

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΕ
ΠΥΛΩΝΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**



ΠΑΠΑΖΗΣΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

© 2019 Παπαζήσης Αναστάσιος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Αντώνιος Λιακόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Θεόδωρος Καρακασίδης
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Δωροθέα Κασιτεροπούλου
Επίκουρος Καθηγήτρια, Γενικό Τμήμα, 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 στον πυλώνα ανεμογεννήτριας 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 ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας θεωρείται πακτωμένος στο έδαφος και ακλόνητος. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο στάδια, αρχικά για ένα ομοιόμορφο προφίλ σταθερής ταχύτητας της τάξεως των 7 m/s και στην συνέχεια ένα δεύτερο εκθετικό προφίλ που θα ξεκινάει από το μηδέν και στο μέγιστο ύψος του πυλώνα θα φτάνει τα 7 m/s.

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 the wind turbine tower 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 tower of the wind turbine is considered to be grounded and immovable. The analysis includes two stages, initially for a uniform constant speed profile of 7 m / s, and then a second exponential profile starting from 0 m/s at the tower base and reaching 7 m/s at the maximum height of the tower on top.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κ. Αντώνιο Λιακόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλες τις υποδείξεις και συμβουλές του, καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα από την άρτια επιστημονική του κατάρτιση. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής την Διδάσκουσα κα. Δωροθέα Κασιτεροπούλου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε στο κομμάτι του λογισμικού προγράμματος που χρησιμοποίησα και για την καθοδήγησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Θεόδωρο Καρακασίδη ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις του. Ευχαριστώ την κα. Γλυκερία Μπαλαμώτη για την βοήθειά της στην επιμέλεια του κειμένου. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για την ηθική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1	Κύριες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (19)
Σχήμα 2.2	Παραδοσιακοί Ανεμόμυλοι (22)
Σχήμα 2.3	Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα μέσης ταχύτητας σε m/s (23)
Σχήμα 2.4	Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χώρα από αιολική ενέργεια (24)
Σχήμα 2.5	Συνολική ισχύς εγκατάστασης Α/Γ στον Ελλαδικό χώρο (25)
Σχήμα 2.6	Εξέλιξη των Α/Γ (26)
Σχήμα 2.7α	Α/Γ οριζοντίου άξονα (27)
Σχήμα 2.7β	Α/Γ κατακόρυφου άξονα (27)
Σχήμα 2.8	Σχηματική αναπαράσταση Α/Γ οριζοντίου άξονα (29)
Σχήμα 2.9	Θεμελίωση Α/Γ ισχύς 2.3 MW (30)
Σχήμα 2.10	Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στη Μ.Βρετανία (31)
Σχήμα 2.11	Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο Hornsea 1 (32)
Σχήμα 2.12α	Υπεράκτια Α/Γ Haliade-X 12 MW (33)
Σχήμα 2.12β	Υπεράκτια Α/Γ Haliade-X 12 MW (33)
Σχήμα 3.1	Εφαρμογές του λογισμικού CFD (40)
Σχήμα 3.2	Εφαρμογές φυσικών προβλημάτων με CFD (41)
Σχήμα 3.3	Στρωτή ροή γύρω από κύλινδρο (42)
Σχήμα 3.4	Τυρβώδη ροή γύρω από κύλινδρο (43)
Σχήμα 3.5	Ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται στις έδρες απειροστού όγκου ελέγχου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου (45)
Σχήμα 4.1	Το γραφικό περιβάλλον του ANSYS WORKBENCH (47)

Σχήμα 4.2	Συνήθεις μορφές στοιχείων πλέγματος που εφαρμόζονται και οι κόμβοι αριθμημένοι (50)
Σχήμα 4.3	Εισαγωγή του πλέγματος μέσω της εντολής Import (52)
Σχήμα 4.4	Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre (52)
Σχήμα 4.5	Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών μέσω της εντολής Insert (54)
Σχήμα 4.6	Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών από τον χρήστη (55)
Σχήμα 4.7	ANSYS CFD-Post Objects (57)
Σχήμα 5.1	Δημιουργία κόλουρου κώνου (59)
Σχήμα 5.2	Σχεδιασμός πυλώνα Α/Γ στο πρόγραμμα Design-Modeler (60)
Σχήμα 5.3	Σχεδιασμός υπολογιστικού πεδίου με την μορφή box (61)
Σχήμα 5.4	Το πλέγμα σε όλο το υπολογιστικό πεδίο (62)
Σχήμα 5.5	Το πλέγμα γύρω από τον πυλώνα (63)
Σχήμα 5.6	Το πλέγμα σε όλο το υπολογιστικό πεδίο για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας (64)
Σχήμα 5.7	Το πλέγμα γύρω από τον πυλώνα για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας (64)
Σχήμα 5.8	Ορισμός συνοριακής συνθήκης στο έδαφος (66)
Σχήμα 5.9	Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας 7 m/s στον πυλώνα (67)
Σχήμα 5.10	Εκθετικό προφίλ ταχύτητας (68)
Σχήμα 6.1	Σταθερή ταχύτητα 7 m/s στην είσοδο του Υ.Π. (69)
Σχήμα 6.2	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα (70)
Σχήμα 6.3	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο στο κέντρο της βάσης του πυλώνα (71)
Σχήμα 6.4	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 5 μέτρα μετά το κέντρο της βάσης του πυλώνα (72)
Σχήμα 6.5	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 20 μέτρα μετά την βάση του πυλώνα (72)

Σχήμα 6.6	Ισοταχείς στην επιφάνεια εξόδου (73)
Σχήμα 6.7	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 0.5m από το έδαφος (73)
Σχήμα 6.8	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 10m από το έδαφος (74)
Σχήμα 6.9	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 65m από το έδαφος (74)
Σχήμα 6.10	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο στην κορυφή του πυλώνα (75)
Σχήμα 6.11	Ισοταχείς σε επίπεδο στον άξονα συμμετρίας z (76)
Σχήμα 6.12	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5m από το κέντρο βάσης του πυλώνα (77)
Σχήμα 6.13	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5m από το κέντρο βάσης του πυλώνα (77)
Σχήμα 6.14	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (78)
Σχήμα 6.15	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πυλώνα στον άξονα z (79)
Σχήμα 6.16	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (79)
Σχήμα 6.17	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (80)
Σχήμα 6.18	Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πυλώνα (80)
Σχήμα 6.19	Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (81)
Σχήμα 6.20	Ταχύτητα 5 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (82)
Σχήμα 6.21	Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (82)
Σχήμα 6.22	Ταχύτητα 10 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (83)
Σχήμα 6.23	Στροβιλότητα 4.61 s^{-1} (84)
Σχήμα 6.24	Στροβιλότητα 0.461 s^{-1} (84)
Σχήμα 6.25	Στροβιλότητα 0.23 s^{-1} (85)
Σχήμα 6.26	Στροβιλότητα 0.047 s^{-1} (85)
Σχήμα 6.27α	Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους k (86)

Σχήμα 6.27β	Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους ε (87)
Σχήμα 6.28	Εκθετικό προφίλ της ταχύτητας στην επιφάνεια εισόδου (88)
Σχήμα 6.29	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα (89)
Σχήμα 6.30	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο στο κέντρο της βάσης του πυλώνα (89)
Σχήμα 6.31	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 5 μέτρα μετά το κέντρο της βάσης του πυλώνα (90)
Σχήμα 6.32	Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 20 μέτρα μετά την βάση του πυλώνα (90)
Σχήμα 6.33	Ισοταχείς στην επιφάνεια εξόδου (91)
Σχήμα 6.34	Κατανομή της ταχύτητας στην επιφάνεια του εδάφους (91)
Σχήμα 6.35	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 0.5m από το έδαφος (92)
Σχήμα 6.36	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 10m από το έδαφος (92)
Σχήμα 6.37	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 35m από το έδαφος (93)
Σχήμα 6.38	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 60m από το έδαφος (93)
Σχήμα 6.39	Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο στην κορυφή του πυλώνα (94)
Σχήμα 6.40	Ισοταχείς σε επίπεδο στον άξονα συμμετρίας z (94)
Σχήμα 6.41	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5m από το κέντρο βάσης του πυλώνα (95)
Σχήμα 6.42	Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5m από το κέντρο βάσης του πυλώνα (95)
Σχήμα 6.43	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (96)
Σχήμα 6.44	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πυλώνα στον άξονα z (97)
Σχήμα 6.45	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (97)
Σχήμα 6.46	Κατανομή της ολικής πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (98)
Σχήμα 6.47	Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πυλώνα (99)

Σχήμα 6.48	Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (100)
Σχήμα 6.49	Ταχύτητα 5 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (100)
Σχήμα 6.50	Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (101)
Σχήμα 6.51	Ταχύτητα 10 m/s στο υπολογιστικό πεδίο (101)
Σχήμα 6.52	Στροβιλότητα 11.41 s^{-1} (102)
Σχήμα 6.53	Στροβιλότητα 1.14 s^{-1} (102)
Σχήμα 6.54	Στροβιλότητα 0.57 s^{-1} (103)
Σχήμα 6.55	Στροβιλότητα 0.114 s^{-1} (103)
Σχήμα 6.56α	Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους k (104)
Σχήμα 6.56β	Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους ϵ (104)
Σχήμα 6.57	Συντελεστής αντίστασης λείου κυλίνδρου και λείας σφαίρας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds (106)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1	Μέση ταχύτητα ανά πλέγμα σε επιφάνεια κατακόρυφου επιπέδου που απέχει 5m από τον πυλώνα (62)
Πίνακας 5.2	Λεπτομέρειες του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε (63)
Πίνακας 5.3	Μέση ταχύτητα ανά πλέγμα σε επιφάνεια κατακόρυφου επιπέδου που απέχει 5m από τον πυλώνα για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας (63)
Πίνακας 5.4	Λεπτομέρειες του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας (65)
Πίνακας 6.1	Συνιστώσες της ολικής δύναμης που ασκείται στον πυλώνα λόγω του ανέμου (105)
Πίνακας 6.2	Συνιστώσες της ολικής δύναμης που ασκείται στον πυλώνα λόγω του ανέμου για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας (105)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	16
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 Μεθοδολογία.....	16
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	18
2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	18
2.1.1 Γενικά περί ΑΠΕ.....	18
2.1.2 Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	19
2.2 Αιολική ενέργεια.....	21
2.3 Ανεμογεννήτριες.....	24
2.3.1 Γενικά περί ανεμογεννητριών.....	24
2.3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	26
2.3.3 Εγκατάσταση Α/Γ.....	28
2.4 Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.....	31
2.5 Πλεονεκτήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.....	33
2.6 Μειονεκτήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.....	34
2.7 Μύθοι και Πραγματικότητα.....	35
2.8 Αντικεραυνική προστασία και γείωση ανεμογεννητριών.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	38
ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ (CFD).....	38
3.1 Σκοπός της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	38
3.2 Εξέλιξη της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	38
3.3 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	38

3.4 Πολυπλοκότητα.....	41
3.5 Συνθήκες ροής.....	43
3.6 Εξισώσεις κίνησης ρευστών	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	47
ANSYS CFX	47
4.1 Το Λογισμικό πρόγραμμα ANSYS CFX.....	47
4.2 Επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας.....	48
4.3 Διακριτοποίηση των στοιχείων	49
4.3.1 Γενική έννοια του πλέγματος.....	49
4.3.2 Τρόποι δημιουργίας του πλέγματος	49
4.4 Ο προεπεξεργαστής του πακέτου CFX (CFX-Pre).....	51
4.4.1 Εισαγωγή στο CFX – Pre.....	51
4.4.2 Εισαγωγή του πλέγματος.....	51
4.4.3. Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre	52
4.4.4 Συνοριακές συνθήκες του προγράμματος.....	55
4.5 CFX – Solver (Επιλυτής).....	56
4.6 Στάδιο μετεπεξεργασίας (CFD – Post).....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	59
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	
ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	59
5.1 Σχεδιασμός πυλώνα της Α/Γ	59
5.1.1 Σχεδιασμός υπολογιστικού πεδίου	60
5.2 Σχεδιασμός του κατάλληλου πλέγματος (Mesh)	61
5.3 Φυσικές ιδιότητες του ρευστού.....	65
5.4 Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου προσομοίωσης.....	65
5.4.1 Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας μέτρου 7 m/s	66
5.4.2 Εκθετικό προφίλ ταχύτητας	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	69
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	69
6.1 Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του (Υ.Π.) μέτρου 7 m/s	69

6.2 Εκθετικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του Υ.Π.....	87
6.3 Σύγκριση δυνάμεων σταθερού και εκθετικού προφίλ.....	105
6.4 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για λείο κύλινδρο	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	108
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Μεθοδολογία

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

- Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει την λειτουργία των ανεμογεννητριών και την χρησιμότητα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στο πεδίο της μελέτης της κίνησης των ρευστών.
- Στην ανάλυση των φορτίων που επιδρούν στον πυλώνα λόγω του ανέμου. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της ροής γύρω από τον πυλώνα είναι το ANSYS CFX, ένα πρόγραμμα ανάλυσης κίνησης ρευστών και στερεών σε ένα υπολογιστικό πεδίο.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

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

Στο κεφάλαιο 2, εξηγείται ο όρος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα είδη των ΑΠΕ και 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. Τέλος, γίνεται αναφορά στην αντικεραυνική προστασία και στην γείωση των ανεμογεννητριών.

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. Τέλος, καταγράφονται η πολυπλοκότητα, οι συνθήκες ροής καθώς και οι εξισώσεις Navier-Stokes που διέπουν την κίνηση των Νευτώνειων ρευστών μέσω των εξισώσεων ορμής και συνέχειας.

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται το λογισμικό πρόγραμμα ANSYS CFX και τα στάδια του προγράμματος κατά την διαδικασία προσομοίωσης μιας ροής. Αρχικά, περιγράφεται η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας και ο σχεδιασμός του πλέγματος (Mesh). Έπειτα, ακολουθεί το στάδιο όπου ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του λογισμικού προγράμματος και ονομάζεται CFX-Pre. Στην συνέχεια περιγράφεται το στάδιο στο οποίο επιλύονται οι

εξισώσεις Navier-Stokes και ονομάζεται Solver (Επιλυτής). Τέλος, ακολουθεί το στάδιο μετεπεξεργασίας, CFD-Post, στο οποίο οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Στο κεφάλαιο 5, περιγράφεται ο σχεδιασμός του πλώνα 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.

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

ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

2.1.1 Γενικά περί ΑΠΕ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή αλλιώς ήπιες μορφές ενέργειας, νέες πηγές ενέργειας και πράσινη ενέργεια, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας, που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια (2009/28/Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο).

Ο όρος «ήπιες» μορφές ενέργειας επεξηγείται από δύο κύρια γνωρίσματα.

Καταρχήν, για την χρησιμοποίησή τους δεν είναι αναγκαία κάποια παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις υφιστάμενες πηγές ενέργειας, αλλά η εκμετάλλευση της ενέργειας που υπάρχει στο περιβάλλον.

Δεύτερον, αναφέρεται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδειγμένα υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι συνηθισμένες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα. Έτσι θεωρούνται από πολλούς ως μία έναρξη προσπαθειών προκειμένου να λυθούν τα οικολογικά προβλήματα που αντιμετωπίζουμε σήμερα.

Όσον αφορά τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προϋποθέτουν την ιδιότητα να ανανεώνονται όσο περνάνε τα χρόνια και να μην υπάρχει κίνδυνος να χαθούν με την χρήση τους, όπως γίνεται με τις συνήθεις πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο.

Για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκύπτουν από την καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση των (Α.Π.Ε). Ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, η γεωθερμία και η βιομάζα είναι πηγές ενέργειας φιλικές προς το

περιβάλλον και με την σωστή εκμετάλλευσή τους μπορούν να βοηθήσουν στην πράσινη ανάπτυξη με την κατάλληλη τεχνολογία, που έχει αναπτυχθεί σήμερα.

Σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια στον κόσμο παράγεται κυρίως από μονάδες που λειτουργούν με άνθρακα. Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο προκαλούνται σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, διότι εκπέμπουν τοξικά αέρια, όπως το διοξείδιο του θείου και το οξείδιο του αζώτου.



Σχήμα 2.1 : Κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (IU Blogs).

2.1.2 Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Υπάρχουν αρκετές δυνατότητες κατάταξης των ΑΠΕ σε κατηγορίες, ανάλογα με την προέλευσή τους, την πυκνότητά τους, το φορέα της ενέργειας. Με εξαίρεση την παλιρροϊκή ενέργεια των θαλασσών, που οφείλεται στην περιστροφή της Γης και την έλξη της από τους πλανήτες, όλες οι άλλες μορφές, έμμεσα ή άμεσα, αποτελούν παράγωγα της ηλιακής ενέργειας. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η γεωθερμία δεν είναι πραγματικά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (αφού είναι πεπερασμένη), αλλά μπορεί να θεωρηθεί ως τέτοια σε σχέση με τον ιστορικό χρόνο.

Σήμερα το Υπουργείο Ανάπτυξης, φορέας της ενεργειακής πολιτικής στην Ελλάδα, εστιάζει στη διαμόρφωση ενός κατάλληλου ρυθμιστικού και νομικού πλαισίου, που θα δώσει ώθηση στις επενδύσεις για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως:

(α) την ηλιακή ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία,

(β) την αιολική ενέργεια, η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των ανέμων,

(γ) τη γεωθερμική ενέργεια, μέσω της οποίας αξιοποιούνται τα θερμά νερά ή/και οι ατμοί που υπάρχουν σε υπόγειους ταμιευτήρες της γης,

(δ) τη βιομάζα, δηλαδή την ενέργεια που πηγάει από την αξιοποίηση του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος κάθε υλικού, που προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από το φυτικό ή ζωικό κόσμο,

(ε) την υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.

Ταυτόχρονα, το ρυθμιστικό και νομικό αυτό πλαίσιο προβλέπει τη δημιουργία μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για την εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ στοχεύει στην ενίσχυση της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας των επενδύσεων σε καθαρές ενεργειακές τεχνολογίες, εξασφαλίζοντας παράλληλα την περιφερειακή ανάπτυξη μέσω των παραπάνω μορφών των ΑΠΕ.

Η αύξηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι ουσιαστικής σημασίας για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της Ε.Ε και της εξάρτησής της από τα ορυκτά καύσιμα και την εισαγόμενη ενέργεια, συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της.

Οι ΑΠΕ ξεπέρασαν τον άνθρακα στη Γερμανία ως βασική πηγή ενέργειας για πρώτη φορά πέρυσι, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 40% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία για το 2018, όπως έδειξε σχετική έκθεση που δημοσιεύθηκε σήμερα από το ινστιτούτο εφαρμοσμένων επιστημών Fraunhofer. Η μεταβολή αυτή σηματοδοτεί μια σημαντική αλλαγή στην μεγαλύτερη οικονομία της Ευρώπης όπου και ο στόχος των ΑΠΕ ανέρχεται στο 65% μέχρι το 2030, αφήνοντας πίσω τα πυρηνικά μέχρι το 2022 και τον άνθρακα προοδευτικά (energypress.gr).

2.2 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 νηζελογεννητριών 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.

