

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΛΑΡΙΣΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΡΓΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Κριτήρια χωροθέτησης ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα»**

**Παπαζήσης Αναστάσιος  
Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ.**

**ΛΑΡΙΣΑ, 2020**

**UNIVERSITY OF THESSALY**  
**DEPARTMENT OF APPLIED SCIENCES (LARISSA)**

**POSTGRADUATE STUDIES PROGRAM**  
**«ADVANCED ENVIROMENTAL MANAGEMENT**  
**TECHNOLOGIES IN ENGINEERING WORKS»**

**POSTGRADUATE MASTER'S THESIS**

**«Methods of wind farm layout optimization»**

**Papazisis Anastasios**  
**Dipl. Civil Engineer**

**Larissa, 2020**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

- 1) Παπαπολυμέρου Γεώργιος, Καθηγητής, Δρ. Χημικός Μηχανικός – Προηγμένες Τεχνολογίες Διαχείρισης Υγρών και Αέριων Αποβλήτων, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων**
  
- 2) Αλαμανής Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός – Προχωρημένη Γεωτεχνική, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος**
  
- 3) Σπηλιώτης Ξενοφών, Καθηγητής, Δρ. Χημικός Μηχανικός - Υλικά Τεχνιτών Έργων και Προστασία Περιβάλλοντος, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε αυτούς που συνέβαλαν στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαπολυμέρου για την άριστη συνεργασία μας στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας, για την εμπιστοσύνη και την βοήθειά του, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς επιτροπής, τους Καθηγητές κ. Ξενοφών Σπηλιώτη και κ. Νικόλαο Αλαμανή για τον χρόνο που διέθεσαν στην αξιολόγηση της εργασίας και για τις πολύ σημαντικές γνώσεις που αποκόμισα από τα μαθήματά τους στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τον σεβασμό και την εκτίμηση μου στον Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Αντώνιο Λιακόπουλο για την διαρκή υποστήριξή του κατά την διάρκεια των σπουδών μου και για την συνεχή καθοδήγηση. Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Δωροθέα Κασιτεροπούλου για την αμέριστη συμπαράσταση της και την πολύτιμη προσφορά της. Η συνεισφορά της ήταν καταλυτική για την εκπόνηση της εργασίας.

Τους ευχαριστώ όλους τόσο για την άριστη συνεργασία μας στα πλαίσια εκπόνησης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας όσο και για το σύνολο των γνώσεων που μου μετέδωσαν στο χρόνο φοίτησης μου στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την πάροδο των χρόνων γίνεται προσπάθεια να σταματήσει η χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων και η βασική πηγή ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, έχει οδηγήσει σε επιδείνωση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι φυσικοί διαθέσιμοι πόροι που υπάρχουν σε αφθονία στο περιβάλλον όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η βιομάζα, η γεωθερμία και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών όπου η κινητική ενέργεια των ανέμων μετατρέπεται σε ηλεκτρική με σκοπό την άμεση χρησιμοποίηση αυτής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρωνόμαστε στην αιολική ενέργεια που αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας σε μία χώρα όπως η Ελλάδα που διαθέτει πλούσιο αιολικό δυναμικό. Συγκεκριμένα, μελετήσαμε τα φορτία του ανέμου που επιδρούν σε δύο πυλώνες Α/Γ οι οποίοι βρίσκονται σε συστοιχία μεταξύ τους, με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος ρευστομηχανικής ANSYS CFX. Η μελέτη αφορά αποκλειστικά την αλληλεπίδραση ανέμου-κατασκευής και όχι εδάφους-κατασκευής και στατικών φορτίων. Οι συνθήκες γύρω από τις οποίες γίνεται η ανάλυση είναι ένας περιβάλλοντας χώρος αεροσύραγγας όπου οι δύο πυλώνες θεωρούνται πακτωμένοι στο έδαφος και ακλόνητοι. Η διαφορετική χωροθέτηση αυτών επηρεάζει την λειτουργία και την απόδοσή τους. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο στάδια, αρχικά έγινε ανάλυση με το μοντέλο τύρβης k-ε και στην συνέχεια με το μοντέλο τύρβης k-ω SST, θεωρώντας ένα εκθετικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου, που θα ξεκινάει από το μηδέν και στο μέγιστο ύψος των πυλώνων θα φτάνει τα 7 m/s.

**Λέξεις κλειδιά:** : Ανεμογεννήτριες, Φορτία ανέμου, Χωροθέτηση αιολικού πάρκου, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, ANSYS CFX.

## **ABSTRACT**

Over the years, efforts have been made to stop the use of fossil fuels and the main source of energy to come from renewable energy, as the growing demand for energy has led to a deterioration in environmental conditions. Renewable energy sources are natural resources available in abundance in the environment such as sun, wind, biomass, geothermal and hydroelectric power. Wind energy is exploited through wind turbines where the kinetic energy from the wind is transformed into electricity with a view to its immediate use. In this diploma thesis we focus on wind energy, an inexhaustible source of energy in a country like Greece with a rich wind potential. Specifically, we studied the wind loads that affect two turbine towers that are in array with the help of the ANSYS CFX computational program. The study concerns only the wind-construction interaction rather than ground-construction and static loads. The conditions around which the analysis is made is a wind tunnel where the turbine towers are grounded and immovable. Wind farm layout affects the power output of the wind turbines. The analysis includes two stages, initially using the turbulence model  $k-\epsilon$  and then using the turbulence model  $k-\omega$  SST. The inserting velocity is an exponential profile starting from 0 m/s at the towers base and reaching 7 m/s at the maximum height of the towers on top.

**KEYWORDS:** Wind turbines, Wind loads, Wind farm layout, Computational Fluid Dynamics, ANSYS CFX.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1	Παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (5)
Σχήμα 2.1	Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα μέσης ταχύτητας σε m/s (6)
Σχήμα 2.2	Ισοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χώρα από αιολική ενέργεια (7)
Σχήμα 2.3	Συνολική ισχύς εγκατάστασης Α/Γ στον Ελλαδικό χώρο (10)
Σχήμα 2.4	Εξέλιξη των Α/Γ (11)
Εικόνα 2.2α	Α/Γ οριζοντίου άξονα (12)
Εικόνα 2.2β	Α/Γ κατακόρυφου άξονα (12)
Σχήμα 2.5	Σχηματική αναπαράσταση Α/Γ οριζοντίου άξονα (14)
Εικόνα 2.3	Θεμελίωση Α/Γ ισχύς 2.3 MW (16)
Σχήμα 2.6	Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στη Μ.Βρετανία (17)
Σχήμα 2.7	Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο Hornsea 1 (18)
Εικόνα 2.4α	Υπεράκτια Α/Γ Haliade-X 12 MW (19)
Εικόνα 2.4β	Υπεράκτια Α/Γ Haliade-X 12 MW (19)
Σχήμα 2.8	Θεματικοί χάρτες στην Ελλάδα (23)
Σχήμα 2.9	Περιοχές κατάλληλες για εγκατάσταση αιολικών πάρκων στην Ελλάδα (24)
Εικόνα 3.1	Εφαρμογές σε λογισμικά με CFD (27)
Εικόνα 3.2	Εφαρμογές φυσικών προβλημάτων με CFD (28)
Εικόνα 3.3	Στρωτή ροή γύρω από κύλινδρο (30)
Εικόνα 3.4	Τυρβώδη ροή γύρω από κύλινδρο (31)
Σχήμα 3.1	Ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται στις έδρες απειροστού όγκου ελέγχου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (34)
Σχήμα 3.2	Θέση ενεργοποιημένου δίσκου στο πεδίο που κυκλοφορεί ο άνεμος (37)
Σχήμα 3.3	Α/Γ που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα $\Omega$ (41)
Σχήμα 4.1	Πλέγμα υπολογιστικού πεδίου και Α/Γ (43)
Σχήμα 4.2	Ισοταχείς σε επιφάνεια παράλληλη στον άξονα x (44)
Σχήμα 4.3	Μέση ταχύτητα σε κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος του Υ.Π. (44)
Σχήμα 4.4	Κατανομή της ολικής πίεσης στην δεύτερη Α/Γ (45)

Σχήμα 4.5	Μέση ταχύτητα σε κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος του Υ.Π. (45)
Σχήμα 4.6	Ισοταχείς στο επίπεδο $y = 35 \text{ m}$ (46)
Σχήμα 4.7	Οριακές συνθήκες και προσομοίωση των Α/Γ (47)
Σχήμα 4.8	Λεπτομέρεις πλέγματος σε ολόκληρο το Υ.Π. (48)
Σχήμα 4.9	Πρώτη προσομοίωση όπου φαίνεται ο ολκός (49)
Σχήμα 4.10	Δεύτερη προσομοίωση όπου φαίνεται ο ολκός (50)
Σχήμα 4.11	Τοποθέτηση Α/Γ συνολικής τάξεως 6 MW (51)
Σχήμα 4.12	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο μετά την αλληλεπίδραση του ανέμου (54)
Σχήμα 4.13	Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας (55)
Σχήμα 4.14	Υ.Π. που έγινε η προσομοίωση (55)
Σχήμα 4.15	Πλέγμα (mesh) φαίνεται από την είσοδο του Υ.Π. (56)
Σχήμα 4.16	Κατανομή της πίεσης σε ένα πτερύγιο του ρότορα (57)
Σχήμα 4.17	Κατανομή της πίεσης γύρω από ένα πτερύγιο του ρότορα (58)
Σχήμα 4.18	Κατανομή της ταχύτητας γύρω από ένα πτερύγιο του ρότορα (58)
Σχήμα 5.1	Δημιουργία κόλουρου κώνου (59)
Σχήμα 5.2	Σχεδιασμός πυλώνα Α/Γ στο πρόγραμμα Design-Modeler (60)
Σχήμα 5.3	Πλέγμα υπολογιστικού πεδίου (63)
Σχήμα 5.4	Πλέγμα των 2 Α/Γ (63)
Σχήμα 5.5	Ορισμός συνοριακής συνθήκης στο έδαφος (65)
Σχήμα 5.6	Εκθετικό προφίλ ταχύτητας (66)
Σχήμα 6.1	Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ε) (67)
Σχήμα 6.2	Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ω) (68)
Σχήμα 6.3	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ε) (69)
Σχήμα 6.4	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ω) (69)
Σχήμα 6.5	Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k-ε) (70)
Σχήμα 6.6	Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k-ω) (70)
Σχήμα 6.7	Ισοταχείς στο επίπεδο $z = 0 \text{ m}$ (k-ε) (71)
Σχήμα 6.8	Ισοταχείς στο επίπεδο $z = 0 \text{ m}$ (k-ω) (71)
Σχήμα 6.9	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (k-ε) (72)



Σχήμα 6.10	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (k-ε) (73)
Σχήμα 6.11	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (k-ω) (74)
Σχήμα 6.12	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (k-ω) (74)
Σχήμα 6.13	Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k-ε) (75)
Σχήμα 6.14	Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k-ω) (75)
Σχήμα 6.15	Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ε) (76)
Σχήμα 6.16	Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ε) (76)
Σχήμα 6.17	Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ω) (77)
Σχήμα 6.18	Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ω) (77)
Σχήμα 6.19	Στροβιλότητα $0.2806 \text{ s}^{-1}$ (k-ε) (78)
Σχήμα 6.20	Στροβιλότητα $0.2804 \text{ s}^{-1}$ (k-ω) (79)
Σχήμα 6.21	Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ε) (81)
Σχήμα 6.22	Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ω) (81)
Σχήμα 6.23	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ε) (82)
Σχήμα 6.24	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ω) (82)
Σχήμα 6.25	Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k-ε) (83)
Σχήμα 6.26	Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k-ω) (83)
Σχήμα 6.27	Ισοταχείς στο επίπεδο $z = 0 \text{ m}$ (k-ε) (84)
Σχήμα 6.28	Ισοταχείς στο επίπεδο $z = 0 \text{ m}$ (k-ω) (84)
Σχήμα 6.29	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (k-ε) (85)
Σχήμα 6.30	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (k-ε) (86)
Σχήμα 6.31	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (k-ω) (86)
Σχήμα 6.32	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (k-ω) (87)
Σχήμα 6.33	Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k-ε) (87)

Σχήμα 6.34	Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k-ω) (88)
Σχήμα 6.35	Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ε) (88)
Σχήμα 6.36	Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ε) (89)
Σχήμα 6.37	Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ω) (89)
Σχήμα 6.38	Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ω) (90)
Σχήμα 6.39	Στροβιλότητα $1194.29 \text{ s}^{-1}$ (k-ε) (90)
Σχήμα 6.40	Στροβιλότητα $18.339 \text{ s}^{-1}$ (k-ω) (91)
Σχήμα 6.41	Συντελεστής αντίστασης λείου κυλίνδρου και λείας σφαίρας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds (93)

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Παράμετροι που εξετάζονται πριν βρεθούν οι κατάλληλες περιοχές για εγκατάσταση (22)
Πίνακας 2.2	Κριτήρια βαρύτητας προς εξέταση πριν την εγκατάσταση (23)
Πίνακας 2.3	Περιοχές κατάλληλες για εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα (24)
Πίνακας 4.1	Τιμές των L1,L2 και L3 για την απόσταση των Α/Γ (52)
Πίνακας 4.2	Παραγωγή ενέργειας σε kW για τις διαφορετικές περιπτώσεις (53)
Πίνακας 4.3	Αεροδυναμική ισχύς και ο συντελεστής αντίστασης στα δύο διαφορετικά προγράμματα (57)
Πίνακας 5.1	Στατιστικά στοιχεία για τα διάφορα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο k-ε (62)
Πίνακας 5.2	Μέση ταχύτητα ταχύτητα στον πυλώνα από την πλευρά που ασκείται ο άνεμος (62)
Πίνακας 6.1	Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος k (k-ε) (80)
Πίνακας 6.2	Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος ε (k-ε) (80)
Πίνακας 6.3	Μέση ταχύτητα και μέση ολική πίεση σε όλη την επιφάνεια στον δεύτερο πυλώνα (k-ε) (80)
Πίνακας 6.4	Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος k (k-ω) (91)
Πίνακας 6.5	Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος ε (k-ω) (92)
Πίνακας 6.6	Μέση ταχύτητα και μέση ολική πίεση σε όλη την επιφάνεια στον δεύτερο πυλώνα (k-ω) (92)

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>III</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>VII</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>- 1 -</b>
1.1 Μεθοδολογία .....	- 1 -
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	- 2 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>- 4 -</b>
<b>ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ</b> .....	<b>- 4 -</b>
2.1 Αιολική ενέργεια .....	- 4 -
2.3 Ανεμογεννήτριες .....	- 7 -
2.3.1 Γενικά περί ανεμογεννητριών .....	- 7 -
2.3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών .....	- 12 -
2.3.3 Εγκατάσταση Α/Γ .....	- 14 -
2.4 Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες .....	- 16 -
2.5 Πλεονεκτήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας .....	- 20 -
2.6 Μειονεκτήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας .....	- 20 -
2.7 Χωροθέτηση ανεμογεννητριών στον Ελλαδικό χώρο .....	- 21 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>- 25 -</b>
<b>ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ</b> <b>ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ (CFD)</b> .....	<b>- 25 -</b>
3.1 Σκοπός της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής .....	- 25 -
3.2 Εξέλιξη της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής .....	- 25 -
3.3 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	- 26 -
3.4 Πολυπλοκότητα .....	- 29 -
3.5 Συνθήκες ροής.....	- 32 -

3.6 Εξισώσεις κίνησης ρευστών .....	- 33 -
3.7 Η θεωρία του Betz (The linear momentum theory) .....	- 36 -
3.8 Συντελεστής Αντίστασης .....	- 39 -
3.9 Συντελεστής ισχύος .....	- 40 -
3.10 Λόγος ταχύτητας πτερυγίου (Tip Speed Ratio) .....	- 40 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>- 42 -</b>
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ</b>	
<b>ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>- 42 -</b>
4.1 Προσομοίωση αιολικού πάρκου χωρίς τον ρότορα .....	- 42 -
4.2 Βελτιστοποίηση χωροθέτησης αιολικών πάρκων με χρήση CFD σε μικρά μοντέλα.....	- 46 -
4.3 Ανάλυση φορτίων ανέμου με χρήση CFD σε ολόκληρα μοντέλα.....	- 51 -
4.4 Προσομοίωση Α/Γ τάξεως 2.5 MW με χρήση διαφορετικών προγραμμάτων CFD .....	- 54 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>- 59 -</b>
<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ</b>	
<b>ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS CFX</b>	
<b>.....</b>	<b>- 59 -</b>
5.1 Σχεδιασμός πυλώνα Α /Γ.....	- 59 -
5.2 Σχεδιασμός υπολογιστικού πεδίου (Υ.Π.) .....	- 60 -
5.3 Σχεδιασμός του κατάλληλου πλέγματος (Mesh).....	- 61 -
5.4 Φυσικές ιδιότητες του ρευστού.....	- 64 -
5.5 Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου προσομοίωσης.....	- 64 -
5.6 Εκθετικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του Υ.Π.....	- 65 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>- 67 -</b>
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>- 67 -</b>
6.1 Σύγκριση μοντέλων k-ε και k-ω SST για $D = 25$ m.....	- 67 -
6.2 Σύγκριση μοντέλων k-ε και k-ω SST για $D = 75$ m.....	- 81 -
6.3 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για λείο κύλινδρο .....	- 92 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....</b>	<b>- 95 -</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>- 95 -</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Μεθοδολογία

Το αντικείμενο μελέτης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι τα κριτήρια χωροθέτησης ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα. Αρχικά, θα παρουσιαστούν στοιχεία μελετών με την χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων καθώς και εργαστηριακών μεθόδων. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση συστοιχίας Α/Γ, ως πεδίο μελέτης για ένα αιολικό πάρκο. Στην περίπτωση μελέτης του αιολικού πάρκου θα παρουσιαστούν αποτελέσματα ερευνών όπου τα φορτία ανέμου επηρεάζουν την λειτουργία της δεύτερης Α/Γ λόγω της επίδρασης της πρώτης όταν βρίσκονται σε συστοιχία. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τα μοντέλα τύρβης k-ε και k-ω SST για την προσομοίωση της τυρβώδης ροής του ανέμου. Τέλος, παρουσιάζονται θέματα μελλοντικής μελέτης καθώς και στοιχεία της μεταπτυχιακής εργασίας στα οποία μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τέτοιου είδους προβλήματα υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί όπως η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για την προσομοίωση τόσο μεγάλων κατασκευών στα υπολογιστικά προγράμματα.

Η μελέτη των Α/Γ στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί με το πρόγραμμα πεπερασμένων όγκων ANSYS CFX. Στην περίπτωση αιολικού πάρκου μία ανεμογεννήτρια επηρεάζεται από την λειτουργία της άλλης καθώς η πρώτη, μετά την αλληλεπίδραση του ανέμου δημιουργεί μικρές ταχύτητες καθώς και κενά αέρος. Αυτό έχει ως συνέπεια στην δεύτερη Α/Γ να επιδρούν μικρότερες ταχύτητες του ανέμου με αποτέλεσμα η παραγωγή ενέργειας να είναι μικρότερη.

Συνεχώς, πραγματοποιούνται όλο και περισσότερες μελέτες προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη απόσταση ώστε η δεύτερη Α/Γ να μην επηρεάζεται από την πρώτη. Το θέμα αυτό, σχετίζεται με την χωροθέτηση, διότι μέχρι σήμερα έχουν τοποθετηθεί πολλά αιολικά πάρκα και δεν είναι εύκολη η εύρεση μιας περιοχής όπου μπορούν να τοποθετηθούν πολλές Α/Γ. Ακόμη, το θέμα έχει σχέση και με οικονομικούς παράγοντες διότι η υπολειτουργία της Α/Γ που βρίσκεται έπειτα από μία άλλη, εμποδίζει την

παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας με αποτέλεσμα η επένδυση να μην είναι τόσο κερδοφόρα.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, βασίζεται σε τρεις οπτικές γωνίες:

- Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει το θέμα της διπλωματικής εργασίας και την χρησιμότητα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στο πεδίο της μελέτης των ανεμογεννητριών.
- Στην ανάλυση των φορτίων που επιδρούν σε μία ανεμογεννήτρια λόγω του ανέμου και λόγω της λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας που βρίσκεται σε συστοιχία με άλλη. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της κίνησης του ρευστού είναι το ANSYS CFX, ένα πρόγραμμα ανάλυσης κίνησης ρευστών και στερεών σε ένα υπολογιστικό πεδίο.
- Στην παρουσία στοιχείων ερευνών που έχουν γίνει πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, μελλοντικά θέματα μελέτης και πως σχετίζεται η μεταπτυχιακή εργασία με το κομμάτι της έρευνας. Σκοπός είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του ανέμου με υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει μία γενικότερη εικόνα στην επιστημονική κοινότητα για αυτό το θέμα.

## 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και η διάρθρωση των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Στο κεφάλαιο 2, εξηγείται η αιολική ενέργεια. Έπειτα, περιγράφονται οι κατηγορίες των ανεμογεννητριών και η λειτουργία τους καθώς και ο τρόπος εγκατάστασης αυτών. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες κατασκευές και στα πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα που έχουν. Αναφορά γίνεται στην αντικραυτική προστασία και στην γείωση των ανεμογεννητριών και τέλος παρουσιάζεται εργασία σχετικά με την τοποθέτηση Α/Γ στον Ελλαδικό χώρο.



Στο κεφάλαιο 3, αρχικά γίνεται μία αναφορά στον σκοπό της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και στην εξέλιξη αυτής με την πάροδο των χρόνων. Στη συνέχεια, περιγράφεται η χρησιμοποίηση και οι εφαρμογές των προγραμμάτων CFD σε διάφορα φαινόμενα στον τομέα της μηχανικής καθώς και σε άλλους τομείς. Αναφέρονται, η πολυπλοκότητα, οι συνθήκες ροής καθώς και οι εξισώσεις Navier-Stokes που διέπουν την κίνηση των Νευτώνειων ρευστών μέσω των εξισώσεων ορμής και συνέχειας και οι θεμελιώδεις αρχές αεροδυναμικής.

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σε εργασίες που γίνανε με την βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων.

Στο κεφάλαιο 5, περιγράφεται ο σχεδιασμός του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και του υπολογιστικού πεδίου στο πρόγραμμα Design-Modeler. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το πλέγμα με το οποίο έγινε η μελέτη του προβλήματός μας. Έπειτα, στο πρόγραμμα CFX-Pre έγινε η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος και εισήχθη το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου (Υ.Π.).

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης στο πρόγραμμα μετεπεξεργασίας CFD-Post για τα μοντέλα τύρβης k-ε και k-ω SST.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, διατυπώνονται τα συμπεράσματα σχετικά με την ανάλυση που έγινε στο λογισμικό πρόγραμμα ANSYS CFX, καθώς και οι προτάσεις σε διάφορους τομείς που υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει στον αναγνώστη τις βασικές αρχές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας με την χρήση των ανεμογεννητριών. Έμφαση δίνεται στις οριζόντιες ανεμογεννήτριες (Horizontal Axis Wind Turbines), στην εκμετάλλευση των υπεράκτιων Α/Γ και η εκμετάλλευση των Α/Γ στον Ελλαδικό χώρο.

#### 2.1 Αιολική ενέργεια

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική, που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα: ιστιοφόρα, ανεμόμυλοι κλπ. Σήμερα για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και στη συνέχεια την διοχετεύουν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας. Χρησιμοποιούνται επίσης και για την κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών απομακρυσμένων εξοχικών κατοικιών, βιομηχανικών μονάδων, ιστιοφόρων πλοίων κ.λπ. Σε περιπτώσεις άπνοιας ή και αυξημένων ενεργειακών αναγκών, η ενέργεια αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες) και χρησιμοποιείται, όταν χρειάζεται, ενώ συχνά γίνεται και χρήση νηξελογεννητριών παράλληλα με τις ανεμογεννήτριες (υβριδικά συστήματα).

Ο άνεμος δημιουργείται λόγω της ανομοιόμορφης θέρμανσης της γης και της ατμόσφαιρας της από τον ήλιο. Η ανομοιόμορφη θέρμανση προκαλεί διαφορές στην πίεση, οι οποίες δημιουργούν τον άνεμο. Σε κάποιες περιπτώσεις, η αιολική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ως ηλιακή ενέργεια. Η αιολική ενέργεια θεωρείται ανεξάντλητος ή ανανεώσιμος ενεργειακός πόρος. Περίπου δύο τοις εκατό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στη γη, μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια.

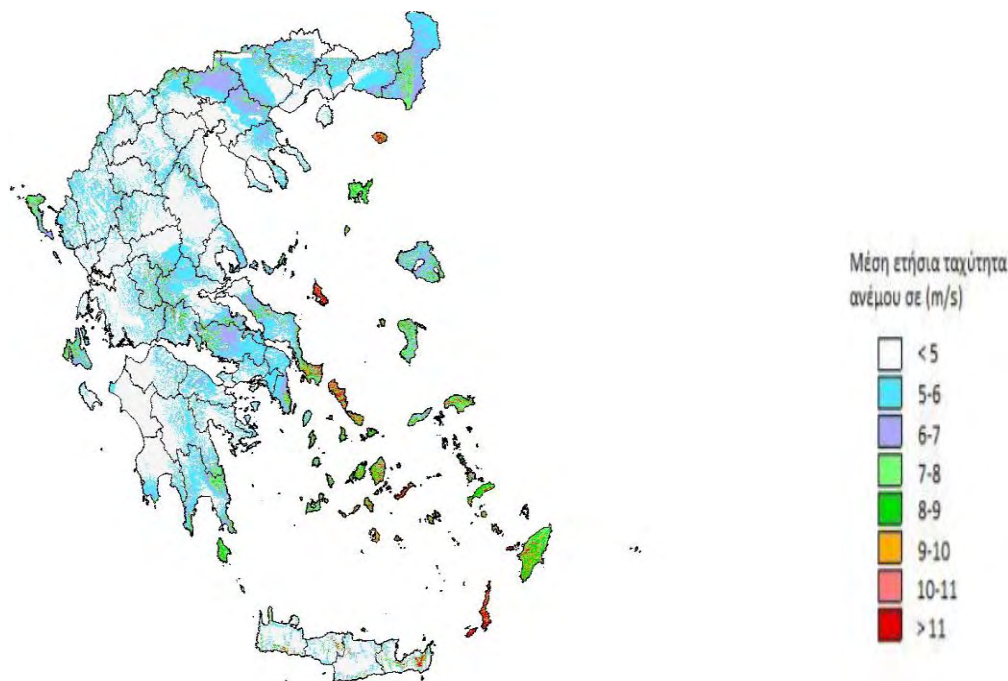
Πριν από πολλά χρόνια και έως τα μέσα της δεκαετίας του 1930 ο άνεμος παρείχε σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Έκτοτε, η ενέργεια παράγεται κυρίως από άλλα μέσα, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Σήμερα όμως η αιολική ενέργεια προκαλεί το έντονο ενδιαφέρον πολλών, καθώς τα ορυκτά καύσιμα είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και το κόστος τους αυξάνεται σταθερά.



**Εικόνα 2.1:** Παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (flickr.com).

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και φυσικά στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές θα συναντήσουμε και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, που στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας των ανέμων μέσω ανεμογεννητριών.



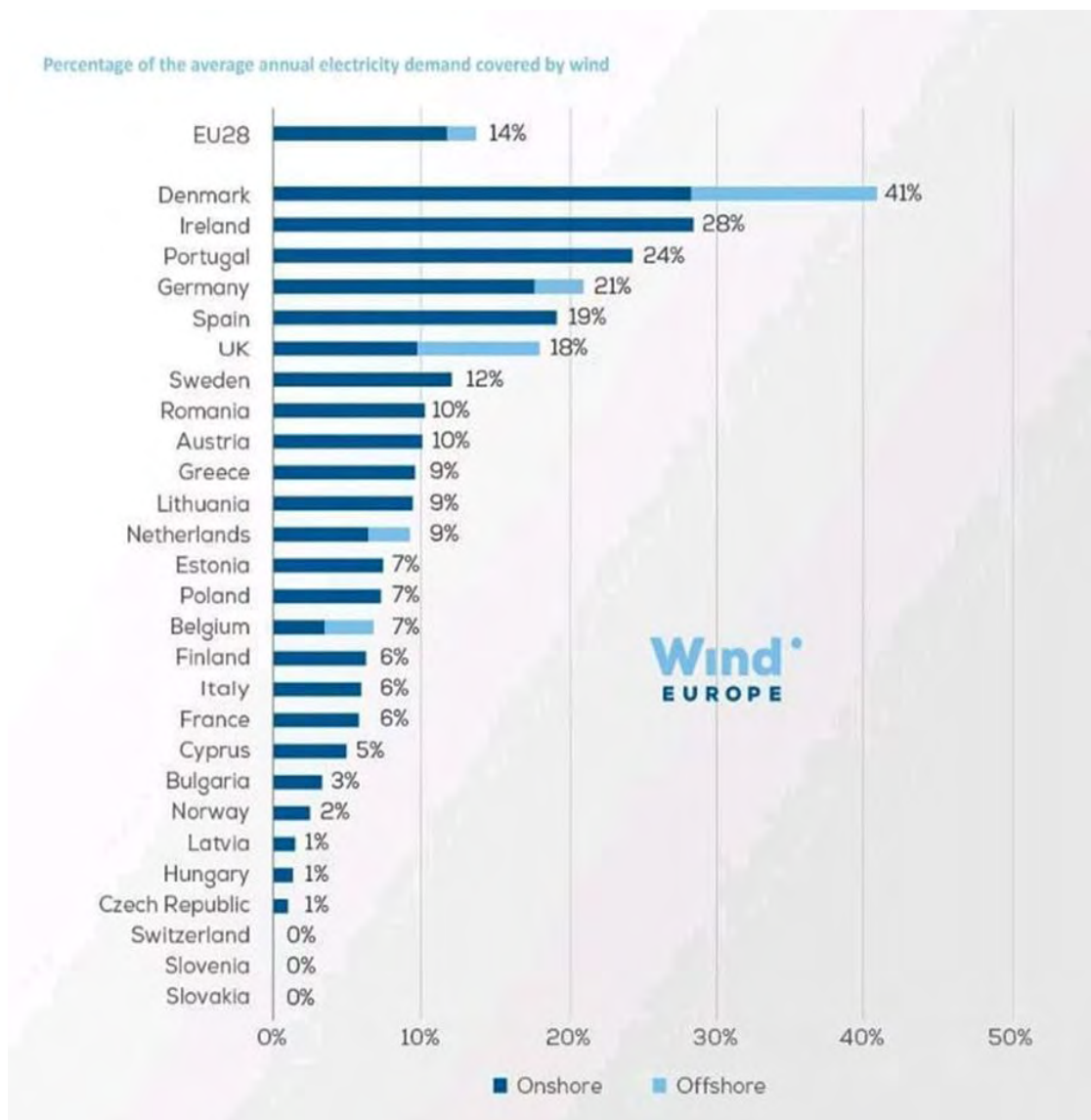
**Σχήμα 2.1:** Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα μέσης ταχύτητας ανά έτος σε m/s (ΚΑΠΕ).

Η Αιολική Ενέργεια είναι η πλέον ώριμη και οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. και καταλαμβάνει τη μικρότερη έκταση ανά παραγόμενη KWh και συνεπώς αποτελεί την πλέον πρόσφορη λύση για περιοχές που διαθέτουν υψηλό αιολικό δυναμικό.

Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής εξαρτάται από την διακύμανση της ταχύτητας και η επιλογή της θέσης μέτρησης απαιτεί καταρτισμένο έμπειρο προσωπικό. Οι μετρήσεις πρέπει να διαρκούν ένα ημερολογιακό έτος καθώς πρέπει να καλυφθούν όλες οι εποχιακές διακυμάνσεις της περιοχής. Με βάση τα ανεμολογικά στοιχεία (ταχύτητες ανέμου, συχνότητα εμφάνισης των ταχυτήτων, μέση ταχύτητα κ.α.) τοποθετούνται οι ανεμογράφοι σε ύψος δέκα μέτρων από το έδαφος. Έπειτα υπάρχει βάσιμη εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής με βάση τους αιολικούς χάρτες και τους ανεμογράφους.

Το 2018 οι επενδύσεις έφτασαν τα 65 δισεκατομμύρια ευρώ στην αιολική ενέργεια παγκοσμίως, εκ των οποίων τα 27 αφορούν νέα αιολικά πάρκα σε στεριά και θάλασσα. Όσον αφορά τις επενδύσεις σε αιολικά πάρκα σε ηπειρωτικές περιοχές της Ευρώπης αυτές ανήλθαν στο ποσό ρεκόρ των 16,4 δις ευρώ αντιστοιχώντας στο 40 % των σχετικών επενδύσεων για το 2018. Βάση των παραπάνω δεδομένων οι αναλυτές του κλάδου

προβλέπουν ότι στο διάστημα 2019-2021 οι επενδύσεις θα ανέλθουν στα 100 δις ευρώ (Η ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ).



Σχήμα 2.2: Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χώρα από αιολική ενέργεια (Wind Europe 2018).

## 2.3 Ανεμογεννήτριες

### 2.3.1 Γενικά περί ανεμογεννητριών

Με τις ανεμογεννήτριες επιτυγχάνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Η μεταβολή αυτή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, μέσω της περωτής, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική με την τρόπο περιστροφής του

άξονα της πτερωτής και στη δεύτερη φάση, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

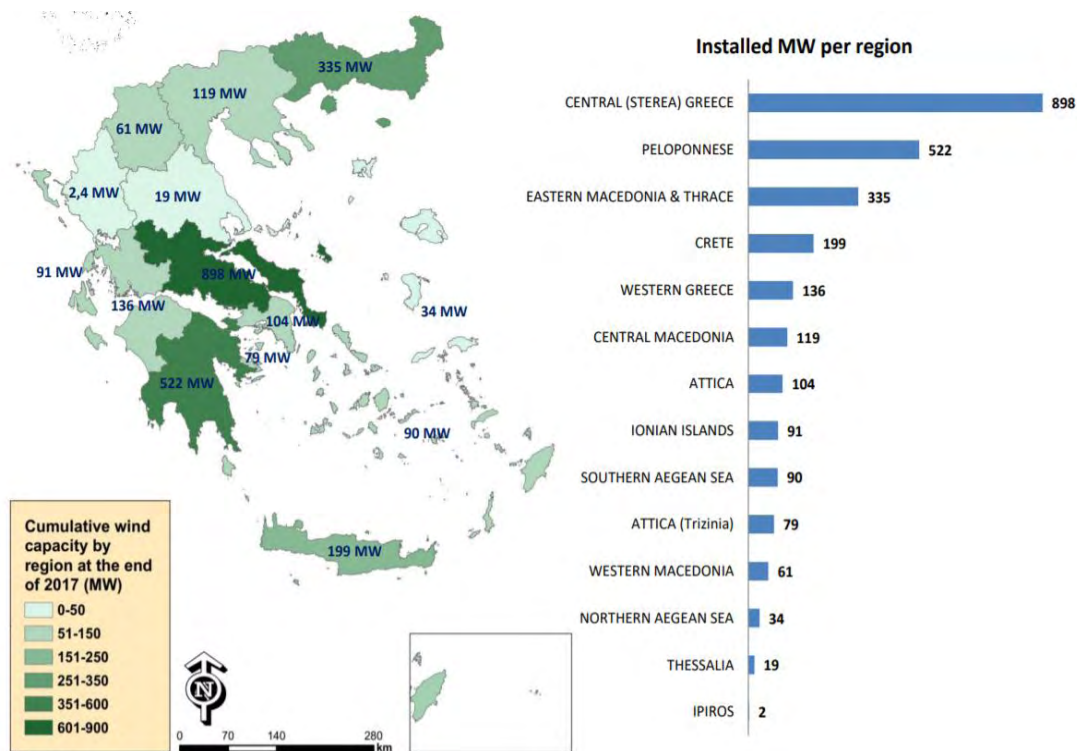
Προκειμένου να υπάρχει μέγιστη παραγωγή ενέργειας πρέπει να γίνει επένδυση σε περιοχές με πλούσιο αιολικό δυναμικό. Η τοπογραφία της περιοχής επηρεάζει τον άνεμο και τον τρόπο με τον οποίο αυτός επιδρά στις ανεμογεννήτριες. Γενικά, πιο πλούσιο αιολικό δυναμικό υπάρχει στις θάλασσες για αυτό κατασκευάζονται πολλές υπεράκτιες κατασκευές (offshore structures). Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής εξαρτάται από την διακύμανση της ταχύτητας και η επιλογή της τοποθέτησης γίνεται από καταρτισμένο έμπειρο προσωπικό. Οι μετρήσεις πρέπει να διαρκούν ένα ημερολογιακό έτος καθώς πρέπει να καλυφθούν όλες οι εποχιακές διακυμάνσεις της περιοχής. Με βάση τα ανεμολογικά στοιχεία (ταχύτητες ανέμου, συχνότητα εμφάνισης των ταχυτήτων, μέση ταχύτητα κ.α.) τοποθετούνται οι ανεμογράφοι σε ύψος δέκα μέτρων από το έδαφος. Έπειτα υπάρχει βάσιμη εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής, με βάση τους αιολικούς χάρτες και τους ανεμογράφους.

Τελευταία κατασκευάζονται όλο και περισσότερες υπεράκτιες Α/Γ δημιουργώντας μεγάλα αιολικά πάρκα στην θάλασσα (offshore wind farms). Καθώς ο χερσαίος χώρος που εγκαταστήθονται οι Α/Γ μας δεσμεύει, η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων αποτελεί μία άλλη εναλλακτική λύση λόγω έλλειψης χώρου και ταυτόχρονα λόγω του μεγάλου αιολικού δυναμικού των παραθαλάσσιων περιοχών. Επίσης, πολλές χώρες έχουν τεράστια πληθυσμιακή πυκνότητα και η εύρεση γης για την δημιουργία χερσαίων αιολικών πάρκων είναι αδύνατη. Με την κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων η αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος και του οικοσυστήματος είναι μικρότερη από ότι στην ξηρά. Λόγω του μεγάλου μήκους των πτερυγίων η μεταφορά είναι πιο εύκολη στη θάλασσα από ότι στην ξηρά, όπου απαιτείται η διάνοιξη μεγάλων δρόμων σε δύσβατες περιοχές, με άμεσες επιπτώσεις στο φυσικό τοπίο και το οικοσύστημα. Ακόμη, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η αύξηση της αιολικής ενέργειας στις θάλασσες και τους ωκεανούς σε σχέση με τη στεριά, καθώς όσο απομακρυνόμαστε από το χερσαίο έδαφος οι ταχύτητες του ανέμου είναι πιο υψηλές. Στην θάλασσα, οι περίοδοι απόλυτης νηνεμίας δεν είναι τόσο συχνές και οι άνεμοι πνέουν σταθερά. Ακόμη, ένας σημαντικός παράγοντας είναι ότι στις υπεράκτιες Α/Γ παρατηρούνται λιγότερες αναταράξεις (turbulence) στην θάλασσα. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιπέδου του νερού και αέρα είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη στην στεριά, ειδικότερα κατά την διάρκεια

της ημέρας. Αυτό έχει αποτέλεσμα ο άνεμος να παρουσιάζει λιγότερες αναταράξεις/διαταραχές στην θάλασσα. Έτσι, οι Α/Γ καταπονούνται λιγότερο λόγω των μικρότερων μηχανικών φορτίων. Μία Α/Γ με ίδια δομικά στοιχεία από τον κατασκευαστή στην στεριά έχει διάρκεια ζωής περίπου 25 χρόνια, ενώ στην θάλασσα μπορεί να φτάσει τα 30-35 χρόνια.

Το ανάγλυφο μίας περιοχής μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή ενέργειας καθώς συνδέεται με τα φορτία του ανέμου. Οι ταχύτητες και οι ανεμοπιέσεις επηρεάζονται από την τοπογραφία της περιοχής. Για τον λόγο αυτόν έχουν γίνει μελέτες προκειμένου να βρεθούν τα σημεία εκείνα στα οποία μπορούν να κατασκευαστούν Α/Γ. Υπάρχουν διάφορα speed-up effects (σημεία στα οποία παρατηρείτε μεγάλο αιολικό δυναμικό), τα οποία καθορίζουν εάν το ανάγλυφο της περιοχής θα βοηθήσει στην παραγωγή ενέργειας. Ένα από αυτά είναι το tunnel effect (το ανάγλυφο να έχει την μορφή τούνελ) (Danish Wind Industry Association., 2003) . Στην περίπτωση αυτή, έχει παρατηρηθεί ότι όταν μία Α/Γ τοποθετείτε γύρω από βουνά, δημιουργούνται μεγάλες ταχύτητες του ανέμου. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει μία επιτάχυνση του ανέμου γύρω από βουνά καθώς το πλάτος του ρεύματος των ανέμου (airline), μειώνεται (Røkenes and Krogstad, 2009). Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη σε λόφους και κορυφογραμμές (ridges). Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται κατά μήκος της κλίσης του πρανούς ενός λόφου και συνδέεται με τις γραμμές ροής του διανύσματος της πίεσης (pressure gradient). Βάση ερευνών, τα διανύσματα της πίεσης σχετίζονται σημαντικά με την κλίση του λόφου (Jackson and Hunt, 1975, Hunt et al., 1988). Ωστόσο, σε ένα μη ομαλό ανάγλυφο πολλές φορές έχουν παρατηρηθεί μεγάλες διαταραχές του ανέμου, πολύ υψηλές ανεμοπιέσεις και διαχωρισμός της ροής (flow separation) (Tian et al., 2018), για αυτό η τοποθεσία που θα κατασκευαστούν οι Α/Γ πρέπει να εξεταστεί ως προς τις παραπάνω παραμέτρους.

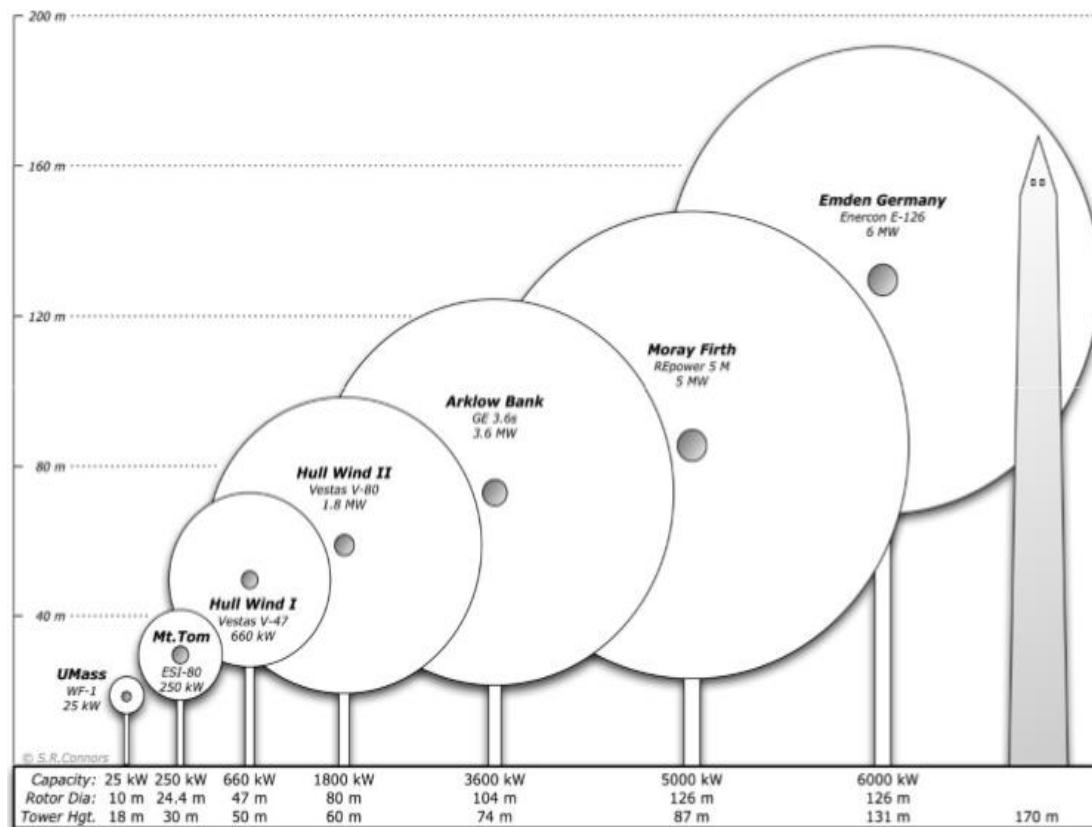
Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και φυσικά στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές θα συναντήσουμε και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η συνολική ισχύς εγκατάστασης στον Ελλαδικό χώρο.



**Σχήμα 2.3:** Συνολική ισχύς ανεμογεννητριών εγκατάστασης στον Ελλαδικό χώρο (HWEA Wind Energy Statistics).

Οι ανεμογεννήτριες βοηθούν στην πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών, που έχει ο άνθρωπος. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις Α/Γ καταναλώνεται αμέσως είτε αποθηκεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για την κατανάλωση μελλοντικά. Έτσι, όταν η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη της ζήτησης, γίνεται αποθήκευση για την χρησιμοποίησή της αργότερα. Η ενέργεια αποθηκεύεται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, ανάλογη της ισχύος της ενέργειας που παράγεται. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) αποτελούν πλέον μια μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μονάδες παραγωγής μικρής κλίμακας που δεν συνδέονται στο κεντρικό δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, όταν η παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη, γίνεται η χρήση των υδροηλεκτρικών σταθμών. Έτσι εκμεταλλευόμαστε την περίσσεια ενέργεια από τις Α/Γ, αποθηκεύοντας το νερό από χαμηλότερα υψόμετρα σε υψηλότερα μέσα σε τεχνητές λίμνες. Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιείται η δυναμική ενέργεια του νερού σε περίπτωση ανάγκης.





Σχήμα 2.4: Εξέλιξη των Α/Γ (MIT Energy Initiative).

Το κόστος επένδυσης ανά μεγαβάτ για τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί σημαντικά από το 2015 έως το 2018. Πλέον, το κόστος παραγωγής είναι χαμηλότερο και αυτό συντείνει σε νέα παραγωγική ικανότητα. Η παραγωγή 1 μεγαβάτ από χερσαίες ανεμογεννήτριες το 2015 κόστιζε 2 εκατομμύρια ευρώ ενώ σήμερα κυμαίνεται στα 1,4 εκ ευρώ. Αντίστοιχα στα υπεράκτια αιολικά πάρκα για να παραχθεί ισχύς της τάξεως του 1 μεγαβάτ σήμερα, απαιτείται χρηματοδότηση 2,5 εκ εν συγκρίσει με τα 4,5 εκ ευρώ του 2015 (WindEurope).

Τα υπεράκτια αιολικά της Γερμανίας παρήγαγαν 19,1 τεραβατώρες το 2018 από 17,5 το 2017, γεγονός που συνιστά νέο ρεκόρ. Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία, τα χερσαία αιολικά έφτασαν τις 87,4 τεραβατώρες, αυξημένες κατά 4,2 TWh ετησίως (energypress.gr).

### 2.3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες, οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Ενέργεια και Πολίτης ΚΑΠΕ) :

**A)** Οριζοντίου άξονα, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται πάντα παράλληλα με την κατεύθυνση του ανέμου και την επιφάνεια του εδάφους.

**B)** Κατακόρυφου άξονα, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος με το έδαφος.



**Εικόνα 2.2α:** Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα (GE Renewable energy).



**Εικόνα 2.2β:** Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα (real.gr).

Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα (Vertical Axis Wind Turbine) έχουν δύο πλεονεκτήματα έναντι των οριζόντιων: πρώτον, ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης (drive train) είναι πιο κοντά στο έδαφος, γεγονός που καθιστά πιο εύκολη την συντήρηση. Δεύτερον, δεν είναι τόσο σύνθετες και το κέντρο βάρους βρίσκεται χαμηλότερα. Μία κατακόρυφου άξονα Α/Γ παράγει ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλότερο κόστος από τις συμβατικές.

Σε αυτόν τον τύπο Α/Γ ο άνεμος μπορεί να προκαλέσει την κίνηση του κάθετου έλικα από οποιαδήποτε κατεύθυνση και αν προέρχεται. Έτσι οι ανάγκες συντήρησης είναι λιγότερες, αφού τα κινητά μέρη είναι λιγότερα λόγω του χαμηλού κέντρου βάρους και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελεί σημαντικό παράγοντα.

Όμως έχει παρατηρηθεί ότι οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα δεν είναι τόσο διαδεδομένες. Ο λόγος είναι ότι οι VAWT παράγουν διαφορετικά φορτία στον μηχανισμό μετάδοσης κίνησης. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine) έχουν έλικες, που βρίσκονται απέναντι στον άνεμο υπό συγκεκριμένη γωνία. Η γωνία μεταβάλλεται, ώστε να προσαρμόζεται στις αυξομειώσεις έντασης του ανέμου, γεγονός που επιτρέπει την κίνηση με σταθερό ρυθμό, μειώνοντας τη φθορά του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης (Hogg and Crabtree, 2016).

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα “συλλέγουν” τον άνεμο, όπως κινούνται, και σε περίπτωση που ο άνεμος δεν είναι σταθερός και υπάρχουν αυξομειώσεις κινούνται γρήγορα έπειτα επιβραδύνουν, έπειτα πάλι γρήγορα με αποτέλεσμα η ροπή στρέψης να είναι μη ομαλή. Μπορούμε να το κατανοήσουμε καλύτερα αν σκεφτούμε τα επιβατικά αυτοκίνητα, όπου με απότομες αυξομειώσεις της ταχύτητας καταναλώνονται περισσότερα καύσιμα.

Μειονέκτημα αποτελεί και το μεγάλο μέγεθος μιας έλικας VAWT. Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα έχουν μήκος περίπου 90 μέτρων, για να παράγουν ισχύ της τάξης των Μεγαβάτ. Για την παραγωγή της ίδιας ισχύς οι VAWT πρέπει να έχουν έλικες με μήκος τουλάχιστον 275 μέτρα. Το γεγονός αυτό κάνει πιο δύσκολη την κατασκευή τέτοιων Α/Γ.

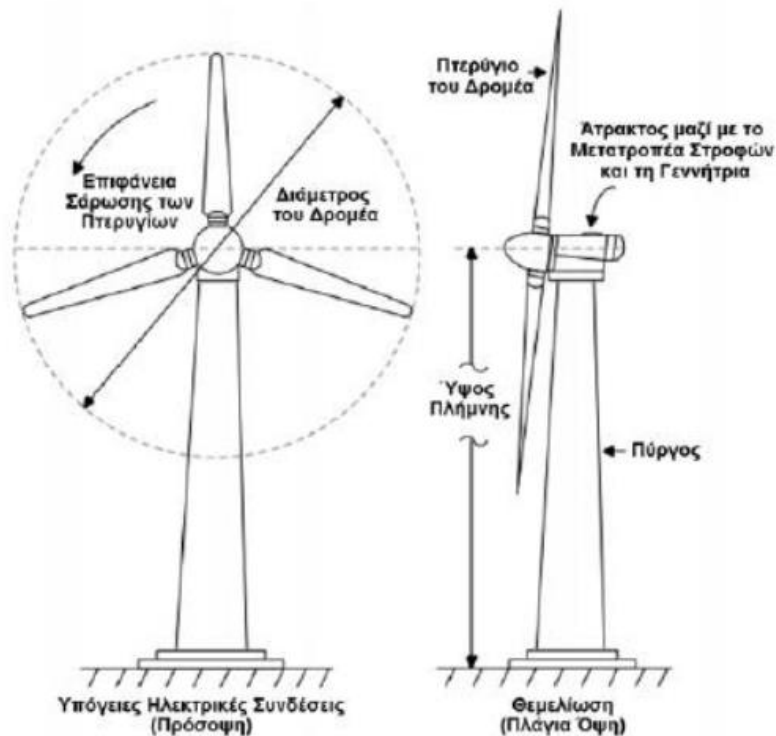
Πλέον παρατηρείται όλο και πιο σπάνια η κατασκευή τέτοιου είδους ανεμογεννητριών. Με βάση τις τελευταίες τεχνολογίες είναι πιο φτηνή και πιο επωφελής η χρήση των HAWT.

### 2.3.3 Εγκατάσταση Α/Γ

Ο πύργος στήριξης μίας Α/Γ μπορεί να είναι σωληνωτός ή με την μορφή δικτυώματος (lattice tower). Ο πύργος τύπου δικτυώματος είναι πιο οικονομικός σε σχέση με τον πρώτο και κατασκευάζεται από γαλβανισμένο χάλυβα με τριγωνική διάταξη και συντηρείται ευκολότερα. Ο σωληνωτός αποτελείται από χαλυβδόφυλλα (σε κάποιες περιπτώσεις και από τσιμέντο) και η εξωτερική επιφάνεια του πύργου δέχεται επικάλυψη με διαδοχικές στρώσεις, ώστε να υπάρξει προστασία από την διάβρωση. Στην βάση του πυλώνα υπάρχει θύρα ασφαλείας που οδηγεί στο εσωτερικό του και υπάρχει πρόσβαση στην κορυφή της Α/Γ. Ο ηλεκτρικός πίνακας τοποθετείται στο εσωτερικό του και συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα κύρια μέρη για την κατασκευή μίας ανεμογεννήτριας είναι :

- Πυλώνας κωνικός από χάλυβα
- Άτρακτος (Nacelle), όπου περιέχονται οι μηχανισμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Πτερωτή, όπου βάση της πλήμνης συνδέονται τα πτερύγια της Α/Γ.



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (gneng.blogspot.com).

Πριν την προσέλευση του εξοπλισμού για την ανέγερση της ανεμογεννήτριας στο χώρο απαιτείται να έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες ενέργειες, ώστε να ξεκινήσουν οι εργασίες. Στο χώρο ανέγερσης της Α/Γ πρέπει να έχουν γίνει οι χωματουργικές εργασίες και οδοποιίες της περιοχής, καθώς και η κατασκευή του θεμελίου.

Η διαδικασία κατασκευής μίας Α/Γ αποτελείται από τα εξής στάδια (Αιολικά πάρκα Κρήτης ΕΛΙΚΑ Α.Ε) :

- Τα περύγια συναρμολογούνται επί της πλήμνης σε θέση, που να μην εμποδίζουν την διέλευση των οχημάτων στο χώρο
- Το κέλυφος τοποθετείται στη θεμελίωση της βάσης στήριξης
- Κατασκευή της βάσης του πυλώνα (πρώτο τμήμα)
- Προετοιμασία, του δεύτερου τμήματος κάθε πυλώνα και ανέγερσή του.
- Τοποθέτηση-σύνδεση της ατράκτου
- Συναρμολόγηση της πτερωτής στο έδαφος
- Ανέγερση-σύνδεση της πτερωτής

➤ Ο πύργος στήριξης της Α/Γ απαιτεί ισχυρή θεμελίωση και ο απαιτούμενος οπλισμός προκύπτει έπειτα από μελέτη των στατικών και δυναμικών φορτίων. Επίσης κατασκευάζεται συναρτήσε των τεχνικών χαρακτηριστικών της Α/Γ, των δράσεων των φορτίων του ανέμου, των γεωλογικών/γεωτεχνικών χαρακτηριστικών τους εδάφους και της σεισμικότητας της περιοχής εγκατάστασης.

Η κατασκευή των θεμελίων περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες (Αιολικά πάρκα Κρήτης ΕΛΙΚΑ Α.Ε) :

- Εκσκαφή βάσεων
- Εγκατάσταση θεμελιακής γειώσεως
- Τοποθέτηση σκυροδέματος καθαριότητας C12/15
- Κατασκευή μεταλλότυπου θεμελίου
- Τοποθέτηση του οπλισμού του πέδιλου και ευθυγράμμιση του κλωβού αγκυρώσεως της ανεμογεννήτριας
- Τοποθέτηση σωληνώσεων για την διέλευση των καλωδίων Μ.Τ.

- Σκυροδέτηση πεδύλου με σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30
- Βαφή άνω επιφάνειας θεμελίου
- Επιχωμάτωση



**Εικόνα 2.3:** Θεμελίωση ανεμογεννήτριας ισχύς 2,3 MW (Αιολικά πάρκα Κρήτης ΕΛΙΚΑ Α.Ε.).

## 2.4 Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη μας η χρήση των Α.Π.Ε. είναι όλο και συχνότερη, υποκαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα, όπου είναι εφικτό.

Σήμερα χρησιμοποιούνται νέες τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, όπου αξιοποιούν τον άνεμο, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας με ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα στη θάλασσα. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε σημεία με υψηλό αιολικό δυναμικό, όπου οι μέσες ετήσιες ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλές. Έτσι παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με μικρό κόστος λόγω των μεγάλων ταχυτήτων του ανέμου. Τελευταία, κατασκευάζονται όλο και περισσότερες υπεράκτιες Α/Γ

δημιουργώντας μεγάλα αιολικά πάρκα στη θάλασσα (off-shore wind farms). Καθώς ο χερσαίος χώρος που εγκαταστίθονται οι Α/Γ μας δεσμεύει, η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων αποτελεί μία άλλη εναλλακτική λύση λόγω έλλειψης χώρου και ταυτόχρονα λόγω του μεγάλου αιολικού δυναμικού των παραθαλάσσιων περιοχών επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας (Stevens and Meneveue 2017). Επίσης, αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντική λύση στο μέλλον, καθώς πολλές χώρες έχουν τεράστια πληθυσμιακή πυκνότητα και η εύρεση γης για την δημιουργία αιολικών πάρκων είναι αδύνατη.



**Σχήμα 2.6** Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στη Μεγάλη Βρετανία (Energypress).

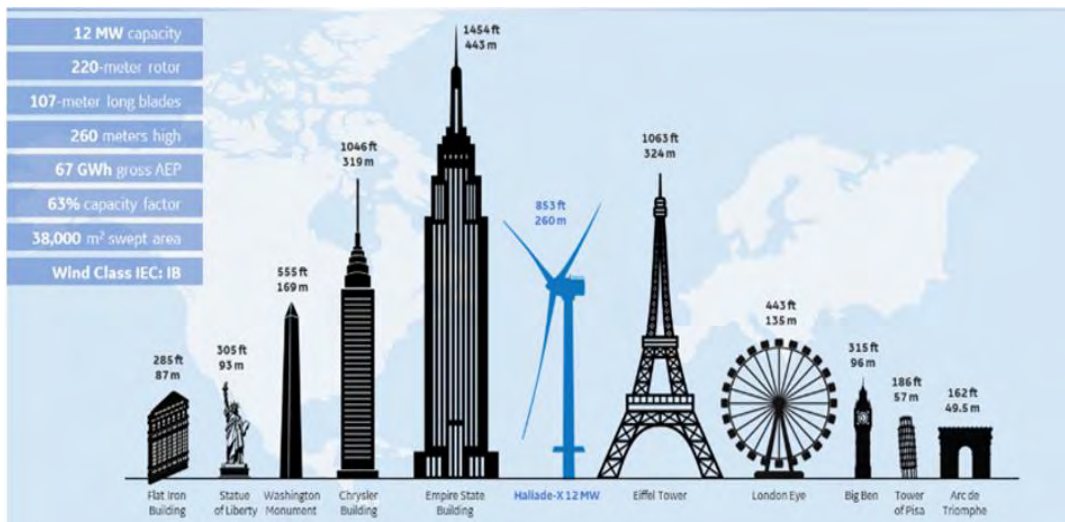
Πρόσφατα εγκαταστάθηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια στο μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο (Hornsea 1) το οποίο βρίσκεται 120 χιλιόμετρα από τις ακτές του Yorkshire και θα αποτελείται από 174 ανεμογεννήτριες της Siemens Gamesa. Κάθε μία θα έχει ισχύ της τάξεως των 7 μεγαβάτ και το πάρκο θα είναι ικανό να τροφοδοτεί πάνω από ένα εκατομμύριο κατοικίες με ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η εταιρεία από την Δανία Orsted ανέλαβε να φέρει εις πέρας το έργο αυτό, το οποίο ξεκίνησε στις αρχές του 2018 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το πρώτο τρίμηνο του 2020. Η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε τέτοια κλίμακα αποτελεί το έναυσμα για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Η Ναυτεμπορική 17/02/2019).



**Σχήμα 2.7:** Υπεράκτιο αιολικό πάρκο Hornsea 1 (Orsted).

Με την πάροδο των χρόνων όλο και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται. Η εταιρεία GE Renewable Energy έφερε στην αγορά τη μεγαλύτερη offshore κατασκευή Haliade-X τάξεως 12 μεγαβάτ. Το μήκος του κάθε πτερυγίου του ρότορα είναι 107 μέτρα και το συνολικό ύψος της κατασκευής φτάνει τα 260 μέτρα. Η συγκεκριμένη Α/Γ μπορεί να παράγει 67 GWh ετησίως και θα τροφοδοτεί καθαρή ηλεκτρική ενέργεια σε 16.000 κατοικίες. (energypress.gr).





Εικόνα 2.4: Υπεράκτια ανεμογεννήτρια Haliade-X 12 MW (GE Renewable Energy).

Η συγκεκριμένη Α/Γ είναι μεγαλύτερη σε μήκος από ένα γήπεδο ποδοσφαίρου και στα ίδια μέτρα με ένα αεροσκάφος τύπου Boeing 747.



Εικόνα 2.4β: Υπεράκτια ανεμογεννήτρια Haliade-X 12 MW (GE Renewable Energy).

## 2.5 Πλεονεκτήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

Με την κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων η αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος και του οικοσυστήματος είναι μικρότερη από ό,τι στην ξηρά. Πλέον η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και κατασκευάζονται Α/Γ πολύ μεγάλου μήκους με τεράστια δομικά στοιχεία. Το μήκος των πτερυγίων είναι μεγάλων διαστάσεων και η μεταφορά τους στη θάλασσα είναι πιο εύκολη από ό,τι στην ξηρά, όπου απαιτείται η διάνοιξη μεγάλων δρόμων σε δύσβατες περιοχές, με άμεσες επιπτώσεις στο φυσικό τοπίο και το οικοσύστημα. Ακόμη, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η αύξηση της αιολικής ενέργειας στις θάλασσες και τους ωκεανούς σε σχέση με την στεριά, καθώς όσο απομακρυνόμαστε από την στεριά οι ταχύτητες του ανέμου είναι πιο υψηλές. Όπως γνωρίζουμε, στην θάλασσα οι περίοδοι απόλυτης νηνεμίας δεν είναι τόσο συχνές και οι άνεμοι πνέουν πιο σταθερά από ό,τι σε κάποια χερσαία έκταση. Με τις θαλάσσιες Α/Γ επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, καθώς το υψηλό αιολικό δυναμικό των παραθαλάσσιων περιοχών διαθέτει καλύτερη αποδοτικότητα από αυτό των χερσαίων.

Ένας σημαντικός παράγοντας, που πρέπει να αναφερθεί, είναι ότι στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παρατηρούνται λιγότερες αναταράξεις στον άνεμο. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιπέδου του νερού και αέρα είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη στην στεριά, ειδικότερα κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο άνεμος να παρουσιάζει λιγότερες αναταράξεις/διαταραχές (turbulence) στην θάλασσα. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες καταπονούνται λιγότερο λόγω των μικρότερων μηχανικών φορτίων. Μία ανεμογεννήτρια με ίδια δομικά στοιχεία από τον κατασκευαστή στην στεριά έχει διάρκεια ζωής 25 χρόνια, ενώ στη θάλασσα έχει 30-35 χρόνια.

Επίσης, λόγω της τεράστιας έκτασης, που μπορούν να εγκατασταθούν οι Α/Γ στη θάλασσα, αποφεύγεται η τοποθέτησή τους κοντά σε κατοικημένες περιοχές, όπου αποφεύγονται οι αντιδράσεις των τοπικών κοινωνιών.

## 2.6 Μειονεκτήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

Το κόστος θεμελίωσης της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι μεγαλύτερο σε σχέση με την ξηρά και αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους

και το βάθος επηρεάζουν τον φορέα στήριξης της κατασκευής. Τα υποθαλάσσια καλώδια, που συνδέεται η ανεμογεννήτρια δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Για την σύνδεση του αιολικού πάρκου στην θάλασσα χρησιμοποιούνται θωρακισμένα υποβρύχια καλώδια προκειμένου να επιτυγχάνεται η συστοιχία της ανεμογεννήτριας με το κεντρικό σημείο του συγκροτήματος και αργότερα με τον μετασχηματιστή. Έπειτα συνδέεται το αιολικό πάρκο με το δίκτυο στην στεριά δημιουργώντας μαγνητικά πεδία τα οποία επάγουν ηλεκτρικά πεδία στα θαλάσσια ύδατα.

Βάση των παραπάνω υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τις επιπτώσεις που μπορούν να υπάρξουν στους θαλάσσιους ζωντανούς οργανισμούς. Ένα ακόμη πρόβλημα είναι η μεταβολή της μορφολογίας του πυθμένα. Η υδρογραφία μιας περιοχής δεν επηρεάζεται από την τοποθέτηση και την λειτουργία ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου ωστόσο, μπορεί να επηρεαστεί η ροή του νερού με αποτέλεσμα την αλλαγή μορφολογίας του εδάφους των παραθαλάσσιων κοντινών ακτών.

Έτσι, πριν την ανέγερση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί η τοπική υδρογραφία της περιοχής, τα θαλάσσια ρεύματα και η ποιότητα των υδάτων. Ακόμη, σε περιπτώσεις, όπου τα αιολικά πάρκα πρόκειται να κατασκευαστούν σε περιοχές όπου υπάρχουν κοντά κύριες γραμμές ναυσιπλοΐας, αεροπορίας, φυσικού αερίου και πετρελαιοαγωγών πρέπει να μεριμνήσουμε για τις συγκρούσεις που μπορούν να επιφέρουν. Θα πρέπει να απέχουν επίσης από άλλα κοιτάσματα πρώτων υλών, από περιοχές με έντονη στρατιωτική δραστηριότητα, όπου πρέπει να βρεθεί πολιτική λύση και από περιοχές όπου υπάρχει αυξημένο αλιευτικό ενδιαφέρον.

Για τους παραπάνω λόγους απαιτείται να τοποθετηθούν τα αιολικά πάρκα μακριά από συγκεκριμένες περιοχές όπου παρατηρούνται δραστηριότητες αλιείας, ναυσιπλοΐας και τουρισμού. Σε Αγγλία και Γερμανία, όπου έχουν δημιουργηθεί μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα με υψηλή παραγωγή ενέργειας ο τουρισμός είναι λιγοστός ή μηδαμινός.

## **2.7 Χωροθέτηση ανεμογεννητριών στον Ελλαδικό χώρο**

Βάση έρευνας των (Spyridonidou et al., 2020) υπάρχουν περιοχές κατάλληλες για να γίνει εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα. Με την βοήθεια γεωγραφικών πληροφοριών συστήματος (GIS) έγινε μελέτη, που απέδειξε, ότι είναι δυνατό να γίνει εγκατάσταση σε πολλές περιοχές του Ελλαδικού χώρου. Στον Πίνακα

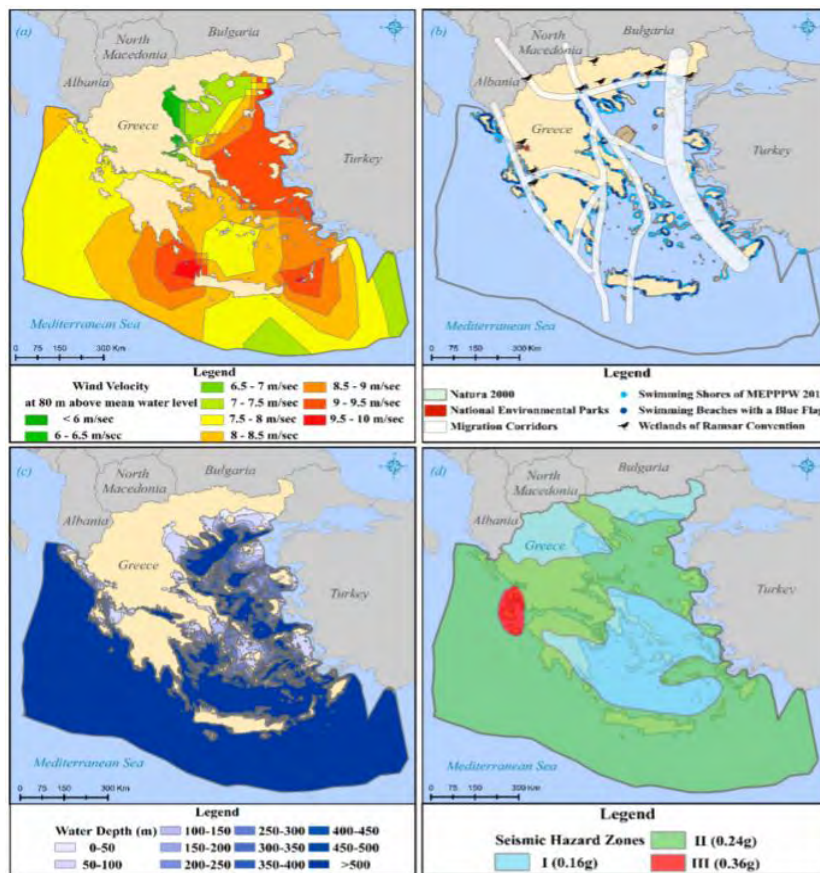
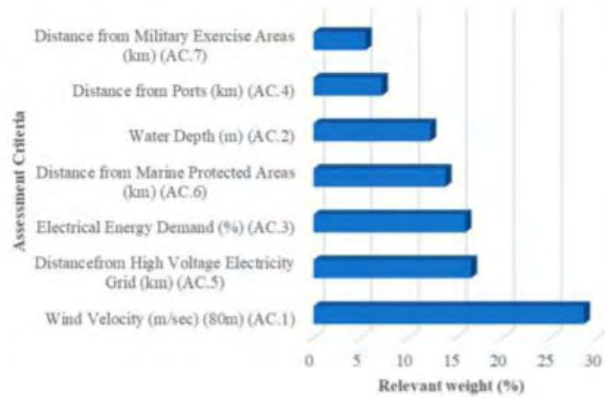
2.1 φαίνονται τα κριτήρια βάση των οποίων δεν συμφέρει να γίνει εγκατάσταση, οπότε για να βρεθεί η κατάλληλη περιοχή πρέπει να εξεταστούν οι παρακάτω παράμετροι.

**Πίνακας 2.1** Παράμετροι που εξετάζονται πριν βρεθούν οι κατάλληλες περιοχές για εγκατάσταση (Spyridonidou et al., 2020).

No.	Exclusion Criterion	Factor	Unsuitable Areas
EC.1	Exclusive Economic Zone	Legal	Outside the boundaries
EC.2	Wind Velocity	Economic	<6 m/s
EC.3	Water Depth	Economic/Technical	>500 m
EC.4	Military Zones	Political/Restrictive	All
EC.5	Seismic Hazard Zones	Protective/Restrictive	Zone III (0.36g)
EC.6	Underwater Cables	Protective/Technical/Restrictive	All
EC.7	Distance from Ports	Economic/Technical	>100 km
EC.8	Distance from High Voltage Electricity Grid	Economic/Technical	>100 km
EC.9	Landscape Protection/Visual and Acoustic Disturbance	Social/Political/Protective	≤20 km
EC.10	Distance from Shipping Routes	Social/Political/Protective	≈5 km (≤3 miles)
EC.11	Distance from Marine Protected Areas	Environmental/Protective	≤2 km
EC.12	Distance from Wildlife Refugees and Migration Corridors	Environmental/Protective	≤3 km
EC.13	Distance from Residential Network	Legal/Social/Protective	≤1 km (non-traditional settlements) ≤1.5 km (traditional settlements)

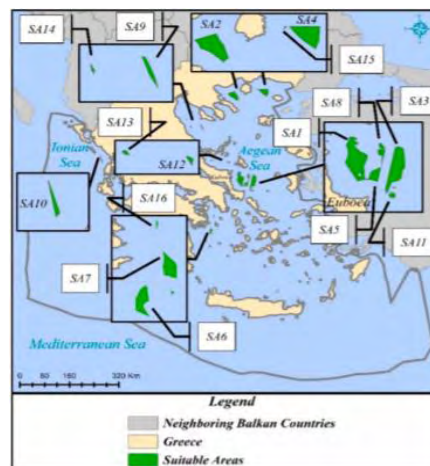
Το σημαντικότερο κριτήριο για να εξεταστεί μία περιοχή αν είναι κατάλληλη για την εγκατάσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου, είναι να υπάρχει ισχυρό αιολικό δυναμικό. Έπειτα σημαντικός παράγοντας που έχει μεγάλη βαρύτητα είναι η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο συνδέεται με τις Α/Γ, καθώς και η ζήτηση για ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή. Μικρότερη βαρύτητα έχει η απόσταση από θαλάσσιες προστατευμένες περιοχές, το βάθος της θάλασσας, η απόσταση από λιμάνια και η απόσταση από περιοχές στρατιωτικής χρήσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2** Κριτήρια βαρύτητας προς εξέταση πριν την εγκατάσταση (Spyridonidou et al., 2020).



**Σχήμα 2.8:** Θεματικοί χάρτες στην Ελλάδα: α) ταχύτητας ανέμου β) θαλάσσιων προστατευμένων περιοχών και αποδημητικών πουλιών γ) βάθος θάλασσας και δ) σεισμικές ζώνες (Spyridonidou et al., 2020).

Αφού εξετάστηκαν οι παραπάνω σημαντικοί παράγοντες με την βοήθεια του λογισμικού ArcGIS βρέθηκαν οι κατάλληλες περιοχές προς εγκατάσταση όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.7. Ανεμογεννήτριες τάξεως 5 MW υπολογίστηκε να τοποθετηθούν, και σύνολο βρέθηκαν 16 θαλάσσιες περιοχές για εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Η έκταση, η τοποθεσία, ο τύπος κατασκευής και η χωρητικότητα σε ενέργεια φαίνονται στον Πίνακα 2.3.



Σχήμα 2.9 Περιοχές κατάλληλες για εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα (Spyridonidou et al., 2020).

Πίνακας 2.3 Στοιχεία των 16 αιολικών πάρκων (Spyridonidou et al., 2020).

No.	Name of OWF	Location	Area (km <sup>2</sup> )	Wind Turbine Support Structure <sup>1</sup>	Project Capacity (MW)
1	"Eolos"	Southeast of Euboea	677.43	TLB and Hywind	4310
2	"Aphrodite"	Southwest of Thasos	552.07	TLB and Hywind	3500
3	"Poseidon"	Southeast of Euboea/North of Andros	542.6	TLB and Hywind	3430
4	"Apollo"	Southeast of Thasos/Northwest of Samothrace	477.46	TLB	3095
5	"Zeus"	Southeast of Euboea	125.63	TLB and Hywind	785
6	"Hera"	South of Hydra	110.29	TLB and Hywind	680
7	"Ares"	East of Hydra	104.46	TLB and Hywind	600
8	"Athena"	Southeast of Euboea	82.03	Hywind	485
9	"Hephaestus"	Northeast of Volos	46.79	Hywind	280
10	"Demeter"	Northwest of Lefkada/West of Preveza	42.7	Hywind	270
11	"Dionysus"	Southeast of Euboea/North of Andros	30.94	Hywind	205
12	"Hestia"	Northwest of Skyros	22.71	Hywind	150
13	"Hermes"	Northeast of Euboea/South of Skopelos	15.6	Hywind	100
14	"Nemesis"	North of Volos	6.9	TLB	50
15	"Artemis"	East of Thasos	4.81	TLB	45
16	"Persephone"	East of Poros	4.45	TLB	40
<b>Total</b>	<b>Portfolio OWFs</b>	<b>EEZ of Greece</b>	<b>2846.87</b>	<b>TLB and Hywind</b>	<b>18,025</b>

<sup>1</sup> TLB is considered for water depths 50–200 m, while Hywind for water depths 200–500 m (see Section 4.2).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ (CFD)

### 3.1 Σκοπός της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Σκοπός της υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics) είναι η ανάλυση συστημάτων τα οποία περιέχουν ροή ρευστών και μεταφοράς θερμότητας με ή χωρίς χημικές αντιδράσεις με χρήση Η/Υ. Είναι ένας τομέας ρευστομηχανικής που με βάση αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους επιλύουν προβλήματα που περιέχουν ροές ρευστών. Οι αριθμητικοί μέθοδοι που αναπτύχθηκαν επιλύουν τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής (Navier-Stokes), ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των ρευστών. Στις αρχές του 1990, έγινε η πρώτη χρήση του λογισμικού CFD από ακαδημαϊκά ινστιτούτα και ερευνητικά κέντρα. Με το πέρασμα του χρόνου οι συγκεκριμένοι κώδικες αναπτύχθηκαν και κατάφεραν να προσομοιώνουν μοντέλα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη, κάνοντας την ανάλυση και επίλυση των προβλημάτων σε πρόγραμμα, αποτελώντας ένα εύχρηστο εργαλείο του μηχανικού.