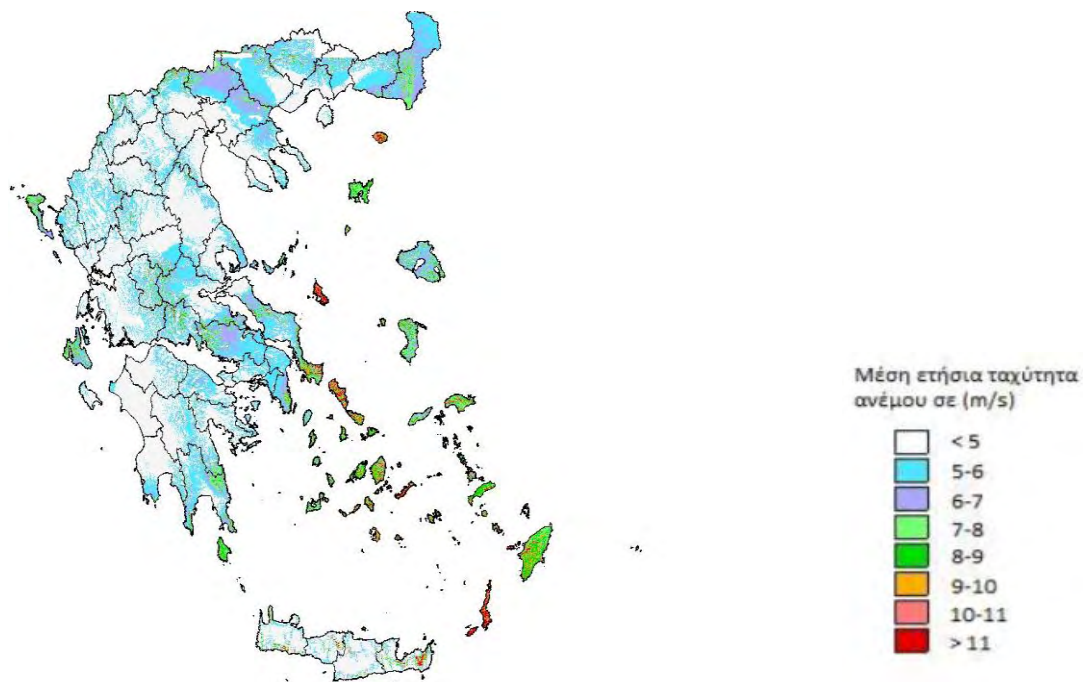
Πριν από πολλά χρόνια και έως τα μέσα της δεκαετίας του 1930 ο άνεμος παρείχε σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Έκτοτε, η ενέργεια παράγεται κυρίως από άλλα μέσα, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Σήμερα όμως η αιολική ενέργεια προκαλεί το έντονο ενδιαφέρον πολλών, καθώς τα ορυκτά καύσιμα είναι επιβλαβή για το περιβάλλον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



Σχήμα 2.2 : 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.

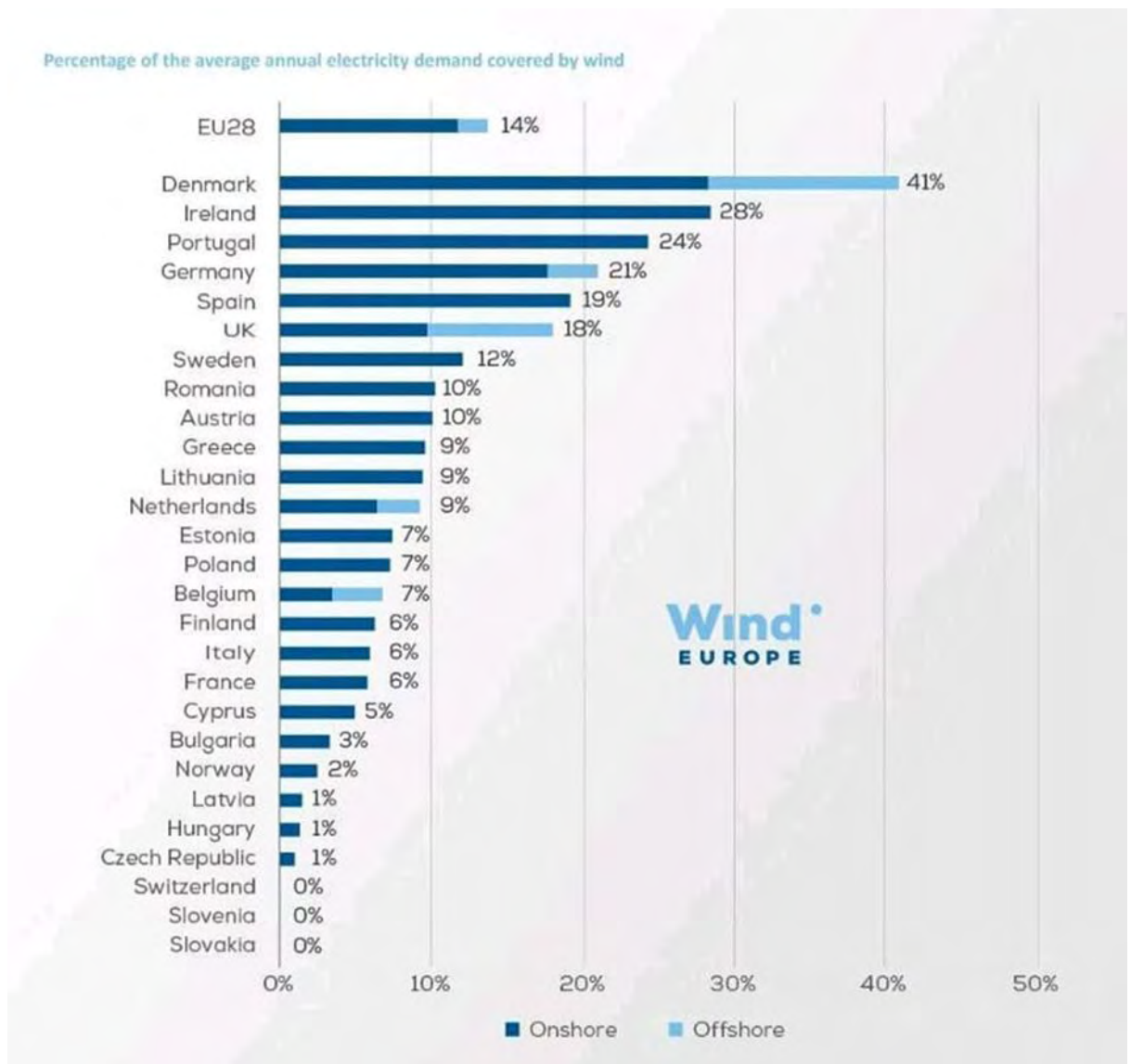


Σχήμα 2.3 : Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα μέσης ταχύτητας ανά έτος σε m/s (ΚΑΠΕ).

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).

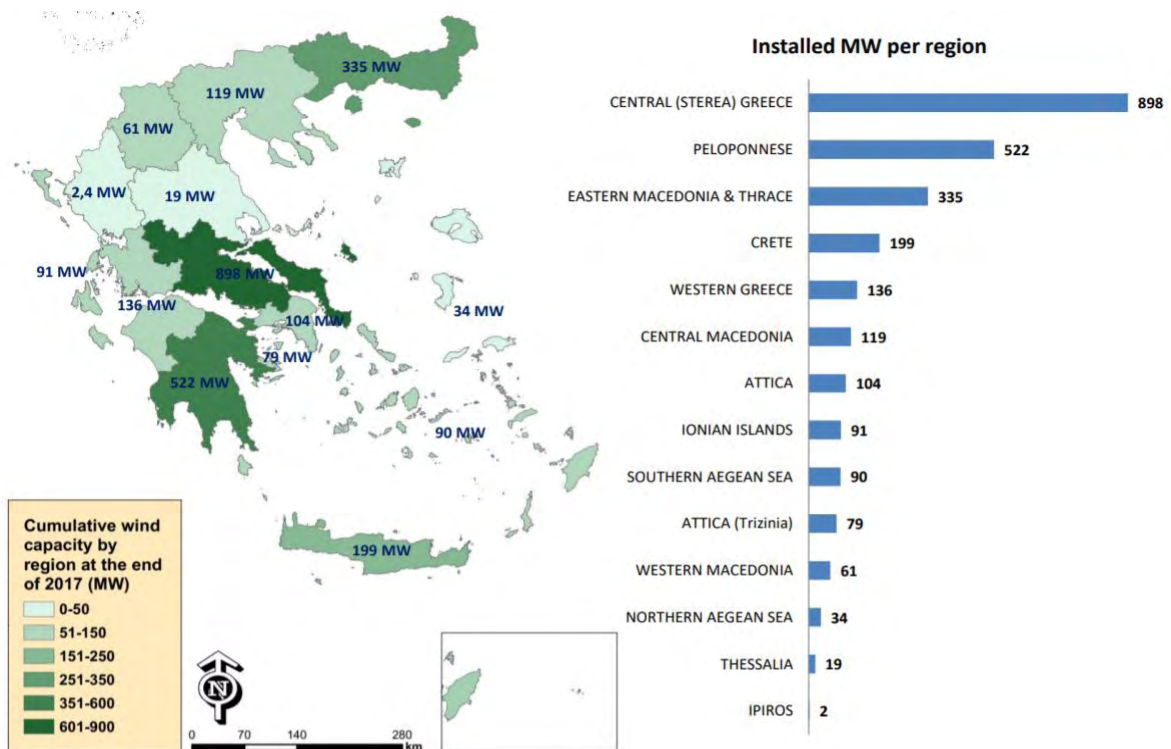


Σχήμα 2.4 : Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χώρα από αιολική ενέργεια (Wind Europe 2018).

2.3 Ανεμογεννήτριες

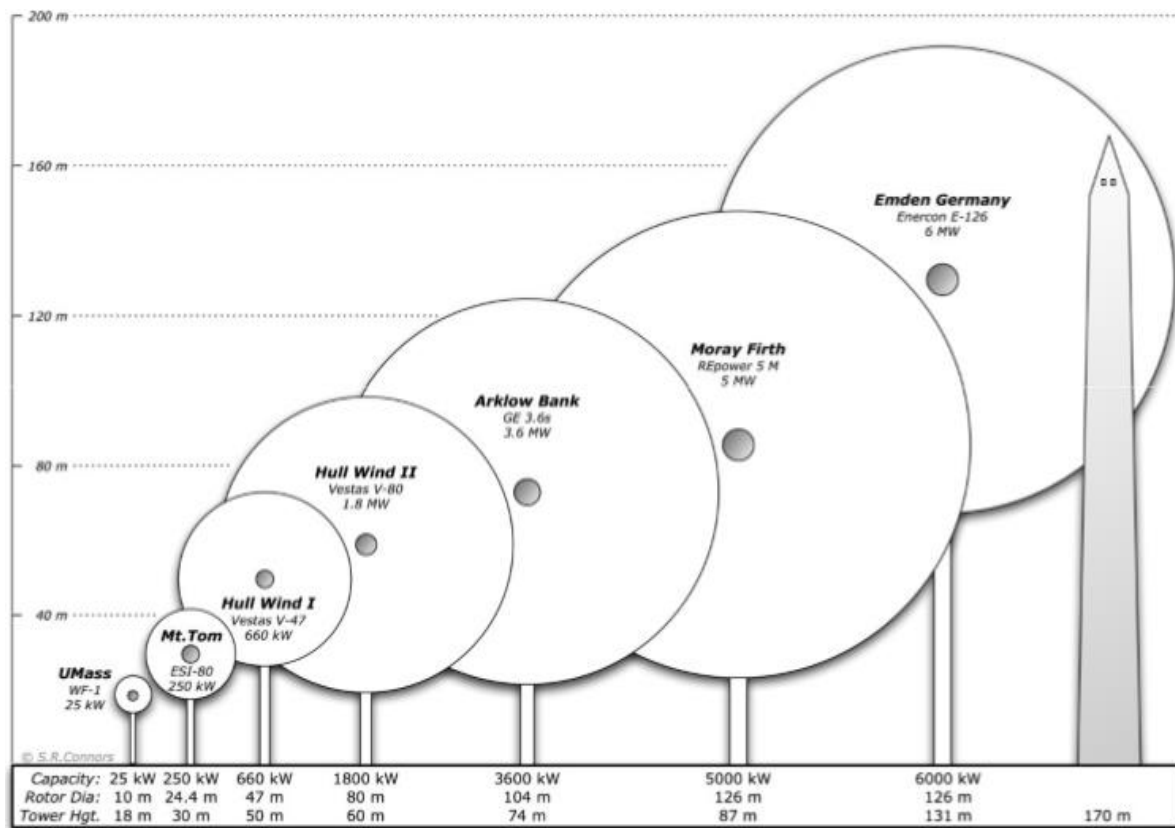
2.3.1 Γενικά περί ανεμογεννητριών

Με τις ανεμογεννήτριες επιτυγχάνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Η μεταβολή αυτή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, μέσω της πτερωτής, 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.



Σχήμα 2.5 : 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 2.6 : 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.



Σχήμα 2.7α : Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα (GE Renewable energy).



Σχήμα 2.7β : 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.

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.

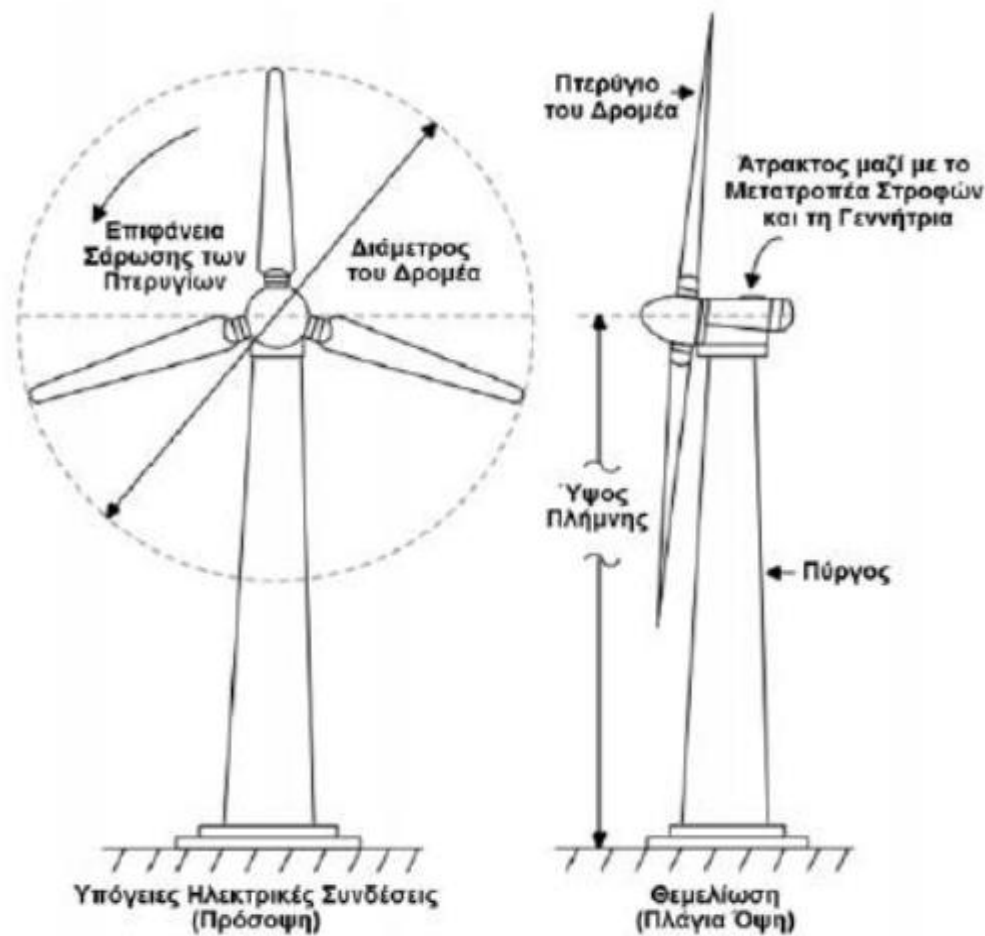
Πλέον παρατηρείται όλο και πιο σπάνια η κατασκευή τέτοιου είδους ανεμογεννητριών. Με βάση τις τελευταίες τεχνολογίες είναι πιο φτηνή και πιο επωφελής η χρήση των HAWT.

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 2.8 : 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 πτερύγια 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 περρωτής στο έδαφος
- Ανέγερση-σύνδεση της περρωτής

➤ Ο πύργος στήριξης της Α/Γ απαιτεί ισχυρή θεμελίωση και ο απαιτούμενος οπλισμός προκύπτει έπειτα από μελέτη των στατικών και δυναμικών φορτίων. Επίσης κατασκευάζεται συναρτήσεως 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 πεδίου και ευθυγράμμιση του κλωβού αγκυρώσεως της ανεμογεννήτριας
- Τοποθέτηση σωληνώσεων για την διέλευση των καλωδίων Μ.Τ.
- Σκυροδέτηση πεδίου με σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30
- Βαφή άνω επιφάνειας θεμελίου
- Επιχωμάτωση



Σχήμα 2.9 : Θεμελίωση ανεμογεννήτριας ισχύος 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 εγκατασθίθονται 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. 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 2.10 : Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στη Μεγάλη Βρετανία (Energypress).

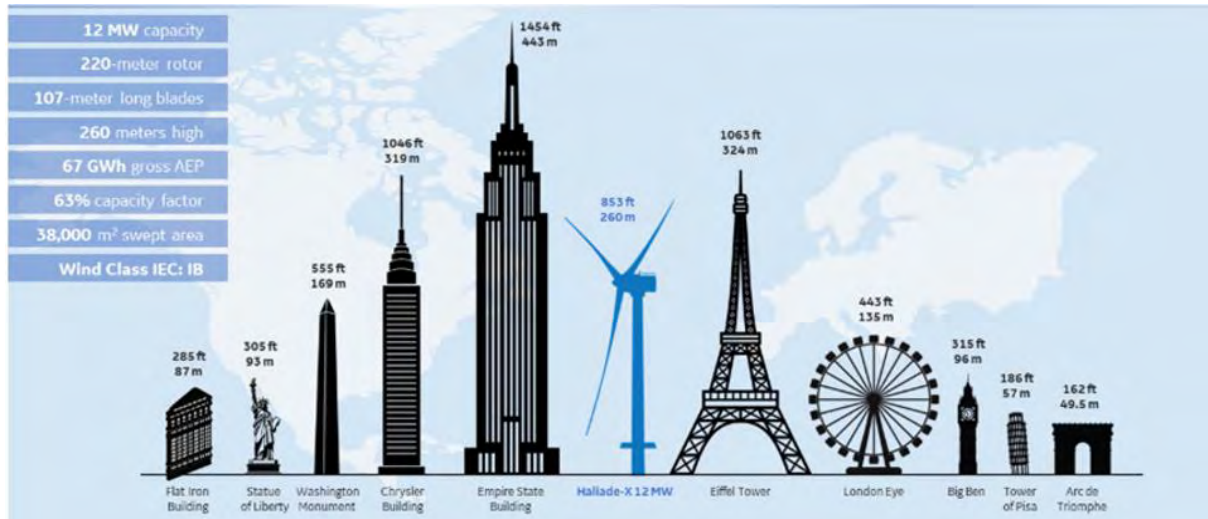
Πρόσφατα εγκαταστάθηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια στο μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο (Hornsea 1) το οποίο βρίσκεται 120 χιλιόμετρα από τις ακτές του Yorkshire και θα αποτελείται από 174 ανεμογεννήτριες της Siemens Gamesa. Κάθε μία θα έχει ισχύ της τάξεως των 7 μεγαβάτ και το πάρκο θα είναι ικανό να τροφοδοτεί 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).



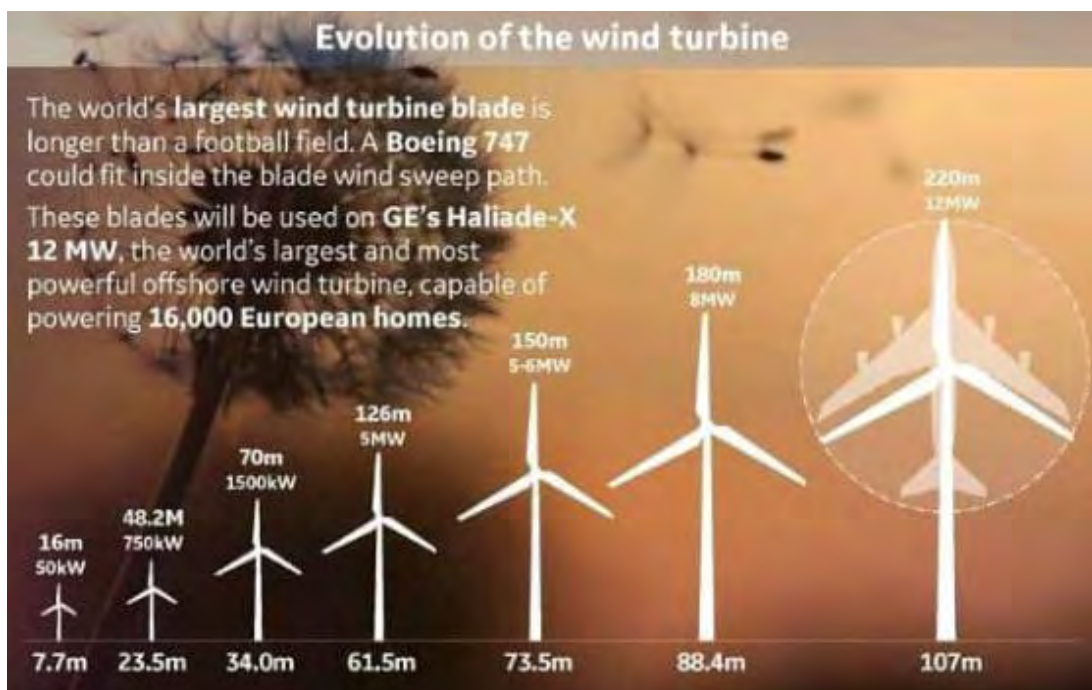
Σχήμα 2.11 : Υπεράκτιο αιολικό πάρκο Hornsea 1 (Orsted).