### 3.2 Εξέλιξη της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Η επίδραση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στον τομέα της Μηχανικής των Ρευστών υπήρξε πολύ σημαντική. Αρχικά, οι λύσεις των προβλημάτων της ρευστομηχανικής προέρχονταν, είτε από πειραματική προσομοίωση των προβλημάτων σε αεροδυναμική σήραγγα, είτε από αναλυτικές λύσεις απλουστευμένων εξισώσεων των οποίων η αξιοπιστία ήταν αμφισβητήσιμη. Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος των μηχανών σε συνδυασμό με την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης πολλές φορές οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια και σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα συγκριτικά με την πειραματική προσομοίωση. Πλέον συζητείται εκτενώς η δυνατότητα του Η/Υ να αντικαταστήσει μελλοντικά πειράματα λόγω του ρυθμού εξέλιξης σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους εκτέλεσης των αριθμητικών πράξεων. Μία ανάλυση με CFD είναι πιο γρήγορη στη διεξαγωγή της, από την πραγματοποίηση ενός πραγματικού πειράματος

και σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί και όρια αφού μπορούμε να διατυπώσουμε το πρόβλημα μας σε πραγματική κλίμακα.

### **3.3 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής**

- **Χρησιμοποίηση CFD**

➤ Η χρησιμοποίηση της τεχνολογίας CFD αφορά την προσομοίωση βασισμένη στο σχεδιασμό, παρέχοντας στον χρήστη ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τη ροή του ρευστού μέσα ή γύρω από μία επιφάνεια. Επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός για διενέργεια μαθηματικών και υπολογιστικών πειραμάτων για να βοηθηθεί η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών της ροής. Τα υπολογιστικά πειράματα είναι ευθέως ανάλογα με τα πραγματικά πειράματα.

➤ Χρησιμοποιείται για περιπτώσεις στις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να εκλάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα όπως η προσομοίωση σε πραγματικές διαστάσεις και συνθήκες (αεροπλάνα, πλοία), περιβαλλοντικές συνθήκες (αέρας, καιρός, κ.α.) και επικίνδυνες δραστηριότητες (εκρήξεις, ραδιενέργεια, κ.α.).

- **Εφαρμογές του CFD**

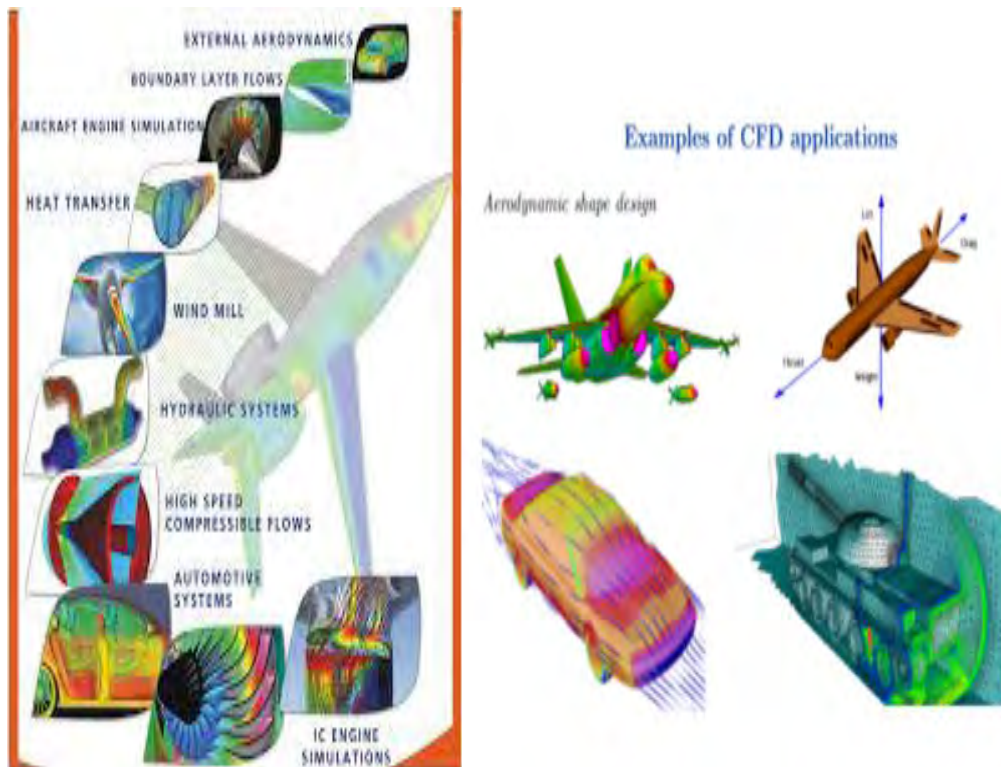
Σημαντικές εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστομηχανικής στο σχεδιασμό και στην μελέτη έργων στον τομέα των μηχανικών αναφέρονται παρακάτω :

1. Σχεδιασμός δικτύων ύδρευσης/άρδευσης οικισμών και αποστραγγιστικών δικτύων.
2. Μελέτη της μεταφοράς των ρυπαντών σε φυσικούς ή τεχνητούς αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες, θάλασσες, ατμόσφαιρα, έδαφος) και σχεδιασμός συστημάτων διάχυσης και διασποράς ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αραίωση.
3. Σχεδιασμός περυγών αεροπλάνων υψηλής ανωστικής δύναμης και χαμηλής αντίστασης, πλοίων και οχημάτων υψηλής ευστάθειας, ψηλών κτιρίων, ελαφρών



μεταλλικών κατασκευών και γεφυρών όπου οι ανεμοπιέσεις αποτελούν ιδιαίτερα επικίνδυνη φόρτιση.

4. Μελέτη της διάδοσης κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας και σχεδιασμός λιμενικών έργων καθώς και έργων προστασίας των ακτών από διάβρωση.
5. Σχεδιασμός μονάδων καθαρισμού αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων.
6. Σχεδιασμός δικτύων αποχέτευσης.
7. Σχεδιασμός στροβιλομηχανών.

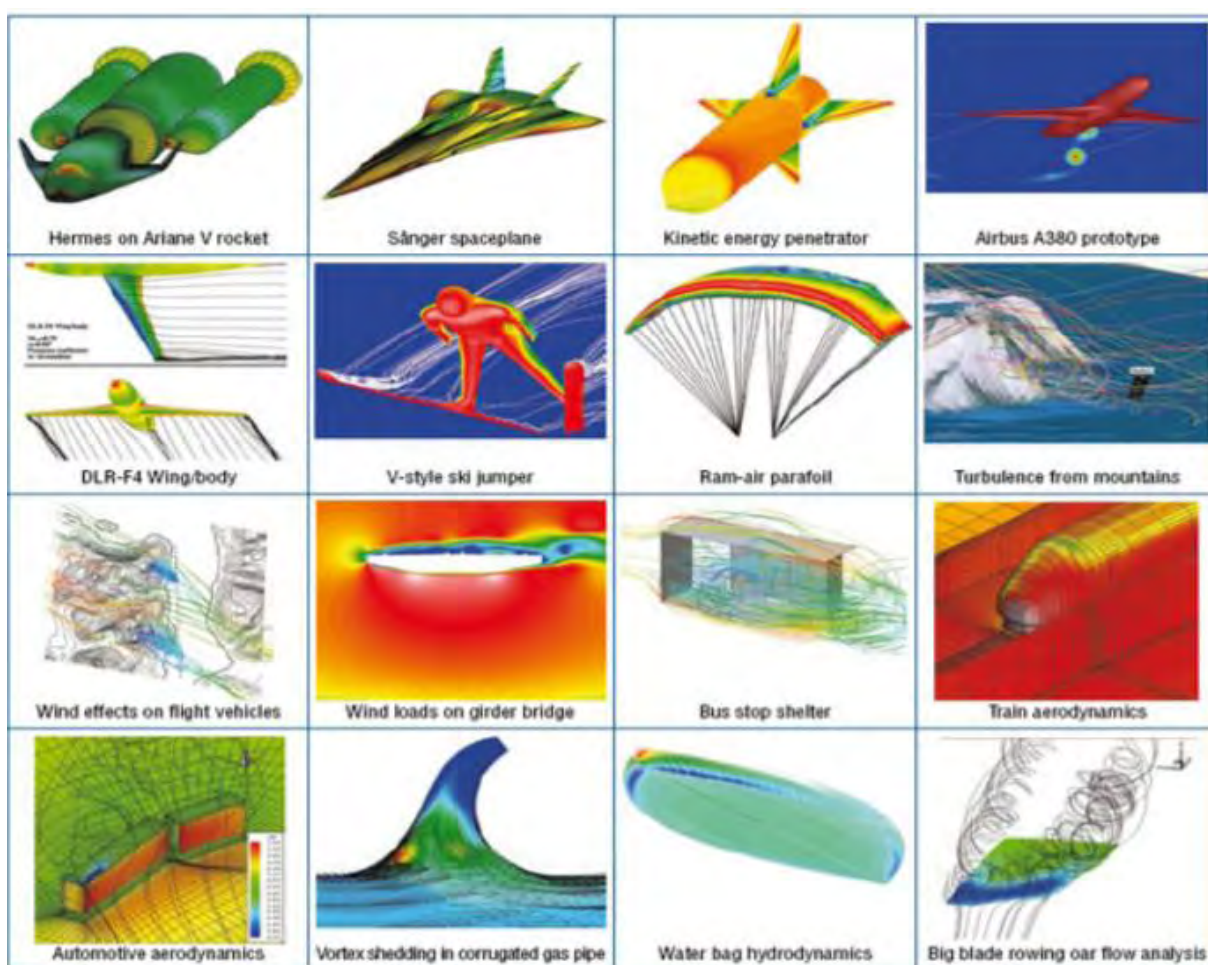


**Εικόνα 3.1:** Εφαρμογές σε λογισμικά με CFD (Ansys.com).

Το CFD είναι ένα αξιόπιστο και πολύ χρήσιμο λογισμικό σε όλες τις αναπτυσσόμενες βιομηχανίες για προσομοίωση ροής. Το CFD χρησιμοποιείται επίσης από :

- Αρχιτέκτονες, ώστε να σχεδιαστεί ένα ασφαλές βιώσιμο περιβάλλον
- Σχεδιαστές διάφορων τύπων οχημάτων, με σκοπό την μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών.
- Χημικούς Μηχανικούς, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης από τον εξοπλισμό τους.

- Μηχανικούς πετρελαίου (Oil engineers), ώστε να σχεδιάσουν την βέλτιστη στρατηγική αποκατάστασης του πετρελαίου.
- Χειρούργους, για την θεραπεία αρτηριακών ασθενειών (υπολογιστική αιμοδυναμική).
- Μετεωρολόγους, για την πρόβλεψη του καιρού και την προειδοποίηση τυχόν φυσικών καταστροφών.
- Επιστήμονες, που σχετίζονται με την υγεία και την μείωση την ακτινοβολίας, που εκπέμπεται.
- Στρατιωτικές οργανώσεις χωρών, για την ανάπτυξη των όπλων και την εκτίμηση της ζημίας τους.



Εικόνα 3.2: Εφαρμογές φυσικών προβλημάτων με CFD (Ansys.com).

### 3.4 Πολυπλοκότητα

Το CFD είναι ένα εργαλείο με μεγάλη ακρίβεια και εύρος εφαρμογής. Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα ρευστοδυναμικής πρέπει να λάβουμε υπόψιν την πολυπλοκότητά του. Οι κυριότεροι παράγοντες είναι οι παρακάτω.

#### 1. Διαστάσεις του προβλήματος

Με βάση τα φυσικά προβλήματα που θέλουμε να προσομοιάσουμε με CFD τα προβλήματα διακρίνονται σε μονοδιάστατα (1D), σε δυοδιάστατα (2D) και σε τρισδιάστατα (3D). Στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο για την ανάλυσή του. Τα αποτελέσματα σε όλες τις διαστάσεις είναι σχεδόν ίδια ή με απειροστή απόκλιση. Η επιλογή των διαστάσεων γίνεται με βάση την γεωμετρία του φυσικού προβλήματος καθώς και των δυνατοτήτων του υπολογιστή που χρησιμοποιείται. Σε 3D προβλήματα ο χρόνος και η ικανότητα του επεξεργαστή του Η/Υ παίζει σημαντικό ρόλο αφού είναι μεγαλύτερος ο αριθμός των κόμβων (nodes) και των στοιχείων (elements) που χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων ορμής και συνέχειας.

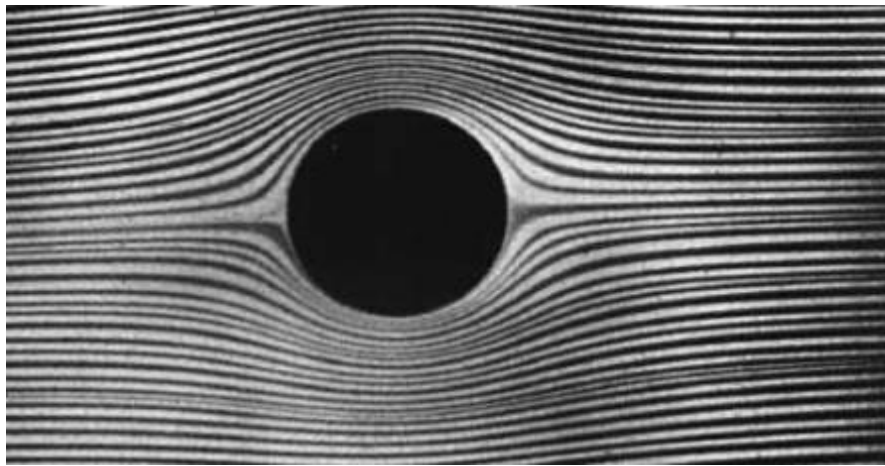
#### 2. Γεωμετρική πολυπλοκότητα

Η γεωμετρία του προβλήματος επιδρά στην διαδικασία ανάλυσης και επίλυσης του. Προβλήματα ροής με CFD όπου τα μοντέλα προσομοίωσης είναι παραπάνω από ένα κάνουν το πρόβλημα πιο πολύπλοκο και φέρουν μεγαλύτερη δυσκολία για να επιλυθούν. Σε σύνθετες γεωμετρίες η υπολογιστική προσομοίωση μπορεί να μην είναι ακριβής λόγω έλλειψης κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. Για την εκτέλεση υπολογιστικών προσομοιώσεων υψηλής ακρίβειας και πιστότητας η γεωμετρία του προβλήματος παίζει καθοριστικό ρόλο. Η ανάπτυξη υψηλής ακρίβειας σύνθετων αριθμητικών σχημάτων επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes για ασυμπίεστες ροές, είναι αναγκαία για την προσομοίωση μεγάλου ενδιαφέροντος προβλημάτων που πραγματοποιούνται μέσω CFD.

### 3. Ο αριθμός Reynolds

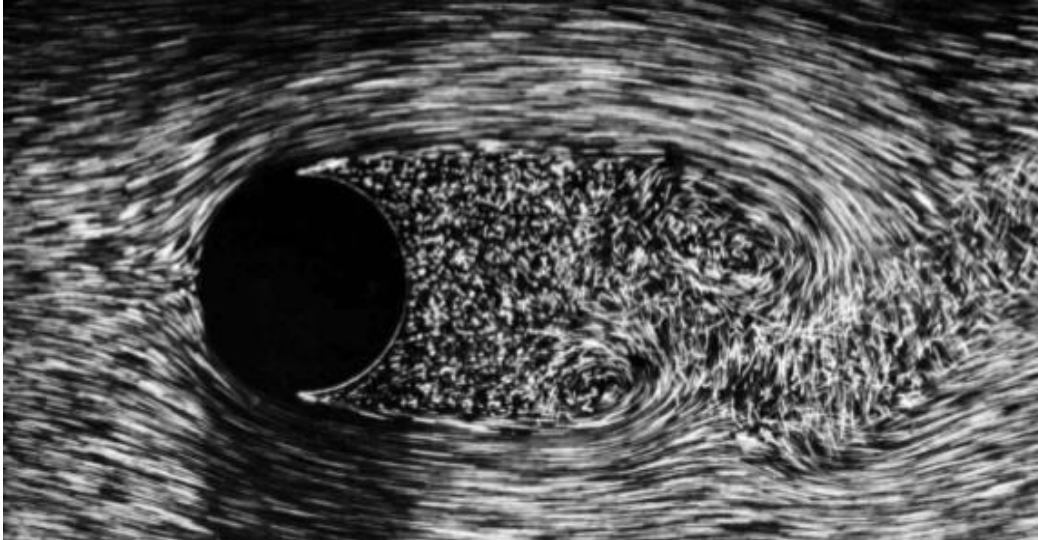
Το 1883 μελετώντας την ροή σε ευθύγραμμο σωλήνα κυκλικής διατομής, ο Osborne Reynolds μελέτησε και κατέγραψε σε τεχνικά σχέδια ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ροής τα οποία στο μέλλον αποδείχθηκαν ότι έχουν μεγάλη σημασία και ισχύ. Στο πείραμά του περιέγραψε την διαφορά μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής.

Η στρωτή ροή χαρακτηρίζεται από ομαλές γραμμές ροής, σταθερή εξάρτηση της σημειακής ταχύτητας με τον χρόνο και χαμηλός ρυθμός μείξης (μέσω του μηχανισμού μοριακής διάχυσης βάση του νόμου του Fick).



**Εικόνα 3.3:** Στρωτή ροή γύρω από έναν κύλινδρο (Van Dyke, No 24).

Αντιθέτως, η τυρβώδη ροή χαρακτηρίζεται από ακανόνιστη συμπεριφορά των γραμμών ροής και των τροχιών, και μη ομαλή μεταβολή της σημειακής ταχύτητας με τον χρόνο. Ακόμη, παρατηρούνται αυξημένοι ρυθμοί διάχυσης, διασποράς και ανάμειξης.



**Εικόνα 3.4:** Τυρβώδης ροή γύρω από έναν κύλινδρο (Van Dyke, No 47).

Ο αριθμός Reynolds, ( $Re$ ), είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος δίνει την σχέση μεταξύ δυνάμεων αδρανείας και δυνάμεων τριβής σε μία ροή υγρού ή αερίου. Αν υπερσχύουν οι δυνάμεις τριβής, ο αριθμός Reynolds είναι έχει χαμηλή τιμή και η ροή είναι στρωτή. Αν υπερσχύουν οι δυνάμεις αδρανείας, ο αριθμός Reynolds έχει υψηλή τιμή και η ροή είναι τυρβώδης.

Οι δυνάμεις αδρανείας είναι ανάλογες της μάζας επί της μεταβολής της ταχύτητας δια του αντίστοιχου χρόνου. Η μάζα διαιρεμένη με τον χρόνο είναι η παροχή μάζας η οποία είναι ίση με το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  επί την ταχύτητα  $V$ .

$$\text{Δυνάμεις αδρανείας} = (\rho D^2 V) V \quad (3.1)$$

Όπου  $D$  είναι η διάμετρος του αγωγού.

Οι δυνάμεις τριβής είναι ανάλογες προς το γινόμενο της διατμητικής τάσης επί το εμβαδόν της επιφάνειας εφαρμογής.

$$\text{Δυνάμεις τριβής} = \eta \left( \frac{du}{dy} \right) D^2 = \eta V D^2 \quad (3.2)$$

Διαιρώντας τις δυνάμεις αδρανείας με τις δυνάμεις τριβής, προκύπτει μία έκφραση του αριθμού Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{(\rho D^2 V^2)}{(\eta VD^2)} = \rho \frac{VD}{\eta} = (\rho D^2 V) V \quad (3.3)$$

Ο όρος  $\eta/\rho$  είναι το κινηματικό ιξώδες,  $\nu$ . Έτσι η σχέση του αριθμού Reynolds γράφεται :

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.4)$$

➤ Η ροή πραγματοποιείται στο εσωτερικό ενός αγωγού ή γύρω από ένα ακίνητο σώμα. Στην πρώτη περίπτωση το χαρακτηριστικό μήκος είναι η διάμετρος του αγωγού (ή η ισοδύναμη υδραυλική διάμετρος για αγωγό οποιουδήποτε σχήματος). Στη δεύτερη περίπτωση ως χαρακτηριστικό μήκος μπορεί να τεθεί μια κύρια διάσταση του σώματος, π.χ. το μήκος ή το πλάτος του.

### 3.5 Συνθήκες ροής

Οι κώδικες CFD έχουν προγραμματιστεί με την εφαρμογή διάφορων μοντέλων να επιλύουν βασικά φαινόμενα μηχανικής ρευστών (Durbin and Medic., 2014). Τα παρακάτω κριτήρια καθορίζουν το φυσικό πρόβλημα που ο χρήστης θέλει να μελετήσει βάση των συνθηκών ροής.

- Ιξώδες ρευστού (παχύρευστο ή λεπτόρευστο)
- Εξωτερική – Εσωτερική ροή (όρια τοιχώματος)
- Τυρβώδης – Στρωτή ροή (αριθμός Reynolds)
- Ασυμπιεστή – Συμπιεστή
- Απλή – Πολυφασική

- Φαινόμενα που εξαρτώνται από θερμοκρασία – πυκνότητα
- Ελεύθερη επιφανειακή ροή και επιφανειακή τάση
- Χημικές αντιδράσεις και καύση

### 3.6 Εξισώσεις κίνησης ρευστών

Οι κινήσεις των ρευστών βασίζονται σε τρεις βασικές αρχές και είναι οι ακόλουθες :

1. Αρχή Διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας)
2. Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα (εξίσωση ορμής)
3. 1<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος (αρχή διατήρησης της ενέργειας)

#### Εξίσωση διατήρησης της μάζας

Ο πρώτος βασικός νόμος της κλασικής μηχανικής εκφράζεται από την εξίσωση διατήρησης της μάζας και γράφεται ως εξής :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = S_m \quad (3.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη γενική μορφή της αρχής διατήρησης της μάζας για συμπιεστές ροές (αριθμός Mach >0.3) και ασυμπίεστες (Mach <0.3). Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, για έναν όγκο ελέγχου του ρευστού, η εξίσωση της συνέχειας παίρνει της παρακάτω μορφή :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

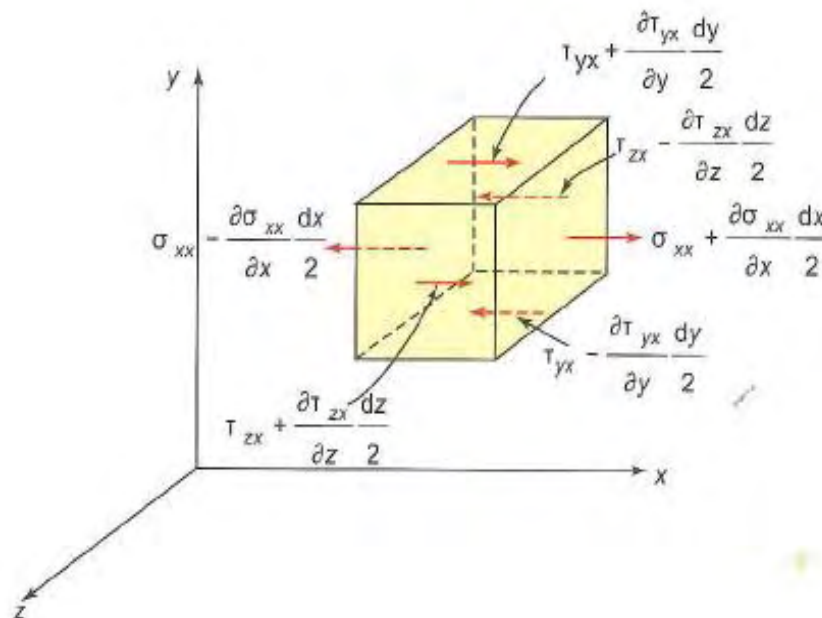
Όπου

u είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα x

$v$  είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα  $y$

$w$  είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα  $z$

$\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού



**Σχήμα 3.1:** Ορθές και διατμητικές τάσεις στην κατεύθυνση  $x$  που ασκούνται στις έδρες απειροστού όγκου ελέγχου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (Α.Λιακόπουλος Μηχανική των Ρευστών, Β Έκδοση).



## Εξίσωση διατήρησης της ορμής

Ο δεύτερος βασικός νόμος της κλασσικής μηχανικής εκφράζεται από την εξίσωση διατήρησης της ορμής (2<sup>ος</sup> νόμος Νεύτωνα) και περιγράφει ότι η χρονική μεταβολή της ορμής ενός σώματος ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που δρουν; πάνω σε αυτό. Η κίνηση του ρευστού στις τρεις διαστάσεις διατυπώνονται ως εξής :

Συνιστώσα x	$\rho = \frac{Du}{Dt} = \frac{\theta(-p + \tau_{xx})}{\theta x} + \frac{\theta\tau_{yx}}{\theta y} + \frac{\theta\tau_{zx}}{\theta z} + S_{m,x}$	(3.7)
Συνιστώσα y	$\rho = \frac{Dv}{Dt} = \frac{\theta(-p + \tau_{yy})}{\theta y} + \frac{\theta\tau_{xy}}{\theta x} + \frac{\theta\tau_{zy}}{\theta z} + S_{m,y}$	
Συνιστώσα z	$\rho = \frac{Dw}{Dt} = \frac{\theta(-p + \tau_{zz})}{\theta z} + \frac{\theta\tau_{xz}}{\theta x} + \frac{\theta\tau_{yz}}{\theta y} + S_{m,z}$	

## Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Σύμφωνα με τον 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο η ενέργεια παραμένει σταθερή κατά την κίνηση του ρευστού. Εφαρμόζοντας την εξίσωση της ενέργειας σε έναν όγκο ελέγχου του ρευστού έχουμε την εξής εξίσωση :

$$\rho = \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(\rho u) + \left[ \frac{\theta(u\tau_{xx})}{\theta x} + \frac{\theta(u\tau_{yx})}{\theta y} + \frac{\theta(u\tau_{zx})}{\theta z} + \frac{\theta(v\tau_{xy})}{\theta x} + \frac{\theta(v\tau_{yy})}{\theta y} \right] + \left[ \frac{\theta(v\tau_{zx})}{\theta z} + \frac{\theta(w\tau_{xz})}{\theta x} + \frac{\theta(w\tau_{yz})}{\theta y} + \frac{\theta(w\tau_{zz})}{\theta z} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (3.8)$$

❖ Για μία ασυμπίεστη ροή ενός Νευτώνειου ρευστού όπως αυτή που μελετάτε στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν υπάρχει μεταβολή της πυκνότητας γεγονός που

καθιστά δύσκολη την σύνδεση μεταξύ των εξισώσεων ορμής και συνέχειας με την εξίσωση ενέργειας. Παρόλα αυτά στις ασυμπίεστες ροές δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας στο ροϊκό πεδίο, οπότε δεν κρίνεται απαραίτητο να επιλυθεί η εξίσωση ενέργειας. Η εξίσωση ενέργειας επιλύεται μόνο σε προβλήματα τα οποία περιέχουν μεταφορά θερμότητας.

### 3.7 Η θεωρία του Betz (The linear momentum theory)

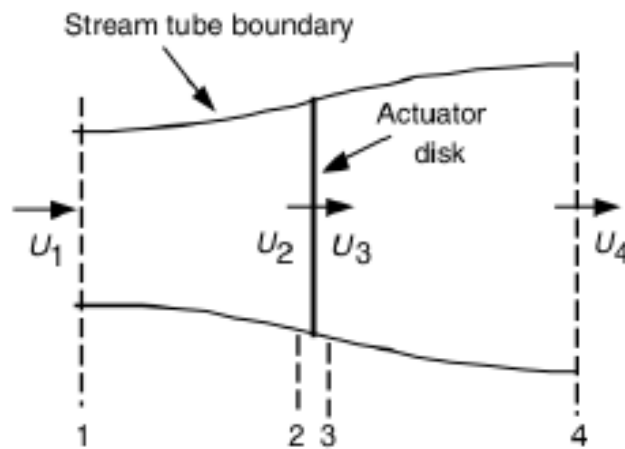
Το 1920, πρωτοπόρος στο πεδίο της αιολικής ενέργειας, υπήρξε ο φυσικός Albert Betz, που δημοσίευσε το άρθρο "Theoretical Limit for Best Utilization of Wind by Wind Motors" (Betz, 1920). Το επίτευγμα αυτό θεωρείται θεμέλιο για την μετέπειτα εξέλιξη των ανεμογεννητριών. Ο Betz υπήρξε ο πρώτος που εξήγησε πόση ενέργεια μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας τον άνεμο. Υποστήριξε ότι μία Α/Γ, ανεξάρτητα από το μέγεθός της, δεν μπορεί να εξαγάγει περισσότερο από το 59 % της κινητικής ενέργειας που περιέχεται στον κινούμενο άνεμο. Η διαπίστωση αυτή γνωστή και ως θεωρία του Betz, χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Η θεωρία του Betz βασίστηκε πάνω στην αρχή της ορμής που χρησιμοποιήθηκε για εφαρμογές σε προπέλες πλοίων που αρχικά ανέπτυξαν οι R.E. Froude (1889) και W.J. Rankine (1865).

Ο Betz χρησιμοποίησε μία ροή μέσα σε έναν όγκο ελέγχου σε σχήμα σωλήνα (tube) που διαχέεται άνεμος. Η ανεμογεννήτρια αναπαρίσταται από έναν "ενεργοποιημένο" δίσκο (actuator disk), τοποθετημένη στο κέντρο του σωλήνα, που προκαλεί πτώση πίεσης στον σωλήνα που κυκλοφορεί ο άνεμος. Η θεωρία του Betz βασίστηκε στις εξής παραδοχές :

- Σταθερή και ασυμπίεστη ροή
- Άπειρο αριθμό πτερυγίων
- Το δύναμη του αέρα δρα ομοιόμορφα στην περιοχή του ρότορα
- Μη περιστρεφόμενος ολκός (non rotating wake)

- Η στατική πίεση ανάντη και κατάντη του ρότορα είναι ίση

Το Σχήμα 3.2 δείχνει την έννοια του δίσκου εντός ενός σωλήνα ροής. Η ταχύτητα  $U_1$  αναπαριστά την ταχύτητα στην είσοδο του όγκου ελέγχου και η  $U_4$  την ταχύτητα εκροής έξω από το πεδίο. Οι  $U_2$  και  $U_3$  αναπαριστούν την ταχύτητα αμέσως πριν και μετά τον δίσκο. Τα σύνορα (boundaries) γύρω από τον όγκο ελέγχου είναι κλειστά.



**Σχήμα 3.2** Θέση ενεργοποιημένου δίσκου στο πεδίο που κυκλοφορεί ο άνεμος  
(Manwell et al., 2009)

Εφαρμόζοντας την διατήρηση της ορμής σε αυτό το μοντέλο επιτυγχάνεται η ισορροπία της ορμής εντός του σωλήνα ροής :

$$\Delta p_{TOTAL} = T_{ROTOR} = U_1 \cdot (\rho \cdot A_1 \cdot U_1) - U_4 \cdot (\rho \cdot A_4 \cdot U_4) \quad (3.9)$$

Η ολική διατήρηση της ορμής πρέπει να ισούται με την δύναμη ώθησης του ρότορα.

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $A$  η επιφάνεια σε τομή στις θέσεις 1,2,3 και 4.

Αφού οι οριακές συνθήκες είναι κλειστές και η θεωρία του Betz αφορά ασυμπίεστη ροή, η παροχή μάζας (mass flow rate) πρέπει να είναι ίση στην είσοδο και στην έξοδο του πεδίου.

$$\dot{m} = (\rho \cdot A_1 \cdot U_1) = (\rho \cdot A_4 \cdot U_4) \quad (3.10)$$

Η εξίσωση 3.9 παίρνει την εξής μορφή:

$$T = \dot{m} (U_1 - U_4) \quad (3.11)$$

Καθώς η δύναμη ώθησης που επιδρά στον ρότορα πρέπει να έχει θετική τιμή, η ταχύτητα  $U_4$  πρέπει να έχει μικρότερη τιμή από την ταχύτητα στην είσοδο  $U_1$ . Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli στο stream tube ισχύει αριστερά :

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2^2 \quad (3.12)$$

Αντίστοιχα δεξιά ισχύει :

$$p_3 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_4^2 \quad (3.13)$$

Η δύναμη ώθησης εκφράζεται από την πτώση της πίεσης από  $p_2$  σε  $p_3$  στον δίσκο :

$$T_{ROTOR} = A_2(p_2 - p_3) \quad (3.14)$$

Βασισμένοι στην παραδοχή του no frictional drag, ισχύει  $U_2 = U_3$  και  $p_1 = p_4$  οπότε οι εξισώσεις 3.12 και 3.13 μετατρέπονται :

$$p_2 = p_4 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_1^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2^2 \quad (3.15)$$

$$p_3 = p_4 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_4^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2^2 \quad (3.16)$$

Αντικαθιστώντας την πίεση  $p_2$  και  $p_3$  στις εξισώσεις 3.15 και 3.16 προκύπτει μία νέα εξίσωση που περιγράφει την δύναμη ώθησης  $T_{rotor}$  που επιδρά στον ρότορα όπου  $A_2$  η γεωμετρία του ρότορα :

$$T_{ROTOR} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (3.17)$$

Η αεροδυναμική ισχύς του ρότορα εκφράζεται ως το γινόμενο της δύναμης ώθησης που δρα στον ρότορα είναι:

$$P_{ROTOR} = T_{ROTOR} \cdot U_2 = \rho \cdot A_2 (U_1^2 - U_4^2) \cdot U_2 \quad (3.18)$$

Στο συγκεκριμένο απλοποιημένο μοντέλο η ταχύτητα  $U_2$  του ρότορα εκτιμάται ως μέση με την εξής σχέση:

$$U_2 = \frac{U_1 - U_4}{2} \quad (3.19)$$

Η μείωση της ταχύτητας  $U_1$  στο πεδίο ροής του ανέμου και της ταχύτητας  $U_2$  στον δίσκο εκφράζεται:

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (3.20)$$

Η ταχύτητα στον ρότορα του δίσκου  $U_2$  και η ταχύτητα  $U_4$  μακριά από τον ολκό μπορούν να εκφραστούν με τις εξής σχέσεις:

$$U_2 = U_1 (1 - a) \quad (3.21)$$

$$U_4 = U_1 (1 - a) \quad (3.22)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και αντικαθιστώντας της επιφάνεια του ρότορα  $A_2$  με  $A_{ROTOR}$  και την ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια  $U_1$  με  $U$  καταλήγουμε στην εξίσωση που υπολογίζει την αεροδυναμική ισχύ μιας ανεμογεννήτριας. Η εξίσωση είναι η εξής:

$$P_{ROTOR} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{ROTOR} \cdot U^3 \cdot 4a(1 - a)^2 \quad (3.23)$$

### 3.8 Συντελεστής Αντίστασης

Η σχέση μεταξύ της δύναμης της αντίστασης και της κινητικής ενέργειας του αέρα δίνεται από τον συντελεστή αντίστασης.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot U^2} \quad (3.24)$$

Όπου,

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα, kg/m<sup>3</sup>,

$A_1$ : η επιφάνεια της ανεμογεννήτριας, και ειδικότερα της περωτής της ανεμογεννήτριας, δηλαδή τα πτερύγια και το τμήμα του κελύφους ανάμεσα στα πτερύγια, το οποίο προστατεύει το στρόβιλο, m<sup>2</sup>,

$U$ : η ταχύτητα ελεύθερης ροής, m/s,

$D$ : η δύναμη αντίστασης που ασκείται στα πτερύγια

### 3.9 Συντελεστής ισχύος

Η σχέση μεταξύ της ισχύος του στρόβιλου και της κινητικής ενέργειας του ανέμου, όταν αυτός προσκρούει στο πτερύγιο, ορίζεται από τον συντελεστή ισχύος.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot U^2} \quad (3.24)$$

Όπου,

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα, kg/m<sup>3</sup>,

$A$ : η επιφάνεια του πτερυγίου, m<sup>2</sup>,

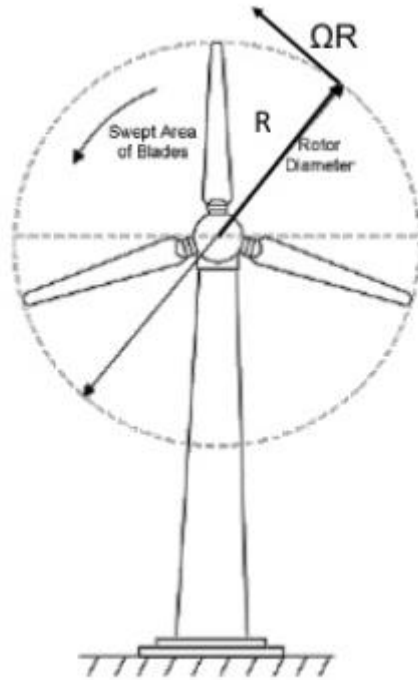
$U$ : η ταχύτητα της ελεύθερης ροής, m/s, και

$P$ : η ισχύς του στρόβιλου

### 3.10 Λόγος ταχύτητας πτερυγίου (Tip Speed Ratio)

Σε ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με πτερύγια ακτίνας  $R$ , που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$ , και με ταχύτητα ανέμου  $V$ , ορίζουμε ως «λόγο ταχύτητας στα άκρα πτερυγίου» (tip speed ratio),  $\lambda$ , το λόγο της γραμμικής ταχύτητας στο άκρο του πτερυγίου (tip), προς την ταχύτητα του ανέμου  $V$ .