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).



Σχήμα 2.12α : 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.



Σχήμα 2.12β : 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 την 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 Μύθοι και Πραγματικότητα

- Οι ανεμογεννήτριες είναι απειλή για τα πουλιά

Πολλοί διεθνείς οργανισμοί έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι συγκριτικά με άλλες μεγάλες κατασκευές, οι οποίες έχουν μεγάλο ύψος, οι ανεμογεννήτριες προκαλούν λιγότερους θανάτους των πουλιών. Σύμφωνα με έρευνα στη Δανία ο αριθμός των πουλιών, που σκοτώνεται για κάθε γιγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας, είναι 5,18 για βιομηχανίες ορυκτών καυσίμων με μεγάλο ύψος και μόλις 0,27 από ανεμογεννήτριες. Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα ο αριθμός μικραίνει ακόμα περισσότερο, καθώς τα αποδημητικά πουλιά πετούν σε πολύ μεγαλύτερα ύψη σε σχέση με αυτά όπου έχουν κατασκευαστεί οι θαλάσσιες Α/Γ. Πριν την τοποθέτηση των αιολικών πάρκων πραγματοποιούνται μελέτες προκειμένου να διερευνηθούν τα «μονοπάτια» (pathlines) που ακολουθούν τα πουλιά, όταν μετακινούνται. Έτσι, πριν την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας λαμβάνονται μέτρα στήριξης της δραστηριότητας των πτηνών, όπως η κατασκευή τεχνητών φωλιών.

- Οι ανεμογεννήτριες προκαλούν οπτική όχληση

Αν γυρίσουμε στο παρελθόν, έχουμε παρατηρήσει κάποιες ανορθόδοξες κατασκευές με άσχημη αρχιτεκτονική στον τομέα των Α/Γ. Ωστόσο σήμερα εφαρμόζονται οι κατάλληλες νομοθεσίες, προκειμένου να διατηρηθεί η φυσική ομορφιά του περιβάλλοντος. Έρευνα του καθηγητή Hubner από το πανεπιστήμιο Halle-Wittenberg της Γερμανίας και του ινστιτούτου Forsa έδειξαν ότι το 80% των ανθρώπων που κατοικούν κοντά σε Α/Γ τις αξιολογούν θετικά. Επίσης στις υπεράκτιες κατασκευές πολλές φορές τοποθετούνται μακριά από τις ακτές, γεγονός που τις κάνει μη ορατές στο ανθρώπινο μάτι.

- Οι ανεμογεννήτριες μειώνουν την αξία των περιοχών, όπου εγκαθίστανται

Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε κάποιο σημείο δεν αποκλείει τη χρήση του ίδιου χώρου και για άλλους σκοπούς. Μια ανεμογεννήτρια καταλαμβάνει το 1-3% του χώρου στον οποίον εγκαθίσταται (συνυπολογίζεται η βάση της Α/Γ) και έτσι έως και το 99% της έκτασης είναι ελεύθερο για άλλες χρήσεις. Πολλές ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη έχουν εγκατασταθεί σε βοσκοτόπια, ενώ επίσης έχει ήδη αποδειχθεί ότι δεν αποκλείεται η δυνατότητα συνέχισης της γεωργικής δραστηριότητας στις εν λόγω περιοχές. Επίσης, η κατασκευή αιολικών πάρκων μειώνει τη λειτουργία θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας και προσελκύει τον "περιβαλλοντικό τουρισμό" (π.χ. Σητεία). Τα παραπάνω οφέλη έχουν ιδιαίτερη σημασία για τα νησιά του Αιγαίου, στα οποία η λειτουργία ενός πετρελαϊκού σταθμού υποβαθμίζει σημαντικά μία μεγάλη έκταση του νησιού.

-Οι ανεμογεννήτριες δε συμβάλλουν στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου

Μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια παράγει ετησίως περίπου 6 εκατομμύρια κιλοβατώρες αποσοβώντας την έκλυση 6.000 τόνων CO₂. Ωστόσο, η αποτελεσματική καταπολέμηση των κλιματικών αλλαγών απαιτεί το συνδυασμό των ΑΠΕ με την εξοικονόμηση ενέργειας.

- Η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου υποβαθμίζει την ποιότητα του φυσικού περιβάλλοντος

Οποιοδήποτε κατασκευαστικό έργο επιφέρει κάποια επιβάρυνση στο φυσικό περιβάλλον. Ωστόσο, μία σωστή περιβαλλοντική μελέτη μπορεί να εκμηδενίσει ουσιαστικά τα όποια περιβαλλοντικά προβλήματα μπορούν να δημιουργηθούν κατά την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν ότι η συμβατική παραγωγή ενέργειας με λιγνιτικούς, πετρελαϊκούς ή σταθμούς φυσικού αερίου και οι συμπληρωματικές εγκαταστάσεις τους (ορυχεία, δίκτυα, αγωγοί) έχουν καταστρέψει τεράστιες εκτάσεις της ελληνικής επικράτειας τα τελευταία πενήντα χρόνια, ενώ πλέον η κατασκευή νέων σταθμών απειλεί με καταστροφή ακόμα μεγαλύτερες.

- Οι ανεμογεννήτριες εκπέμπουν ραδιομαγνητική ακτινοβολία και επηρεάζουν τα επικοινωνιακά συστήματα

Οι παρεμβολές που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες μπορούν να επηρεάσουν μόνο το τηλεοπτικό σήμα και την αεροπλοΐα στις περιπτώσεις, όπου αυτές βρίσκονται πολύ κοντά σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις. Ακόμα και τότε όμως το πρόβλημα εκμηδενίζεται με τη σωστή χωροθέτηση των ανεμογεννητριών.

- Οι ανεμογεννήτριες είναι θορυβώδεις

Ο θόρυβος που προέρχεται από την εγκατάσταση μίας Α/Γ είναι αεροδυναμικός και ηλεκτρομηχανολογικός. Ο αεροδυναμικός παράγεται από την περωτή λόγω της περιστροφής και της τύρβης. Ο μηχανικός παράγεται από το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης και την γεννήτρια. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν πρακτικά εκμηδενίσει το μηχανικό τους θόρυβο, ενώ ο αεροδυναμικός θόρυβος σχετίζεται με παράγοντες, όπως η ταχύτητα του αέρα, η υγρασία ή η ύπαρξη φυσικών εμποδίων. Οι Α/Γ τελευταίας τεχνολογίας προκαλούν θορύβους μέσα στα όρια και για τις αποστάσεις που προβλέπονται από την νομοθεσία. Επίσης, κατά την διαδικασία κατασκευής του περυγίου χρησιμοποιούνται υλικά, που δεν επηρεάζουν τις συχνότητες της τηλεόρασης ή του ραδιοφώνου.

- Η αιολική ενέργεια δεν έχει οφέλη

Η αιολική ενέργεια είναι η σημαντικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ως τέτοια πρέπει να αντιμετωπίζεται. Σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες ΑΠΕ και την εξοικονόμηση ενέργειας συμβάλλει τα μέγιστα στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου που ευθύνονται για τις κλιματικές αλλαγές. Επίσης συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή ανεξαρτησία από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, καθώς οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες και εγχώριες. Τέλος, συμβάλλει στην τοπική ανάπτυξη, καθώς δημιουργεί περισσότερες θέσεις εργασίας σε σύγκριση με ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας.

Συμπερασματικά, η αιολική ενέργεια και οι υπόλοιπες ΑΠΕ έχουν τεράστια περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη.

2.8 Αντικεραυνική προστασία και γείωση ανεμογεννητριών

Προκειμένου να υπάρχει προστασία του εν λόγω φαινομένου οι ανεμογεννήτριες φέρουν προστασία και στα πτερύγια του ρότορα (προστασία και στο ψηλότερο σημείο). Για την γείωση της Α/Γ υπάρχει σύνδεση με το σύστημα γείωσης του μετασχηματιστή (IEC 413.1.3.2 και 413.1.3.3) και προϋποθέτει :

- Γύρω από τα θεμέλια της ανεμογεννήτριας σε απόσταση του ενός μέτρου να τοποθετείται μία περιμετρική γείωση.
- Οι ράβδοι χαλκού που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή να τοποθετούνται σε αποστάσεις, που προβλέπεται από τους κανονισμούς (Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384)
- Ο αγωγός σύνδεσης πρέπει να συνδέεται με την Α/Γ σε τουλάχιστον δύο σημεία. Η διατομή του αγωγού πρέπει να είναι ανάλογη του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνολική αντίσταση γείωσης δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 ohm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ 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.

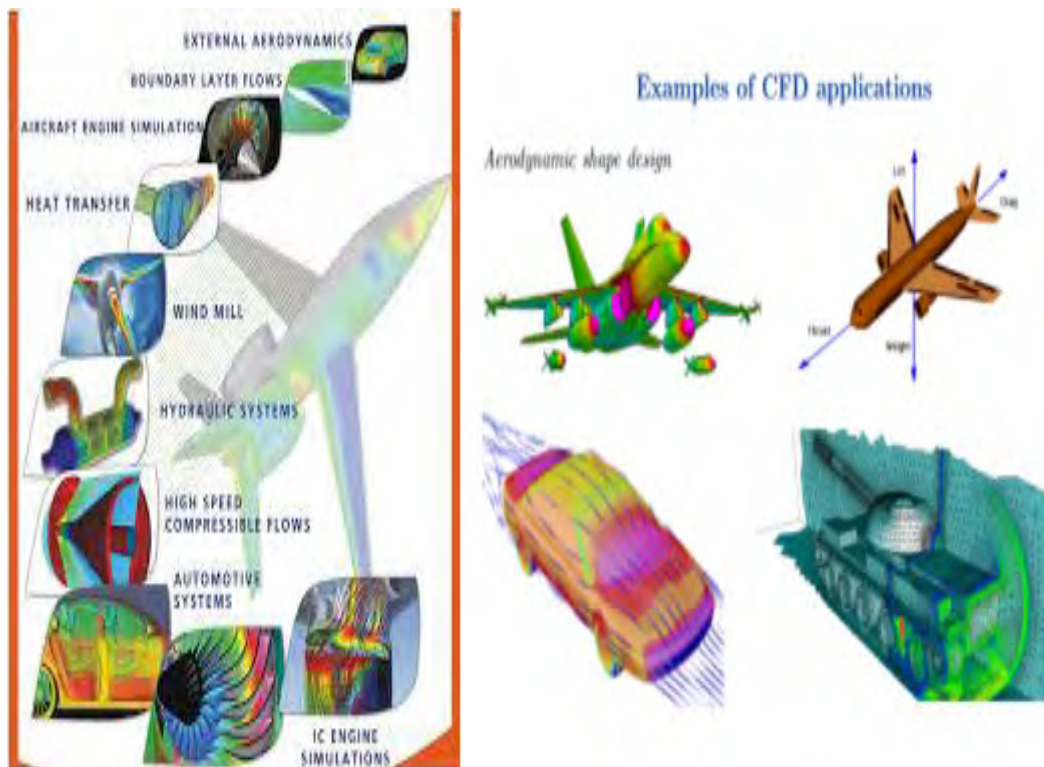
➤ Χρησιμοποιείται για περιπτώσεις στις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να εκλάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα όπως η προσομοίωση σε πραγματικές

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 :

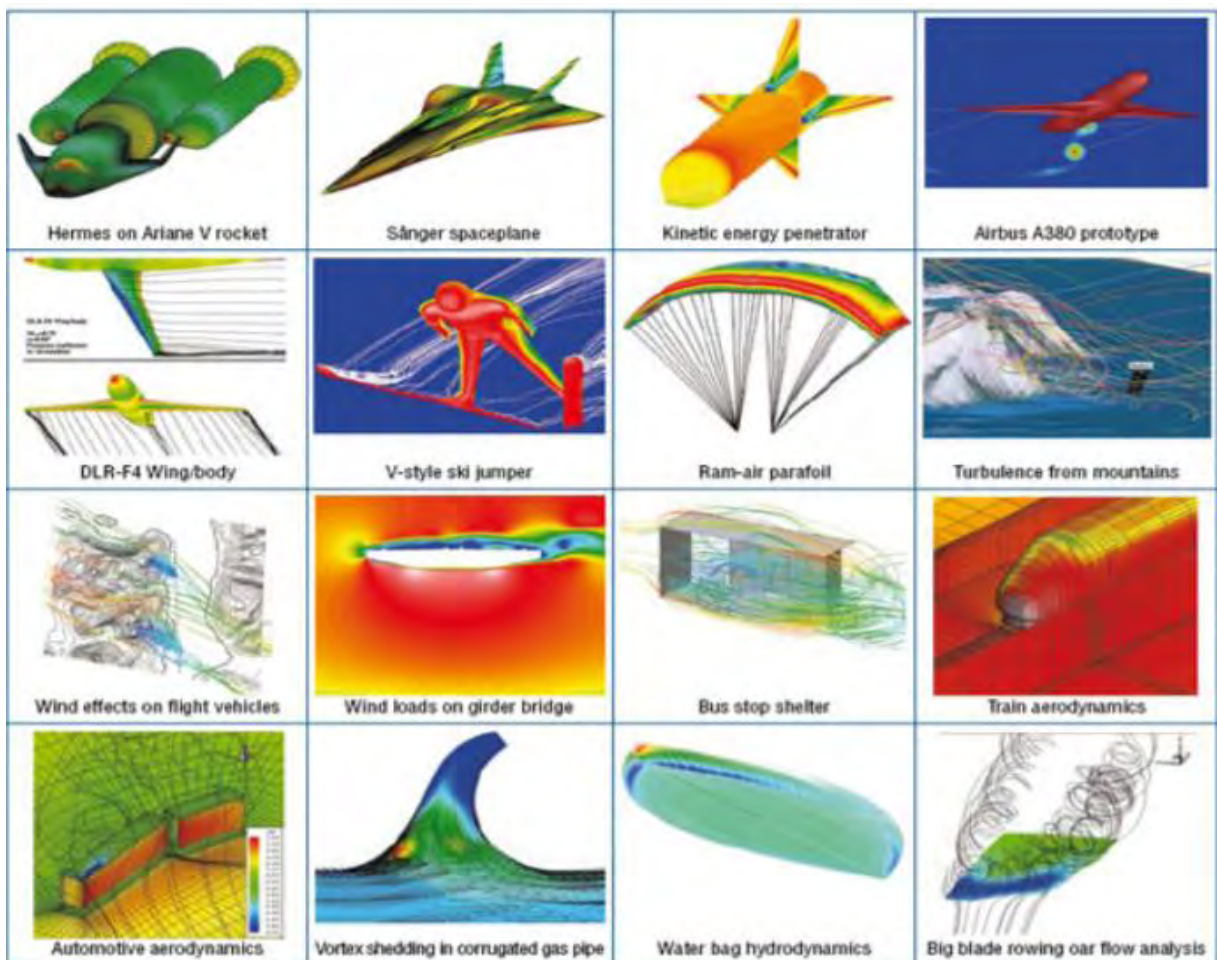
1. Σχεδιασμός δικτύων ύδρευσης/άρδευσης οικισμών και αποστραγγιστικών δικτύων.
2. Μελέτη της μεταφοράς των ρυπαντών σε φυσικούς ή τεχνητούς αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες, θάλασσες, ατμόσφαιρα, έδαφος) και σχεδιασμός συστημάτων διάχυσης και διασποράς ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αραίωση.
3. Σχεδιασμός πτερύγων 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.



Σχήμα 3.1 : Εφαρμογές του λογισμικού CFD (Ansys).

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.
- Χειρουργούς, 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.



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

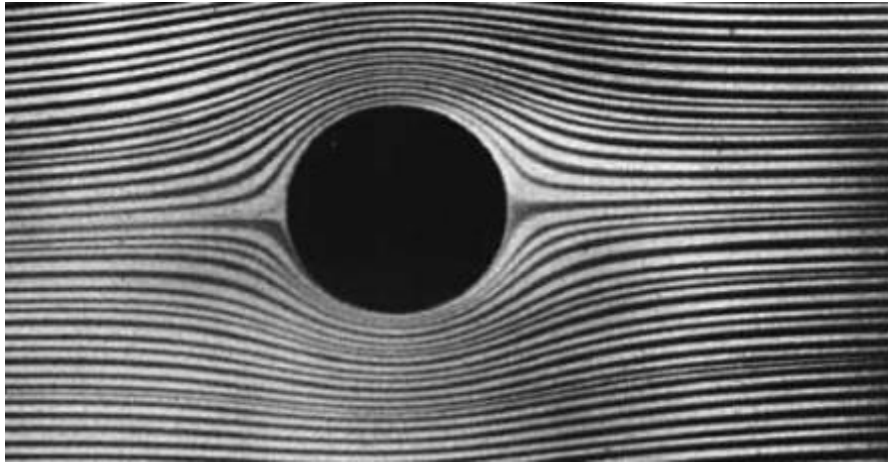
Με βάση τα φυσικά προβλήματα που θέλουμε να προσομοιώσουμε με CFD τα προβλήματα διακρίνονται σε μονοδιάστατα (1D), σε δυσδιάστατα (2D) και σε τρισδιάστατα (3D). Στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο για την ανάλυσή του. Τα αποτελέσματα σε όλες τις διαστάσεις είναι σχεδόν 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.

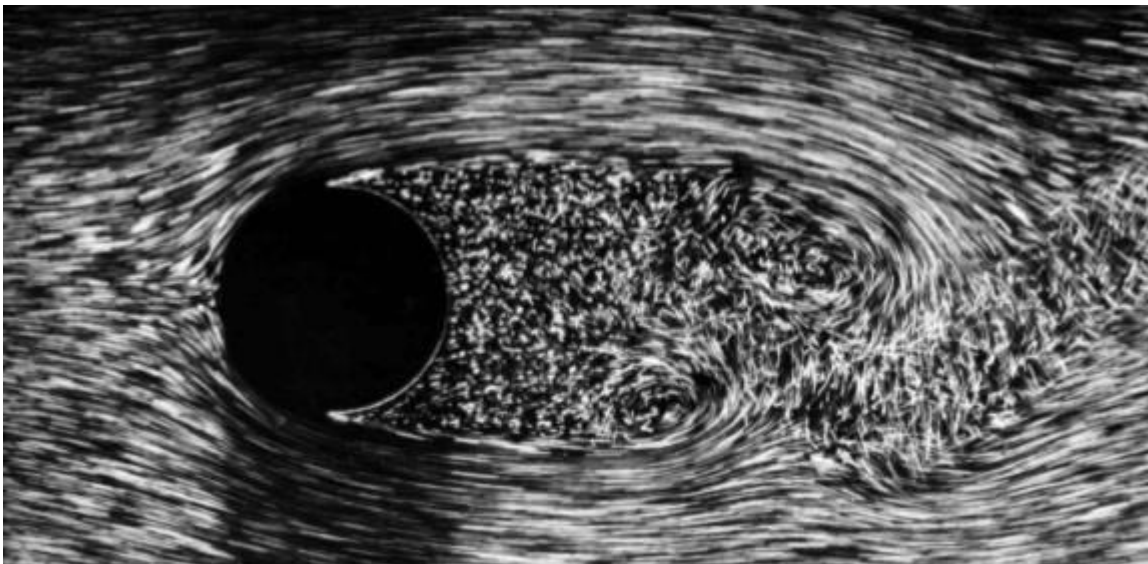
3. Ο αριθμός Reynolds

Το 1883 μελετώντας την ροή σε ευθύγραμμο σωλήνας 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).