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V} \quad (3.25)$$



**Σχήμα 3.3:** Ανεμογεννήτρια που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$ .  
(<https://www.slideshare.net/taralsoliya/wind-energy-technology-70224162>)

## ΚΕΦΑΛΑΟ 4

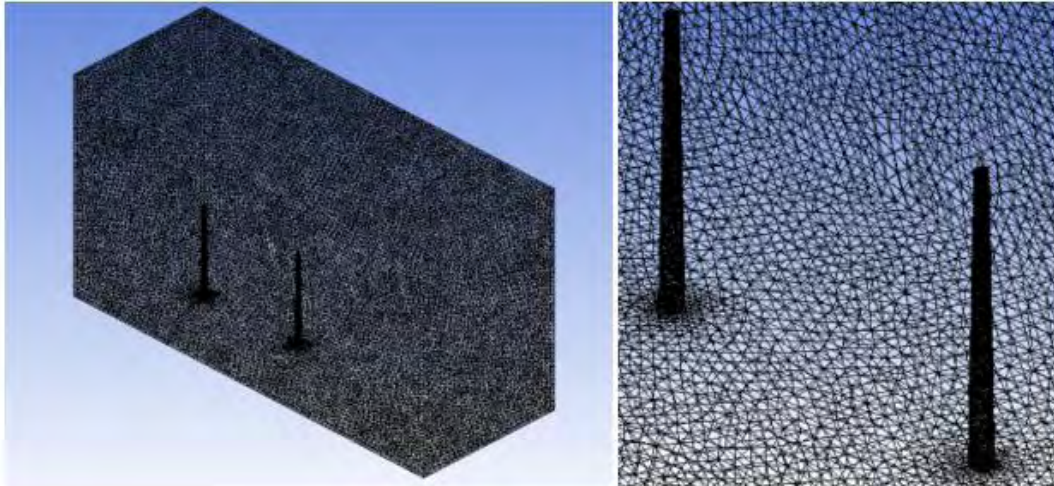
### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Στην μεταπτυχιακή εργασία θα γίνει προσομοίωση ενός αιολικού πάρκου σε ένα υπολογιστικό πεδίο με χρήση CFD. Υπάρχουν διάφορα λογισμικά προγράμματα στην αγορά, τόσο στον τομέα της βιομηχανίας όσο και στον χώρο πανεπιστημίων. Μερικά ευρέως γνωστά προγράμματα για ανάλυση κίνησης ρευστών είναι το ANSYS CFX και Fluent, το STAR CCM, το ParaView, το FLOW-3D, το OpenFOAM κ.α. Η μοντελοποίηση στην μεταπτυχιακή εργασία θα γίνει με το λογισμικό ANSYS CFX. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των ρευστών είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes, όπου στο πρόγραμμα CFX χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε αλγεβρικές εξισώσεις (εξισώσεις πεπερασμένων όγκων) οι οποίες επιλύονται με επαναληπτικές μεθόδους. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της τυρβώδης κίνησης του ρευστού είναι το μοντέλο  $k - \epsilon$  και το  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport) model.

#### 4.1 Προσομοίωση αιολικού πάρκου χωρίς τον ρότορα

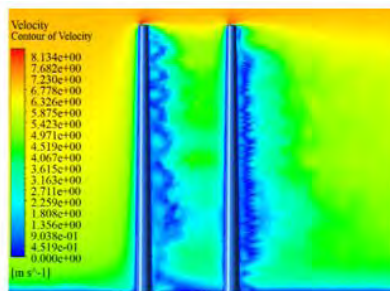
Στην συνέχεια παρουσιάζεται μία εργασία από εμένα σε συνεργασία με τον Καθηγητή Λιακόπουλο Αντώνιο και την Καθηγήτρια Κασσιτεροπούλου Δωροθέα που εγκρίθηκε στο συνέδριο Protection and Restoration of the Environment XV. Στην περίπτωση αυτή έγινε μοντελοποίηση του πυλώνα της Α/Γ δίχως τον ρότορα. Συνολικά τοποθετήθηκαν δύο μοντέλα γεωμετρίας στο υπολογιστικό πεδίο. Η μοντελοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 4.1 μαζί με το πλέγμα που σχεδιάστηκε.



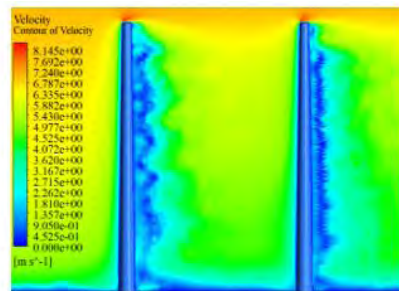


**Σχήμα 4.1** Πλέγμα υπολογιστικού πεδίου και Α/Γ.

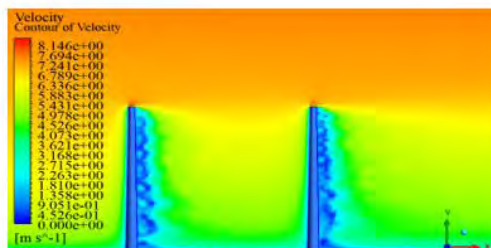
Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσομοίωση για 3 περιπτώσεις όπου η απόσταση του ενός πυλώνα με τον άλλον αλλάζει (Σχήμα 4.2). Στην πρώτη περίπτωση η μεταξύ τους απόσταση είναι 25, στην δεύτερη περίπτωση 50 και στην τρίτη 75 μέτρα. Η ταχύτητα του ανέμου που επιδρά στην δεύτερο πυλώνα είναι μικρότερη όσο η μεταξύ τους απόσταση μικραίνει. Οπότε, στην περίπτωση του αιολικού πάρκου η μεταξύ τους απόσταση των Α/Γ αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που πρέπει να διερευνήσουμε.



(a)



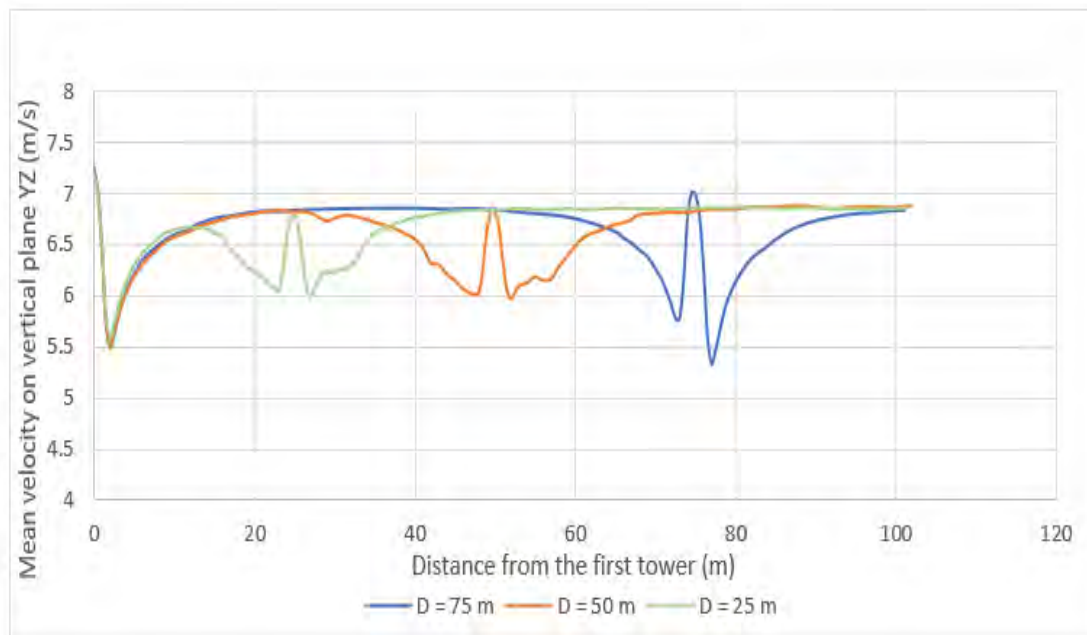
(b)



(c)

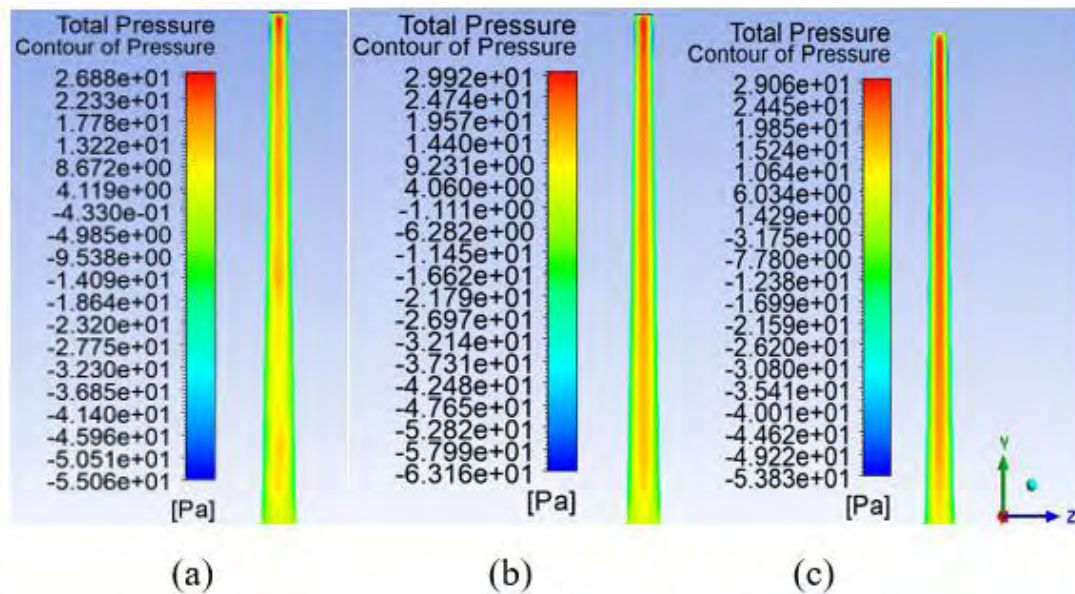
**Σχήμα 4.2** Ισοταχείς σε επιφάνεια παράλληλη στον άξονα x α) σε απόσταση 25 μέτρα  
β) σε απόσταση 50 μέτρα και γ) σε απόσταση 75 μέτρα.

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα σε κατακόρυφο επίπεδο σε όλο το υπολογιστικό πεδίο για κάθε περίπτωση. Αρχικά, στο Σχήμα 4.3 η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται πριν την αλληλεπίδραση του ανέμου με τον πυλώνα και στην συνέχεια αυξάνεται. Αυτό ισχύει για όλες τις περιπτώσεις.



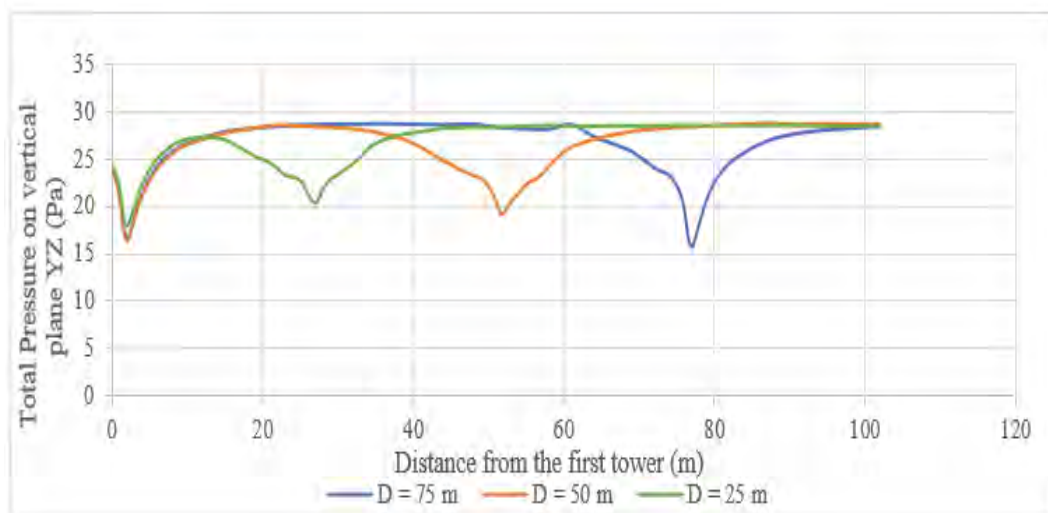
**Σχήμα 4.3** Μέση ταχύτητα σε κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος του υπολογιστικού πεδίου για όλες της περιπτώσεις.

Ακόμη, υπολογίστηκε η κατανομή της ολικής πίεσης στον δεύτερο πυλώνα Α/Γ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόσταση επηρεάζει το μέγεθος της ολικής πίεσης (total pressure). Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στην περίπτωση όπου η απόσταση είναι 75 μέτρα. Αντιθέτως, στην περίπτωση που ο ένας πυλώνας βρίσκεται κοντά στον άλλον η τιμή της ολικής πίεσης είναι πιο μικρή.



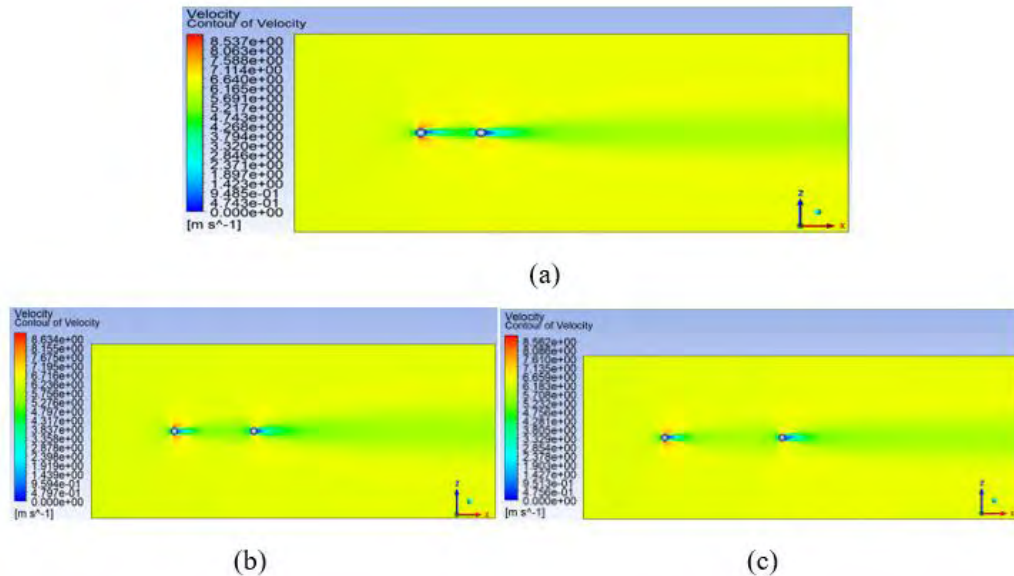
**Σχήμα 4.4** Κατανομή της ολικής πίεσης στην δεύτερη Α/Γ α) σε απόσταση 25 μέτρα β) σε απόσταση 50 μέτρα και γ) σε απόσταση 75 μέτρα.

Την ίδια συμπεριφορά με το μέγεθος της μέσης ταχύτητας δείχνει και το διάγραμμα της ολικής πίεσης στο Σχήμα 4.5, που υπολογίστηκε σε κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος του υπολογιστικού πεδίου.



**Σχήμα 4.5** Μέση ταχύτητα σε κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος του υπολογιστικού πεδίου για όλες της περιπτώσεις.

Στην συνέχεια, στο Σχήμα 4.6, υπολογίστηκαν οι ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο στο μέσο ύψος των Α/Γ ( $y = 35 \text{ m}$ ). Η ταχύτητα του ανέμου που επιδρά στον πρώτο πυλώνα επηρεάζει τις ταχύτητες που επιδρούν στον δεύτερο με αποτέλεσμα να υπάρχει πιο αργή περιστροφή του ρότορα σε περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε προσομοίωση ολόκληρων των μοντέλων.

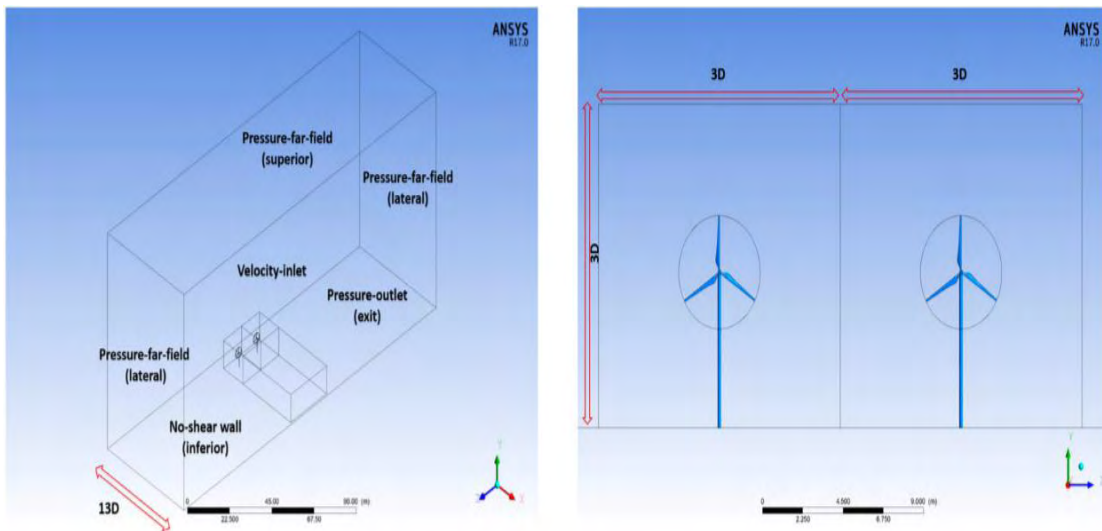


**Σχήμα 4.6** Ισοταχείς στο επίπεδο  $y = 35 \text{ m}$  α) σε απόσταση 25 μέτρα β) σε απόσταση 50 μέτρα και γ) σε απόσταση 75 μέτρα.

## 4.2 Βελτιστοποίηση χωροθέτησης αιολικών πάρκων με χρήση CFD σε μικρά μοντέλα

Με την βοήθεια του CFD είναι δυνατή η προσομοίωση Α/Γ σε υπολογιστικά πεδία (Υ.Π.), και είναι δυνατή η μελέτη της κίνησης του ρευστού (άνεμος) και η σύγκριση με εργαστηριακές μεθόδους. Στο παρακάτω παράδειγμα των Rodrigues and Lengsfeld (2019) γίνεται η προσομοίωση δύο ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας στο λογισμικό Fluent, ένα λογισμικό που μοιάζει με το CFX που αναφέρθηκε προηγουμένως, της ANSYS. Στην διπλωματική εργασία θα γίνει έρευνα με το λογισμικό CFX οπότε θα είχε

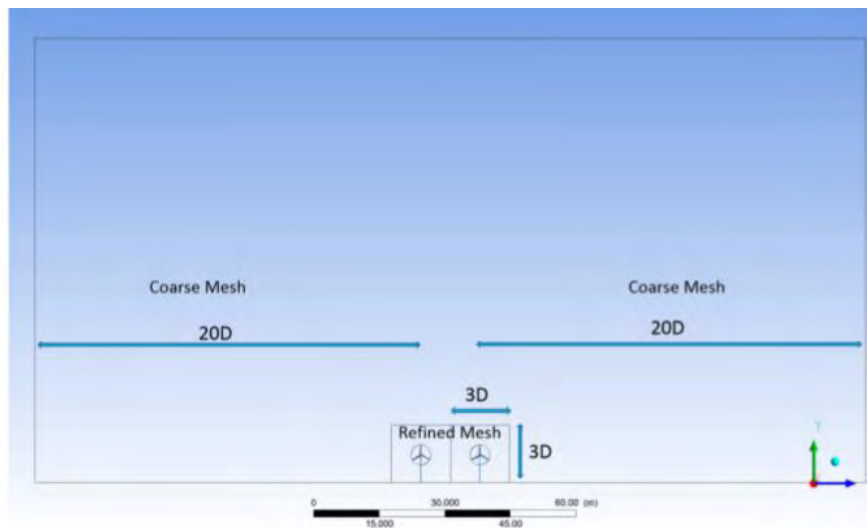
μεγάλο ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρακάτω εργασίας όπου χρησιμοποιήθηκε το Fluent με το CFX. Κατά την προσομοίωση των μοντέλων των Α/Γ είναι αρκετά δύσκολο η μοντελοποίηση σε πραγματικές διαστάσεις γι' αυτό και χρησιμοποιούνται μικρής κλίμακας μοντέλα τόσο κατά την έρευνα των πανεπιστημίων όσο και στον χώρο της βιομηχανίας. Για την ανάλυση τέτοιων μοντέλων απαιτείται υπολογιστής με ισχυρή υπολογιστική ισχύ με πολλούς πυρήνες και μεγάλη μνήμη RAM προκειμένου να υπάρξουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Ειδικά, στην περίπτωση όπου χρειάζεται η ροή να εξαρτάται από τον χρόνο (transient) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα σε πραγματικές διαστάσεις διότι οι υπολογισμοί μπορούν να διαρκέσουν χρόνια. Στο παρακάτω παράδειγμα γίνεται προσομοίωση δύο ανεμογεννητριών με διάμετρο ρότορα ίσο με 4.5 μέτρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



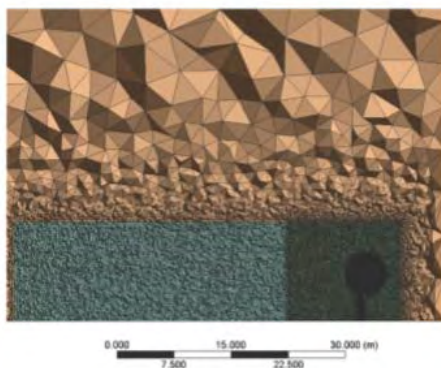
**Σχήμα 4.7** Οριακές συνθήκες (boundary conditions) και προσομοίωση των Α/Γ (Rodrigues and Lengsfeld., 2019).

Αν παρατηρήσουμε στο υπολογιστικό πεδίο (computational domain) έχουν χωριστεί δύο μικρότερα domain πίσω από τα μοντέλα προσομοίωσης. Αυτό γίνεται διότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης πρέπει να είναι ανεξάρτητα του πλέγματος (mesh). Οι συγγραφείς δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στο κομμάτι αυτό ώστε να αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα. Για την ανάλυση της κίνησης του ρευστού στον επιλυτή του προγράμματος επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes. Μέσω του πλέγματος γίνεται διαχωρισμός του

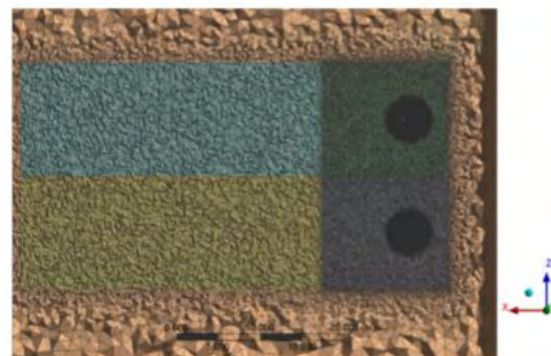
φυσικού χώρου ροής σε δίκτυο κελιών (grid) όπου επιτυγχάνεται η διακριτοποίηση των εξισώσεων (Navier – Stokes) που περιγράφουν το φαινόμενο. Έτσι γίνεται η μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε εξισώσεις διαφορών, δηλαδή αλγεβρικών εξισώσεων, που επιλύονται διαδοχικά μέσα στα τρισδιάστατα κελιά του πλέγματος. Για μία γρήγορη ανάλυση ή για κάποιον που δεν έχει εμπειρία στο πρόγραμμα της ANSYS το πλέγμα μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα χρησιμοποιώντας την εντολή automatic mesh. Το πλέγμα ή κανάβρος επιλέγει τον κατάλληλο τρόπο διακριτοποίησης βάσει της γεωμετρίας του μοντέλου που έχουμε σχεδιάσει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Το πρόγραμμα έχει εξελιχθεί και αναλόγως τους πυρήνες (cores) που διαθέτει ο υπολογιστής μας, επεξεργάζεται και μειώνει αποτελεσματικά τον χρόνο της δημιουργίας ενός πλέγματος.



(a)



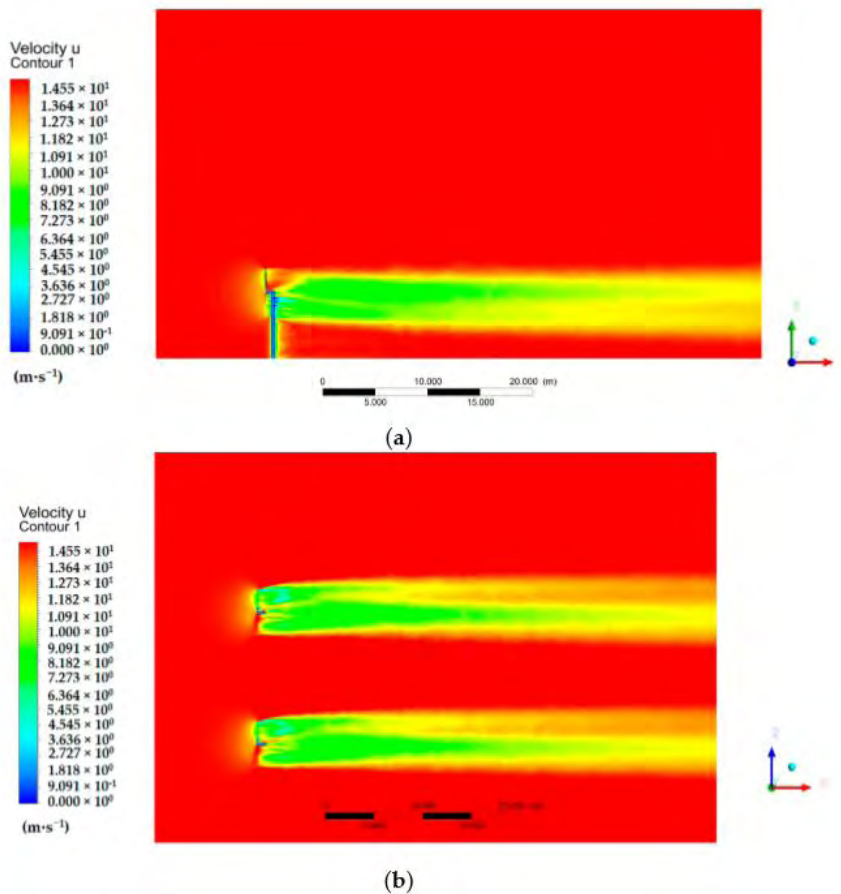
(b)



(c)

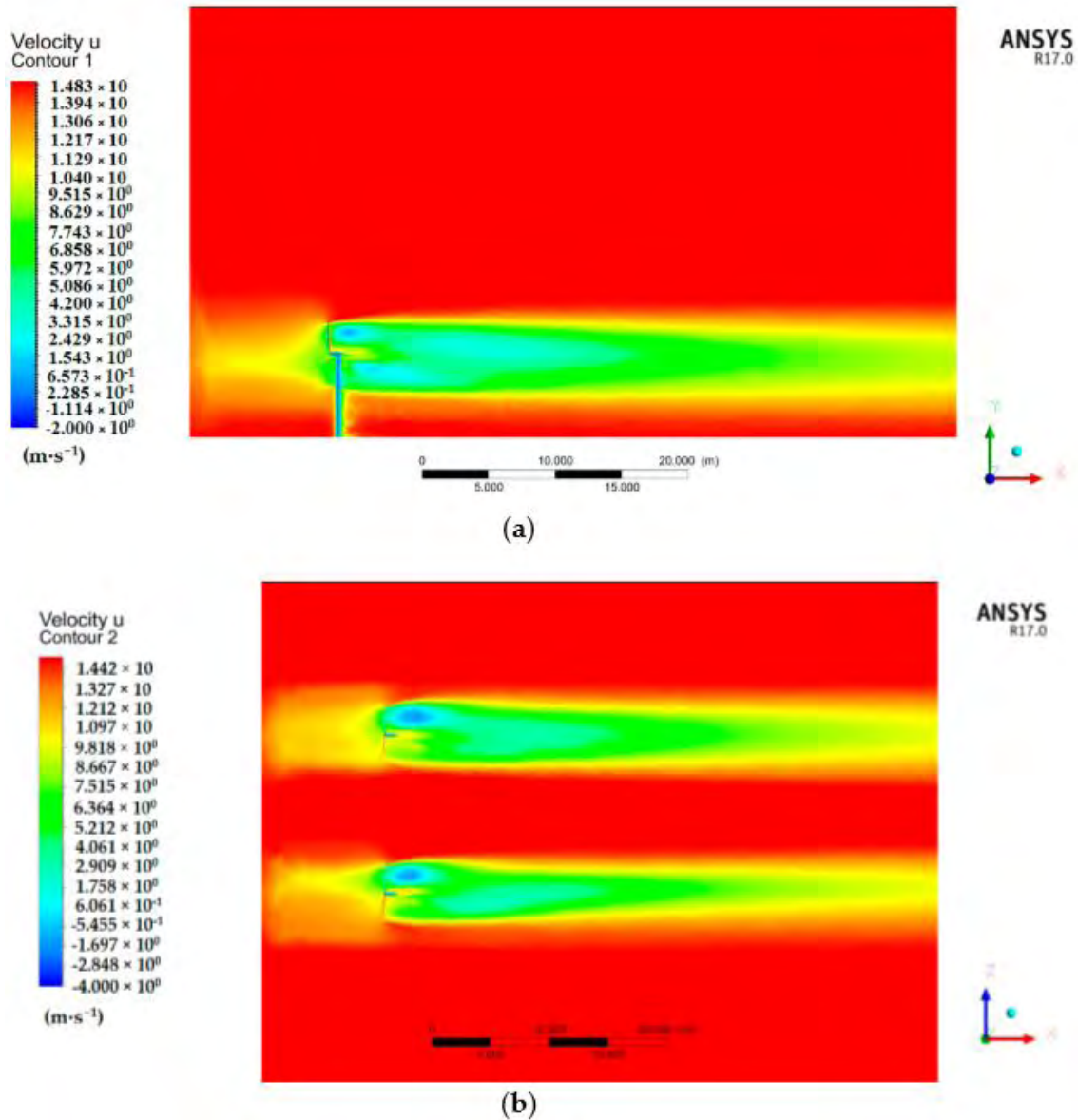
**Σχήμα 4.8** (a) Λεπτομέρειες πλέγματος σε ολόκληρο το Υ.Π. (b) Από πλευρική όψη (άξονας z) και (c) από κάτοψη (Rodrigues and Lengsfeld., 2019).

Στην διπλωματική εργασία όπως αναφέρθηκε δίνεται προσοχή στο πεδίο τυρβώδους ροής (turbulent entrainment) πίσω από την ανεμογεννήτρια. Στο πεδίο αυτό επιδρούν μικρές ταχύτητες και διαταραχές του ανέμου που έχουν ως αποτέλεσμα να επηρεάζουν μία ανεμογεννήτρια που βρίσκεται ακριβώς πίσω της. Η δεύτερη Α/Γ χάνει την απόδοσή της σε ισχύ λόγω των παραπάνω παραγόντων. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα προκειμένου να γίνει ποσοτικοποίηση των τιμών της ταχύτητας και της πίεσης έγινε προσομοίωση δύο φορές. Αρχικά τοποθετήθηκε η μία Α/Γ πίσω από την άλλη και έγινε ανάλυση του wake profile όπως στο Σχήμα 4.9. Στην συνέχεια, στο Σχήμα 4.10 το outflow (εκροή) έγινε inflow (εισροή) στην επόμενη προσομοίωση. Αυτό έγινε για τον λόγο ότι λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας δεν μπορεί να υπάρξει αξιόπιστη ανάλυση προσομοιώνοντας 4 Α/Γ στο Υ.Π. Με αυτόν τον τρόπο απλουστεύεται σημαντικά η πολυπλοκότητα του προβλήματος και τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι αξιόπιστα.



**Σχήμα 4.9** Πρώτη προσομοίωση όπου φαίνονται τα wakes (a) από πλευρική όψη (άξονας z) και (b) από κάτωψη (Rodrigues and Lengsfeld., 2019).

Στην συνέχεια στο Σχήμα 4.10 φαίνεται με ποιον τρόπο οι συγγραφείς προσομοίωσαν τα μοντέλα την δεύτερη φορά όπου χρησιμοποίησαν ως inflow το outflow του Σχήματος 4.9.



**Σχήμα 4.10** Δεύτερη προσομοίωση όπου φαίνονται τα wakes (a) από πλευρική όψη (άξονας z) και (b) από κάτοψη (Rodrigues and Lengsfeld., 2019).

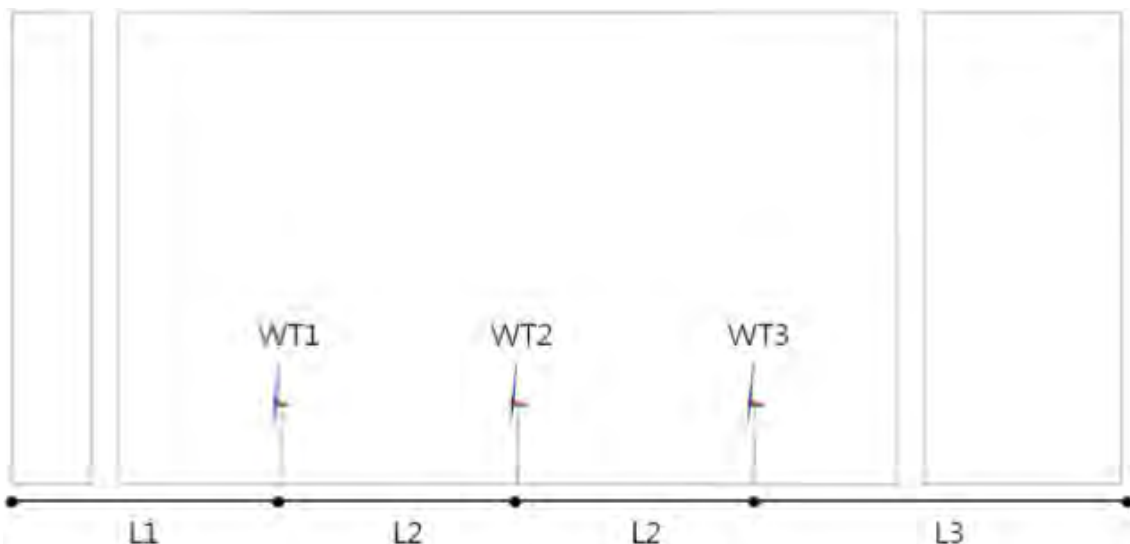
Όπως παρατηρείτε στο Σχήμα 4.10 οι τιμές των ταχυτήτων που επιδρούν στις Α/Γ είναι μικρότερες της πρώτης προσομοίωσης. Αυτό έχει ως συνέπεια την μικρότερη απόδοση



αυτών λόγω μικρότερων ταχυτήτων του ανέμου. Μικρότερες ταχύτητες ως inflow έχει ως αποτέλεσμα ακόμα μικρότερες τιμές “πίσω” από την Α/Γ. Στην βιβλιογραφία, σπάνια γίνεται προσομοίωση πολλών μοντέλων. Η χρήση CFD βοηθά σε μεγάλο βαθμό ώστε να υπάρξουν βάσιμα συμπεράσματα όπου θα βοηθήσουν στην εύρεση κατάλληλης περιοχής για την τοποθέτηση ενός αιολικού πάρκου. Αυτό αποτελεί μία μεγάλη πρόκληση για την υπολογιστική μηχανική σε αυτόν τον τομέα όπου δεν έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό σε αντίθεση με τις αυτοκινητοβιομηχανίες και σε άλλους χώρους όπου μοντέλα CFD χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό κατά τον σχεδιασμό των αυτοκινήτων.

### 4.3 Ανάλυση φορτίων ανέμου με χρήση CFD σε ολόκληρα μοντέλα

Ένα παράδειγμα στο οποίο γίνεται ανάλυση των φορτίων ανέμων με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος CFX, είναι το παράδειγμα των Choi et al., 2014. Στην εργασία αυτή γίνεται μοντελοποίηση 3 Α/Γ όπου η λειτουργία της πρώτης επηρεάζει την λειτουργία των υπολοίπων. Η μεταξύ τους απόσταση αλλάζει συγκριτικά με τη διάμετρο του ρότορα. Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται ένα σκαρίφημα της χωροθέτησης των Α/Γ στο υπολογιστικό πεδίο.



**Σχήμα 4.11** Τοποθέτηση Α/Γ συνολικής τάξεως 6 MW στο υπολογιστικό πεδίο (Choi et al., 2014).

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι τιμές των L1, L2 και L3 συγκρικά με την διάμετρο του ρότορα D. Η απόσταση της πρώτης A/Γ με την είσοδο του υπολογιστικού πεδίου (Υ.Π.), (computational domain), είναι ίση με 7D. Η απόσταση του L2 είναι ίση με 3D έως 7D. Η απόσταση της τελευταίας A/Γ με την έξοδο του Υ.Π. είναι ίση με 17D. Το ύψος και το πλάτος του πεδίου ροής του αιολικού πάρκου είναι ίσο με 6D και 10D αντίστοιχα. Το μοντέλο επίλυσης είναι το SST model που βασίζεται στο μοντέλο k- $\omega$ . Η ανάλυση έγινε με ισχυρό επεξεργαστή (48 πυρήνες) και το πλέγμα (mesh) που σχεδιάστηκε ήταν αρκετά πυκνό, με αριθμό κόμβων κοντά στα 12 εκατομμύρια για τον ρότορα.