Σχήμα 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.



Σχήμα 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 υπερισχύουν οι δυνάμεις τριβής, ο αριθμός Reynolds είναι έχει χαμηλή τιμή και η ροή είναι στρωτή. Αν υπερισχύουν 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 ρ 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.

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

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 η/ρ είναι το κινηματικό ιξώδες, ν . 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. 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)
- Ασυμπίεστη – 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^{ος} Θερμοδυναμικός νόμος (αρχή διατήρησης της ενέργειας)

Εξίσωση διατήρησης της μάζας

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

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

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 :

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

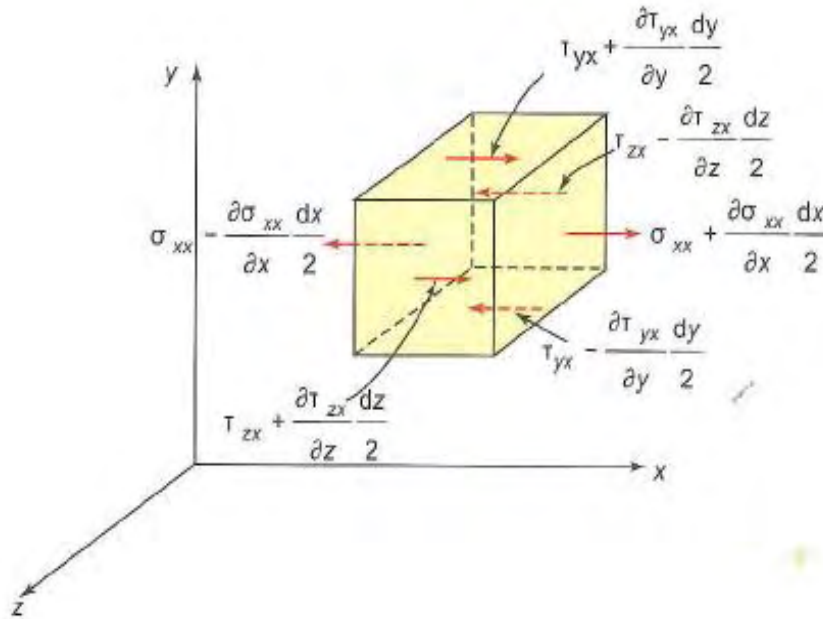
Όπου

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

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού



Σχήμα 3.5 : Ορθές και διατμητικές τάσεις στην κατεύθυνση x που ασκούνται στις έδρες απειροστού όγκου ελέγχου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου (Α.Λιακόπουλος Μηχανική των Ρευστών, Β Έκδοση).

Εξίσωση διατήρησης της ορμής

Ο δεύτερος βασικός νόμος της κλασικής μηχανικής εκφράζεται από την εξίσωση διατήρησης της ορμής (2^{ος} 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^ο 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 :

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

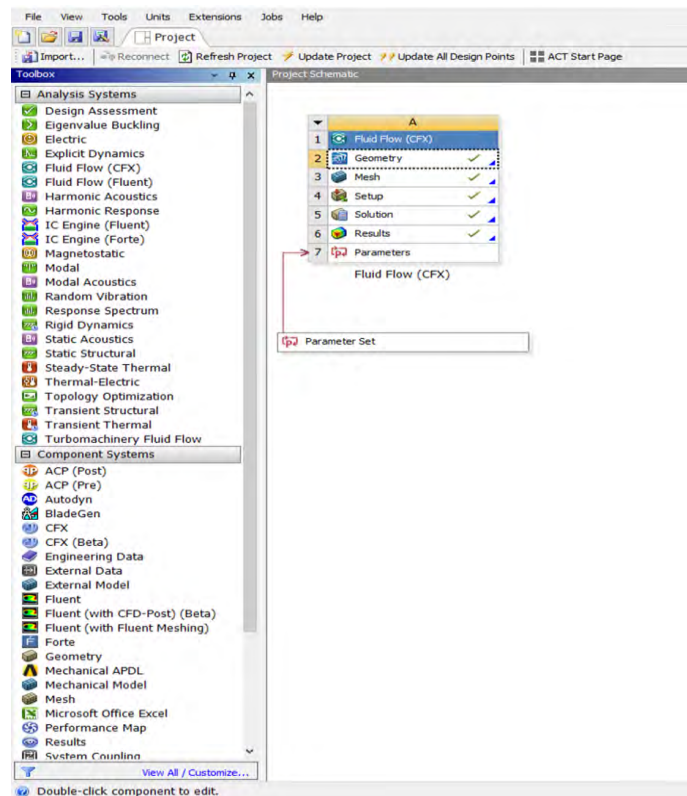
- ❖ Για μία ασυμπίεστη ροή ενός Νευτώνειου ρευστού όπως αυτή που μελετάτε στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν υπάρχει μεταβολή της πυκνότητας γεγονός που καθιστά δύσκολη την σύνδεση μεταξύ των εξισώσεων ορμής και συνέχειας με την εξίσωση ενέργειας. Παρόλα αυτά στις ασυμπίεστες ροές δεν υπάρχει σημαντική 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ANSYS CFX

4.1 Το Λογισμικό πρόγραμμα ANSYS CFX

Η εταιρεία ANSYS διαθέτει λογισμικό, καλύπτοντας το φάσμα της φυσικής, παρέχοντας πρόσβαση στο πεδίο των προσομοιώσεων, που απαιτούνται για τον σχεδιασμό του μοντέλου που επιθυμούμε. Το λογισμικό της ANSYS συνδυάζει προσομοίωση ρευστών, στερεών, ηλεκτρονικών και multiphysics με λογισμικό σχεδίασης, καλύπτοντας ένα ευρύτατο πεδίο από εφαρμογές του τομέα των ηλεκτρολόγων, μηχανολόγων, ναυπηγών, πολιτικών και χημικών μηχανικών. Για διάφορες επενδύσεις, που κάνουν οργανισμοί σε όλο τον κόσμο, χρησιμοποιούν το λογισμικό της εν λόγω εταιρείας, καθώς στον τομέα της ρευστοδυναμικής παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει πρόσβαση σε διάφορα προγράμματα, ανάλογα με το είδος της ανάλυσης που μας ενδιαφέρει. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε αναλυτικά στο αριστερό μέρος της μία σειρά προγραμμάτων (analysis systems), που παρέχονται στον χρήστη, προκειμένου να διατυπώσει το μοντέλο, που επιθυμεί, και να εκλάβει τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Το πρόγραμμα στο οποίο θα γίνει η ανάλυση της παρούσας εργασίας, είναι το CFX.



Σχήμα 4.1 : Γραφικό περιβάλλον του ANSYS WORKBENCH.

Το λογισμικό ANSYS CFX αποτελεί εργαλείο για προσομοίωση υψηλής ακρίβειας της συμπεριφοράς των ρευστών και παρέχει πληροφορίες για τις πραγματικές επιδόσεις του προϊόντος ή της διεργασίας κατά την διαδικασία της σχεδίασης, της βελτιστοποίησης και της παραγωγής. Το CFX χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των φυσικών προβλημάτων. Με το πρόγραμμα αυτό ο χρήστης είναι ικανός να μοντελοποιήσει φυσικά προβλήματα, όπου αφορούν μόνιμες και χρονικά μεταβαλλόμενες ροές, οι οποίες μπορεί να αφορούν προβλήματα της σύγχρονης εποχής, όπως μετάδοσης θερμότητας, χημικών αντιδράσεων, περιστρεφόμενες/κινούμενες κατασκευές και άλλα σύνθετα φαινόμενα. Το λογισμικό αυτό τρέχει στην πλατφόρμα προσομοίωσης ANSYS Workbench και βάση της σύγχρονης τεχνολογίας, που διαθέτει, χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω στάδια :

- ❖ Geometry (μέσω του προγράμματος Spaceclaim ή DesignModeler)
- ❖ Mesh
- ❖ Setup (μέσω του CFX-Pre)
- ❖ Solution (κώδικας που ονομάζεται Solver)
- ❖ Results (CFD-Post)
- ❖ Parameters

Για την επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο λογισμικό CFX της ANSYS πρέπει να υλοποιηθούν τα παραπάνω στάδια. Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα κατασκευής της γεωμετρίας (Design Modeler) και στην συνέχεια του κατάλληλου πλέγματος (Mesh). Ακόμη, εισάγονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, το μοντέλο τύρβης και άλλα στοιχεία στο στάδιο CFX-Pre. Έπειτα ακολουθεί ο επιλυτής (Solver) στον οποίο γίνεται η επίλυση του ροικού πεδίου και τέλος τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται στο πρόγραμμα μετεπεξεργασίας (CFD-Post).

4.2 Επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας

Η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας επιτυγχάνεται μέσω των σχεδιαστικών προγραμμάτων Spaceclaim ή DesignModeler. Αποτελούν το πρώτο στάδιο του ANSYS CFX και μέσω των κατάλληλων εργαλείων ο χρήστης είναι ικανός να σχεδιάσει πολύπλοκες γεωμετρίες για φυσικά προβλήματα, που θέλει να προσομοιώσει. Ένας άλλο σχεδιαστικό πρόγραμμα, που χρησιμοποιείται ευρέως, είναι το Solidworks. Μέσω αυτού σχεδιάζονται πολλά τρισδιάστατα προβλήματα και έπειτα εισάγονται εύκολα στο λογισμικό πρόγραμμα ANSYS.

Στην συγκεκριμένη εργασία το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι το Design Modeler. Μέσω αυτού σχεδιάστηκε ένας κόλπουρος κώνος στερεής μορφής, όπου στην συνέχεια θα εκτελέσουμε την αεροδυναμική ανάλυση που επιθυμούμε. Σε αυτό το στάδιο εκτός από την γεωμετρία της κατασκευής που μας ενδιαφέρει κρίνεται απαραίτητο ο σχεδιασμός και του κατάλληλου πεδίου ορισμού

(Enclosure), όπου μπορεί να έχει την μορφή ορθογώνιου κουτιού (box) ή κυλίνδρου (cylinder) ή σφαίρας (sphere).

4.3 Διακριτοποίηση των στοιχείων

4.3.1 Γενική έννοια του πλέγματος

Το Mesh (πλέγμα) είναι ένα ευφρές προϊόν γενικής χρήσης υψηλής απόδοσης. Δημιουργεί το κατάλληλο πλέγμα για ακριβείς και πολυσύνθετες λύσεις. Κατά την διαδικασία της ανάλυσης εφαρμόζεται πάνω στο μοντέλο που προσομοιώνουμε και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την διακριτοποίηση σε στοιχεία στο μοντέλο. Όσο περισσότερα είναι τα elements (στοιχεία) και nodes (κόμβοι), τόσο πιο ακριβή θα είναι τα αποτελέσματα. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διακριτοποίησης ανάλογα με τον χρόνο αναμονής που επιθυμούμε, ώστε να δημιουργηθεί το πλέγμα.

Μέσω του πλέγματος γίνεται διαχωρισμός του φυσικού χώρου ροής σε δίκτυο κελιών (grid) όπου επιτυγχάνεται η διακριτοποίηση των εξισώσεων 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.

Η δημιουργία του κατάλληλου πλέγματος είναι το θεμέλιο για προσομοιώσεις μηχανικών προβλημάτων. Πάνω στο project που εργαζόμαστε το meshing είναι υπεύθυνο για τον τύπο των λύσεων που θα ακολουθήσουν και θα χρησιμοποιηθούν βάση των κριτηρίων που επιθυμούμε. 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 κανάβδος επιλέγει τον κατάλληλο τρόπο διακριτοποίησης βάση της γεωμετρίας του μοντέλου που έχουμε σχεδιάσει. Το πρόγραμμα έχει εξελιχθεί και αναλόγως τους πυρήνες (cores) που διαθέτει ο υπολογιστής μας, επεξεργάζεται και μειώνει αποτελεσματικά τον χρόνο της δημιουργίας ενός πλέγματος.

4.3.2 Τρόποι δημιουργίας του πλέγματος

- Assembly meshing

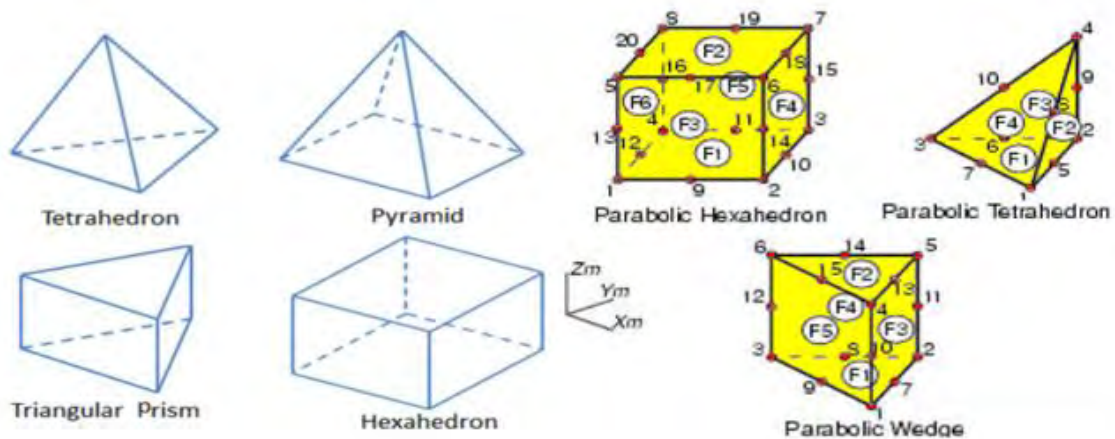
Είναι ο τύπος πλέγματος, όπου γίνεται η διακριτοποίηση των στοιχείων μέσω μίας διαδικασίας σε όλο το μοντέλο, κατευθείαν σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, όπου γίνεται σε κάθε κομμάτι, (part or body-based meshing) και τα κομμάτια (parts) δεν έχουν καμία σύνδεση μεταξύ τους, καθώς το meshing γίνεται ατομικά. Μέσω των συναρτήσεων Boolean αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος, όπου πραγματοποιείται η συναρμολόγηση των στοιχείων (elements) μέσα στο ίδιο πρόγραμμα, γλυτώνοντας από τον σχεδιασμό τους σε ένα πρόγραμμα σχεδίασης CAD. Αυτές οι λειτουργίες δημιουργούν ένα σύμμορφο πλέγμα μεταξύ των στερεών, ρευστών και εικονικών σωμάτων κατά την διαδικασία της ανάλυσης.

- Meshing by Algorithm

Αυτός ο τύπος meshing περιγράφει μια διαδικασία που αναπτύσσεται βάση ενός αλγορίθμου, όπου υπάρχει σύνδεση των στοιχείων (patch conforming) ή ανεξαρτησία αυτών (patch independent). Σε κάποιες περιπτώσεις οι αλγόριθμοι λειτουργούν στο επίπεδο ενός κομματιού (part level) και σε άλλες με την παραπάνω μέθοδο (assembly level).

❖ Patch conforming

Το patch conforming ή αλλιώς η αντιστοίχιση πλέγματος είναι μία τεχνική διακριτοποίησης των στοιχείων, στην οποία όλες οι όψεις και τα όριά τους (faces and boundaries) συνυπάρχουν σε ένα δεδομένο μέρος. Αυτός ο τρόπος πλέγματος χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες, που προκύπτουν από την σύνθετη γεωμετρία του προβλήματος. Η μέθοδος αυτή παραμένει αμετάβλητη για τα φορτία, τις οριακές συνθήκες και τα αποτελέσματα του αντικειμένου μας και σε περίπτωση αλλαγής του πεδίου εφαρμογής δεν χρειάζεται να γυρίσουμε πίσω και να ξανασχεδιάσουμε το πλέγμα.



Σχήμα 4.2 : Συνήθεις μορφές στοιχείων πλέγματος που εφαρμόζονται και οι κόμβοι (nodes) αριθμημένοι (Sharcnet.ca).

Εφαρμογές του patch conforming :

Σώματα ελεύθερης επιφάνειας (Surface bodies)

- Quad Dominant

Η μέθοδος αυτή στοχεύει σε ένα ελεύθερο πλέγμα με την δημιουργία τετραγώνων. Το συγκεκριμένο mesh περιλαμβάνει τα Element Midsize Nodes και Free Face Mesh Type. Το πρώτο αφορά στον έλεγχο του πλέγματος και το αν θα δημιουργηθεί γύρω από μεσαίους ή κομβικούς κόμβους. Το free face mesh καθορίζει το σχήμα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την πλήρωση του σώματος και επιτρέπει την επιλογή ανάμεσα σε τετράεδρα και τρίεδρα στοιχεία.

- Triangles method

Αυτή η μέθοδος δημιουργεί ένα ενιαίο πλέγμα, όπου όλα τα στοιχεία αποτελούνται από τρίγωνα.

❖ Patch Independent

Ο συγκεκριμένος τύπος meshing είναι μια τεχνική, στην οποία οι επιφάνειες του μοντέλου (faces) και τα όρια του (boundaries) δεν αλληλοεπιδρούν απαραίτητα μεταξύ τους, εκτός αν υπάρχουν οριακές συνθήκες. Η ανεξάρτητη αντιστοίχιση των στοιχείων (patch independent) είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις, όπου χρειάζεται ομοιόμορφο πεδίο εφαρμογής του πλέγματος με στοιχεία (elements) του ίδιου μεγέθους. Το πρόγραμμα δημιουργεί το κατάλληλο πάχος των στοιχείων και τον συνθηκών του προβλήματος και η τοποθέτηση αυτών από τον χρήστη πρέπει να τηρείται σωστά, καθώς ενδέχεται να παρουσιαστούν σφάλματα (errors) με συνέπεια να μην μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο στάδιο (CFX-Pre) του προγράμματος. Με την σωστή τήρηση των ελέγχων διασφαλίζεται η σύνδεση των στοιχείων του πλέγματος και μπορεί να συνεχιστεί η διαδικασία της ανάλυσης.

Εφαρμογές του Patch Independent :

Σώματα ελεύθερης επιφάνειας (Surface bodies)

- Multizone Quad/Tri Mesh Method Control

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την δημιουργία του mesh σε πολύ μικρά στοιχεία πολλαπλών σωμάτων (multibody parts). Ωστόσο οι επιφάνειες των σωμάτων με μεταβλητό πάχος (variable thickness) δεν προστατεύονται από την τοπολογία. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό που παρουσιάζεται κοντά στα όρια (boundaries) δημιουργούμε ονομαστικές επιλογές (named selection) για κάθε πάχος. Έτσι υποστηρίζονται όλες οι συνδέσεις του πλέγματος.

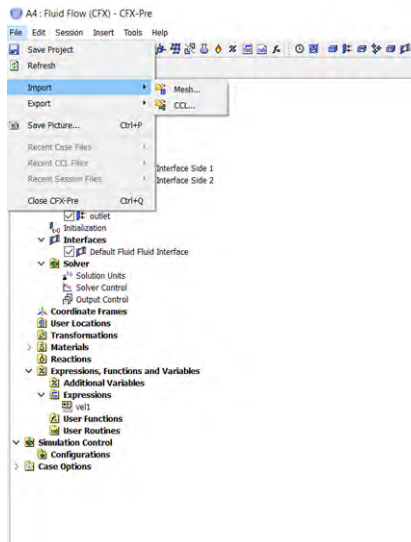
4.4 Ο προεπεξεργαστής του πακέτου CFX (CFX-Pre)

4.4.1 Εισαγωγή στο CFX – Pre

Το CFX-Pre είναι ένα στάδιο του προγράμματος ANSYS CFX, στο οποίο τοποθετούνται τα φυσικά προβλήματα, ώστε στο επόμενο στάδιο μέσω του solver να καταλήξουμε στα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα. Το CFX-PRE χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό και τον καθορισμό των ρυθμίσεων της προσομοίωσης του μοντέλου και των φυσικών παραμέτρων, που απαιτούνται για να περιγράψουν τα προβλήματα ροής. Η δημιουργία της προσομοίωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα του προβλήματος το οποίο διερευνάμε. Στο συγκεκριμένο στάδιο (προεπεξεργασία) εισάγουμε τις οριακές συνθήκες του προβλήματος που πρέπει να υπάρχουν σε κάθε περιοχή του όγκου ελέγχου, ώστε να συνεχίσουμε στην επίλυση (CFX-Solver).

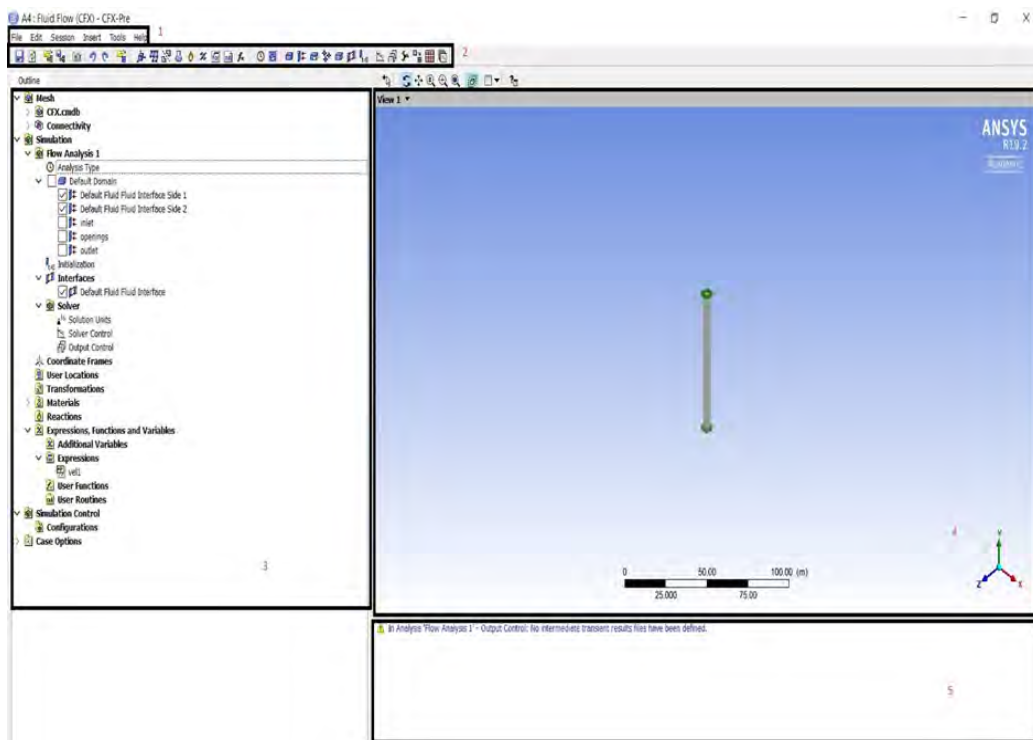
4.4.2 Εισαγωγή του πλέγματος

Στο κύριο παράθυρο του CFX-Pre από την γραμμή εργαλείων μπορούμε να εισάγουμε το πλέγμα που έχουμε δημιουργήσει μέσω της εντολής File-Import-Mesh. Ακόμη ένας άλλος τρόπος εισαγωγής είναι, αν χρησιμοποιήσουμε την εντολή Update Upstream Components κάνοντας δεξί κλικ στην λέξη Setup στο γραφικό περιβάλλον του ANSYS Workbench. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται κατευθείαν το πλέγμα στο CFX-Pre και αποτελεί πιο εύκολο τρόπο από τον προηγούμενο.



Σχήμα 4.3 : Εισαγωγή του πλέγματος μέσω της εντολής Import

4.4.3. Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre



Σχήμα 4.4 : Το γραφικό περιβάλλον του CFX – Pre.

1) Menu Bar

Το menu bar βοηθά τον χρήστη του προγράμματος να έχει πρόσβαση στις λειτουργίες και στις εντολές του.

- File Menu

Επιλέγοντας την συγκεκριμένη εντολή ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει (import) και να εξάγει (export) φακέλους από τον σκληρό δίσκο του υπολογιστή που σχετίζονται με την προσομοίωση.

- Edit Menu

Με την συγκεκριμένη εντολή ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα άλλο παράθυρο που ονομάζεται Options και έχει προχωρημένες ρυθμίσεις σχετικά με τον γραφικό σχεδιασμό, το mesh, extensions κ.α.

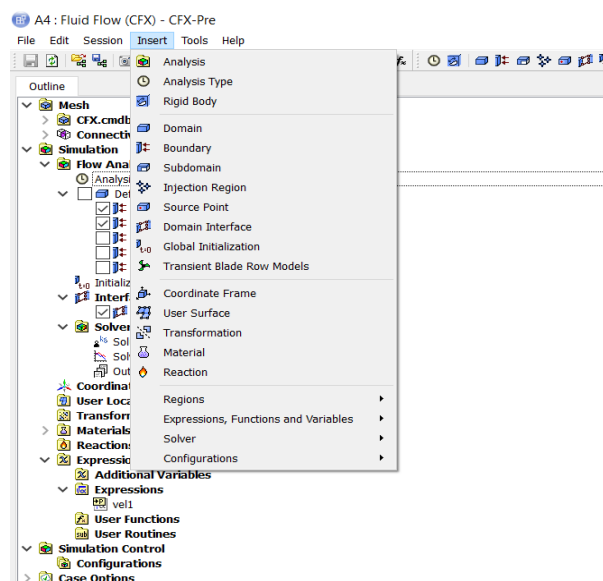
Επίσης μπορούμε να επιλέξουμε τις εντολές Undo και Redo.

- Session Menu

Σε αυτό το menu υπάρχουν τρεις επιλογές : New Session, Start Recording και Stop Recording. Με την εντολή session ο χρήστης αποθηκεύει σε έναν φάκελο όλες τις διαδικασίες που έχει κάνει και όταν κριθεί απαραίτητο μπορεί να ανατρέξει σε αυτόν.

- Insert Menu

Το σημαντικότερο παράθυρο του Menu Bar καθώς σε αυτό ο χρήστης τοποθετεί τα φυσικά προβλήματα που θέλει να κάνει ανάλυση για το δεδομένο μοντέλο.



Σχήμα 4.5 : Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών μέσω της εντολής Insert.

Σε αυτό εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες, οι περιοχές, το περιβάλλον και τοποθετούνται συγκεκριμένες τιμές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση.

- **Tools Menu**

Μια σειρά εντολών όπου χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση για επεξεργασία των στοιχείων.

- **Help Menu**

Το συγκεκριμένο menu παρέχει πρόσβαση στον χρήστη σε μία διαδικτυακή πλατφόρμα της εταιρείας ANSYS. Μέσω αυτού μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στο manual του προγράμματος και σε κάποια tutorials με σκοπό την αντιμετώπιση των πιθανών προβλημάτων που θα παρουσιαστούν σε αυτό το στάδιο του προγράμματος.

2) Toolbar

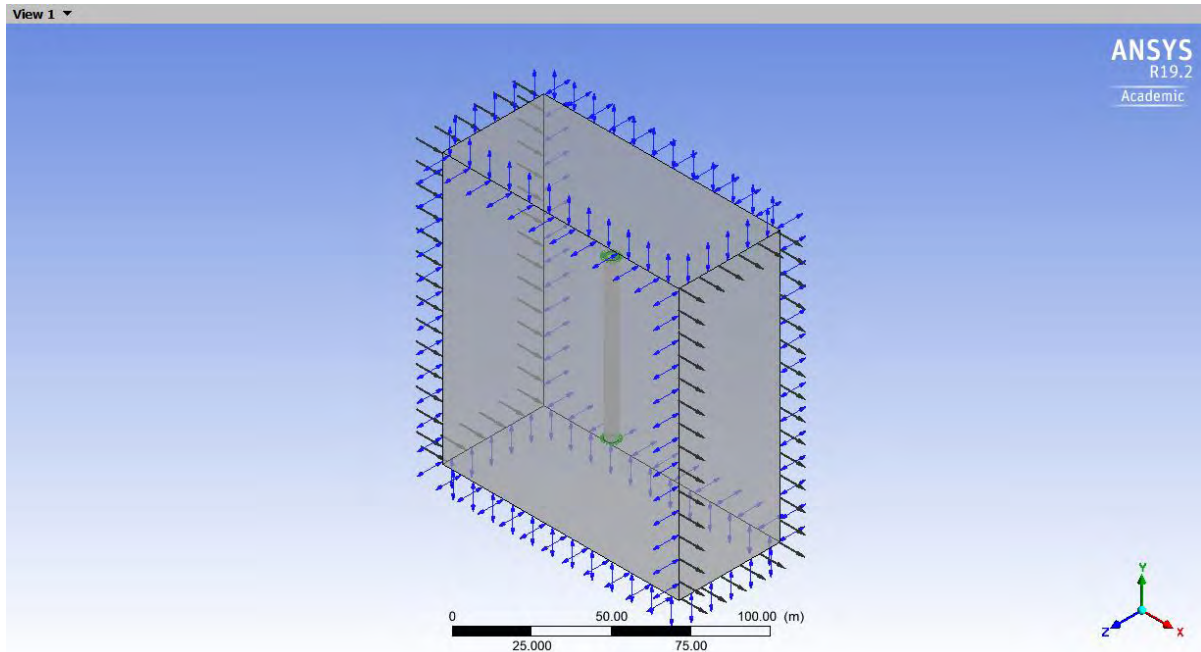
Στο toolbar εμφανίζονται οι λειτουργίες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά. Όλες μπορούν να βρεθούν από την εντολή insert που αναφέρθηκε προηγουμένως.

3) Workspace Area

Εδώ υπάρχει μία σειρά παραμέτρων σε δένδροειδή μορφή, όπου παρουσιάζονται διάφορες κατηγορίες, στις οποίες ο χρήστης επιλέγει τις κατάλληλες για την προσομοίωσή του. Σημαντική παράμετρος είναι το Analysis Type, όπου ελέγχεται το είδος της ροής (steady or transient) και τον χρόνο (time duration), που θα τρέξει ο κώδικας στον solver. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί το expressions, καθώς ο χρήστης μπορεί να εισάγει εύκολα τις ταχύτητες, τις πιέσεις κ.α., που χρειάζεται για το πρόβλημα.

4) Viewer Area

Στο παράθυρο αυτό απεικονίζονται η γεωμετρία, το πλέγμα και οι συνοριακές συνθήκες, που έχει εισάγει ο χρήστης στο μοντέλο, που προσομοιώνει. Ο χρήστης βλέπει σφαιρικά το πρόβλημα και οπτικοποιούνται οι εντολές, που έχει χρησιμοποιήσει.



Σχήμα 4.6 : Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών από τον χρήστη

5) Physics Message Window

Το παράθυρο αυτό ελέγχει τις ενέργειες, που έχει κάνει ο χρήστης, ώστε να τηρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την συνέχεια στο επόμενο στάδιο του προγράμματος. Το μοντέλο, που έχει εισάγει ο χρήστης, πρέπει να έχει το κατάλληλο πλέγμα και τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, ώστε να μην δημιουργούνται ασάφειες στο πρόγραμμα. Σε περίπτωση σφάλματος του χρήστη εμφανίζονται, στο παράθυρο αυτό μηνύματα με έντονα κόκκινα γράμματα, δείχνοντας στον χρήστη που έχει γίνει το λάθος. Το πρόγραμμα υποδεικνύει στον χρήστη τις ρυθμίσεις, που πρέπει να αλλάξει, προκειμένου το πρόβλημα να διατυπωθεί σωστά. Ένα σημαντικό λάθος που παρατηρείται είναι το χρονικό βήμα, το οποίο θα τρέξει ο κώδικας και ένα άλλο είναι το κομμάτι της φυσικής, όπου πρέπει να καθορίζονται όλοι οι παράμετροι με σαφήνεια. Εάν δεν παρουσιαστεί κανένα σφάλμα, μπορεί ο χρήστης να συνεχίσει στο επόμενο στάδιο της προσομοίωσης.

4.4.4 Συνοριακές συνθήκες του προγράμματος

Οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να διατυπώνονται σε κάθε περιοχή του όγκου ελέγχου του προβλήματος. Για να δημιουργήσουμε μία συνοριακή συνθήκη ο χρήστης επιλέγει την εντολή Create a Boundary Condition και έπειτα δίνει ένα όνομα για δική του διευκόλυνση. Συνοριακές συνθήκες αποτελούν τα : Inlets, Outlets, Openings, Walls και Symmetry planes.

➤ Inlets

Τα inlets (εισαγωγές) χρησιμοποιούνται σε περιοχές, όπου αναμένουμε εισροή (inflow) δηλαδή ροή κατευθυνόμενη προς το εσωτερικό του όγκου ελέγχου της προσομοίωσης. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετικούς τύπους εισροών και μπορεί να είναι ταχύτητες,

μαζικές παροχές, ολική ή στατική πίεση, καθώς και εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας και θερμοκρασίας.

➤ Outlets

Αντιθέτως τα outlets χρησιμοποιούνται σε περιοχές, όπου αναμένουμε εκροή (outflow). Και σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διάφορους τύπους outflow όπως παραπάνω (ταχύτητες, πιέσεις κ.α.) ή και καμία.

➤ Openings

Όταν δεν γνωρίζουμε την κατεύθυνση της ροής σε μία περιοχή, τότε χρησιμοποιούμε τον συγκεκριμένο τύπο συνοριακών συνθηκών. Μπορεί εύκολα να οριστεί το διάνυσμα της ταχύτητας στο σύνορο, η στατική ή ολική πίεση. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να δέχεται πίεση ίση με την ατμοσφαιρική, καθώς πολλά φυσικά προβλήματα βρίσκονται στο εξωτερικό περιβάλλον.

➤ Walls

Τα τοιχώματα (walls) είναι στερεά (αδιαπέρατα) όρια στη ροή του ρευστού. Ωστόσο η θερμότητα μπορεί να διαπεράσει τα τοιχώματα σε αντίθεση με τα ρευστά. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τύπος No Slip Wall στην επιφάνεια εδάφους και Free Slip Wall στις υπόλοιπες επιφάνειες.

➤ Symmetry Plane

Αυτός ο τρόπος οριακών συνθηκών αναφέρεται σε μία επιφάνεια πάνω στην γεωμετρία, όπου η ροή στην μία πλευρά του επιπέδου είναι συμμετρική προς την ροή του άλλου. Όπως και σε διάφορα στατικά προβλήματα της επιστήμης του μηχανικού έτσι και στο συγκεκριμένο πραγματοποιείται η ανάλυση του μοντέλου ενός μόνου μέρους και όχι ολόκληρου λόγω της συμμετρίας της κατασκευής. Στο επίπεδο του προβλήματος εισάγονται μέσω της εντολής Periodic Interface.

4.5 CFX – Solver (Επιλυτής)

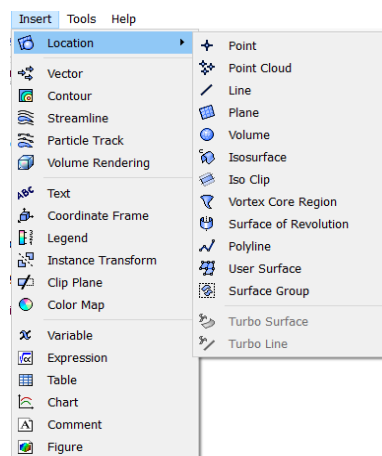
Τα περισσότερα λογισμικά χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την διακριτοποίηση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση των ρευστών (Finite Volume Method). Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται στους πεπερασμένους όγκους αναφοράς, επομένως οι ίδιες αρχές που ισχύουν για το φυσικό πρόβλημα σε ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο (αρχή διατήρησης μάζας, ορμής, συνέχειας, κ.α.) ισχύουν για κάθε πεπερασμένο όγκο ξεχωριστά. Μετά το mesh οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε αλγεβρικές εξισώσεις (εξισώσεις των πεπερασμένων όγκων) οι οποίες επιλύονται χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους. Στο κέντρο κάθε κελιού (cell) επιλύονται οι αλγεβρικές εξισώσεις. Αν σε ένα πρόβλημα οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν

είναι τρεις (u , v , w) και το πλέγμα αποτελείται από 500.000 στοιχεία τότε το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που θα επιλυθούν σε μία επανάληψη θα είναι 1.500.000. Η διαδικασία πρέπει να είναι επαναληπτική λόγω της μη γραμμικής φύσης των φαινομένων που αναπτύσσονται στις ροές των ρευστών. Μέσω των εξισώσεων ορμής και συνέχειας το CFX – Solver δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να ελέγχει και να βλέπει πληροφορίες για την πορεία και τα αποτελέσματα της επίλυσης. Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται μέσω του προγράμματος CFD – Post.

4.6 Στάδιο μετεπεξεργασίας (CFD – Post)

Στο συγκεκριμένο στάδιο γίνεται η ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν από τον επιλυτή με σκοπό την φυσική αναπαράσταση της λύσης. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων (postprocessing) αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην εξαγωγή των συμπερασμάτων. Το CFD – Post είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να προσφέρει εύκολη απεικόνιση και ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Όπως στο CFX-Pre το γραφικό του περιβάλλον χωρίζεται σε Menu Bar, Toolbar, Workspace Area και Viewer Area.

Το πρόγραμμα υποστηρίζει μία πληθώρα εντολών για ποσοτική ανάλυση και για την εξαγωγή γραφημάτων. Ο χρήστης πρέπει να είναι εξοικειωμένος με το πρόγραμμα και να γνωρίζει τα graphic και locator objects προκειμένου να υπολογιστούν τιμές. Οι locators εκφράζουν περιοχές στον όγκο ελέγχου που χρησιμοποιούνται από άλλες επιλογές. Για παράδειγμα αν ο χρήστης θέλει να υπολογίσει την στατική πίεση σε ένα επίπεδο (plane) τότε το επίπεδο αυτό αποτελεί έναν locator. Τα graphic objects επιτρέπουν στον χρήστη να εμφανίσει ροϊκές γραμμές, διανύσματα κ.α. σε όλο το υπολογιστικό πεδίο.



Σχήμα 4.7 : ANSYS CFD – Post Objects

Locator Objects

- **Point Option** : Δημιουργείται συγκεκριμένο σημείο το οποίο ορίζεται στο χώρο με συντεταγμένες και μπορεί να εντοπίσει την θέση των τιμών κάποιας μεταβλητής.
- **Line Option**: Με αυτή την εντολή δημιουργείται ένα ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από δύο σημεία στο χώρο.
- **Plane Option**: Δημιουργείται μία επιφάνεια που ορίζεται εντός του υπολογιστικού όγκου ελέγχου.
- **Volume Option**: Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για γραφικές εντολές ή υπολογισμούς. Δημιουργεί έναν όγκο που αποτελείται από στοιχεία του mesh.
- **Isosurface Option**: Με την εντολή αυτή δημιουργείται μία επιφάνεια της οποίας η θέση ορίζεται από κάποια σταθερή μεταβλητή ή από ίδιες τιμές.
- **Vortex Core Region Option**: Δημιουργείται ένα κυκλικό ή σπειροειδές σχήμα από ροϊκές γραμμές. Η εντολή αυτή παράγει μία δίνη (Vortex).
- **Polyline Option**: Δημιουργείται μία συνεχόμενη γραμμή (polyline) η οποία αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα ενωμένα μεταξύ τους.