**Πίνακας 4.1** Τιμές των L1, L2 και L3 για την απόσταση των A/Γ (Choi et al., 2014).

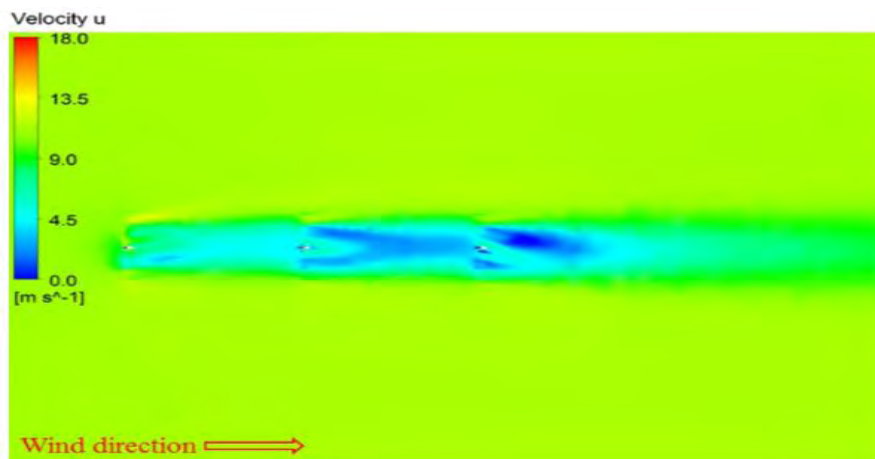
No. of analysis case	L1	L2	L3	Remark
Case 1	7D	3D	17D	
Case 2	7D	4D	17D	
Case 3	7D	5D	17D	D = 84.2 m
Case 4	7D	6D	17D	
Case 5	7D	7D	17D	

Ιδιαίτερη προσοχή αξίζει να δοθεί στον Πίνακα 4.2. Εδώ φαίνεται πως η διαφορετική χωροθέτηση επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας. Παρατηρούμε πως όσο πιο μικρή είναι η απόσταση μεταξύ των A/Γ τόσο μικρότερη είναι η συνολική απόδοση. Εδώ φαίνεται πόσο σημαντική είναι η σωστή χωροθέτηση των A/Γ σε ένα αιολικό πάρκο και πως οι στροβιλισμοί (eddies) και τα κενά αέρος που δημιουργεί η πρώτη επηρεάζει την ακόλουθη καθώς βρίσκονται σε συστοιχία.

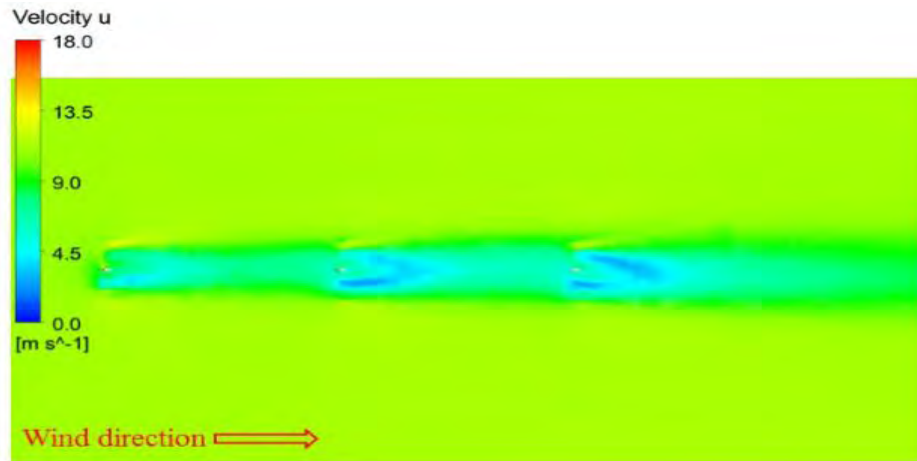
**Πίνακας 4.2** Παραγωγή ενέργειας σε kW για τις διαφορετικές περιπτώσεις (cases)  
(Choi et al., 2014).

No. of analysis case	Wind turbine ID.	Aerodynamic power output (kW)	Power ratio (WT2/WT1)	Power ratio (WT3/WT1)
Case 1	WT1	2030	15%	3.6%
	WT2	309		
	WT3	74		
Case 2	WT1	2052	30%	18%
	WT2	611		
	WT3	364		
Case 3	WT1	2065	41%	29%
	WT2	838		
	WT3	607		
Case 4	WT1	2068	49%	35%
	WT2	1007		
	WT3	718		
Case 5	WT1	2106	56%	44%
	WT2	1185		
	WT3	917		

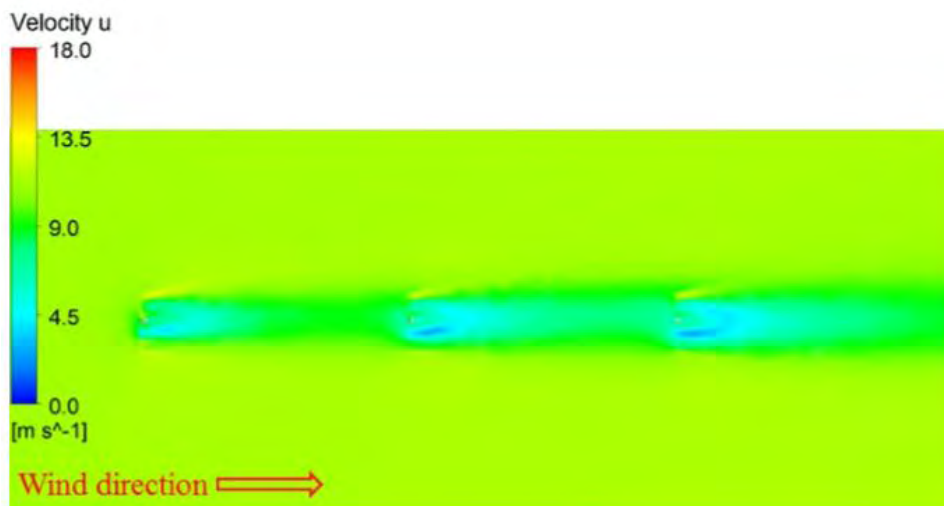
Για τις περιπτώσεις 1,3 και 5 του Πίνακα 4.2. φαίνονται στο Σχήμα 4.12 σε κάτοψη οι Α/Γ και η επιρροή στην ταχύτητα του ανέμου μετά την αλληλεπίδραση ανέμου κατασκευής (fluid-structure interaction). Βλέπουμε, ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ τους (separation distance) τόσο μικρότερη είναι η επιρροή στην ακόλουθη Α/Γ.



(a)



(b)



(γ)

**Σχήμα 4.12** Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο μετά την αλληλεπίδραση του ανέμου (Choi et al., 2014)

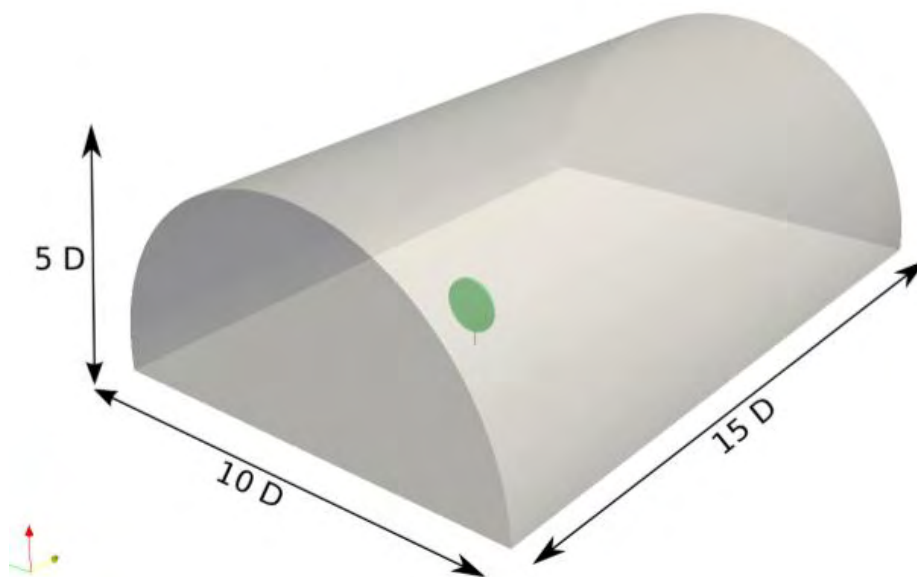
#### **4.4 Προσομοίωση Α/Γ τάξεως 2.5 MW με χρήση διαφορετικών προγραμμάτων CFD**

Μία ανεμογεννήτρια τάξεως των 2.5 MW μοντελοποιήθηκε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας του Bastien Dose. Για την εκπόνηση της πραγματοποιήθηκε συνεργασία του πανεπιστημίου University of Applied Science Kiel και του ινστιτούτου

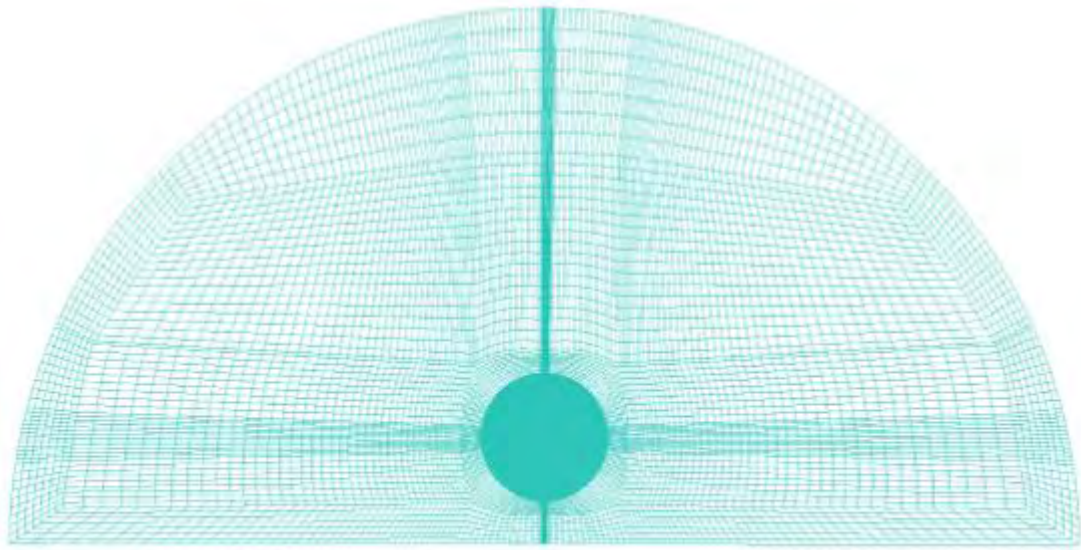
Fraunhofer IWES στην Γερμανία. Το μοντέλο προσομοίωσης έχει χαρακτηριστικά μίας Α/Γ της τάξεως των 2.5 MW όπου τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στο Σχήμα 4.13 και 4.14.

Turbine specifications	
Rated power output	2.5 MW
Rated aerodynamic power output	2.7 MW
Rated generator torque	16692 Nm
Rated wind speed	10.8 m/s
Rated tip speed	68 m/s
Rated tip speed ratio	6.3
Rated rotor speed	13 rpm
Rotor diameter	100 m
Hub flange diameter	3 m
Hub height	90 m
Blade length	48.5 m
Tilt angle	3°

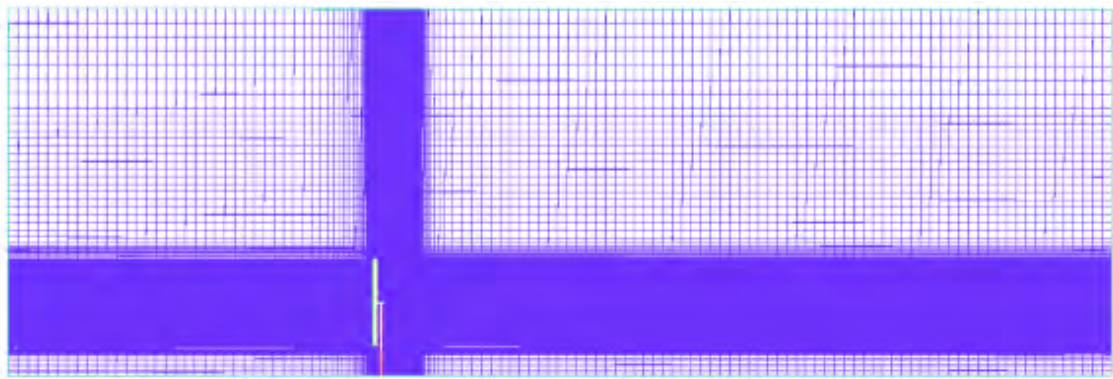
**Σχήμα 4.13** Χαρακτηριστικά της ανεμονεννήτριας (Dose MasterThesis).



**Σχήμα 4.14** Υπολογιστικό πεδίο που έγινε η προσομοίωση (Dose MasterThesis).



(α)



(β)

**Σχήμα 4.15** Πλέγμα (mesh) (α) όπως φαίνεται από την είσοδο του Υ.Π. και (β) από τον οριζόντιο άξονα  $x$  (Dose MasterThesis).

Για να γίνει η ανάλυση των φορτίων του ανέμου αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως ταχύτητα του ανέμου μία μόνιμη κίνηση του ρευστού ανεξαρτήτου του χρόνου (steady state). Ως μοντέλο επίλυσης των εξισώσεων Navier – Stokes χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο  $k - \omega$  SST. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου μία κίνηση ρευστού ως μη μόνιμη (transient). Η εισαγωγή αυτή έγινε ώστε με βάση ορισμένης χρονικής διάρκειας ο ρότορας της Α/Γ να περιστρέφεται. Ωστόσο χρειάζεται τεράστια

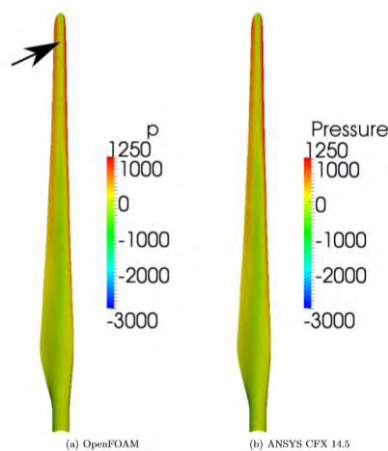
υπολογιστική ισχύς προκειμένου ο ρότορας να κάνει μία πλήρης περιστροφή. Στην πρώτη περίπτωση, η ανάλυση διήρκεσε 86 ώρες σε cluster (πολλοί υπολογιστές συνδεδεμένοι μαζί) με αριθμό πυρήνων ίσο με 120. Ο αριθμός επαναλήψεων που έτρεξε ο κώδικας ήταν 5000. Στην δεύτερη περίπτωση, για να πραγματοποιηθεί μόλις το 10% της μίας περιστροφής του ρότορα σε cluster με 96 πυρήνες χρειάστηκαν συνολικά 30 ημέρες !

Ένα ακόμη πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για ανάλυση της κίνησης των ρευστών είναι το OpenFOAM. Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσομοίωση και σε αυτό το πρόγραμμα για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Συνήθως η χρησιμοποίηση 2 διαφορετικών προγραμμάτων για μία ανάλυση μας δίνει περισσότερη σιγουριά ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στον παρακάτω πίνακα υπολογίστηκε η αεροδυναμική ισχύς της Α/Γ και παρατηρείται πως οι διαφορές είναι πολύ μικρές. Το ίδιο ισχύει και στα μεγέθη πίεσης και ταχύτητας.

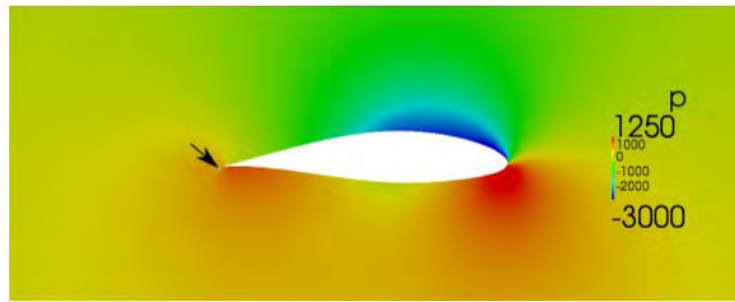
**Πίνακας 3.1** Αεροδυναμική ισχύς σε MW και ο συντελεστής αντίστασης στα δύο διαφορετικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν (Dose MasterThesis).

	<b>ANSYS CFX</b>	<b>OpenFOAM</b>
Calculated aerodynamic power	1.998 MW	1.981 MW
Power coefficient $C_P$	0.33	0.33

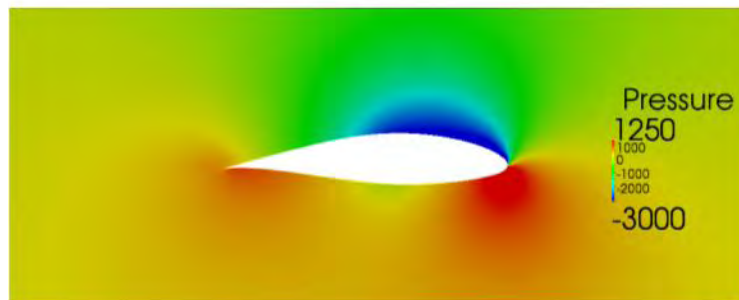
Ενδεικτικά τα παρακάτω Σχήματα δείχνουν την κατανομή του μεγέθους της πίεσης σε ένα πτερύγιο του ρότορα. Παρατηρούμε στα Σχήματα 4.16, 4.17 και 4.18 ότι οι τιμές στα δύο προγράμματα είναι περίπου ίδιες.



**Σχήμα 4.16** Κατανομή της πίεσης σε ένα πτερύγιο του ρότορα (Dose MasterThesis).

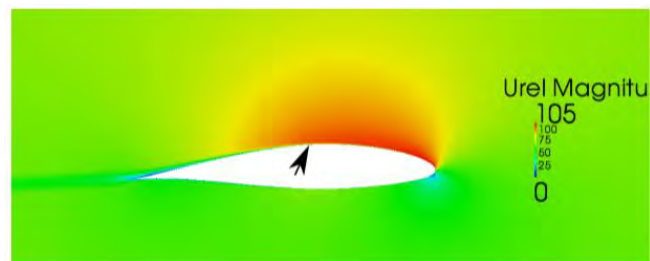


(a) OpenFOAM

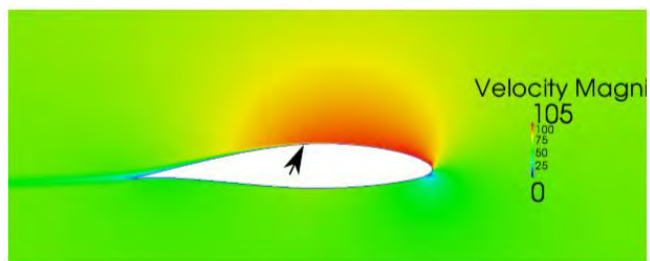


(b) ANSYS CFX 14.5

**Σχήμα 4.17** Κατανομή της πίεσης γύρω από ένα πτερύγιο του ρότορα (Dose MasterThesis).



(a) OpenFOAM



(b) ANSYS CFX 14.5

**Σχήμα 4.18** Κατανομή της ταχύτητας (κατά x,y,z) γύρω από ένα πτερύγιο του ρότορα (Dose MasterThesis).

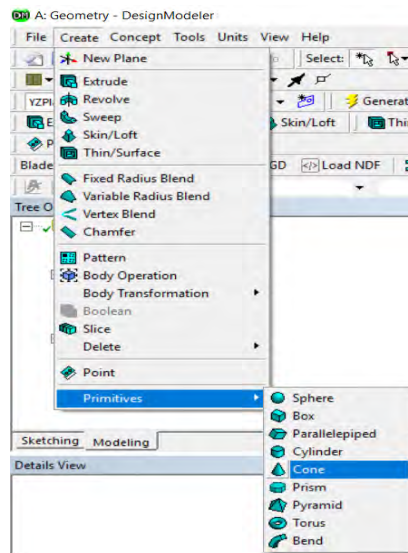


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS CFX

### 5.1 Σχεδιασμός πυλώνα A /Γ

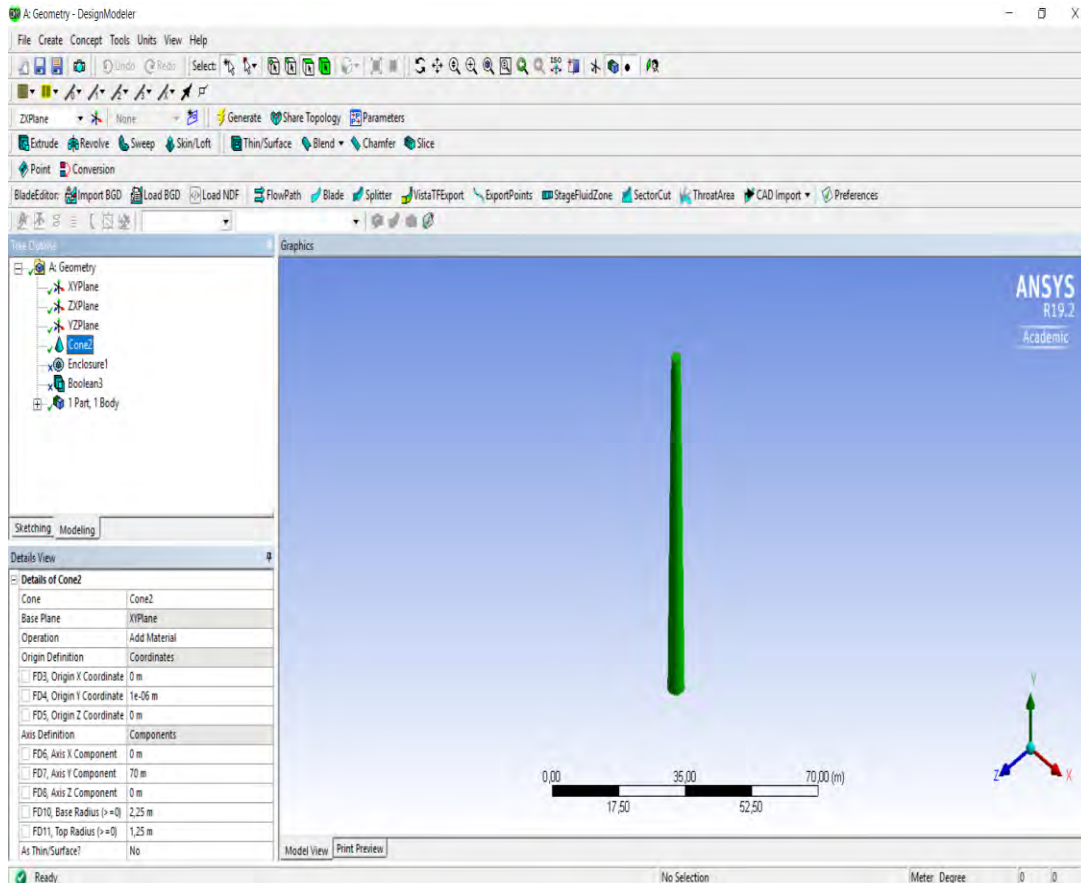
Το λογισμικό σχεδίασης Design Modeler προσφέρει στον χρήστη μία μεγάλη γκάμα κατάλληλων εργαλείων προκειμένου ο χρήστης να σχεδιάσει τα τρισδιάστατα προβλήματα με μεγαλύτερη ευκολία σε σχέση με τα κλασικά προγράμματα CAD. Στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε έναντι των άλλων προγραμμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σε πρώτη φάση σχεδιάστηκε ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας. Μέσω της εντολής Circle στο Sketching σχεδιάστηκε η διάμετρος βάσης. Έπειτα επιλέγοντας την εντολή Dimensions καθορίσαμε τις αποστάσεις που επιθυμούμε. Μέσω της εντολής Create έγινε η επιλογή του Primitives και αμέσως μετά το Cone.



Σχήμα 5.1: Δημιουργία κόλουρου κώνου.

Έτσι δημιουργείται ο στερεός κόλουρος κώνος που βλέπουμε παρακάτω. Στο αριστερό μέρος της οθόνης στο παράθυρο του Details View μπορεί να δει κανείς τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Στον άξονα y το ύψος του πυλώνα σχεδιάστηκε

στα 70 μέτρα από το έδαφος. Η διάμετρος βάσης είναι 4,5 μέτρα και η διάμετρος κορυφής στα 2,5 μέτρα. Τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά αντιστοιχούν σε μία τυπική ανεμογεννήτρια της τάξεως των 4 MW όπου μαζί με τα πτερύγια του ρότορα μπορεί να φτάσει στα 135 μέτρα.



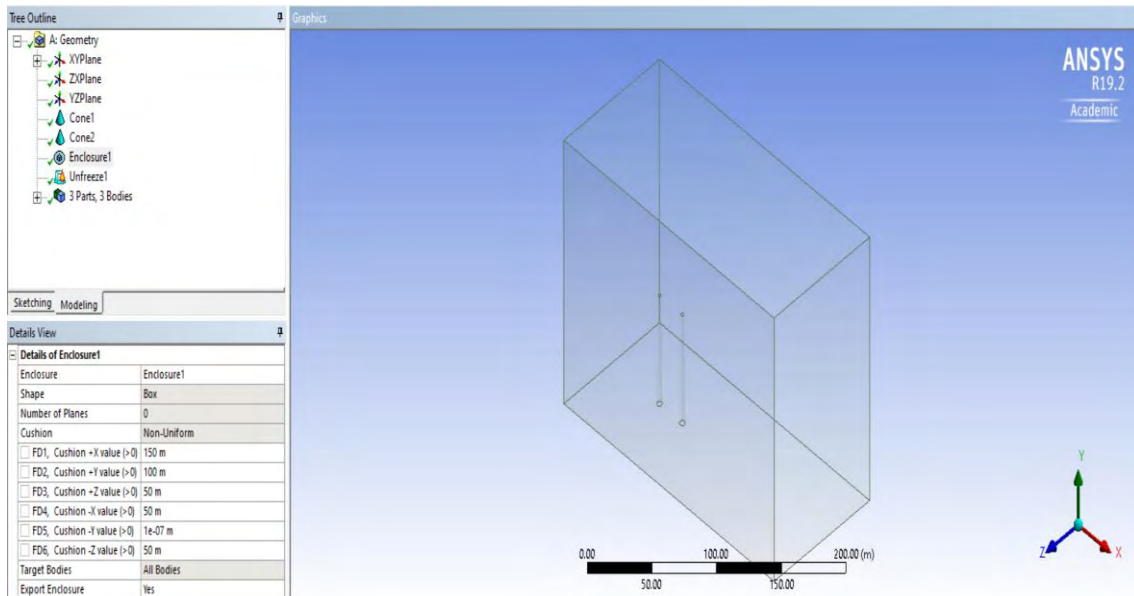
Σχήμα 5.2: Σχεδιασμός πυλώνα ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα DesignModeler.

## 5.2 Σχεδιασμός υπολογιστικού πεδίου (Υ.Π.)

Προκειμένου να διατυπωθεί το πρόβλημα που θέλει να προσομοιώσει ο χρήστης, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί το υπολογιστικό πεδίο του μοντέλου (enclosure). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα ορθογώνιο κουτί (box) όπου ορίστηκε στις τρεις διαστάσεις.

Στο Sketching Toolboxes του προγράμματος DesignModeler υπάρχει η εντολή Draw. Επιλέγοντάς τη εμφανίζονται μία σειρά εργαλείων όπου επιλέγουμε την επιλογή

Rectangle. Στην συνέχεια δημιουργείται ένα ορθογώνιο κουτί, όπου δίνουμε τις διαστάσεις που επιθυμούμε στις τρεις διαστάσεις. Κατά τον άξονα x, που επιλέγεται στην οριζόντια κατεύθυνση του ανέμου, η απόσταση μεταξύ των inlet/outlet και του πυλώνα σχεδιάστηκε στα 50 μέτρα. Η κατακόρυφη απόσταση (άξονας y), από το εξωτερικό περιβάλλον (opening) πάνω είναι 30 μέτρα. Ο πυλώνας από το έδαφος απέχει απειροστά μικρή απόσταση καθώς το πρόγραμμα δεν μπορεί να προχωρήσει στην διαδικασία επίλυσης εφόσον το ύψος πάρει μηδενική τιμή. Ο πυλώνας θεωρείται ότι είναι πακτωμένος και στερεωμένος στην βάση του και ότι δεν επιδρούν οι δυνάμεις του εδάφους. Τέλος στην εγκάρσια κατεύθυνση (άξονας z), το μήκος του υπολογιστικού πεδίου είναι 40 m. Πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι στον άξονα x και z οι αποστάσεις είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής.



Σχήμα 5.3: Σχεδιασμός υπολογιστικού πεδίου (enclosure) με την μορφή box.

### 5.3 Σχεδιασμός του κατάλληλου πλέγματος (Mesh)

Το συγκεκριμένο στάδιο του προγράμματος απαιτεί ιδιαίτερη αντιμετώπιση καθώς η χρησιμοποίηση του επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από ένα σωστά δομημένο πλέγμα. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πλέγματα για την επίλυση του συγκεκριμένου μοντέλου της προσομοίωσης

και στα δύο προφίλ ταχύτητας που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν θα πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 5 % προκειμένου η λύση να είναι ανεξάρτητη του πλέγματος. Υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα που δέχεται ο πύργος στην επιφάνεια του, έτσι όπως ασκείται ο άνεμος από την είσοδο του υπολογιστικού πεδίου. Η ανάλυση της παρούσας εργασίας επιλύθηκε για τρία διαφορετικά πλέγματα για το μοντέλο k-ε και k-ω SST.

**Πίνακας 5.1** Στατιστικά στοιχεία για τα διάφορα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο k-ε.

Πλέγμα	Ελαχ. Μέγεθος στοιχείου (m)	Μεγ. Μέγεθος στοιχείου (m)	Αριθμός κόμβων	Αριθμός τετράεδρων στοιχείων
Πλέγμα 1	6.4614 $\cdot 10^{-8}$	0.999958	149863	648702
Πλέγμα 2	7.5701 $\cdot 10^{-8}$	0.999993	123399	500543
Πλέγμα 3	1.2609 $\cdot 10^{-9}$	0.999998	126547	686211

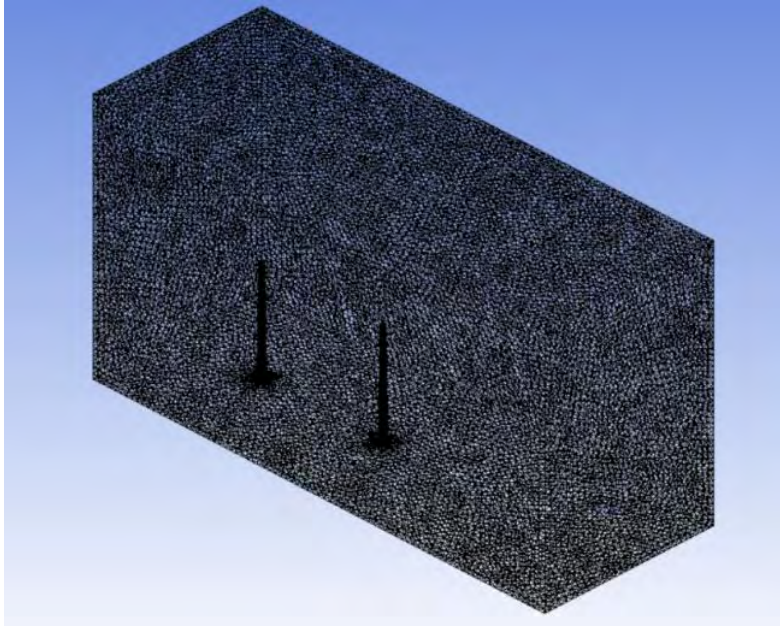
Από τα παραπάνω πλέγματα έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το πλέγμα που είναι πιο πυκνό.

Παρακάτω παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας δεν διαφέρουν περισσότερο από 5 %.

**Πίνακας 5.2** Μέση ταχύτητα στον πυλώνα από την πλευρά που ασκείται ο άνεμος για το μοντέλο k-ε.

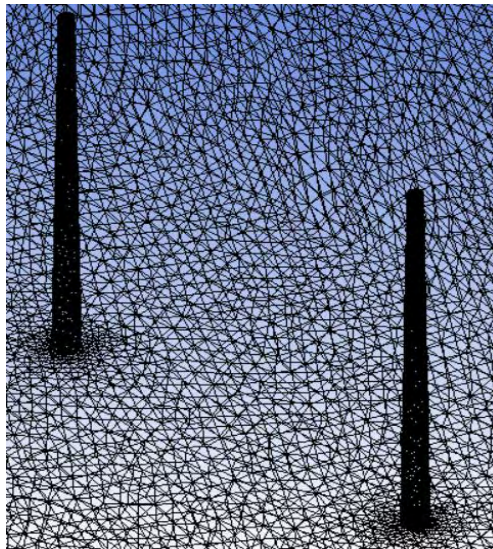
Πλέγμα	Μέση ταχύτητα (m/s)	% διαφορά
Πλέγμα 1	4.458	
Πλέγμα 2	4.488	0.67%
Πλέγμα 3	4.528	1.57%

Το πλέγμα στον πυλώνα είναι πιο πυκνό σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο του υπολογιστικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 5.3:** Πλέγμα υπολογιστικού πεδίου.

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στους πυλώνες των Α/Γ είναι πιο πυκνό σε σχέση με το υπόλοιπο Υ.Π.



**Σχήμα 5.4:** Πλέγμα των 2 Α/Γ.

➤ Ομοίως, και για το μοντέλο  $k - \omega$  SST, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πλέγμα. Αυτό έγινε με σκοπό να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων, έχοντας ακριβώς ίδια γεωμετρία, ίδιο πλέγμα και ίδιες οριακές συνθήκες.

## 5.4 Φυσικές ιδιότητες του ρευστού

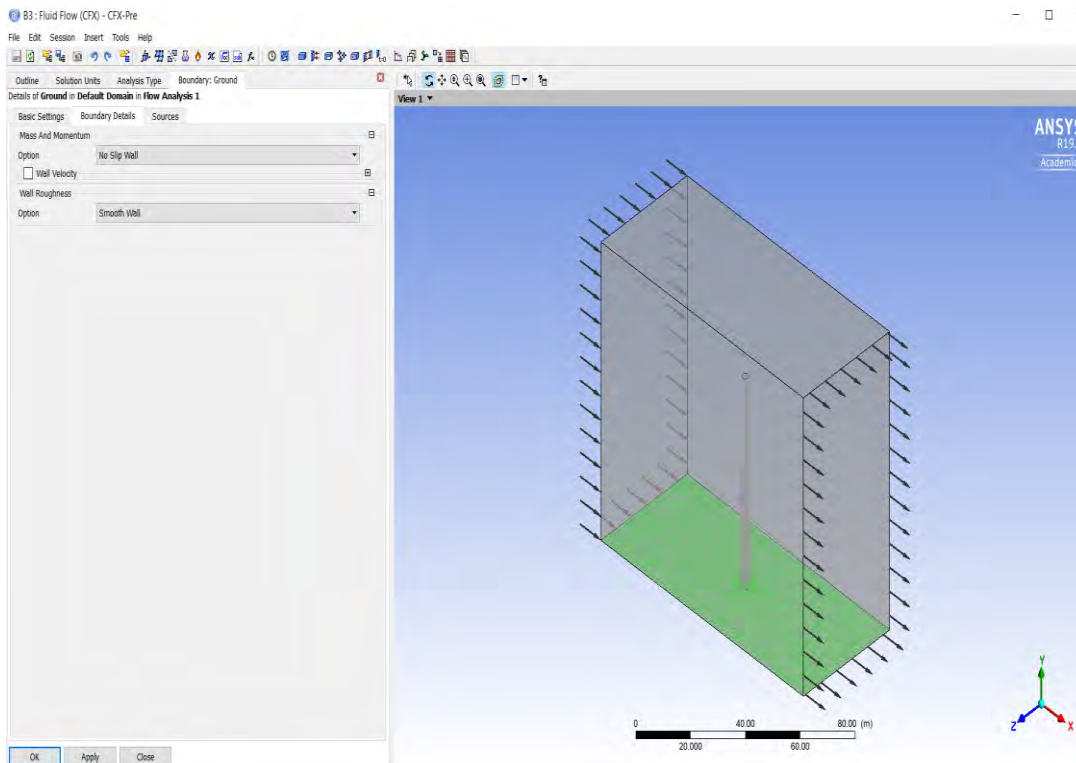
Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη δύο προφίλ ταχυτήτων του ομοιόμορφου και του εκθετικού. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να αναφερθούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγινε η ανάλυση.

- Η θερμοκρασία σταθερή και ίση με 25 βαθμούς Κελσίου σε όλο το υπολογιστικό πεδίο
- Η ατμοσφαιρική πίεση ίση με 1 ατμόσφαιρα
- Η πυκνότητα ίση με  $1.185 \text{ kg/m}^3$
- Το κινηματικό ιξώδες ίσο με  $1.831 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$

Η διαταραχή του ανέμου (turbulence) ορίστηκε ως μέτρια με ένταση 5 % . Τα μοντέλα τυρβώδους ροής υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιήθηκαν, είναι το μοντέλο k-ε και k-ω SST.

## 5.5 Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου προσομοίωσης

- Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας ορίστηκε ως πακτωμένος και ακλόνητος στο έδαφος. Η συνοριακή συνθήκη που εισήχθη στο πρόγραμμα είναι η συνθήκη μη ολίσθησης (No Slip Wall).
- Στην επιφάνεια εδάφους πάνω στην οποία στερεώνεται ο πυλώνας εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη τύπου Wall (τοιχώμα). Στην παρούσα εργασία το έδαφος θεωρήθηκε ως λείο χωρίς να παρουσιάζει κάποια τραχύτητα. Στο Boundary Details ως Option (επιλογή) επιλέγουμε συνθήκη μη ολίσθησης (No Slip Wall) και ως τραχύτητα εδάφους (Wall Roughness) γίνεται η επιλογή του λείου τοιχώματος (Smooth Wall). Στον συγκεκριμένο τύπο οριακής συνθήκης μπορούν να εφαρμοστούν οι δυνάμεις του εδάφους που ασκούνται στον πυλώνα της Α/Γ, ωστόσο δεν θα γίνει έλεγχος της αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, παρά μόνον ανέμου-κατασκευής γι' αυτό και δεν εφαρμόστηκε κάποια δύναμη στο δεδομένο μοντέλο.



Σχήμα 5.5: Ορισμός συνοριακής συνθήκης στο έδαφος.