Graphic Objects

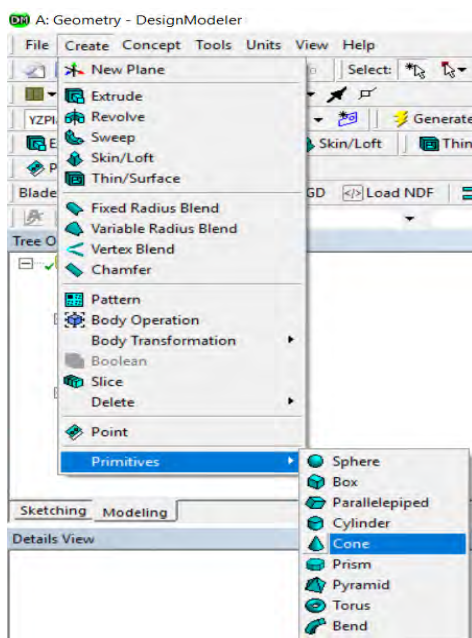
- **Vector Option**: Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα πλήθος διανυσμάτων με κατεύθυνση και μέτρο μίας διανυσματικής μεταβλητής, όπως για παράδειγμα της ταχύτητας.
- **Contour Option**: Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα πλήθος συνδεδεμένων γραμμών ενώνοντας σημεία που εκφράζουν την ίδια μεταβλητή.
- **Streamline Option**: Με την εντολή αυτή δημιουργούνται ροϊκές γραμμές με πορεία διαμέσου του ρευστού κατά μήκος του όγκου ελέγχου. Κάθε ροϊκή γραμμή ορίζεται από ένα κόμβο (node) του πλέγματος του αντίστοιχου locator.
- **Volume Rendering Option**: Η εντολή αυτή οπτικοποιεί μία μεταβλητή στον όγκο ελέγχου της προσομοίωσης μέσω της μεταβολής του χρώματος και της διαφάνειας του γραφήματος εξαρτώμενη της τιμής της μεταβλητής.
- **Legend Option**: Με την εντολή αυτή δημιουργείται ένα υπόμνημα με ορισμένες ιδιότητες όπως εύρος, χρώμα και μονάδα μέτρησης οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη.
- **Instance Transform Option**: Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί την υπάρχουσα γεωμετρία του προβλήματος με εντολές όπως rotation (περιστροφή), reflection (κατοπτρισμός) κ.α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

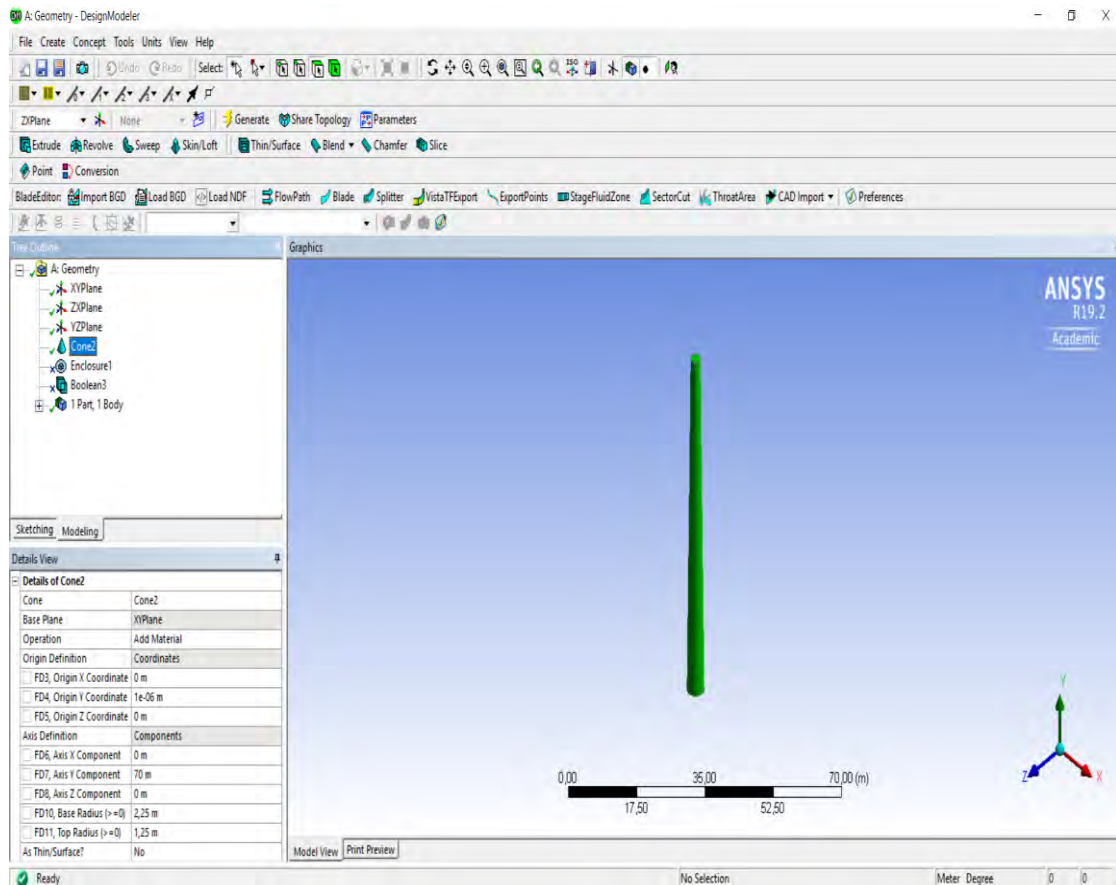
5.1 Σχεδιασμός πυλώνα της Α/Γ

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 κώλου κώνου

Έτσι δημιουργείται ο στερεός κώλου 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.

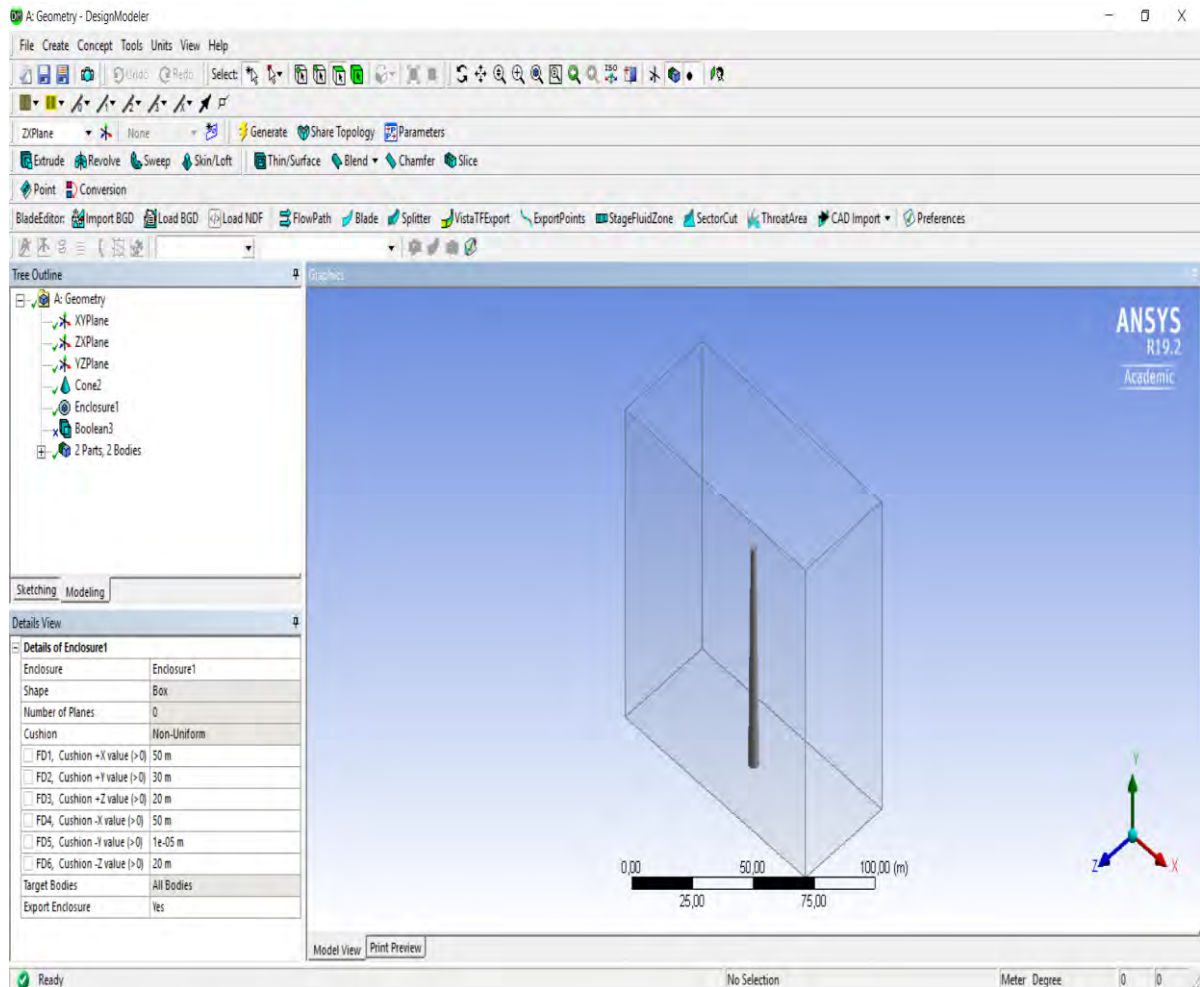


Σχήμα 5.2 : Σχεδιασμός πυλώνα ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα DesignModeler.

5.1.1 Σχεδιασμός υπολογιστικού πεδίου

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.

5.2 Σχεδιασμός του κατάλληλου πλέγματος (Mesh)

Το συγκεκριμένο στάδιο του προγράμματος απαιτεί ιδιαίτερη αντιμετώπιση καθώς η χρησιμοποίηση του επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα στο CFD-Post. 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 σε μία επιφάνεια κατακόρυφου επιπέδου που βρίσκεται λίγο πριν από αυτόν σε απόσταση 0,5 μέτρα. Το μοντέλο ανάλυσης της παρούσας εργασίας επιλύθηκε για τρία διαφορετικά πλέγματα τόσο για το προφίλ σταθερής ταχύτητας όσο και για το εκθετικό. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό πλέγμα για το ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας σε σχέση με το εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

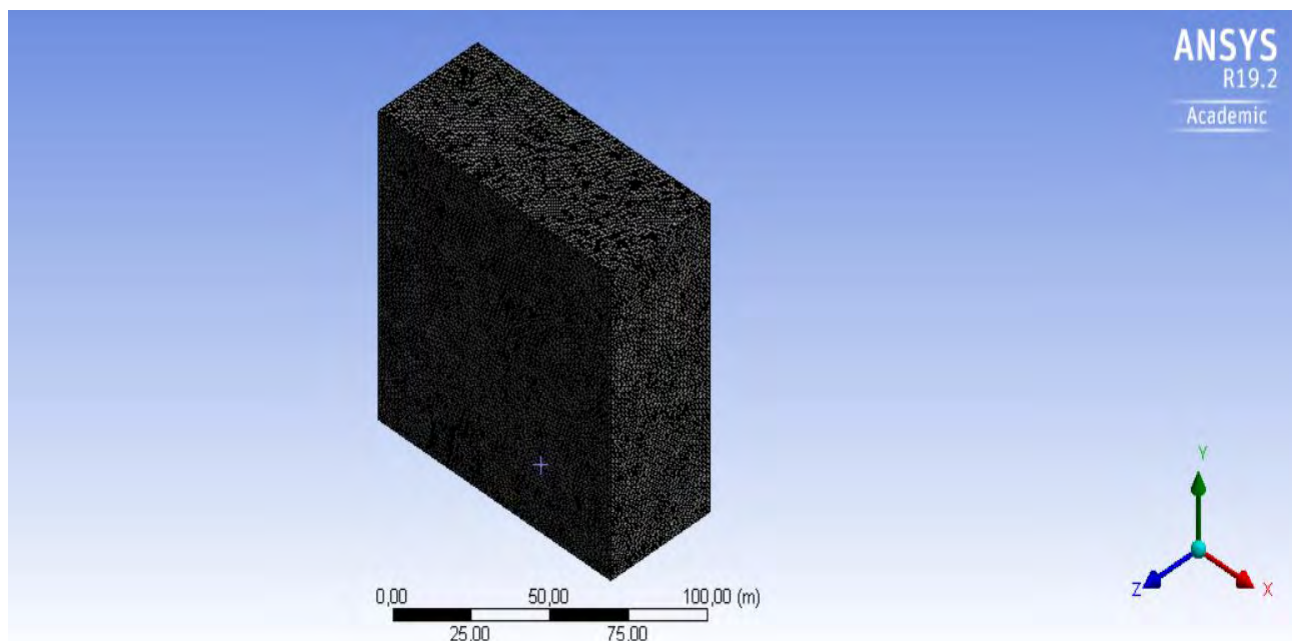
➤ **Σχεδιασμός πλέγματος για σταθερό προφίλ ταχύτητας 7 m/s**

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

ΠΛΕΓΜΑ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (m/s)
1	6.8582
2	6.8863
3	6.9995

Πίνακας 5.1 : Μέση ταχύτητα ανά πλέγμα σε επιφάνεια κατακόρυφου επιπέδου που απέχει 5m από τον πυλώνα.

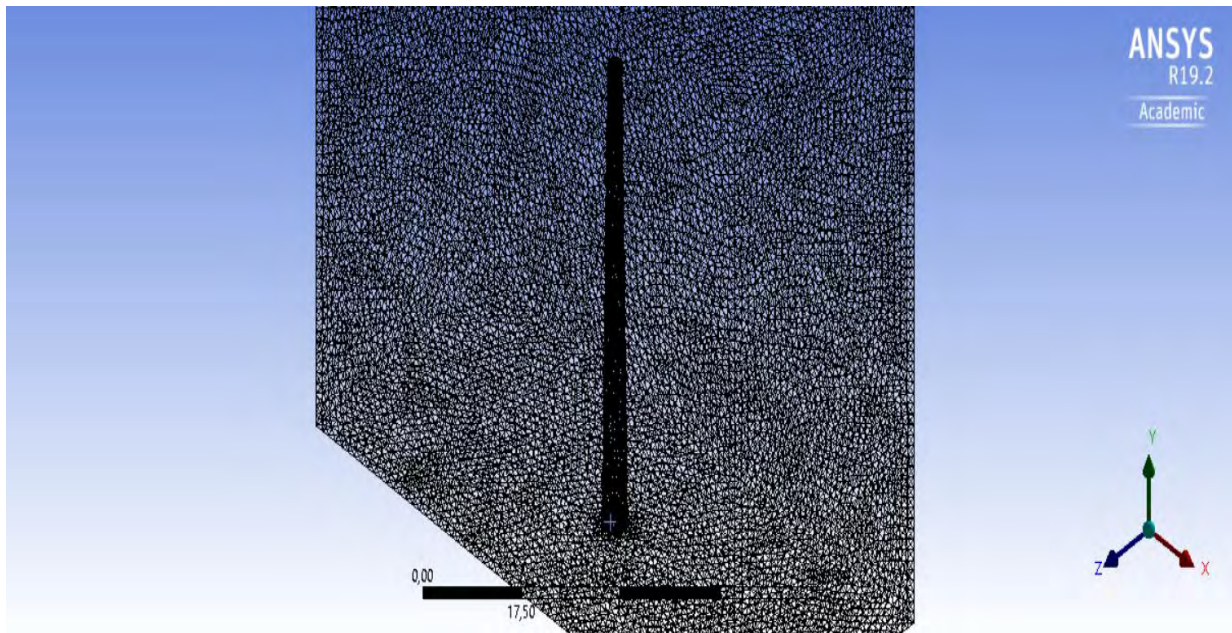
Από τα παραπάνω πλέγματα έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το πλέγμα που είναι πιο πυκνό. Παρακάτω φαίνεται το πλέγμα που για το προφίλ σταθερής ταχύτητας και η μέθοδος διακριτοποίησης των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 5.4 : Το πλέγμα σε όλο το υπολογιστικό πεδίο.

Το πλέγμα στον πυλώνα είναι πιο πυκνό σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο του υπολογιστικού πεδίου. Αυτό έγινε διότι δόθηκε έμφαση στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας καθώς το προφίλ σταθερής ταχύτητας εισάγεται πιο εύκολα και δεν απαιτεί τόσο πυκνό mesh στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου. Αντίθετα παρακάτω, το εκθετικό προφίλ ταχύτητας

απαιτεί πυκνότερο πλέγμα στον περιβάλλοντα χώρο προκειμένου η ανάλυση να έχει αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.5 : Το πλέγμα γύρω από τον πυλώνα.

Τα στοιχεία του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην παρακάτω πίνακα :

Domain	Nodes	Elements	Tetrahedra	Wedges	Pyramids	Hexahedra	Polyhedra
Default Domain	96066	457419	427167	30135	117	0	0

Domain	Minimum Face Angle	Maximum Face Angle	Maximum Edge Length Ratio	Maximum Element Volume Ratio	Connectivity Range
Default Domain	0.059347 [degree]	179.864 [degree]	16.8464	197315	2 42

Πίνακας 5.2 : Λεπτομέρειες του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε.

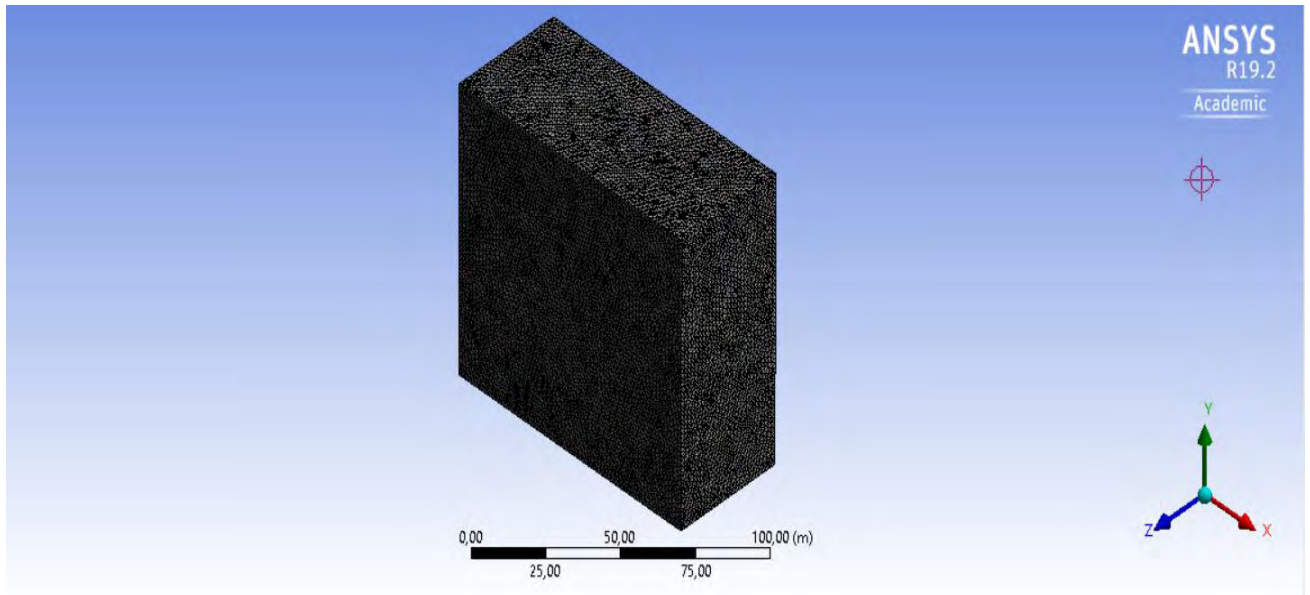
➤ Σχεδιασμός πλέγματος εκθετικού προφίλ ταχύτητας 7 m/s

Όπως και παραπάνω και στο συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πλέγματα ώστε η λύση να είναι ανεξάρτητη του πλέγματος.