- Καθώς το μοντέλο προσομοίωσης βρίσκεται σε έναν περιβάλλοντα χώρο αεροσύραγγας περιμετρικά του πυλώνα υπάρχουν Walls (τοιχώματα). Στο συγκεκριμένο τύπο οριακής συνθήκης στα περισσότερα φυσικά προβλήματα εφαρμόζονται Walls ή Openings. Στο συγκεκριμένο μοντέλο στο Boundary Details γίνεται η επιλογή του Free Slip Wall (συνθήκη ελεύθερης ολίσθησης).
- Τέλος, ως Outlet ορίστηκε μηδενική στατική πίεση καθώς στο πρόβλημα που γίνεται η ανάλυση δεν αναμένεται κάποια εκροή (outflow).

## 5.6 Εκθετικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του Υ.Π.

Για την ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων του μοντέλου της παρούσας εργασίας αρχικά ορίστηκε ως Inlet ένα εκθετικό προφίλ ταχύτητας της τάξεως των 7 m/s. Το συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας έχει σημαντικό ενδιαφέρον στην μελέτη των φορτίων του ανέμου καθώς στα μεγαλύτερα ύψη η τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι

μεγαλύτερη. Στην βιβλιογραφία ο εκθετικός τύπος της ταχύτητας που μεταβάλλεται με το ύψος είναι ο παρακάτω :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^{1/a} \quad (5.1)$$

Όπου  $V_1$  και  $V_2$  η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας στα ύψη  $z_1$  και  $z_2$  αντίστοιχα

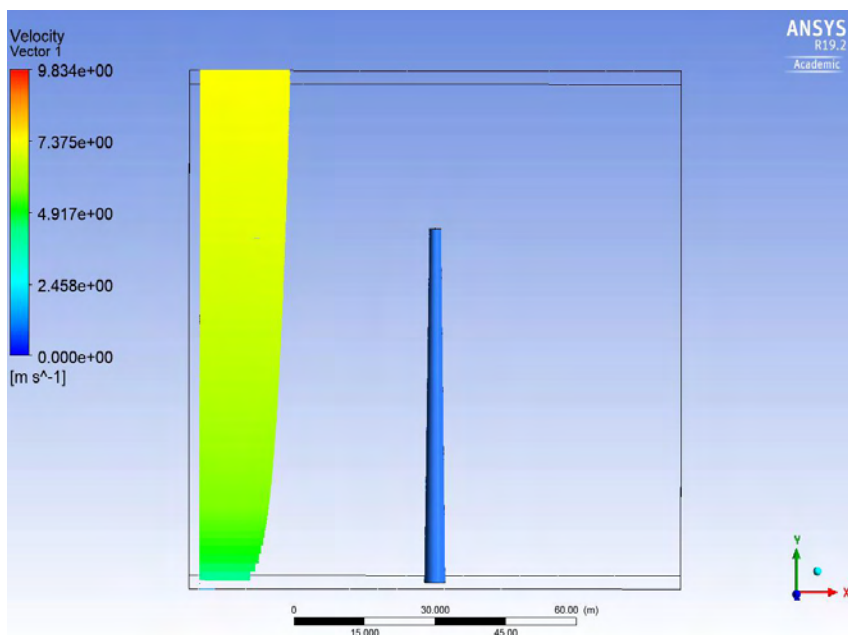
Ο εκθέτης στην σχέση 5.1 έχει οριστεί ως  $a = 0.1429$  (Ανεμοκινητήρες Γ.Μπεργελές).

Ως  $y$  ορίζεται ο κατακόρυφος άξονας  $y$

Στην προσομοίωση της παρούσας εργασίας ως  $V_2$  ορίστηκε η τιμή των 7 m/s και ως  $H$  το ύψος του πυλώνα του μοντέλου το οποίο είναι 70m. Κατά συνέπεια το προφίλ της ταχύτητας που ασκείται στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας παίρνει την εξής μορφή :

$$V_{\text{profile}} = 7 \cdot \left( \frac{y}{70} \right)^{0.1429} \quad (5.2)$$

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στο μέγιστο ύψος του πυλώνα το οποίο είναι 70 μέτρα θα ασκείται η ταχύτητα των 7 m/s. Στο οριακό στρώμα του εδάφους η ταχύτητα του ανέμου θα είναι μηδέν και όσο μεγαλώνει το ύψος θα μεγαλώνει και η ταχύτητα του ανέμου βάση του παραπάνω τύπου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το εκθετικό προφίλ της ταχύτητας στο μοντέλο της προσομοίωσης.



**Σχήμα 5.6:** Εκθετικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του Υ.Π.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

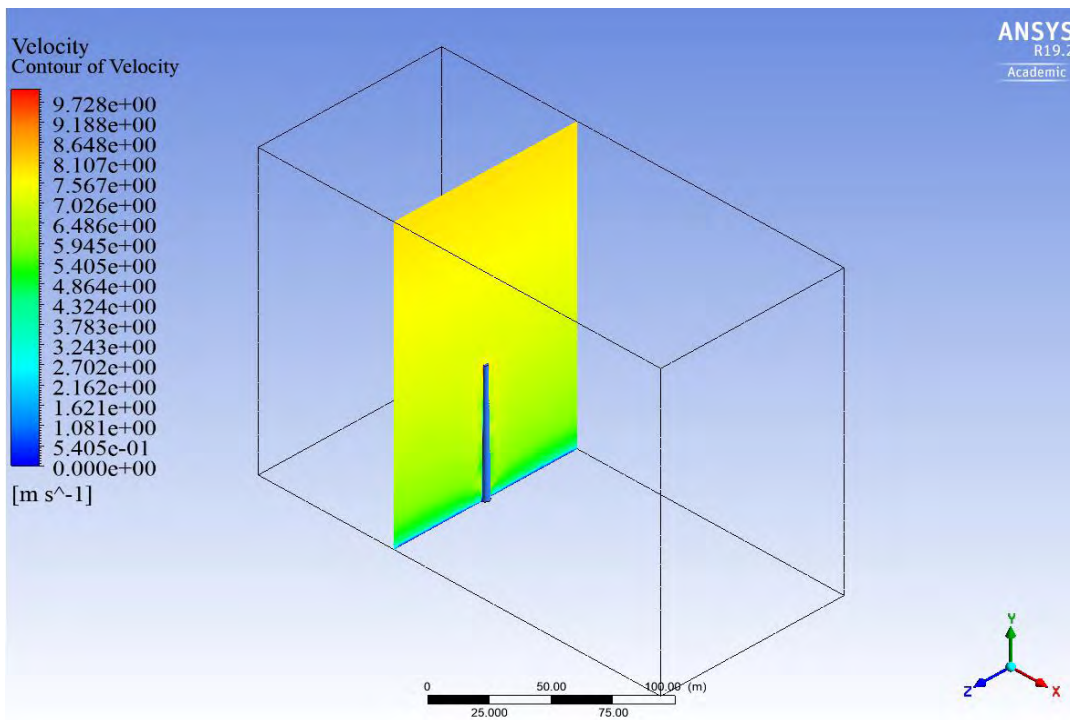
#### 6.1 Σύγκριση μοντέλων k-ε και k-ω SST για $D = 25$ m

Αρχικά θα γίνει σύγκριση διάφορων μεγεθών στην περίπτωση που ο ένας πυλώνας απέχει με τον άλλον 25 μέτρα. Μεγέθη που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η ταχύτητα, η ολική πίεση, οι γραμμές ροής της ταχύτητας, η στροβιλότητα, η κινητική ενέργεια της τύρβης (k) και ο ρυθμός καταστροφής της κινητικής ενέργειας ( $\epsilon$ ).

Μέσω της εντολής Contour υπολογίστηκαν οι τιμές της ταχύτητας σε διάφορα επίπεδα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

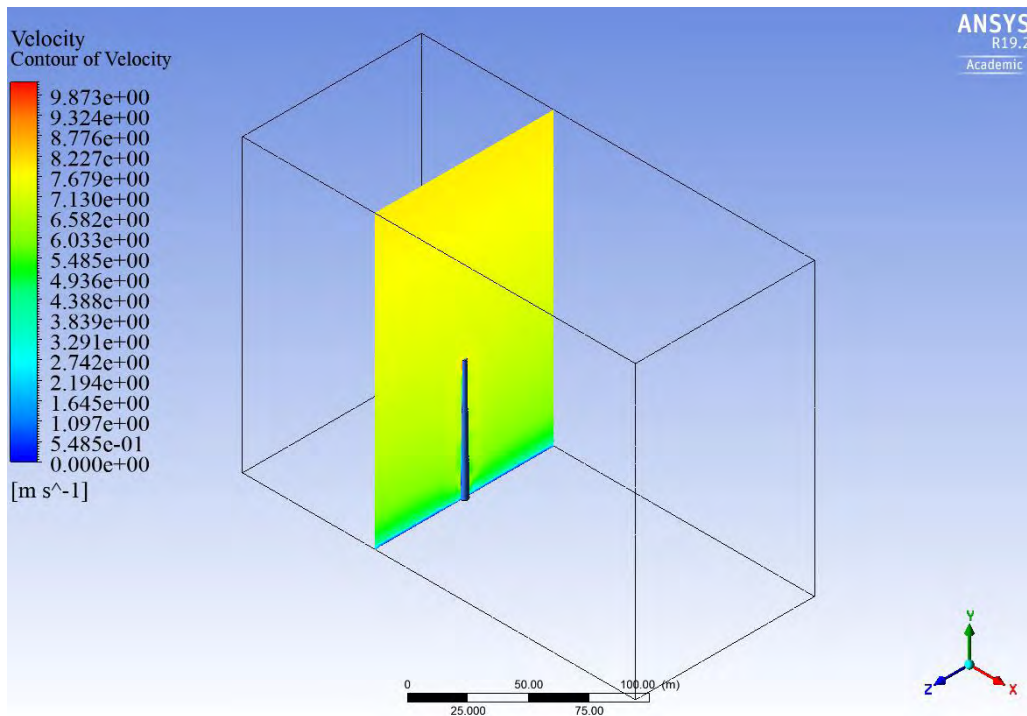
- **Plane  $x = 25$  m (k-ε)**

Στο παρακάτω Σχήμα φαίνονται οι τιμές της ταχύτητας στον δεύτερο πυλώνα σε επίπεδο στον άξονα συμμετρίας του. Στην συγκεκριμένη επιφάνεια παρατηρείται πως εμφανίζονται οι μέγιστες ταχύτητες της ροής του ανέμου



Σχήμα 6.1: Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ε).

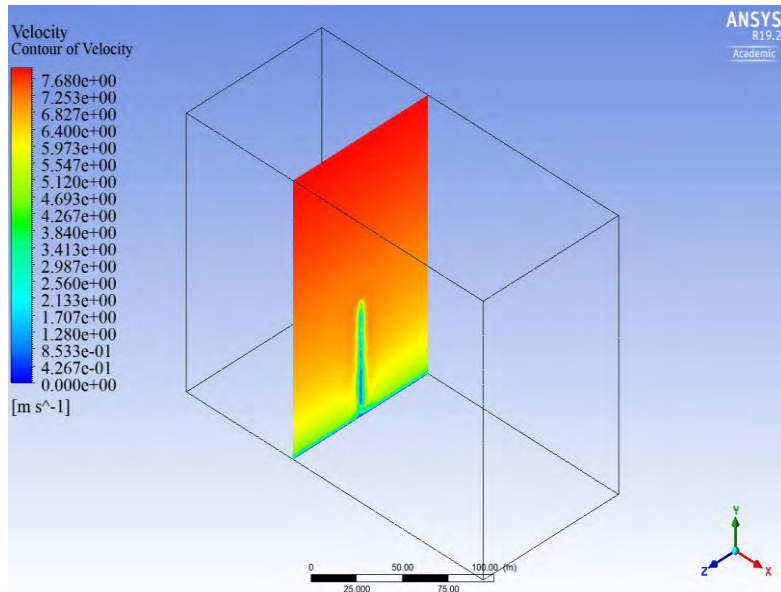
- **Plane x = 25 m (k- $\omega$ , SST)**



Σχήμα 6.2: Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k- $\omega$ ).

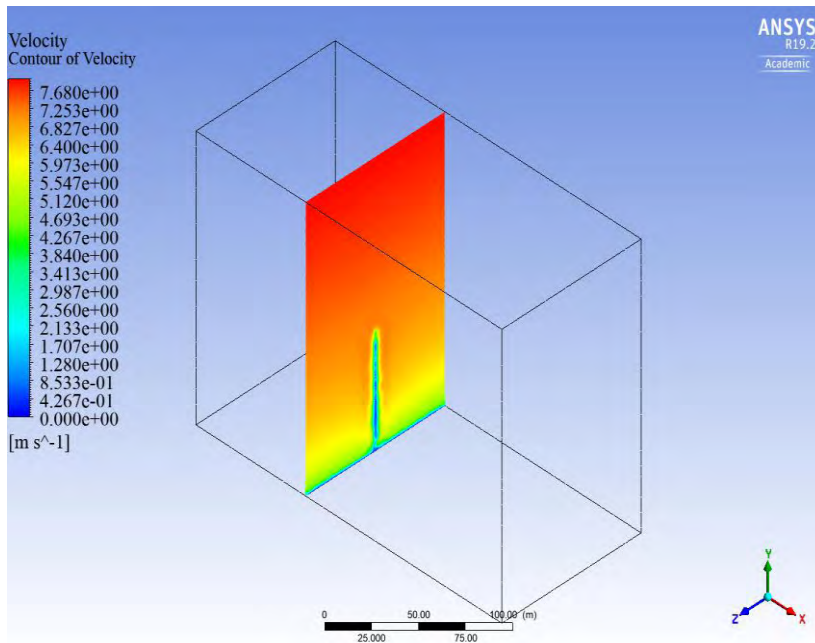
- **Plane x = 30 m (k- $\epsilon$ )**

Οι ισοταχείς (καμπύλες ίσης ταχύτητας) που υπάρχουν στην επιφάνεια του κατακόρυφου επιπέδου  $x = 30$  m, είναι λίγο μετά την αλληλεπίδραση του ανέμου με την κατασκευή. Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ακριβώς μετά τον πυλώνα διότι εμφανίζονται πολύ μικρές ταχύτητες λόγω των στροβίλων που δημιουργούνται στον ολόκο της ανεμογεννήτριας. Οι ταχύτητες της παρακάτω εικόνας αφορούν την επιφάνεια του επιπέδου που βρίσκεται 5 μέτρα μετά το κέντρο της βάσης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται πως στον ολόκο εμφανίζονται ταχύτητες από 0 m/s έως 3 m/s.



Σχήμα 6.3: Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ε).

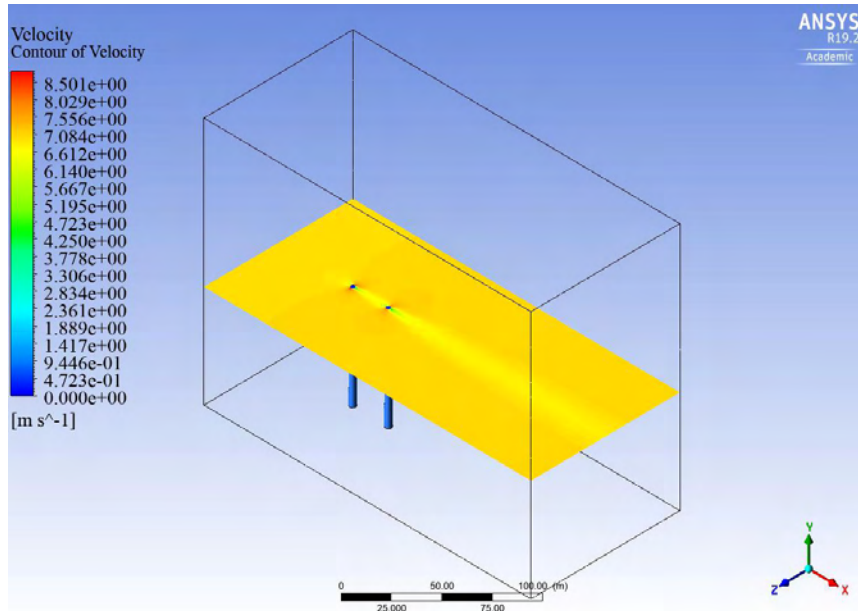
- **Plane x = 30 m (k-ω, SST)**



Σχήμα 6.4: Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ω).

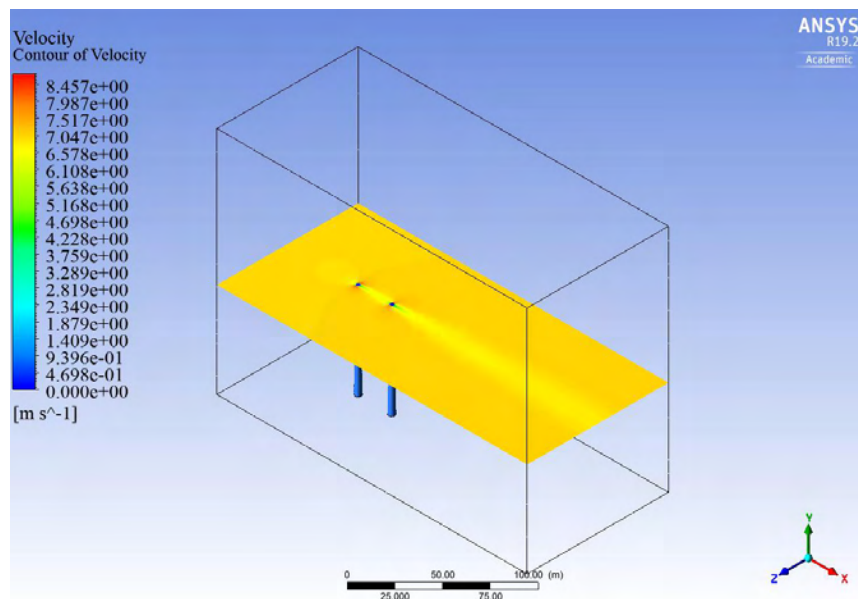
- **Plane y = 70 m (k-ε)**

Στο παρακάτω Σχήμα φαίνονται οι ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των Α/Γ. Στην επιφάνεια που βρίσκεται στην κορυφή του πυλώνα φαίνεται πως η ταχύτητα στον ολκό (wake) του, επηρεάζεται σε μικρό βαθμό λόγω της μικρής διαμέτρου. Σε μικρότερα ύψη λόγω μεγαλύτερης διαμέτρου η ταχύτητα επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό.



Σχήμα 6.5: Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k-ε).

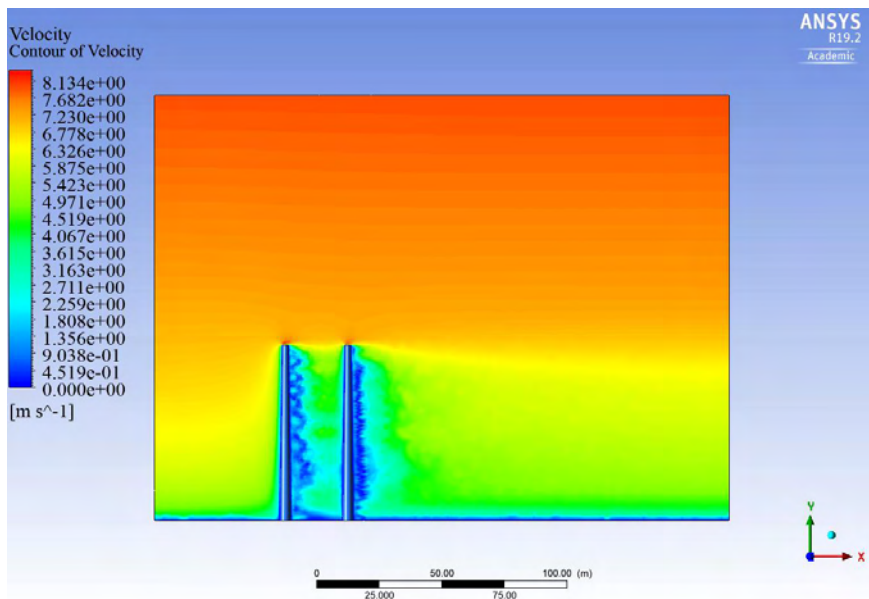
- **Plane y = 70 m (k-ω, SST)**



Σχήμα 6.6: Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k-ω).

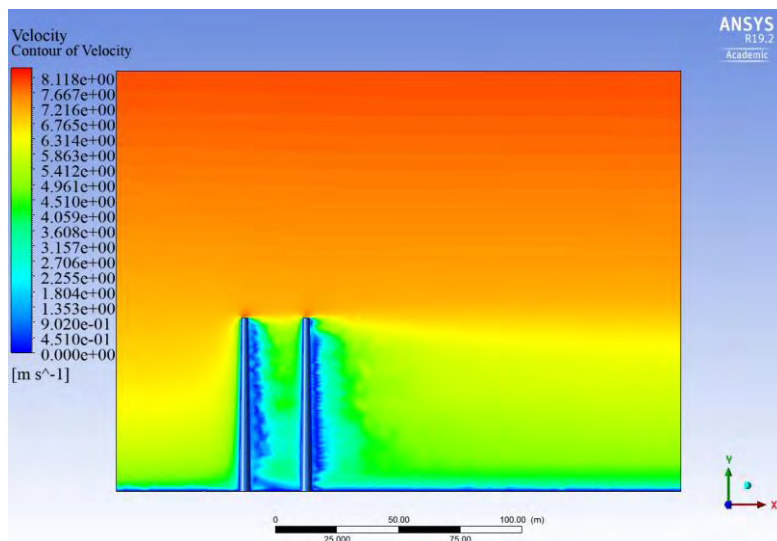
### Plane $z = 0$ (k- $\epsilon$ )

Η συγκεκριμένη επιφάνεια του επιπέδου  $z = 0$  m απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς δείχνει τις μηδενικές και τις πολύ μικρές ταχύτητες που δημιουργούνται λόγω των στροβιλισμών στον ολκό. Ο μεγάλος αριθμός Reynolds του προβλήματος δημιουργεί οριακά στρώματα τα οποία αποκολλούνται από την στερεά επιφάνεια του πυλώνα με συνέπεια της ανάπτυξη των στροβιλισμών.



Σχήμα 6.7: Ισοταχείς στο επίπεδο  $z = 0$  m (k- $\epsilon$ ) .

### Plane $z = 0$ (k- $\omega$ , SST)



Σχήμα 6.8: Ισοταχείς στο επίπεδο  $z = 0$  m (k- $\omega$ ).

- Κατανομή της ολικής πίεσης (πίεσης ανακοπής στην παράπλευρη επιφάνεια του πυλώνα), (Total Pressure),

Η ολική πίεση (total pressure) σε τυχόν σημείο του πεδίου ροής ορίζεται ως

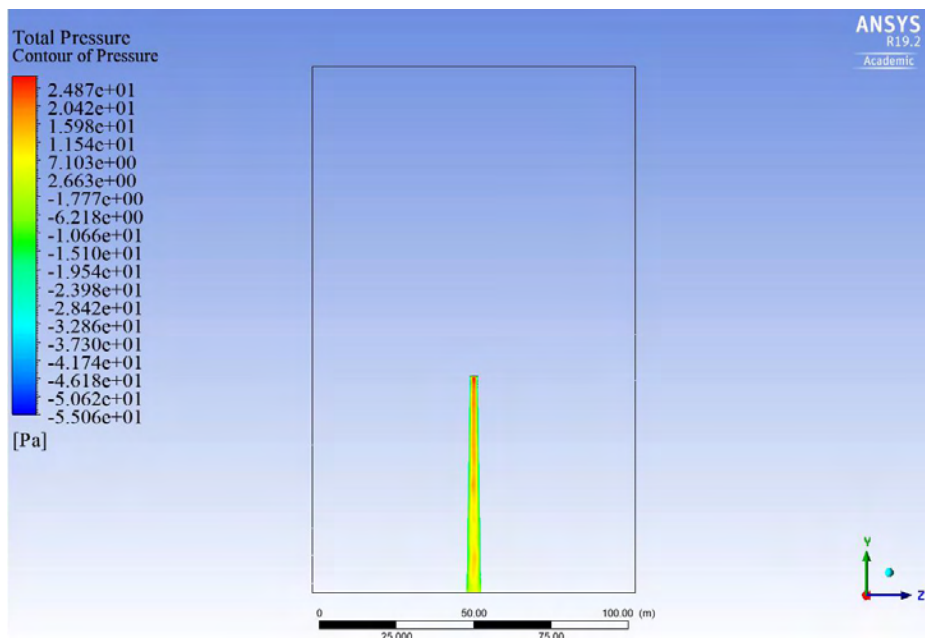
$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6.1)$$

Εναλλακτικά, η ολική πίεση αναφέρεται στην ελληνική βιβλιογραφία και ως πίεση ανακοπής.

Υπολογίστηκε το μέγεθος της ολικής πίεσης στην επιφάνεια της δεύτερης Α/Γ, έτσι όπως φαίνεται από την είσοδο του Υ.Π. Το μέγεθος αυτό αποδεικνύει το πόσο σημαντική είναι η χωροθέτηση των Α/Γ και φαίνεται ο τρόπος όπου η πρώτη Α/Γ επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την λειτουργία της δεύτερης.

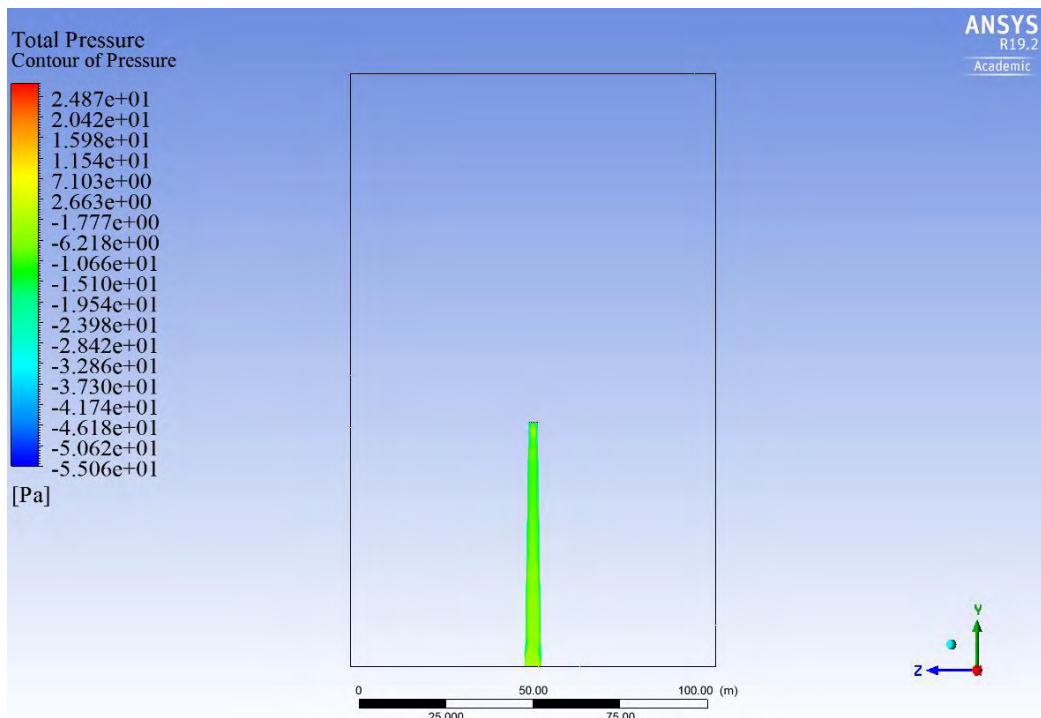
### Για το k – ε model

Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή της πίεσης εμφανίζεται στο μέγιστο ύψος και είναι ίση με 27,64 Pa.



**Σχήμα 6.9:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (Inlet) (k-ε).

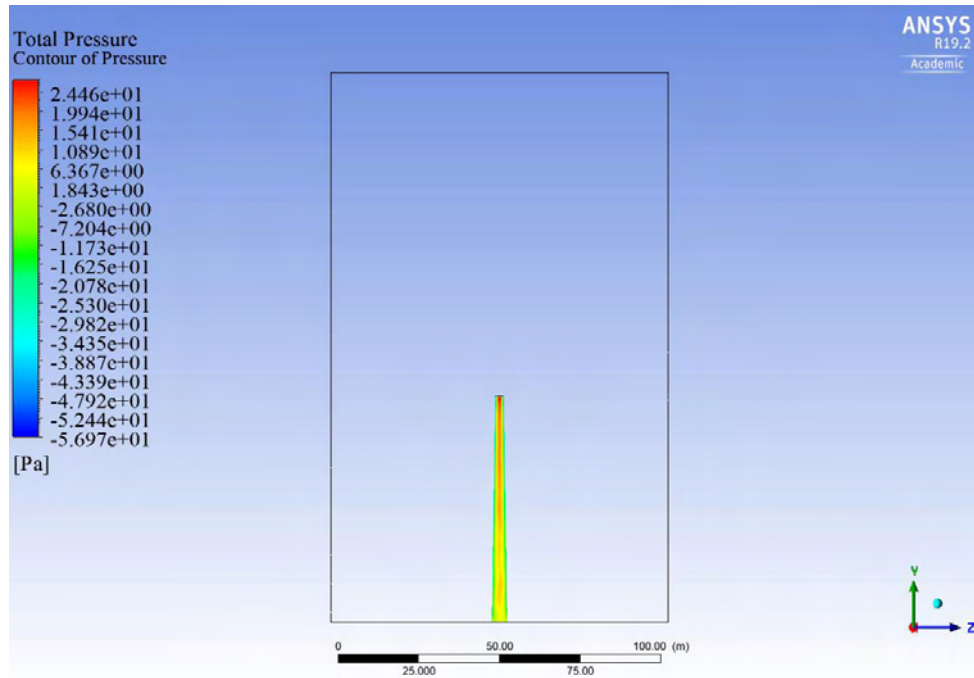
Στο πίσω μέρος του πυλώνα (υπήνεμος) αναμένονται πολύ μικρές τιμές ολικής πίεσης λόγω των στροβιλισμών που έχουν δημιουργηθεί. Παρατηρούμε ότι η μικρότερη τιμή της πίεσης είναι ίση με  $-10,66 \text{ Pa}$ . Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι πλευρικά, στην επιφάνεια της Α/Γ, εμφανίζονται ακόμη μικρότερης τιμές με την μικρότερη να ισούται με  $-55,06 \text{ Pa}$ .



**Σχήμα 6.10:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (Outlet) (k-ε).

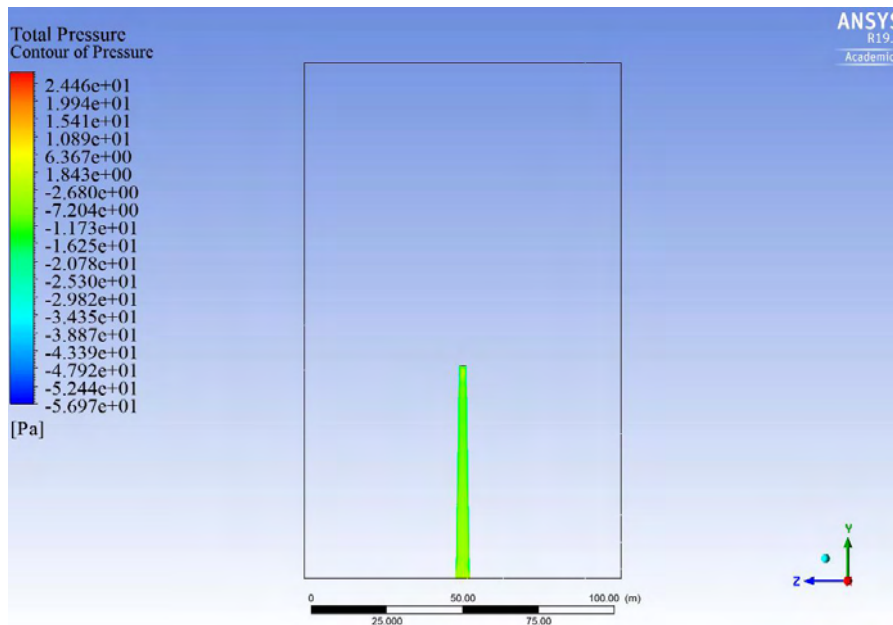
### Για το $k - \omega$ SST model

Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή της πίεσης εμφανίζεται στο μέγιστο ύψος και είναι ίση με  $27,29 \text{ Pa}$ . Οι τιμή αυτή είναι αρκετά κοντά με το μοντέλο τύρβης k-ε όπου ήταν ίση με  $27,64 \text{ Pa}$ .



**Σχήμα 6.11:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (Inlet) (k-ω).

Παρατηρούμε ότι η μικρότερη τιμή της πίεσης είναι κατά προσέγγιση ίση με  $-10,97 \text{ Pa}$ . Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι πλευρικά, στην επιφάνεια της Α/Γ, εμφανίζονται ακόμη μικρότερης τιμές με την μικρότερη να ισούται με  $-56,96 \text{ Pa}$ . Και εδώ παρατηρούμε ότι οι τιμές στα δύο μοντέλα είναι αρκετά κοντά.

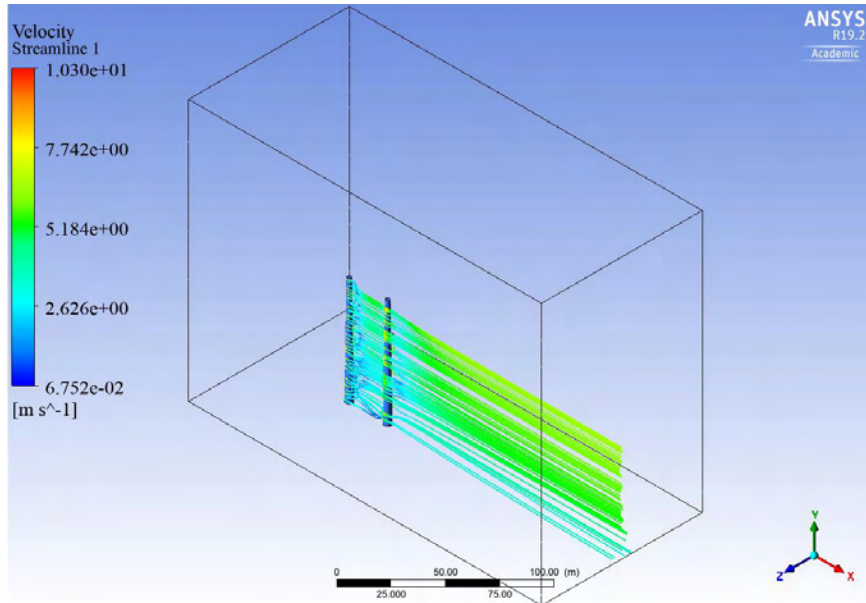


**Σχήμα 6.12:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (Outlet) (k-ω).



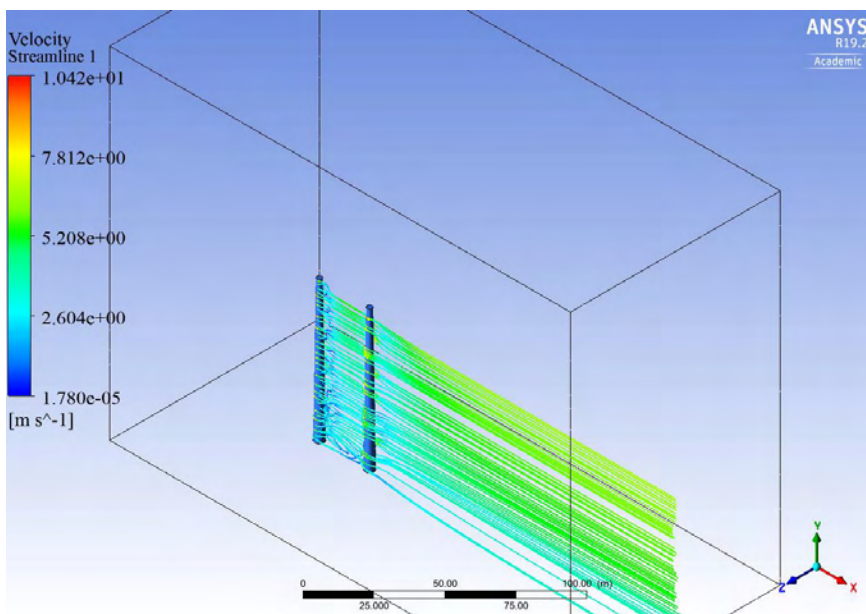
- **Γραμμές ροής ταχύτητας (k-ε)**

Στην παρακάτω εικόνα οπτικοποιούνται οι γραμμές ροής και οι στροβιλισμοί που δημιουργούνται μετά την αποκόλληση της ροής.