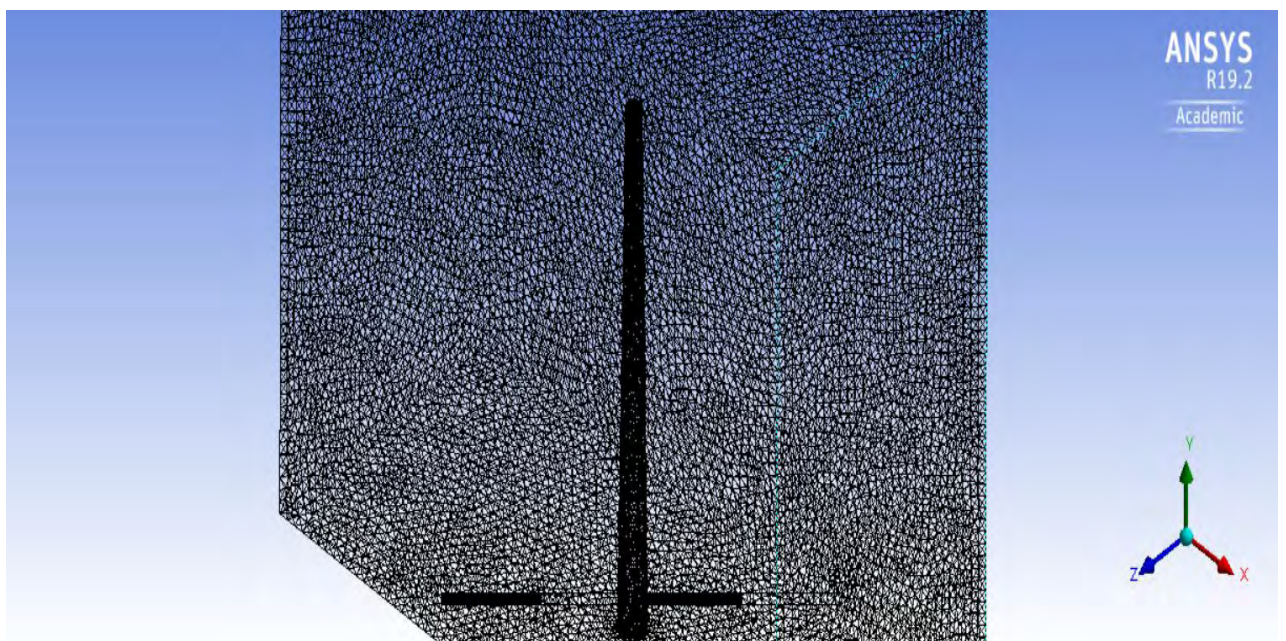
ΠΛΕΓΜΑ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (m/s)
1	6.1688
2	6.1763
3	6.2057

Πίνακας 5.3 : Μέση ταχύτητα ανά πλέγμα σε επιφάνεια κατακόρυφου επιπέδου που απέχει 5m από τον πυλώνα για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

Το παρακάτω πλέγμα που φαίνεται στην εικόνα είναι το πλέγμα το οποίο ήταν πιο πυκνό και τα αποτελέσματα του είχαν μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάλυση.



Σχήμα 5.6 : Το πλέγμα σε όλο το υπολογιστικό πεδίο για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας .



Σχήμα 5.7 : Το πλέγμα γύρω από τον πύλωνα για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

Όπως θα φαίνεται παρακάτω το πλέγμα για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας διαφέρει από αυτό του σταθερού. Τα τετράεδρα στοιχεία μειώνονται και υπάρχουν περισσότερα σφηνοειδή στοιχεία (wedges) και στοιχεία πυραμίδας. Αυτό συμβαίνει λόγω της διακριτοποίησης σε στοιχεία σε τέτοια μορφή ώστε στα πρώτα μέτρα του ύψους του πύλωνα όπου η ταχύτητα

αυξάνεται απότομα εκθετικά, τα διανύσματα της ταχύτητας να επιδρούν στον πυλώνα ομοιόμορφα. Η σειρά των στοιχείων ορίστηκε ως Quadratic σε αντίθεση με το ομοιόμορφο προφίλ που ορίστηκε ως Linear.

Domain	Nodes	Elements	Tetrahedra	Wedges	Pyramids	Hexahedra	Polyhedra
Default Domain	129553	435732	285258	150152	322	0	0

Domain	Minimum Face Angle	Maximum Face Angle	Maximum Edge Length Ratio
Default Domain	0 [degree]	180 [degree]	37.851

Πίνακας 5.4 : Λεπτομέρειες του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

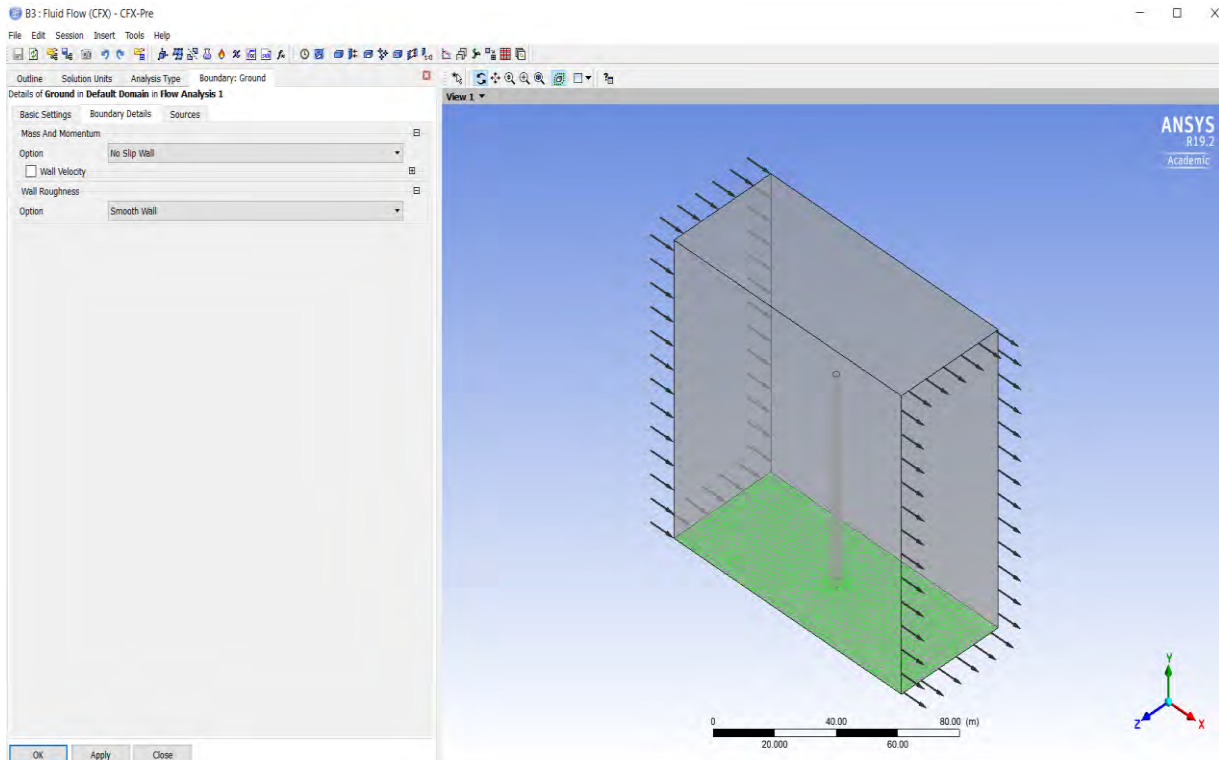
5.3 Φυσικές ιδιότητες του ρευστού

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 kg/m^3
- Το κινηματικό ιξώδες ίσο με $1.831 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$

5.4 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.

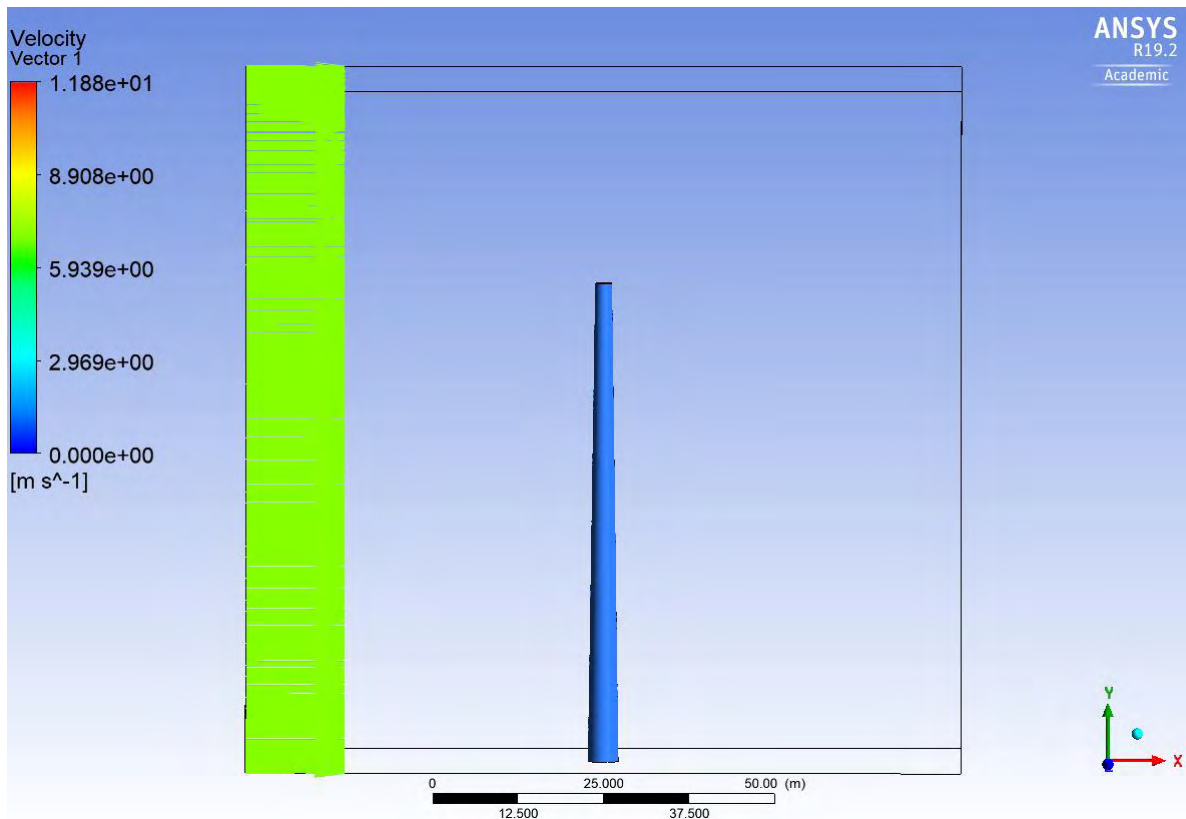


Σχήμα 5.8 : Ορισμός συνοριακής συνθήκης στο έδαφος.

- 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).

5.4.1 Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας μέτρου 7 m/s

Για την ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων του μοντέλου της παρούσας εργασίας αρχικά ορίστηκε ως Inlet μια μέση σταθερή ταχύτητα της τάξεως των 7 m/s . Μέσω της εντολής Insert Boundary στο πρόγραμμα έγινε η εισαγωγή του ομοιόμορφου σταθερού προφίλ ταχύτητας και ως ορτιον επιλέχθηκε το normal speed. Η διαταραχή του ανέμου (turbulence) ορίστηκε ως μέτρια με ένταση 5 % και στα δύο προφίλ ταχύτητας. Το μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιήθηκε, είναι το μοντέλο (k – ε). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το προφίλ του διανύσματος της ταχύτητας που ασκείται στον πυλώνα της Α/Γ κατά τον οριζόντιο άξονα x.



Σχήμα 5.9 : Ομοιόμορφο προφίλ σταθερής ταχύτητας 7 m/s στον πυλώνα.

5.4.2 Εκθετικό προφίλ ταχύτητας

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

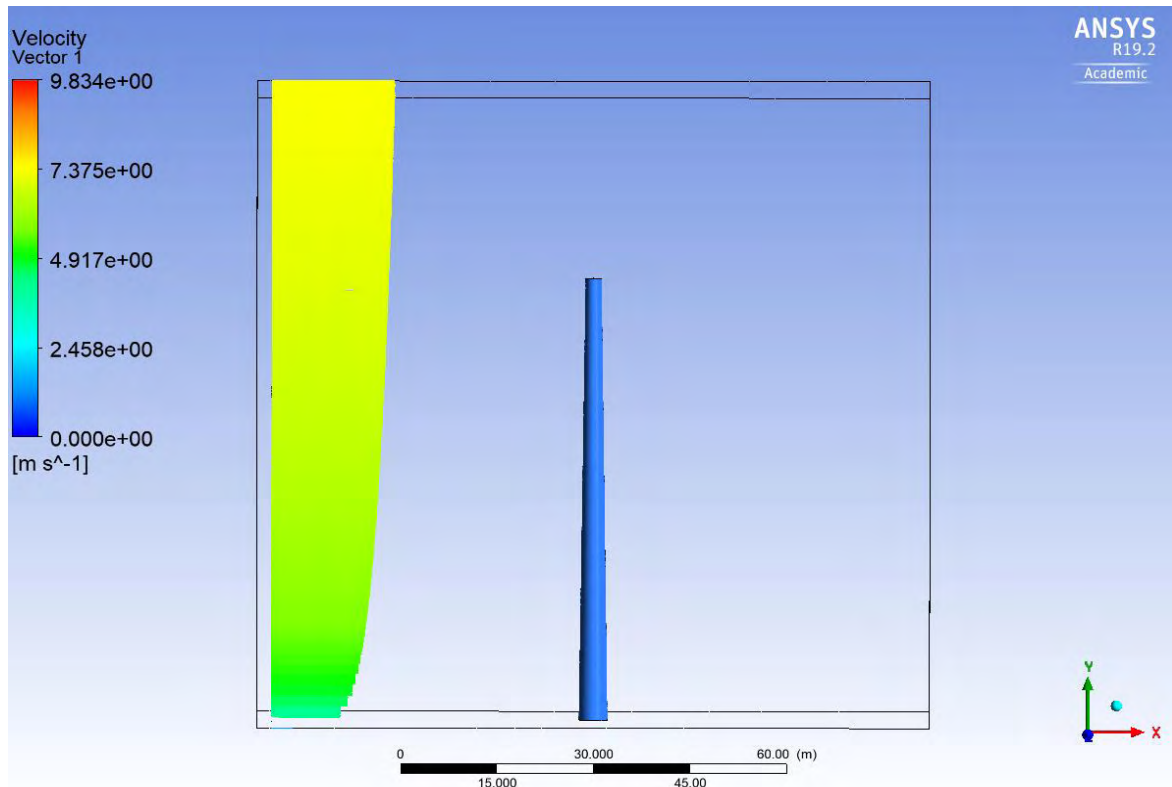
Ο εκθέτης στην σχέση 5.1 έχει οριστεί ως $a = 0.1429$ (Ανεμοκινητήρες Γ.Μπεργελές).

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 5.10 : Εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

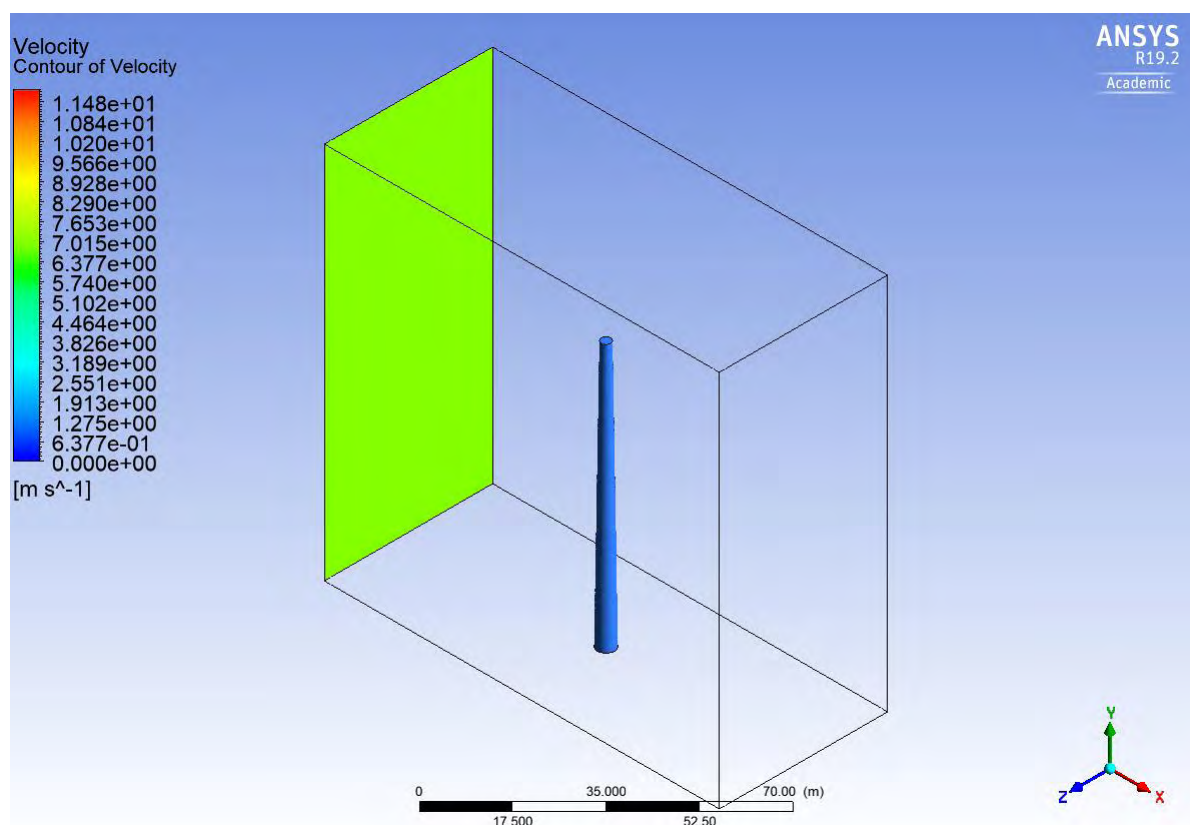
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης οπτικοποιούνται στο πρόγραμμα CFD-Post. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το ομοιόμορφο σταθερό προφίλ ταχύτητας και έπειτα για το εκθετικό.

6.1 Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του (Υ.Π.) μέτρου 7 m/s

- Μέσω της εντολής Contour υπολογίστηκαν οι τιμές της ταχύτητας σε διάφορα επίπεδα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Τα επίπεδα αυτά είναι λίγο πριν τον πυλώνα, ακριβώς στην επιφάνεια του άξονα συμμετρίας του, αμέσως μετά, μετά από 20 μέτρα από το σημείο στο κέντρο της βάσης του και στην περιοχή εξόδου (Outlet).

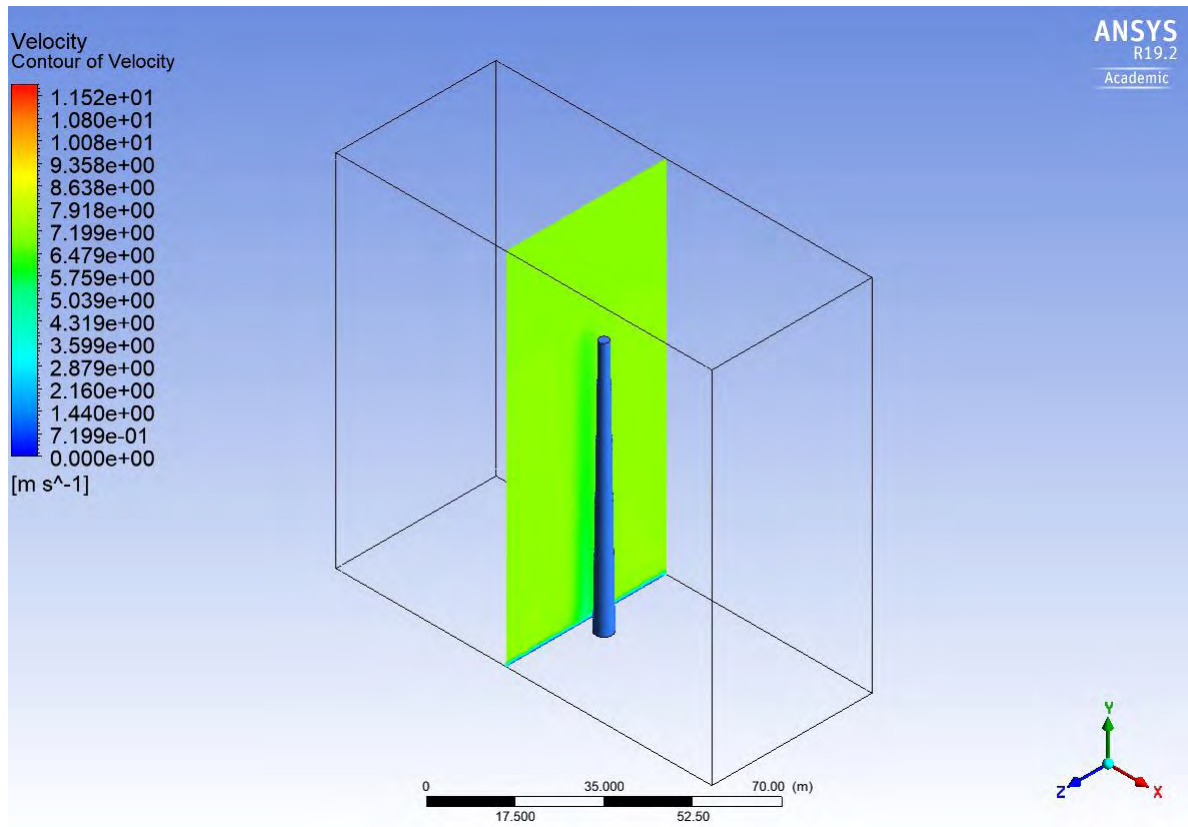
Plane x = -50 m (Inlet)



Σχήμα 6.1 : Σταθερή ταχύτητα 7 m/s στην περιοχή εισόδου (Inlet).

Plane x = -5 m

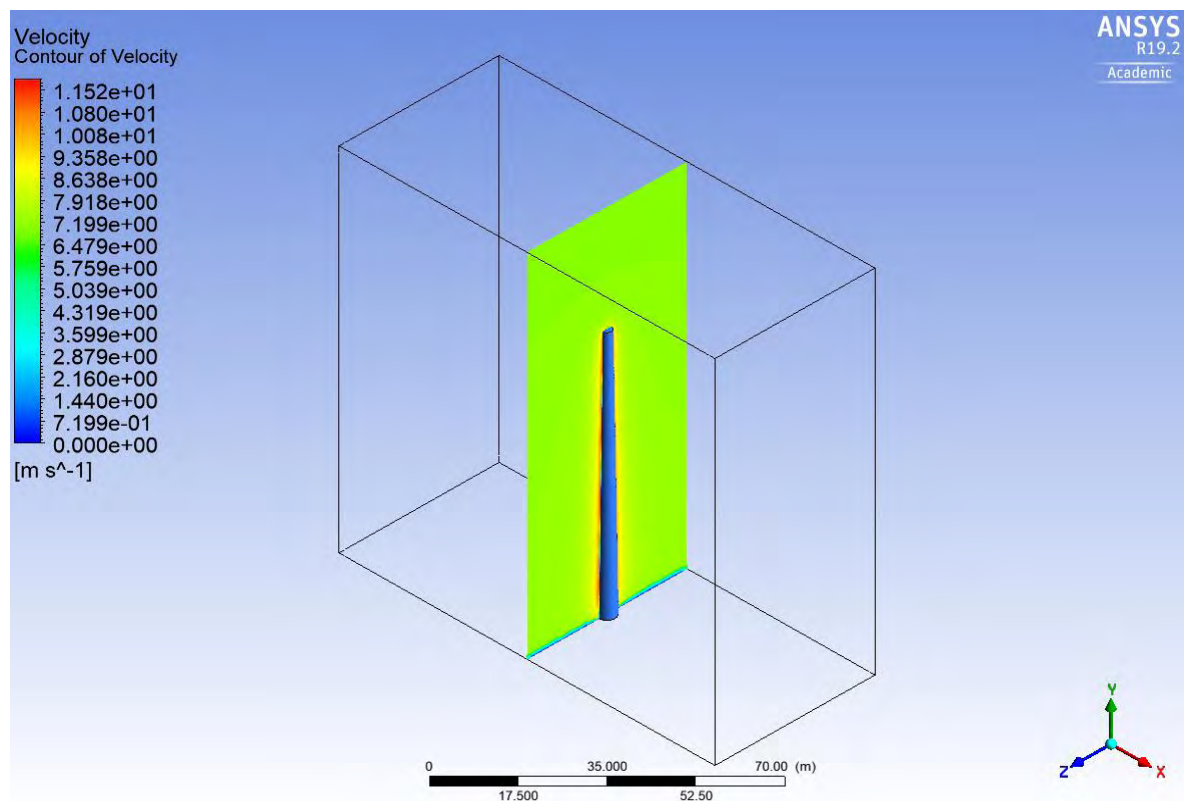
Οι ισοταχείς (καμπύλες ίσης ταχύτητας) που υπάρχουν στην επιφάνεια του κατακόρυφου επιπέδου $x = -5$ m, είναι λίγο πριν την αλληλεπίδραση του ανέμου με την κατασκευή. Η τιμή της ταχύτητας είναι 6.5 m/s παρότι το ύψος αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω του μοιόμορφου προφίλ της ταχύτητας.



Σχήμα 6.2 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πύλωνα ($x = -5m$).

Plane x = 0 m

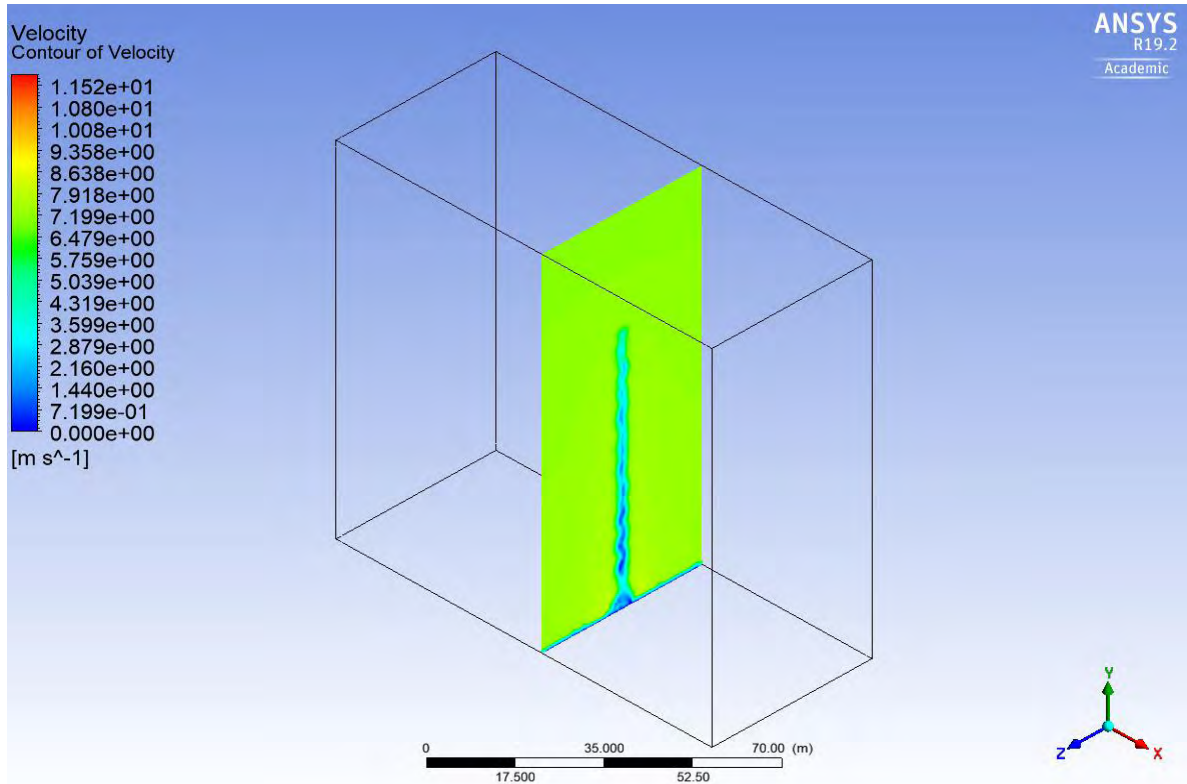
Στην συγκεκριμένη επιφάνεια παρατηρείται πως εμφανίζονται οι μέγιστες ταχύτητες της ροής του ανέμου. Λόγω της κίνησης που κάνουν οι γραμμές ροής όταν συναντήσουν τον πυλώνα οι ταχύτητες φτάνουν στο μέγιστο σε αυτή την επιφάνεια. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται πως η μεγαλύτερη ταχύτητα είναι 11.88 m/s.



Σχήμα 6.3 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο στο κέντρο της βάσης του πυλώνα ($x = 0m$).

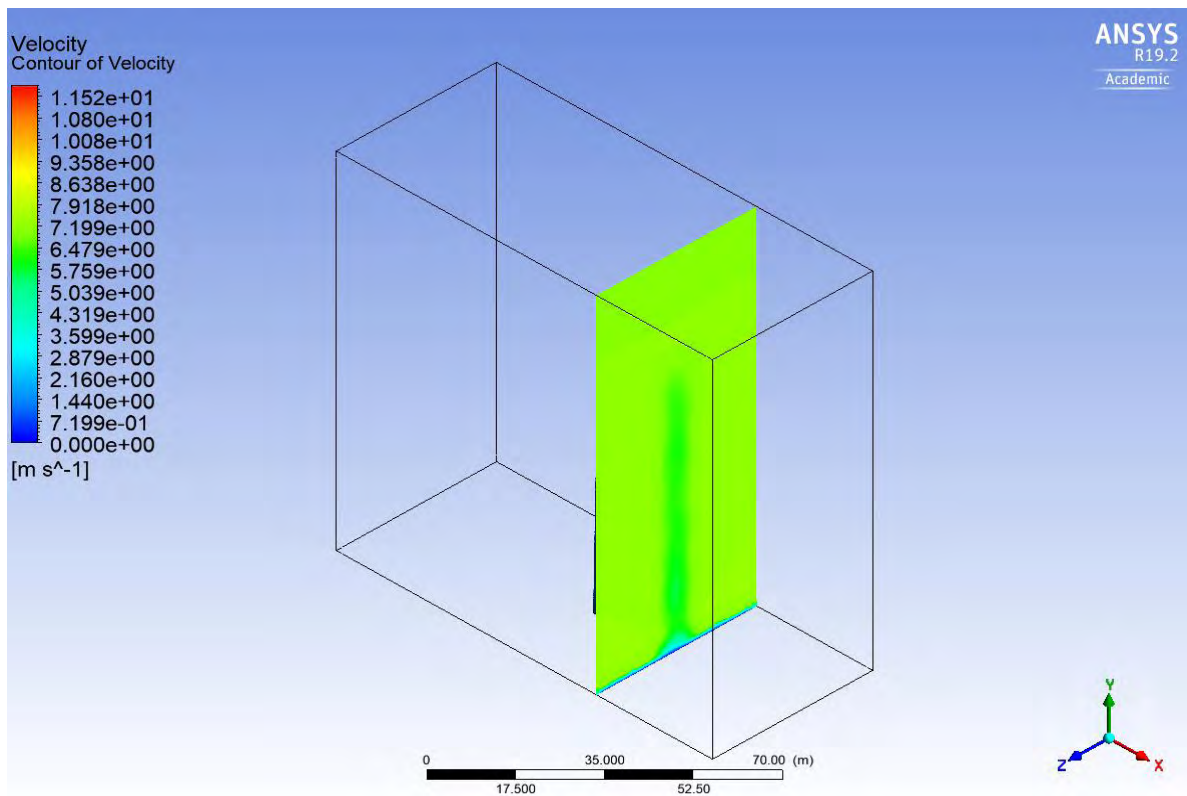
Plane x = 5 m

Μία επιφάνεια που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον είναι αμέσως μετά τον πυλώνα όπου εμφανίζονται πολύ μικρές ταχύτητες λόγω των στροβίλων που δημιουργούνται στον ολκό 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 ολκό εμφανίζονται ταχύτητες από 0 m/s έως 3 m/s.



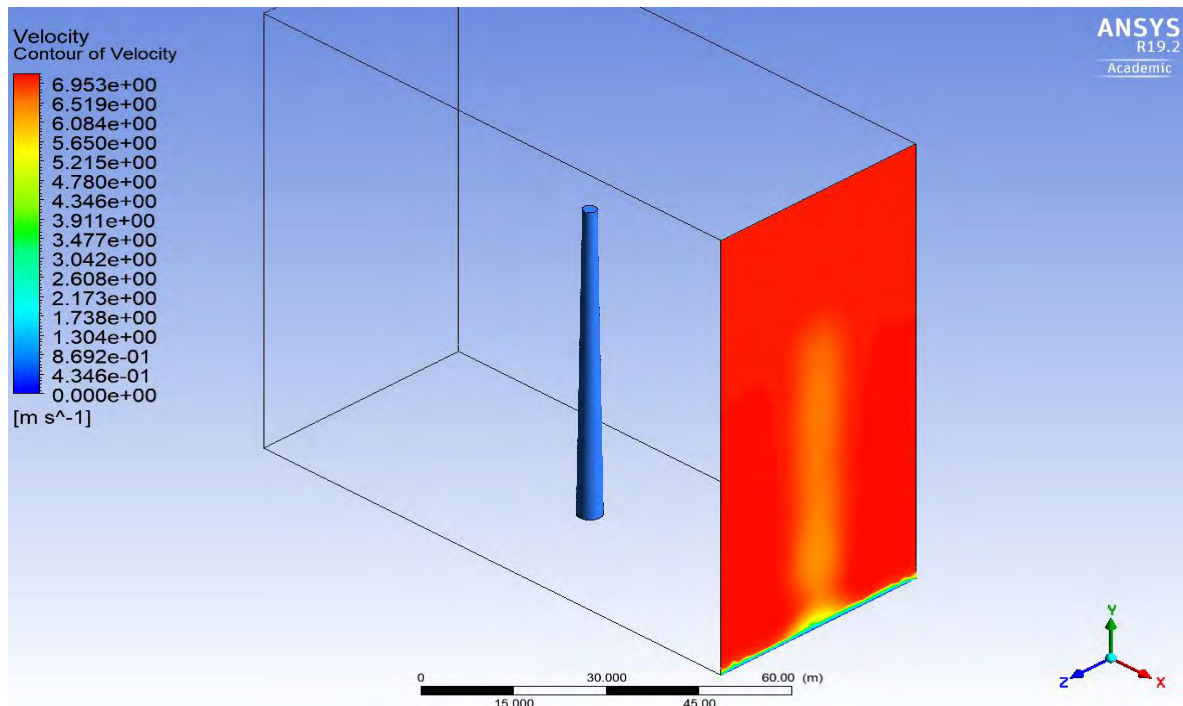
Σχήμα 6.4 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 5 μέτρα μετά το κέντρο της βάσης του πλώνα ($x = 5m$).

Plane $x = 20 m$



Σχήμα 6.5 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 20 μέτρα μετά την βάση του πλώνα ($x = 20m$).

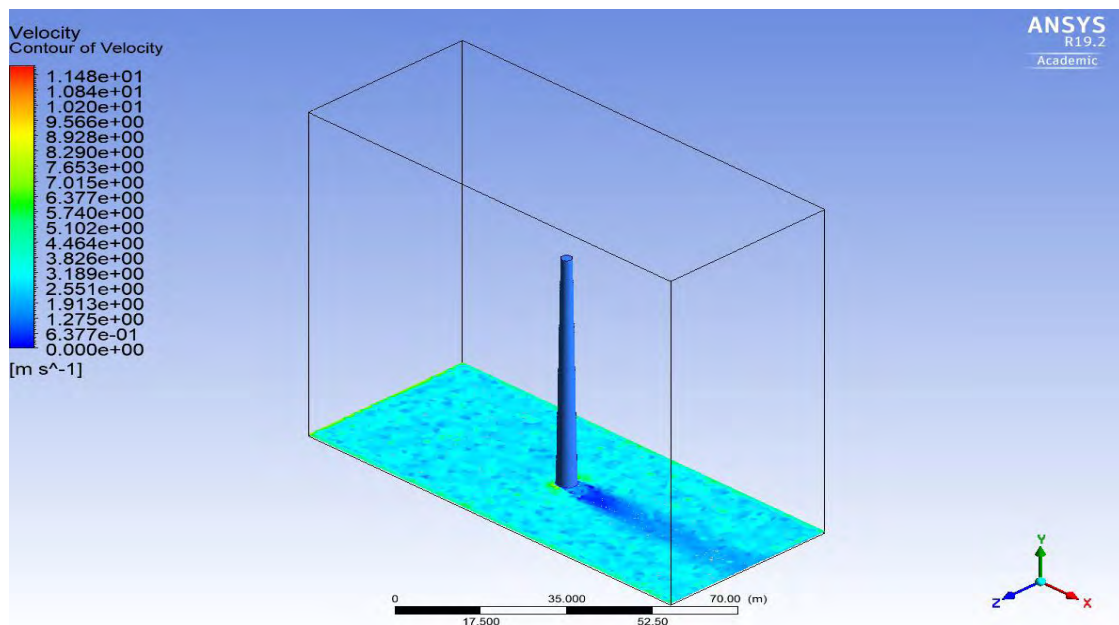
Plane x = 50m (Outlet)



Σχήμα 6.6 : Ισοταχείς στην επιφάνεια εξόδου (περιοχή Outlet).

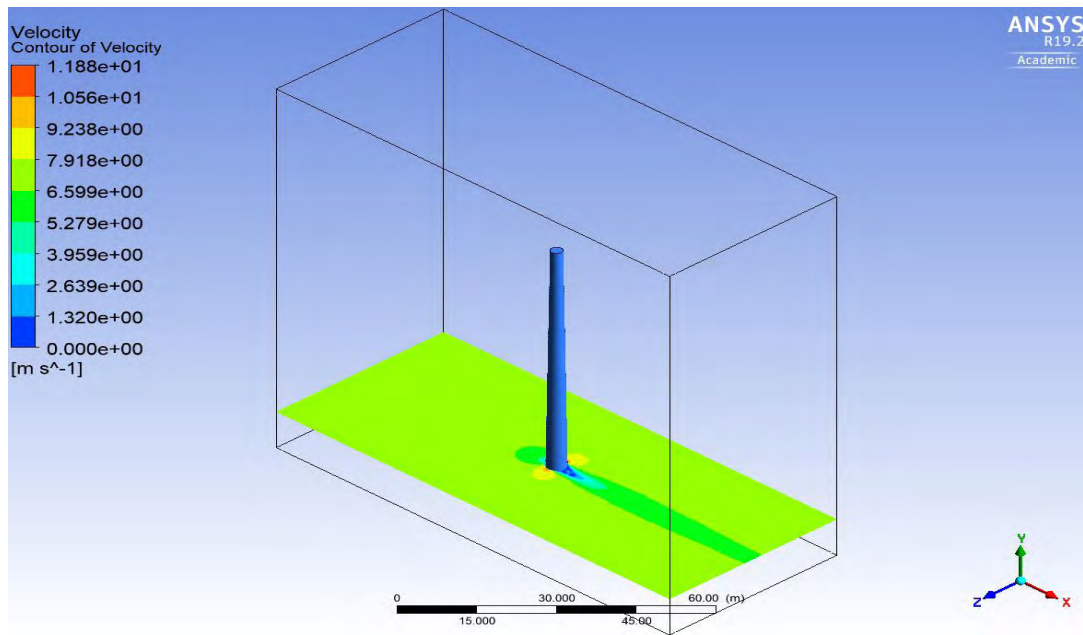
Plane y = 0.5 m

Στη συγκεκριμένη επιφάνεια του επιπέδου αναμένονται πολύ μικρές ταχύτητες καθώς η επιφάνεια $y = 0.5$ m είναι 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους όπου οι τιμές της ταχύτητας είναι μηδενικές. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούνται οι μικρές τιμές της ταχύτητας.