**Σχήμα 6.13:** Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k-ε).

- **Γραμμές ροής ταχύτητας (k-ω, SST)**

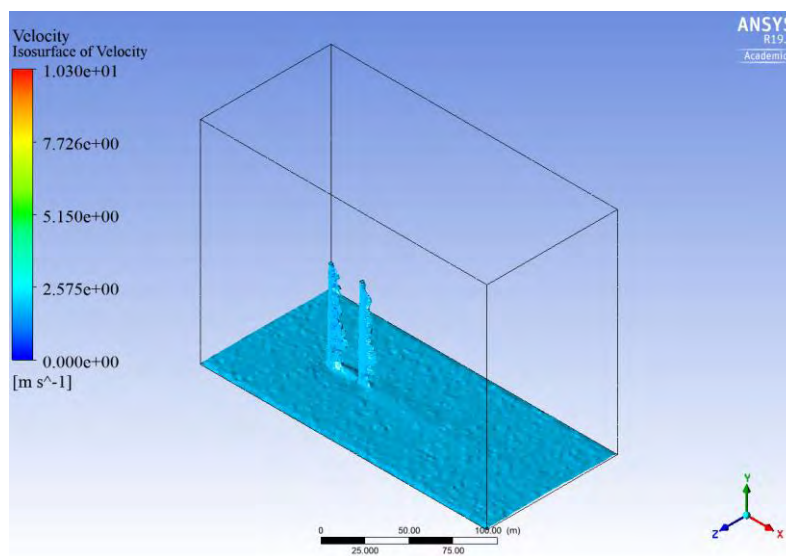


**Σχήμα 6.14:** Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k-ω).

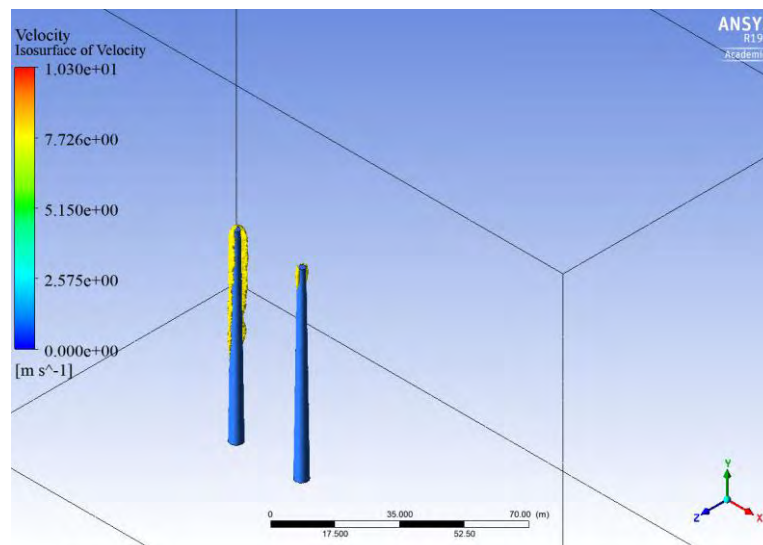
- **Επιφάνειες ίσης ταχύτητας (κ-ε)**

Μέσω της εντολής Isosurface γίνεται η επιλογή να εμφανιστούν όπου υπάρχουν επιφάνειες ίσης ταχύτητας. Επίσης, διακρίνεται που αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας και που οι μικρότερες στο υπολογιστικό πεδίο. Ενδεικτικά παρακάτω για τιμές της ταχύτητας 2 m/s και 8 m/s.

Στο παρακάτω Σχήμα παρατηρούμε ότι οι πολύ μικρές ταχύτητες εμφανίζονται πίσω από τον πυλώνα, όπου υπάρχει το πολύπλοκο πεδίο ροής λόγω των στροβιλισμών που δημιουργούνται.

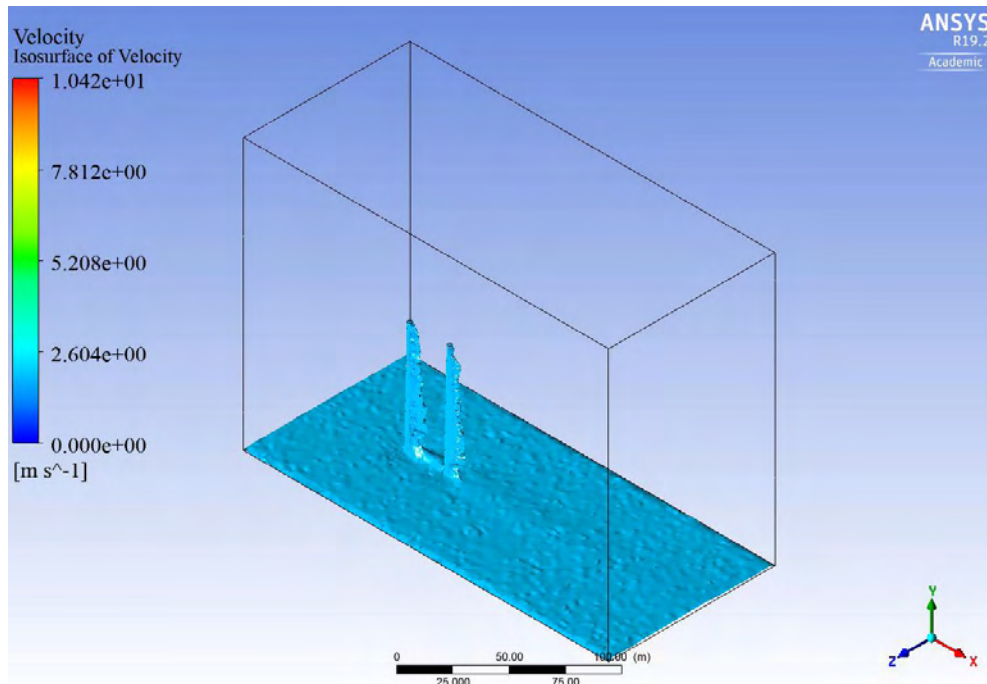


**Σχήμα 6.15:** Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (κ-ε).

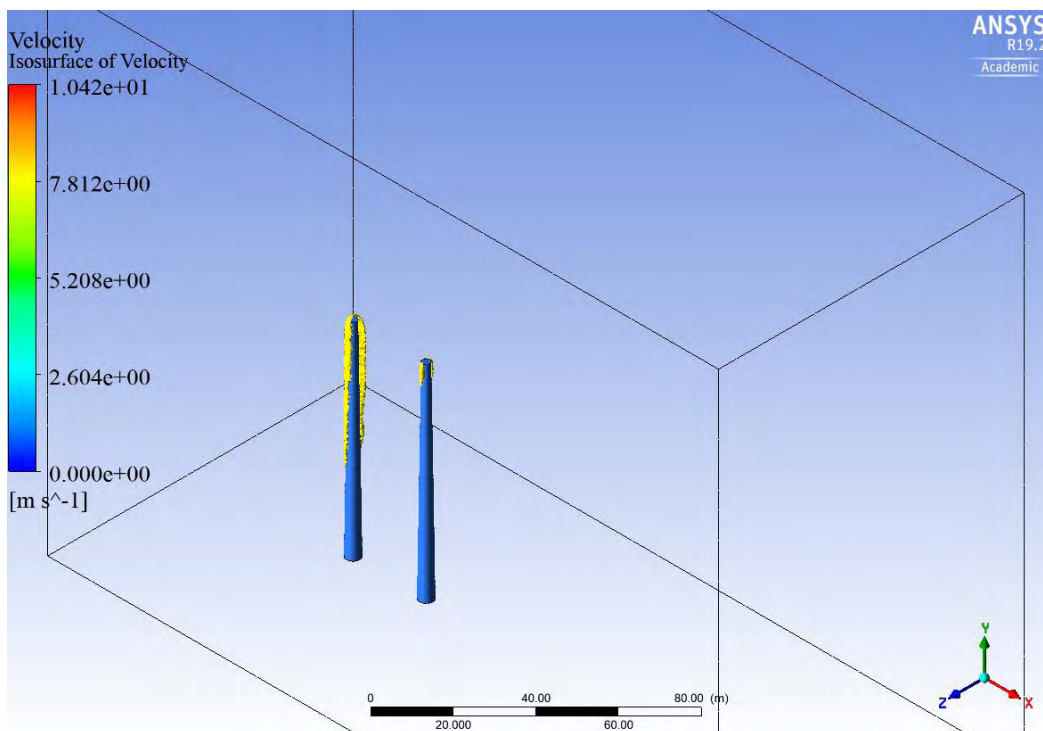


**Σχήμα 6.16:** Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (κ-ε).

- **Επιφάνειες ίσης ταχύτητας (k- $\omega$ , SST)**



**Σχήμα 6.17:** Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k- $\omega$ ).



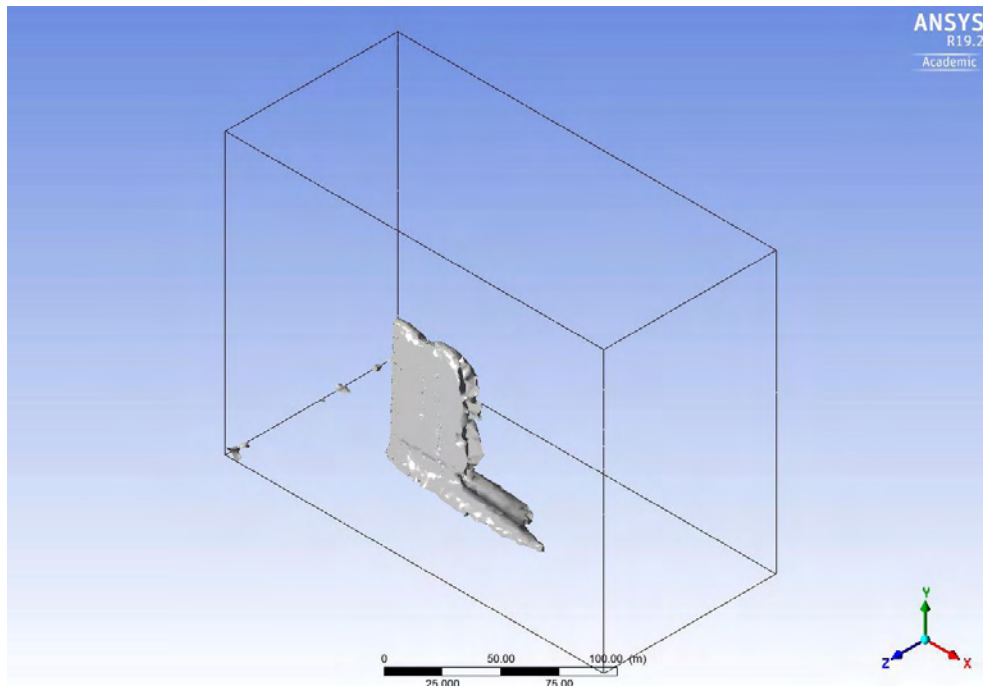
**Σχήμα 6.18:** Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k- $\omega$ ).

- **Στροβιλότητα (Vorticity)**

Η στροβιλότητα είναι η κάμψη (curl) του πεδίου ταχύτητας και ένα μέτρο της τοπικής περιστροφής του ρευστού, δηλαδή η τάση ενός σωματιδίου του ρευστού (fluid particle) να περιστρέφεται ή να κυκλοφορεί γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο. Εάν η στροβιλότητα δεν είναι μηδέν τότε η ροή ονομάζεται περιστροφική ενώ αν η τιμή της στροβιλότητας είναι μηδενική τότε η ροή είναι μη περιστροφική (irrotational). Κάθε γραμμή του στροβίλου αντιπροσωπεύει τον άξονα περιστροφής σωματιδίων του ρευστού. Η στροβιλότητα αναπτύσσεται όταν οι διαμητικές τάσεις του ρευστού είναι χαμηλές καθώς θα υπάρξει μείωση στο διάνυσμα κλίσης της ταχύτητας (velocity gradient) και λόγω αυτής θα δημιουργηθούν στροβιλισμοί στην κυκλοφορία στην ροή του ρευστού.

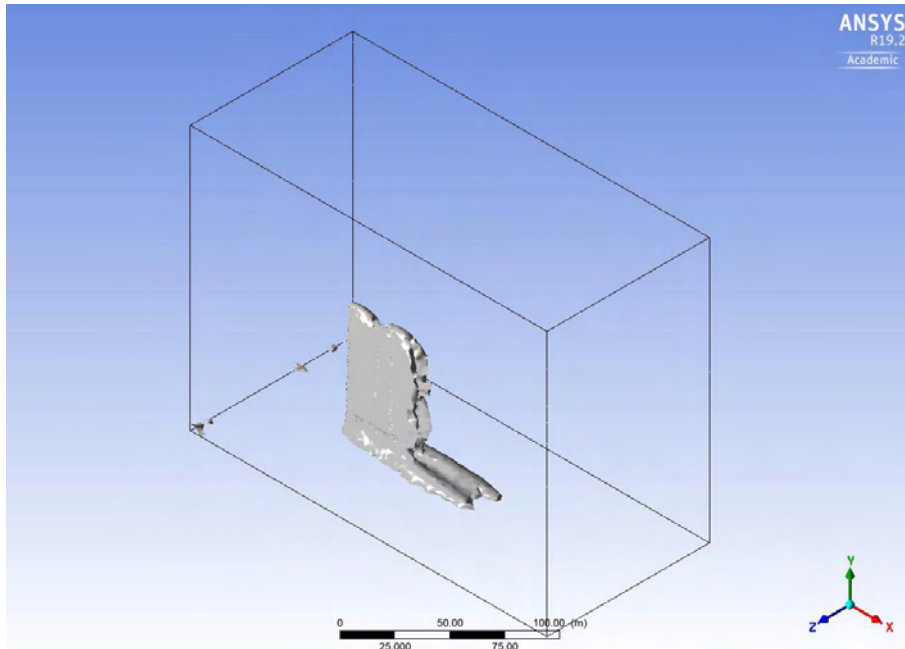
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται μετά τον πυλώνα (ολκός) λόγω αποκόλλησης της ροής και δημιουργίας μεγάλων δυνάμεων του ιξώδους. Με την εντολή Vortex Core Region οπτικοποιούνται στο πρόγραμμα CFD-Post σε διάφορα μεγέθη (levels).

### **Στροβιλότητα μεγέθους 0.01 (Vorticity Level 0.01), (k-ε)**



**Σχήμα 6.19:** Στροβιλότητα (Vorticity)  $0.2806 \text{ s}^{-1}$  (k-ε).

## Στροβιλότητα μεγέθους 0.01 (Vorticity Level 0.01), (k- $\omega$ SST)



Σχήμα 6.20: Στροβιλότητα (Vorticity)  $0.2804 \text{ s}^{-1}$  (k- $\omega$ ).

- **Κινητική ενέργεια της τύρβης (turbulence kinetic energy), (k)**

Η συνηθέστερη μεθοδολογία που ακολουθείται σήμερα στη μελέτη ασυμπίεστων τυρβωδών ροών βασίζεται στη χρήση χρονικά μέσων ποσοτήτων. Στη μεθοδολογία αυτή, η στιγμιαία ταχύτητα  $(u, v, w)$  σε τυχόν σημείο της τυρβώδους ροής αναλύεται στο άθροισμα της χρονικά μέσης τιμής της ταχύτητας  $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$  και στη διακύμανση της ταχύτητας με συνιστώσες  $(u', v', w')$ . Για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και την πίεση γράφουμε :

$$u = \bar{u} + u' , v = \bar{v} + v' , w = \bar{w} + w' , p = \bar{p} + p' \quad (6.2)$$

Για ροές με συνοριακές συνθήκες ανεξάρτητες του χρόνου (όπως στο παρόν μοντέλο μελέτης) οι ποσότητες  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$  και  $p$  είναι επίσης ανεξάρτητες του χρόνου.

Η χρονικά μέση κινητική ενέργεια της τύρβης ανά μονάδα μάζας σε τυχόν σημείο ενός τυρβώδους πεδίου ροής ισούται με :

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (\text{Μηχ.Ρευστών, Α.Λιακόπουλος, Β' Έκδοση}) \quad (6.3)$$

Οι μεγαλύτερες τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης που ανταπτύσσονται παρατηρούνται στον ολκό (wake).

**Πίνακας 6.1** Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος k.

Μοντέλο	Μικ.Τιμή (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Μεγ.Τιμή (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
k-ε	1,48 · 10 <sup>-21</sup>	2,234
k-ω SST	1,54 · 10 <sup>-21</sup>	2,469

- **Ρυθμός καταστροφής (μετατροπής σε θερμότητα) της κινητικής ενέργειας της τύρβης (turbulence kinetic energy dissipation rate), (ε)**

Η διάχυση της κινητικής ενέργειας της τύρβης είναι ο ρυθμός με τον οποίο απορροφάται η ενέργεια του στροβιλισμού σε όλο και μικρότερες δίνες έως ότου τελικά μετατραπεί σε θερμότητα λόγω των δυνάμεων του ιξώδους. Εκφράζεται ως κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας.

**Πίνακας 6.2** Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος ε.

Μοντέλο	Μικ.Τιμή (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	Μεγ.Τιμή (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
k-ε	6,427 · 10 <sup>-11</sup>	29,743
k-ω SST	6,884 · 10 <sup>-11</sup>	32,658

- **Σύγκριση των μεγεθών μέσης ταχύτητας και μέσης ολικής πίεσης σε όλη την επιφάνεια στον δεύτερο πυλώνα για τα δύο μοντέλα τύρβης.**

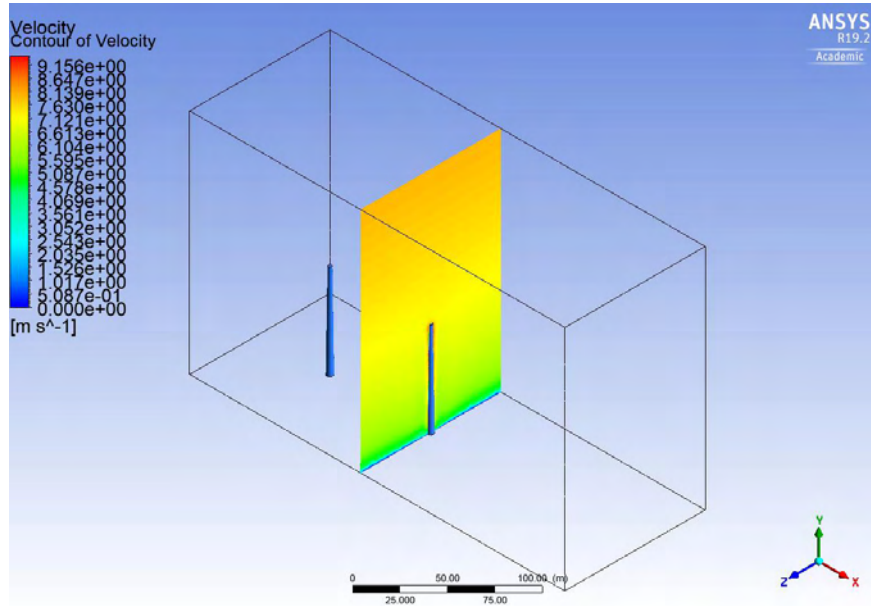
**Πίνακας 6.3** Μέση ταχύτητα και μέση ολική πίεση σε όλη την επιφάνεια στον δεύτερο πυλώνα

Μοντέλο	Μέση ταχύτητα (m/s)	Μέση Ολική Πίεση (Pa)
k-ε	3,786	29,743
k-ω SST	3,817	32,658

## 6.2 Σύγκριση μοντέλων k-ε και k-ω SST για D = 75 m

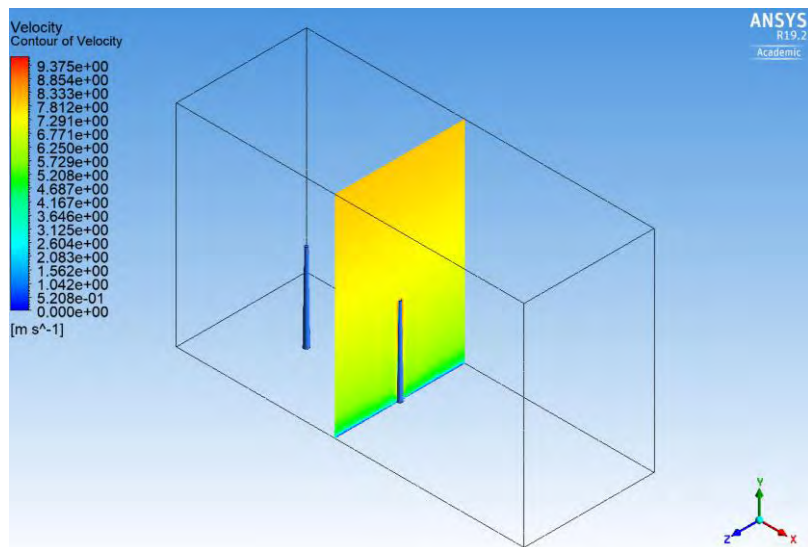
Θα γίνει σύγκριση διάφορων μεγεθών στην περίπτωση που ο ένας πυλώνας απέχει με τον άλλον 75 μέτρα.

- **Plane x = 75 m (k-ε)**



Σχήμα 6.21: Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ε).

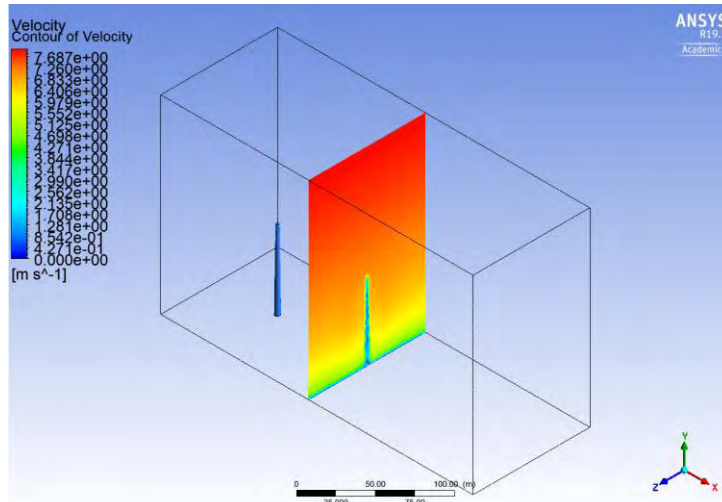
- **Plane x = 75 m (k-ω SST)**



Σχήμα 6.22: Ισοταχείς στον άξονα συμμετρίας του δεύτερου πυλώνα (k-ω).

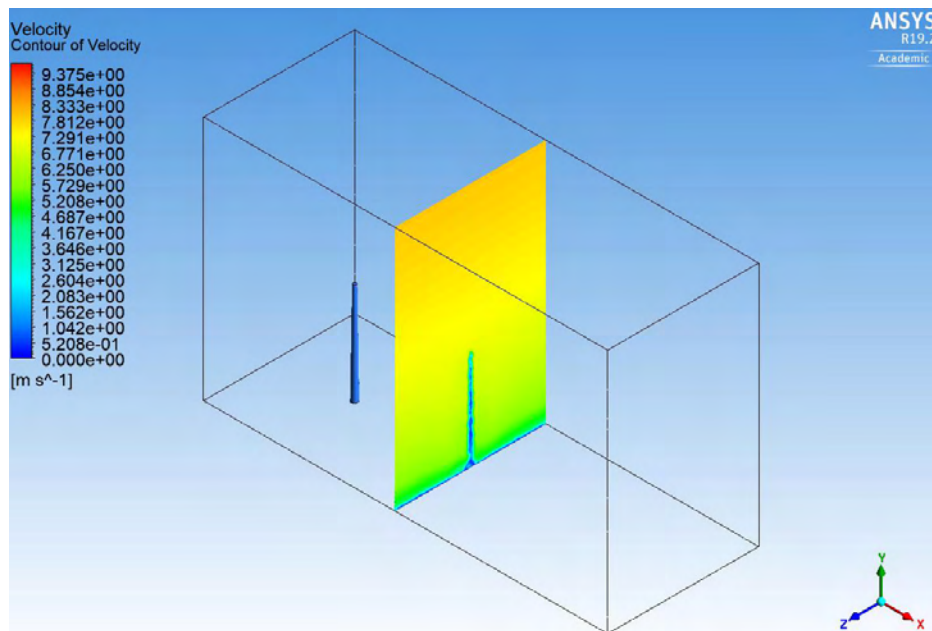
- **Plane x = 80 m (k-ε)**

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τις τιμές της ταχύτητας σε κατακόρυφο επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα



**Σχήμα 6.23:** Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ε).

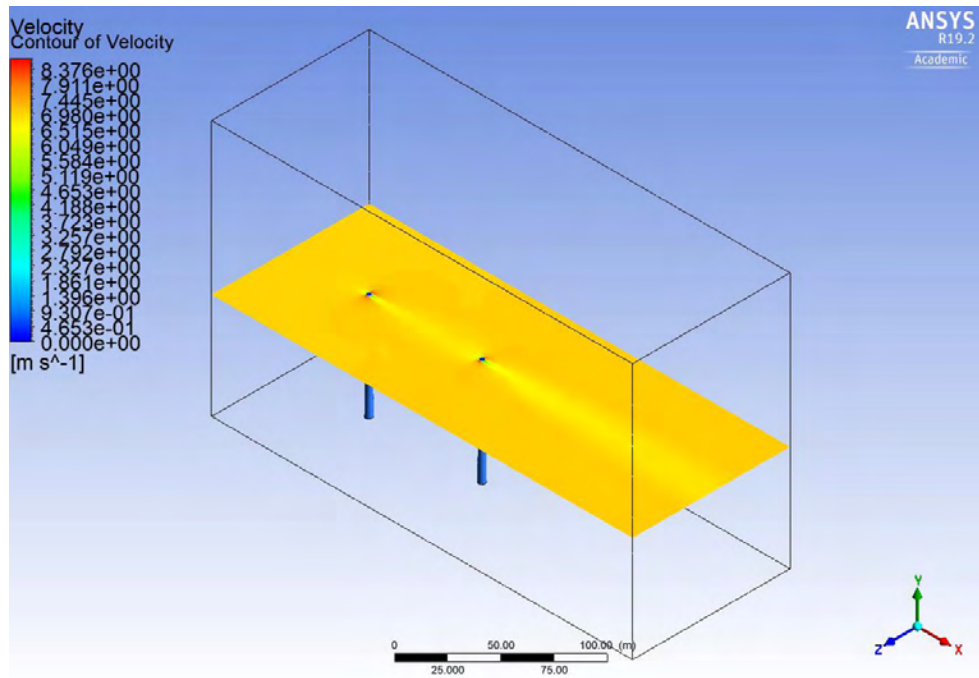
- **Plane x = 80 m (k-ω SST)**



**Σχήμα 6.24:** Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από τον δεύτερο πυλώνα (k-ω).

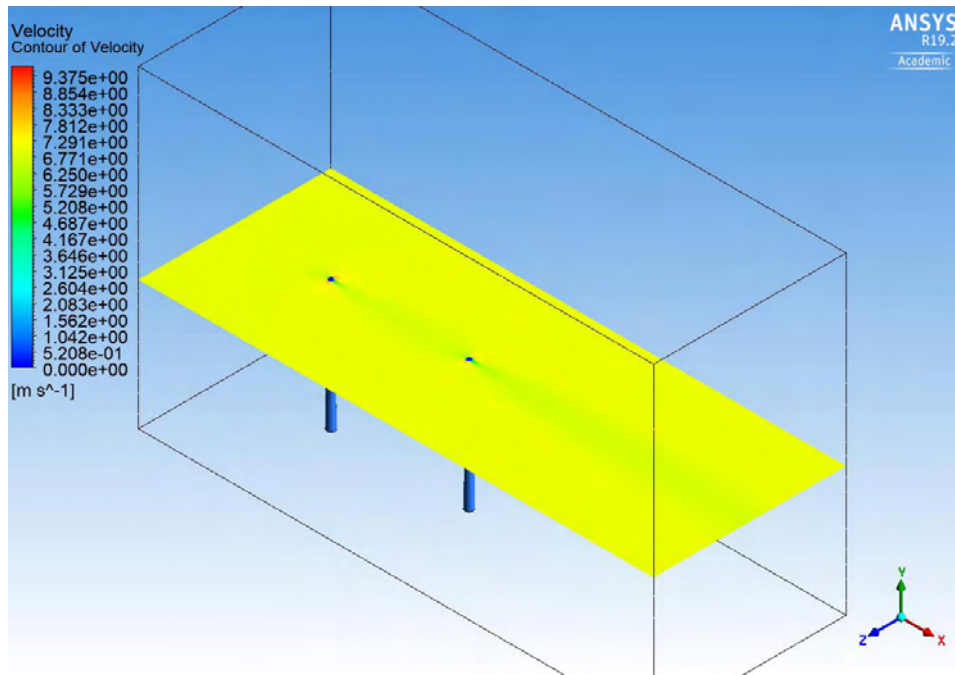


- **Plane  $y = 70$  m (k- $\epsilon$ )**



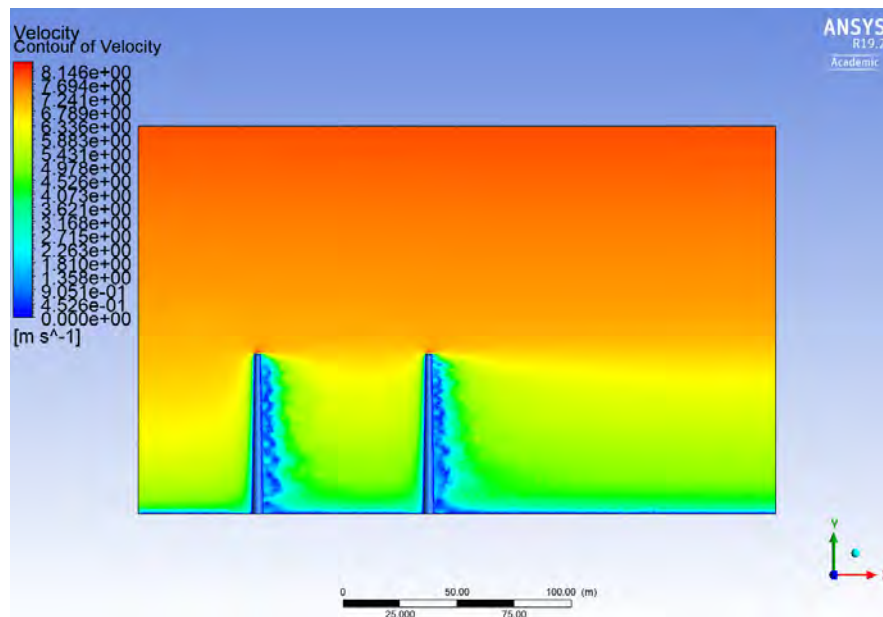
Σχήμα 6.25: Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k- $\epsilon$ ).

- **Plane  $y = 70$  m (k- $\omega$  SST)**



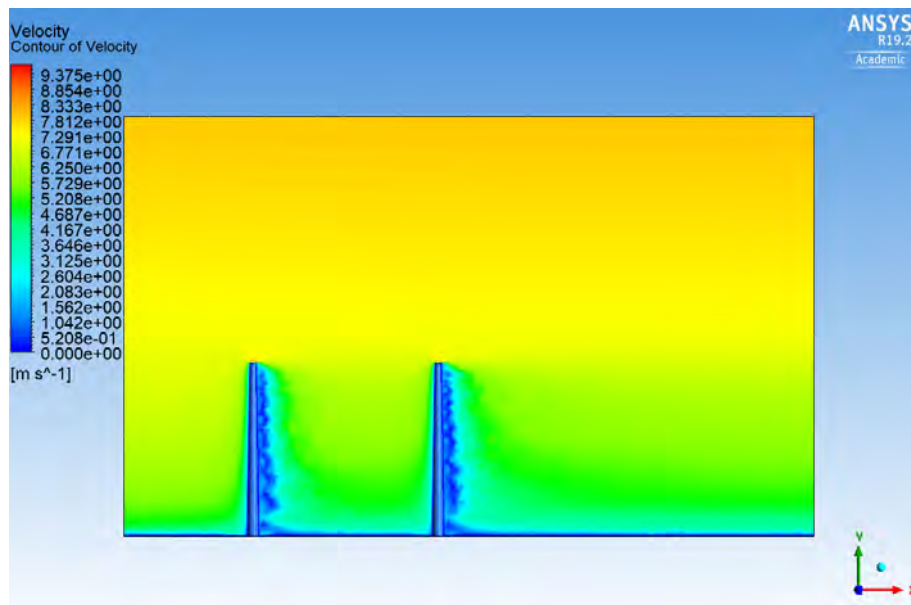
Σχήμα 6.26: Ισοταχείς σε επίπεδο στο μέγιστο ύψος των πυλώνων (k- $\omega$ ).

- **Plane  $z = 0$  m (k-ε)**



Σχήμα 6.27: Ισοταχείς στο επίπεδο  $z = 0$  m (k-ε) .

- **Plane  $z = 0$  m (k-ω SST)**



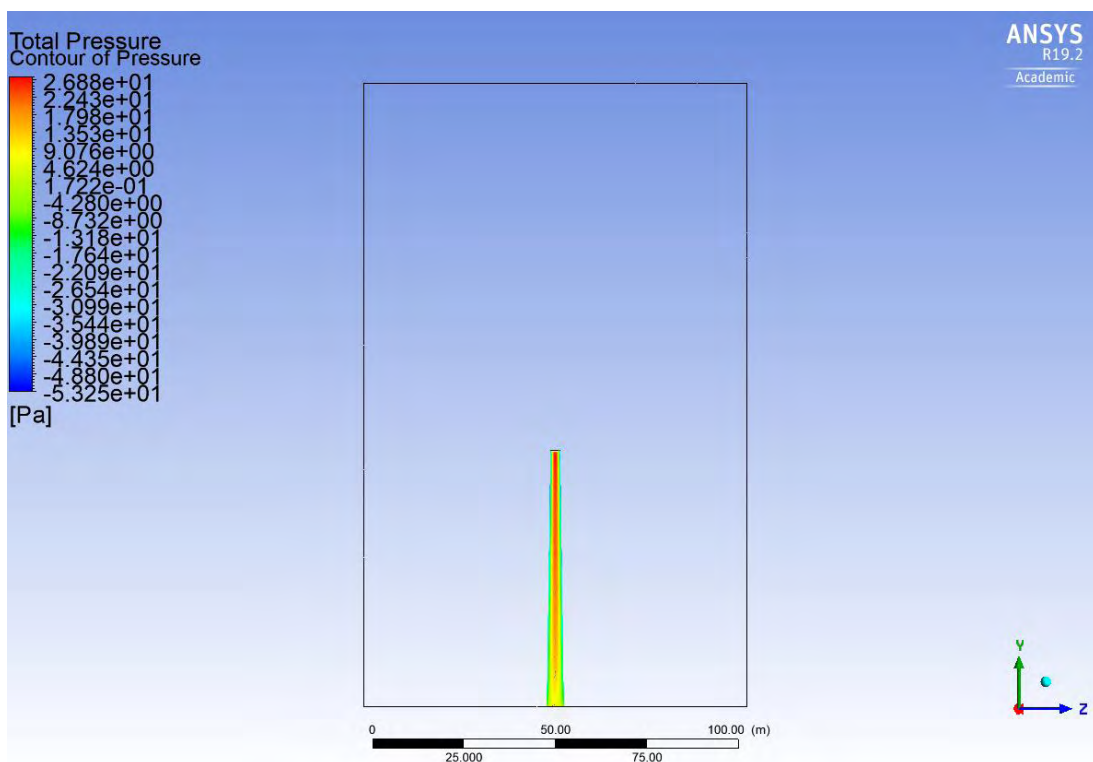
Σχήμα 6.28: Ισοταχείς στο επίπεδο  $z = 0$  m (k-ω) .

- Κατανομή της ολικής πίεσης (πίεσης ανακοπής στην παράπλευρη επιφάνεια του πυλώνα), (Total Pressure)

Η ολική πίεση (total pressure) σε τυχόν σημείο του πεδίου ροής ορίζεται ως

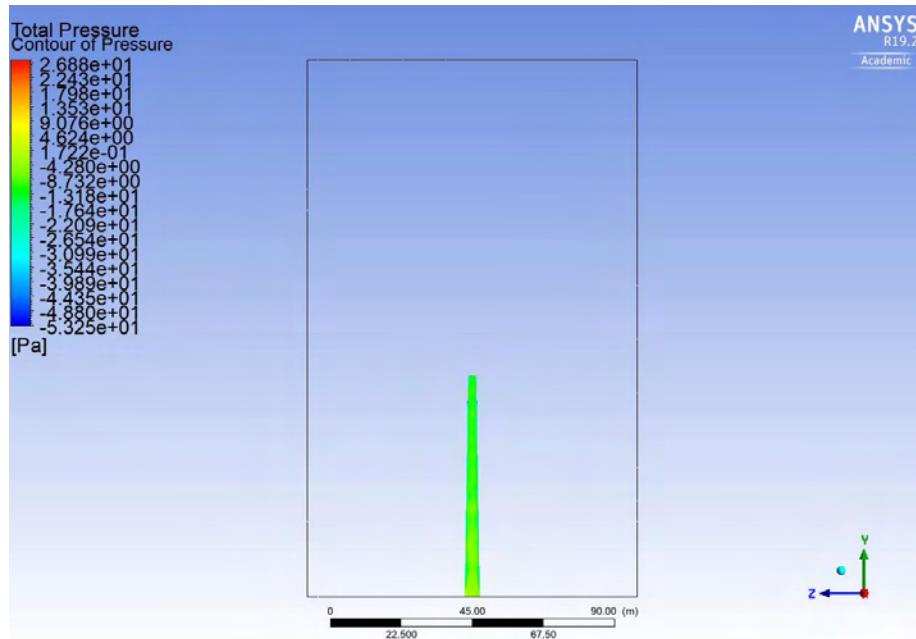
$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6.4)$$

Για το k-ε model.



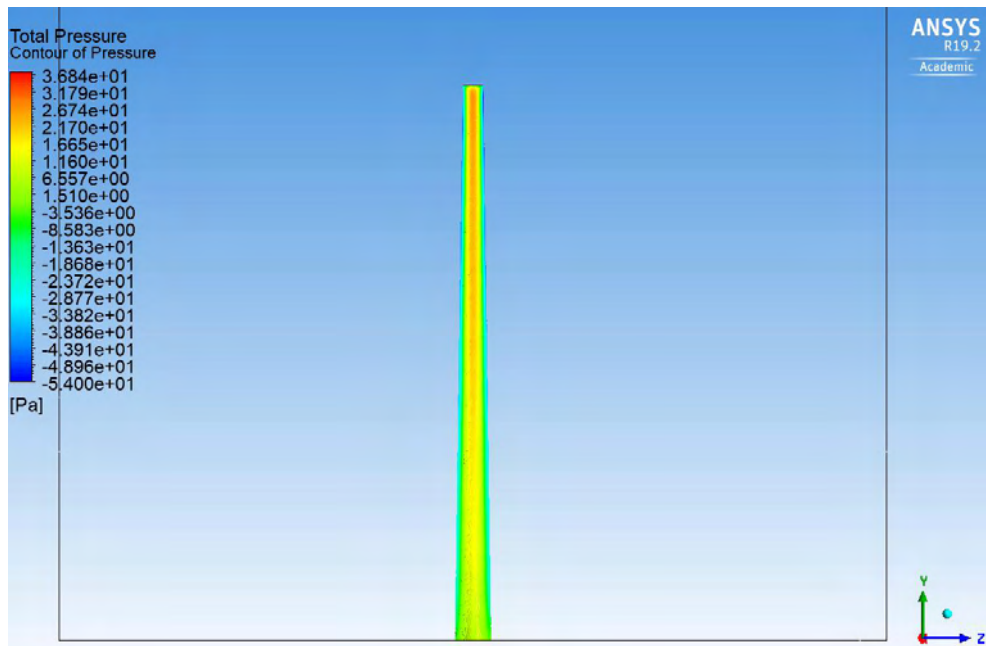
**Σχήμα 6.29:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (Inlet) (k-ε).

Στο πίσω μέρος του πυλώνα (υπήνεμο) λόγω των στροβιλισμών που δημιουργούνται αναμένονται οι μικρότερες τιμές της ολικής πίεσης. Η τιμή της ολικής πίεσης είναι -13,18 Pa με μικρές διαφορές καθώς το ύψος αλλάζει.

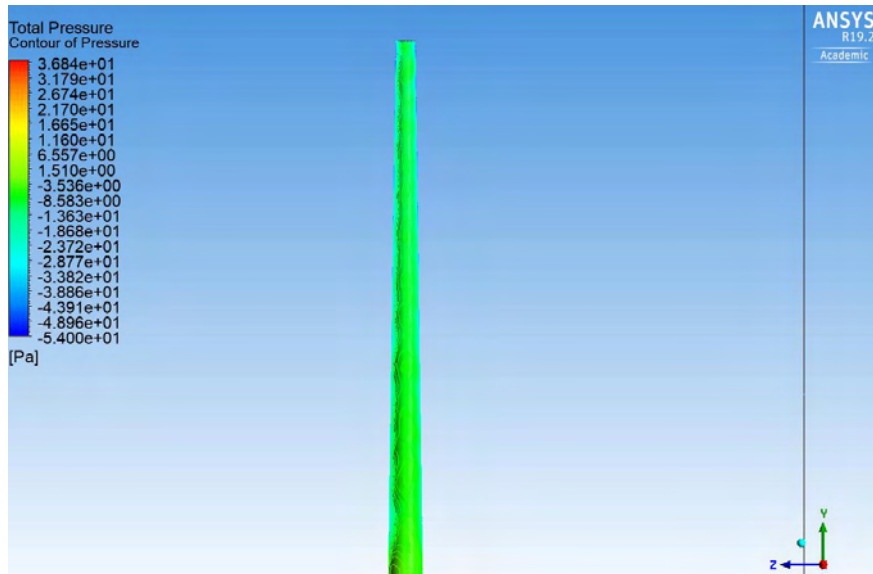


**Σχήμα 6.30:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (Outlet) (k-ε).

**Για το k- $\omega$  SST model.**



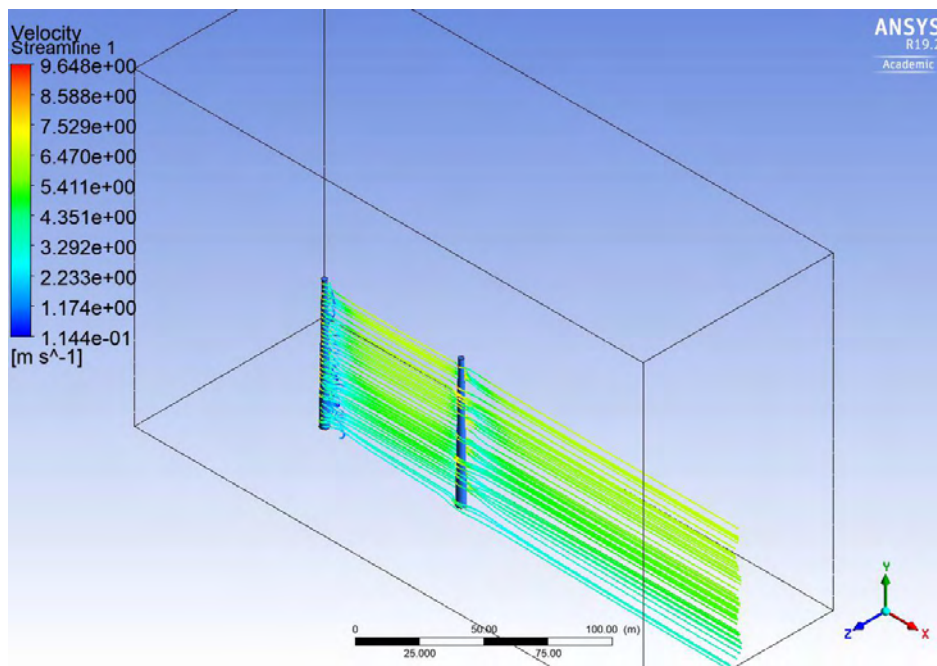
**Σχήμα 6.31:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (Inlet) (k- $\omega$ ).



**Σχήμα 6.32:** Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του δεύτερου πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (Outlet) (κ-ω).

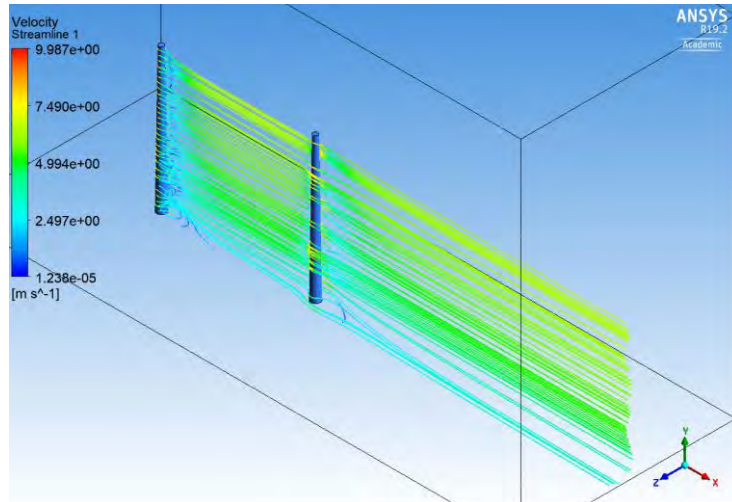
- **Γραμμές ροής ταχύτητας (κ-ε)**

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούνται τις γραμμές ροής και οι στροβιλισμοί που δημιουργούνται στο πίσω μέρος του πυλώνα (ολκός). Οι μεγαλύτεροι σχηματίζονται κοντά στην βάση του.



**Σχήμα 6.33:** Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (κ-ε).

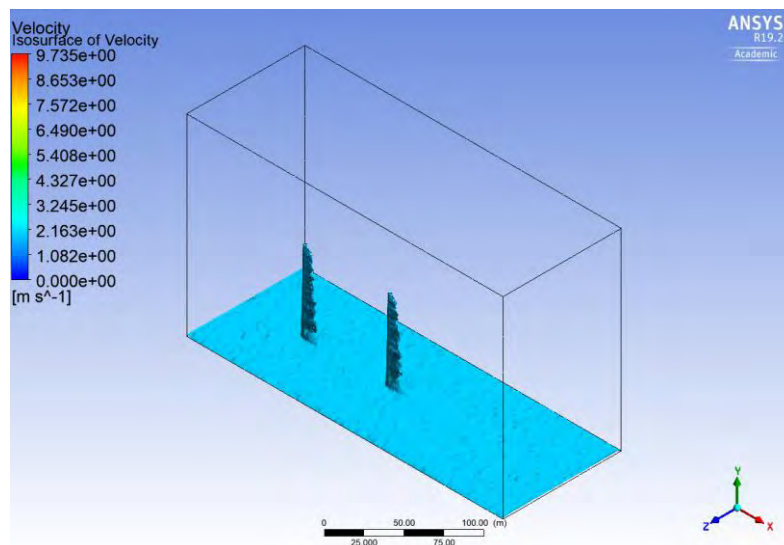
- **Γραμμές ροής ταχύτητας (k- $\omega$  SST)**



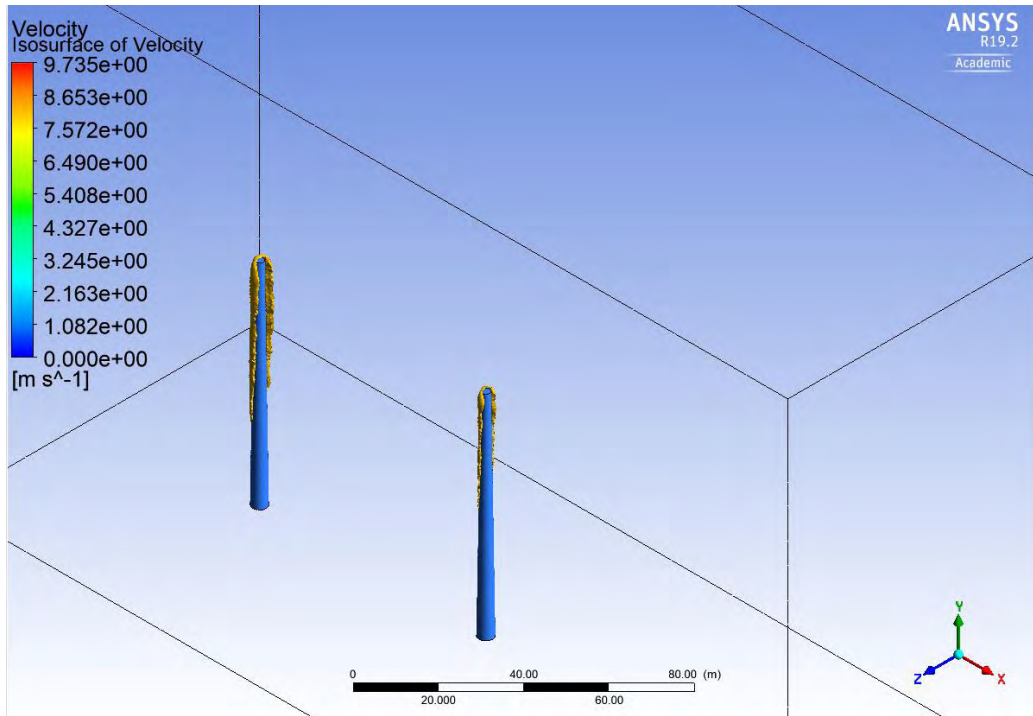
**Σχήμα 6.34:** Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πρώτο πυλώνα (k- $\omega$ ).

- **Επιφάνειες ίσης ταχύτητας (k- $\epsilon$ )**

Οι τιμές που παρουσιάζονται παρακάτω είναι για 2 m/s και 8 m/s. Παρατηρούμε ότι στον δεύτερο πυλώνα αναπτύσσονται μικρότερες ταχύτητες πίσω από τον πυλώνα σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου ο ένας πυλώνα απέιχε 25 μέτρα από τον άλλον.

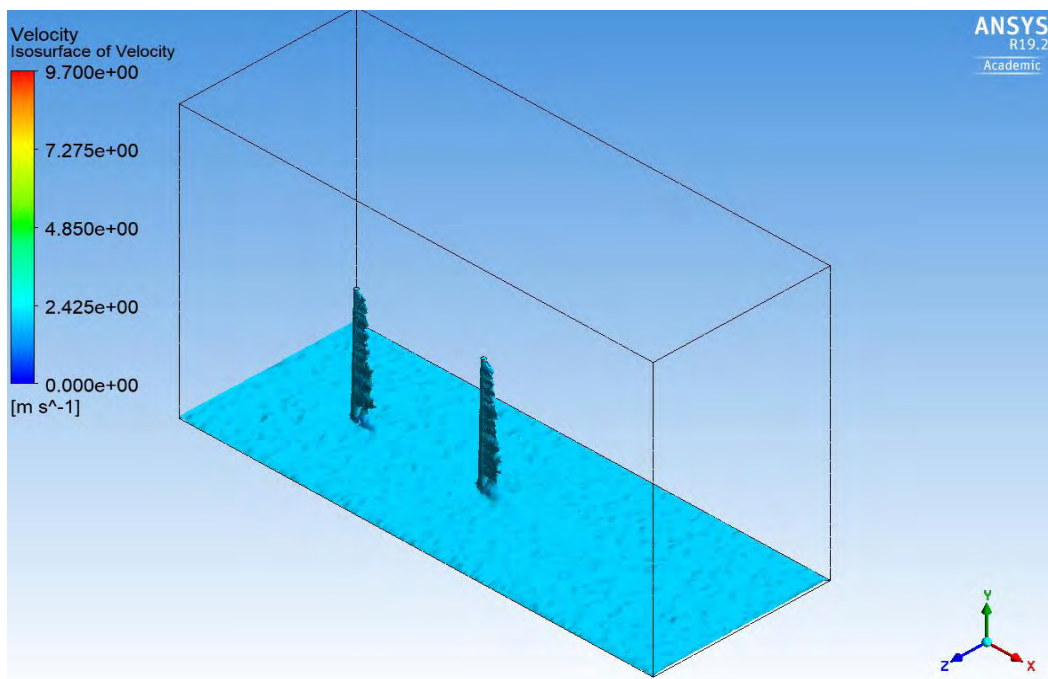


**Σχήμα 6.35:** Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k- $\epsilon$ ).

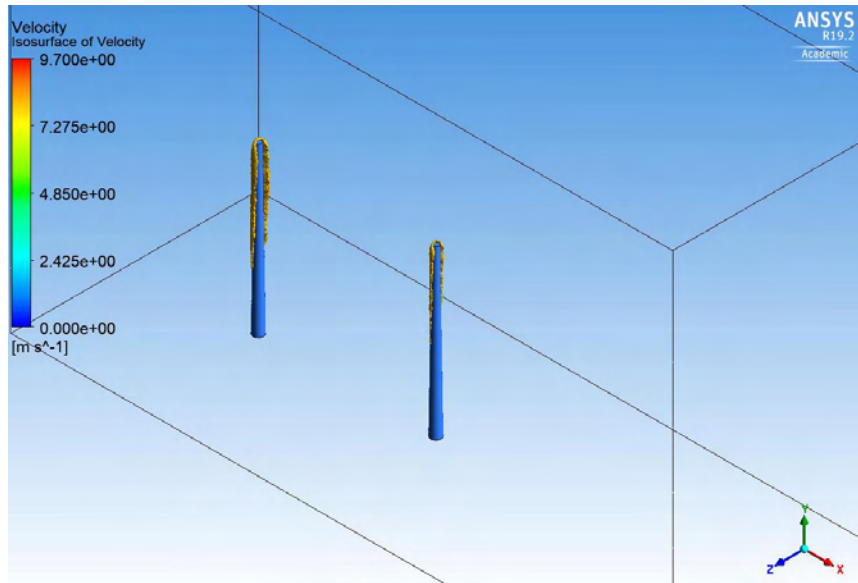


Σχήμα 6.36: Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ε).

- Επιφάνειες ίσης ταχύτητας (k-ω SST)



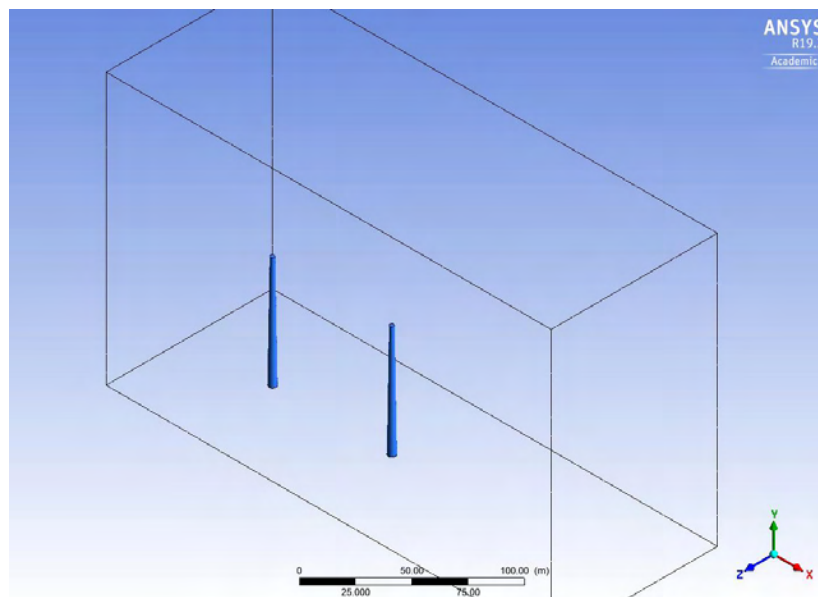
Σχήμα 6.37: Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ω).



**Σχήμα 6.38:** Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (k-ω).

### Στροβιλότητα μεγέθους 0.01 (Vorticity level 0.01), (k-ε)

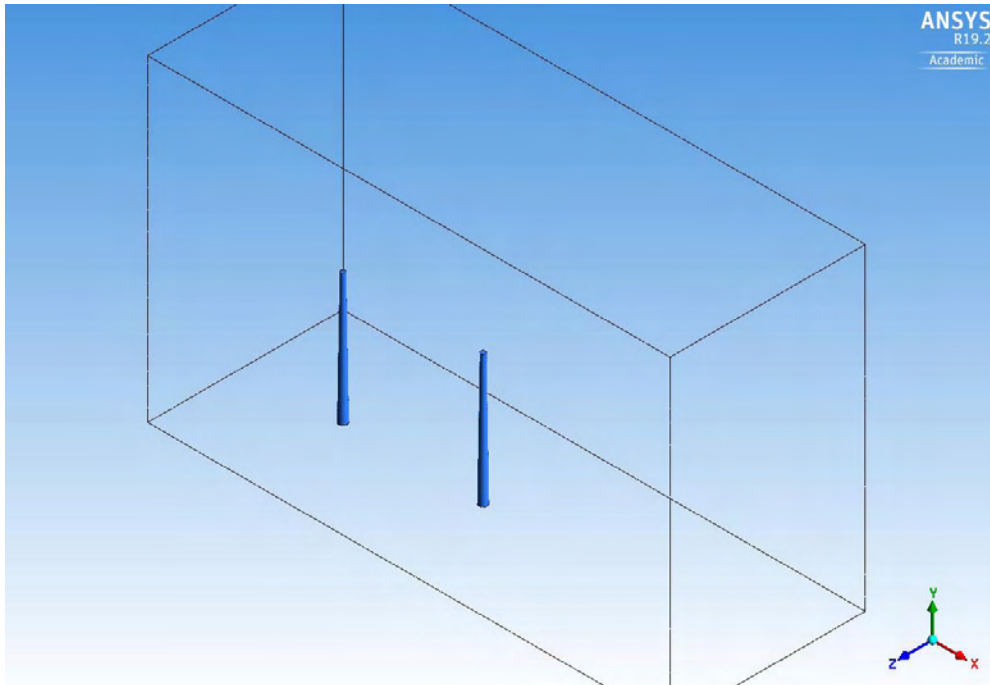
Σε σχέση με  $D = 25\text{m}$  όπου η το μέγεθος της στροβιλότητας ήταν εμφανές σε αυτήν την περίπτωση αναπτύσσεται σε μικρότερο βαθμό λόγω της μεγαλύτερης απόστασης του ενός πυλώνα με τον άλλον. Για τον λόγο αυτό, δεν διακρίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



**Σχήμα 6.39:** Στροβιλότητα (Vorticity)  $1194.29\text{ s}^{-1}$  (k-ε).



### Στροβιλότητα μεγέθους 0.01 (Vorticity level 0.01), (k- $\omega$ SST)



Σχήμα 6.40: Στροβιλότητα (Vorticity)  $18.339 \text{ s}^{-1}$  (k- $\omega$ ).

- **Κινητική ενέργεια της τύρβης (Turbulence Kinetic Energy), (k- $\epsilon$ )**

Οι τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης στο εκθετικό προφίλ ταχύτητας είναι μεγαλύτερες σε σχέση με του ομοιόμορφου. Μετά την αποκόλληση της ροής εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές

Πίνακας 6.4 Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος k.

Μοντέλο	Μικ.Τιμή ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )	Μεγ.Τιμή ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
k- $\epsilon$	$1,73 \cdot 10^{-9}$	1,897
k- $\omega$ SST	$9,16 \cdot 10^{-19}$	2,4506

- Ρυθμός καταστροφής της κινητικής ενέργειας της τύρβης (μετατροπής σε θερμότητα), (Turbulence Kinetic Energy dissipation rate), ( $\epsilon$ ), (k- $\epsilon$  model)

**Πίνακας 6.5** Μικρότερη και μεγαλύτερη τιμή στο Υ.Π. για το μέγεθος  $\epsilon$ .

Μοντέλο	Μικ.Τιμή (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Μεγ.Τιμή (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
k- $\epsilon$	$6,757 \cdot 10^{-11}$	101,727
k- $\omega$ SST	$1,115 \cdot 10^{-8}$	32,658

- Σύγκριση των μεγεθών μέσης ταχύτητας και μέσης ολικής πίεσης σε όλη την επιφάνεια στον δεύτερο πυλώνα για τα δύο μοντέλα τύρβης.

**Πίνακας 6.6** Μέση ταχύτητα και μέση ολική πίεση σε όλη την επιφάνεια στον δεύτερο πυλώνα

Μοντέλο	Μέση ταχύτητα (m/s)	Μέση Ολική Πίεση (Pa)
k- $\epsilon$	4,217	3,422
k- $\omega$ SST	4,2114	3,308

### 6.3 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για λείο κύλινδρο

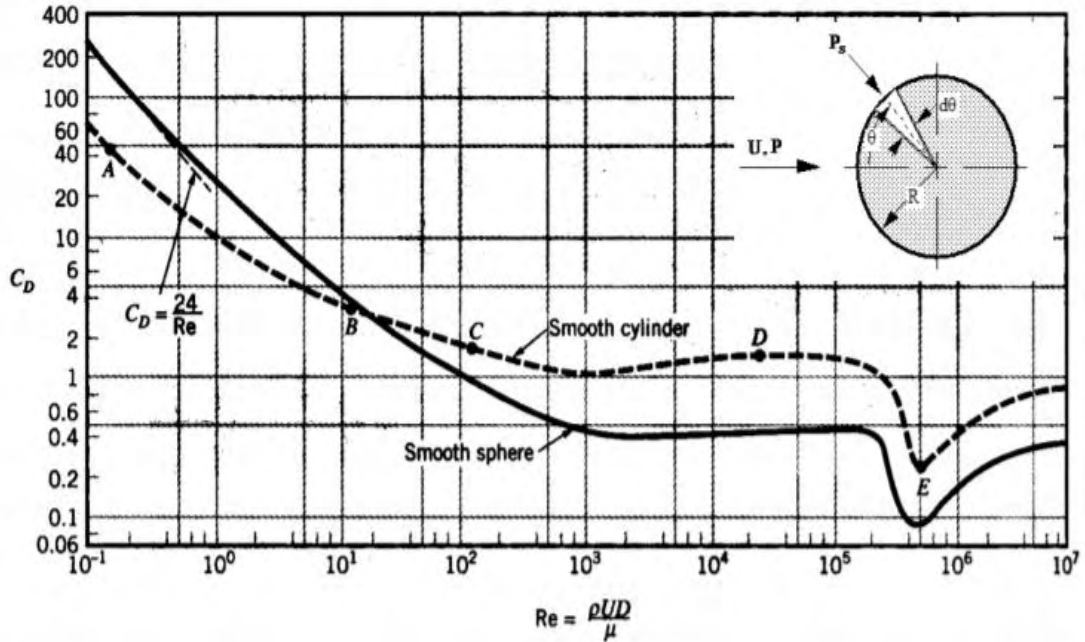
Γνωρίζουμε από την Μηχανική Ρευστών ότι η αδιάστατη δύναμη αντίστασης εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds της ροής. Ο συντελεστής αντίστασης (drag coefficient) ορίζεται από τον τύπο

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (6.4)$$

(βλέπε Α. Λιακόπουλος, 2019).

Για ομοιόμορφη ροή προσπίπτουσα σε λείο κύλινδρο η τιμή του συντελεστή αντίστασης (οπισθέλκουσας) λείου κυλίνδρου κυκλικής διατομής ως συνάρτηση του

αριθμού Reynolds υπολογίζεται από το παρακάτω διάγραμμα όπως έχει βρεθεί από πειραματικές μετρήσεις.



**Σχήμα 6.41:** Συντελεστής αντίστασης λείου κυλίνδρου και λείας σφαίρας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds (Fox and McDonald, 2006).

Για την σύγκριση με τα αποτελέσματα μέσω του υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύξαμε βρίσκουμε τα εξής.

- Για ομοιόμορφο προφίλ της ταχύτητας 7 m/s :

$$\rho = 1.185 \text{ kg/m}^3, \nu = 1.831 \text{ kg/m s}^{-1}, D_{\text{μέσο}} = 3.5 \text{ m}, V = 7 \text{ m/s}$$

$$\text{Άρα } Re = \frac{VD}{\nu} = 1.58510^6 \text{ και } A = D_{\text{μέσο}} \cdot H = 245 \text{ m}^2$$

Επομένως βάση του τύπου :

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \frac{3626.5}{0.5 \cdot 1.185 \cdot 49 \cdot 245} = 0.51$$

Στο παραπάνω διάγραμμα η τιμή του συντελεστή αντίστασης για τη μέση διάμετρο, είναι περίπου 0.5 οπότε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης βρίσκεται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

- Για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας

$$\rho = 1.185 \text{ kg/m}^3, \nu = 1.831 \text{ kg/m s}^{-1}, D_{\text{μέσο}} = 3.5 \text{ m}$$

$$V_{\text{average}} = 6.331 \text{ m/s (μέση ταχύτητα εισόδου στο Υ.Π.)}$$

Υπολογίζοντας τον αριθμό Reynolds για μέση διάμετρο του πυλώνα

$$Re = \frac{VD}{\nu} = 1.410^6 \text{ και } A = D_{\text{μέσο}} \cdot H = 245 \text{ m}^2$$

Επομένως βάση του τύπου :

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \frac{1001.3}{0.5 \cdot 1.185 \cdot 40.08 \cdot 245} = 0.172$$

Όπως παρατηρούμε η τιμή του συντελεστή αντίστασης για τον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds, για εκθετικό προφίλ ταχύτητας είναι περίπου 0.17. Το αποτέλεσμα αναμέναμε να είναι διαφορετικό καθώς η πειραματική μελέτη έχει γίνει για ομοιόμορφο προφίλ σταθερής ταχύτητας σε λείο κύλινδρο σταθερής διατομής και όχι για εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιήθηκε η ροή του ανέμου γύρω από δύο πυλώνες ανεμογεννήτριας. Το ύψος του κάθε μοντέλου είναι 70 μέτρα, η διάμετρος βάσης 4.5 μέτρα και η διάμετρος κορυφής 2.5 μέτρα. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αντιστοιχούν σε μία ανεμογεννήτρια της τάξεως των 4 MW όπου μαζί με τα πτερύγια του ρότορα μπορεί να φτάσει τα 135 μέτρα. Αρχικά, έγινε ανάλυση όταν η απόσταση του ενός πυλώνα με τον άλλον ήταν 25 μέτρα και στην συνέχεια 75 μέτρα. Ορίστηκε ένα εκθετικό προφίλ ταχύτητας που στο μέγιστο ύψος της κατασκευής η τιμή της ταχύτητας του ανέμου θα είναι 7 m/s. Η ροή θεωρήθηκε ως μόνιμη (ανεξάρτητη του χρόνου). Για την προσομοίωση της ροής χρησιμοποιήθηκε από το πρόγραμμα το μοντέλο τύρβης  $k-\epsilon$  και το μοντέλο  $k-\omega$  SST, δύο μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην υπολογιστική ρευστοδυναμική για ανάλυση ρευστού σε συνθήκες τυρβώδους ροής. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πρόγραμμα ANSYS CFX Academic Version R19.2.

- ✓ Η διαδικασία σχεδιασμού του κατάλληλου πλέγματος αποτελεί το σημαντικότερο και πιο χρονοβόρο στάδιο στην διαδικασία της ανάλυσης. Η λύση πρέπει να είναι ανεξάρτητη του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Η μείωση των στοιχείων οδηγεί σε πολύ αραιό πλέγμα και αποτελέσματα χωρίς μεγάλη ακρίβεια. Οι τιμές των αποτελεσμάτων από τα διάφορα πλέγματα που χρησιμοποιούνται δεν πρέπει να παρουσιάζουν διαφορές μεγαλύτερες του 5 %. Αυτό σημαίνει ότι το πλέγμα δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.
- ✓ Στο πρόγραμμα ρευστομηχανικής που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει ο περιορισμός στοιχείων και κόμβων καθώς το πρόγραμμα είναι ακαδημαϊκής μορφής και δωρεάν. Το πρόγραμμα μας περιορίζει σε 512.000 cells/nodes. Το Ansys Workbench επιτρέπει την λειτουργία μέχρι 20 πυρήνων υπολογιστή. Εφόσον ο χρήστης θέλει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων οπότε και πυκνότερο πλέγμα θα χρειαστεί να προμηθευτεί την πλήρη έκδοση από την εν λόγω εταιρεία. Περισσότερα στοιχεία στο πλέγμα σημαίνει και περισσότερες αλγεβρικές εξισώσεις επίλυσης στο πρόγραμμα οπότε απαιτείται η χρησιμοποίηση υπολογιστή με μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες.

- ✓ Οι συνοριακές συνθήκες που τοποθετούνται στο πρόγραμμα CFX-Pre αποτελούν επίσης ένα σημαντικό στάδιο της ανάλυσης. Ο χρήστης πρέπει να έχει κατανοήσει την πλήρη φυσική του προβλήματος και να διατυπώσει σωστά τις συνοριακές συνθήκες. Μία τυχόν λάθος διατύπωση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
- ✓ Ο αριθμός Reynolds της ροής είναι μεγάλος με συνέπεια να δημιουργούνται οριακά στρώματα τα οποία αποκολλούνται από τη στερεά επιφάνεια του μοντέλου με αποτέλεσμα τη δημιουργία ολκού (wake) στο πίσω μέρος του. Οι μικρότερες ταχύτητες εμφανίζονται ακριβώς μετά τον πυλώνα όπου στο πίσω μέρος του (ολκός) υπάρχουν στροβιλισμοί (eddies). Οι ταχύτητες αυτές επιδρούν στον δεύτερο πυλώνα και επηρεάζουν την λειτουργία του. Αυτή η πολύπλοκη ροή που δημιουργείται αποτελεί αντικείμενο ερευνών σε πολλά πανεπιστήμια αλλά και στον χώρο της βιομηχανίας από ιδιωτικές εταιρείες.
- ✓ Στην επιφάνεια του εδάφους οι ταχύτητες είναι μηδενικές λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης. Επομένως κοντά στο έδαφος δημιουργείται ένα οριακό στρώμα και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην πυκνότητα του πλέγματος για να έχουμε την απαιτούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το ίδιο συμβαίνει και στην παράπλευρη επιφάνεια του πυλώνα όπου ισχύει επίσης συνθήκη μη ολίσθησης.
- ✓ Τα δύο μοντέλα τύρβης, k-ε και k-ω SST, συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο για την ανάλυση της κίνησης του ανέμου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ενός μοντέλου είναι αρκετά κοντά με το άλλο. Παρατηρήθηκε, πως τα αποτελέσματα των μεγεθών της ταχύτητας, της ολικής πίεσης, της κινητικής ενέργειας του ανέμου κ.α. δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στα δύο μοντέλα τύρβης. Επίσης, οι γραμμές ροές της ταχύτητας του ανέμου ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι (path) και στα δύο μοντέλα.
- ✓ Στη βάση των δύο πυλώνων η σύνδεση του κόλουρου κώνου με το επίπεδο του εδάφους δημιουργεί ένα πολύπλοκο πεδίο ροής που χρήζει περαιτέρω μελέτης. Εδώ μπορούν να δοκιμαστούν διαφορετικά πλέγματα και να φανεί πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
- ✓ Η απόσταση του ενός πυλώνα με τον άλλον αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για την σωστή χωροθέτηση των Α/Γ. Η παράμετρος απόσταση επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα και την λειτουργία μίας Α/Γ που βρίσκεται σε συστοιχία με μία άλλη. Παρατηρήθηκε στην περίπτωση όπου  $D = 25m$ , ότι η πρώτη Α/Γ επηρεάζει σημαντικά

την δεύτερη λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ αυτών. Η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου που ασκείται στην δεύτερη Α/Γ οδηγεί στην υπολειτουργία αυτής με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου  $D = 75 \text{ m}$  βλέπουμε ότι η ροή του ανέμου σταθεροποιείται και η ταχύτητα που επιδρά στην δεύτερη Α/Γ είναι αρκετά κοντά με την ταχύτητα που ασκείται στην πρώτη Α/Γ.

- ✓ Για το μοντέλο τύρβης k-ε, στο Σχήμα 4.3 η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται πριν την αλληλεπίδραση του ανέμου με τον πυλώνα και στην συνέχεια αυξάνεται. Η ταχύτητα του ανέμου που επιδρά στον δεύτερο πυλώνα είναι ανάλογη της απόστασης του ενός πυλώνα με τον άλλον. Όσο η μεταξύ τους απόσταση μικραίνει τόσο μικρότερη θα είναι η ταχύτητα που επιδρά στην δεύτερη Α/Γ. Την ίδια συμπεριφορά με το μέγεθος της μέσης ταχύτητας δείχνει και το διάγραμμα της ολικής πίεσης στο Σχήμα 4.5, που υπολογίστηκε σε επιφάνεια ίσης ολικής πίεσης σε κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος του υπολογιστικού πεδίου.
- ✓ Αν θεωρήσουμε μία ομοιόμορφη ταχύτητα ανέμου στην είσοδο του Υ.Π.  $7 \text{ m/s}$ , έχοντας έναν πυλώνα Α/Γ, η αδιάστατη συνολική δύναμη που ασκείται στον πυλώνα βρίσκεται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα για κύλινδρο απείρου μήκους. Βέβαια, η σύγκριση πρέπει να γίνει για τον αριθμό Reynolds υπολογισμένο με την μέση τιμή της διαμέτρου του κώλου κώνου. Αντίθετα, όταν λαμβάνουμε υπόψη το οριακό στρώμα κοντά στο έδαφος (δηλαδή όταν χρησιμοποιούμε την εκθετική σχέση για την ταχύτητα στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου) υπάρχει απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα του λείου κυλίνδρου απείρου μήκους.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CFD Online Forum., <http://www.cfd-online.com>, (accessed by 07/04/2019).
2. CFX User Manual 13.0, 2013
3. Choi N., Nam S., Jeong J. and Kim K. (2014) ‘CFD Study on Aerodynamic Power Output Changes with Inter-Turbine Spacing Variation for a 6 MW Offshore Wind Farm’, *Energies* 7, pp. 7483-7498.
4. Dose Bastien, Master Thesis, ‘CFD Simulations of a 2.5 MW wind turbine using ANSYS CFX and OpenFOAM’, University of Applied Science Kiel and Fraunhofer IWES Institute, 2013.
5. Durbin P.A., Medic G., *Fluid Dynamics with a Computational Perspective*, Cambridge University Press, 2014.
6. Fox & McDonald, 4<sup>th</sup> ed., Munson B.R., Young D.F., Okiiski T.H. “Fundamentals of Fluid Mechanics” 5<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons p.526, 2006
7. Hogg S., Crabtree C. J., *UK Wind Energy Technologies*, 1st Edition, 2016
8. Hunt J.C.R., Leibovich S. and Richards K.J. (1988) ‘Turbulent shear flows over low hills’, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 114, pp. 1435-1470.
9. Jackson P.S. and Hunt J.C.R. (1975) ‘Turbulent wind flow over a low hill’, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101, pp. 929-955.
10. Papazisis A., Kasiteropoulou D., Liakopoulos A. (2020) “Wake interference between two wind turbines for wind farm layout optimization”, *Protection and Restoration of the Environment XV*, Patras, Greece.
11. Rafael V. Rodrigues \* and Corinne Lengsfeld (2019) ‘Development of a Computational System to Improve Wind Farm Layout, Part II: Wind Turbine Wakes Interaction’, *Journal of Energies* 12, pp. 1328.
12. Røkenes K. and Krogstad P. (2009) ‘Wind Tunnel Simulation of Terrain Effects on Wind Farm Siting’ *Wind Energy* 12, pp. 391-410.
13. Spyridonidou S., Vagiona D., and Loukogeorgaki E., (2020) ‘Strategic Planning of Offshore Wind Farms in Greece’, *Journal of Sustainability* 12(3), pp 905.



14. Stevens R. J.A.M., Meneveau C. “Flow structure and turbulence in wind farms”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 49:311-339, 2017.
15. Tian W., Ozbay A. and Hu H. (2018) ‘An experimental investigation on the aeromechanics and wake interferences of wind turbines sited over complex terrain’, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 172, pp. 379-394.
16. Van Dyke, *An Album of Fluid Motion*, Parabolic Press, Stanford, California, 1982.
17. Danish Wind Energy Association (2003),  
<http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/speedup.htm>
18. [www.asnys.com](http://www.asnys.com) (accessed by 18/05/2019)
19. [www.ecopress.gr](http://www.ecopress.gr) (accessed by 18/03/2019)
20. [www.e-nautilia.gr](http://www.e-nautilia.gr) (accessed by 16/03/2019)
21. [www.energypress.gr](http://www.energypress.gr) (accessed by 11/02/2019)
22. [www.eon.com](http://www.eon.com) (accessed by 05/10/2018)
23. [www.ge.com](http://www.ge.com) (accessed by 16/12/2018)
24. [www.keyshone.com](http://www.keyshone.com) (accessed by 28/01/2019)
25. [www.sharcnet.ca](http://www.sharcnet.ca) (accessed by 07/10/2018)
26. [www.simtec.gr](http://www.simtec.gr) (accessed by 17/11/2018)
27. [www.wind-energy-the-facts.org](http://www.wind-energy-the-facts.org) (accessed by 30/01/2019)
28. Ανάπτυξη αιολικών πάρκων συνολικής ισχύς 830,3 MW (Αιολικά Πάρκα Κρήτης Έλικα Α.Ε.)
29. Ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές για Βιώσιμη Αγροτική Ανάπτυξη Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο Ειδική έκθεση αριθ. 05/2018.
30. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) ([www.cres.gr](http://www.cres.gr))
31. Λιακόπουλος Α. *Μηχανική Ρευστών*, 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
32. Μπεργελές Γ., *Ανεμοκινητήρες*, Εκδόσεις Συμμεών, 2006
33. Μπιζιώνης Β., Μπιζιώνης Δ., “*Ηλιακή και Αιολική Ενέργεια: Θεωρία και εφαρμογές*”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
34. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής ([www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr))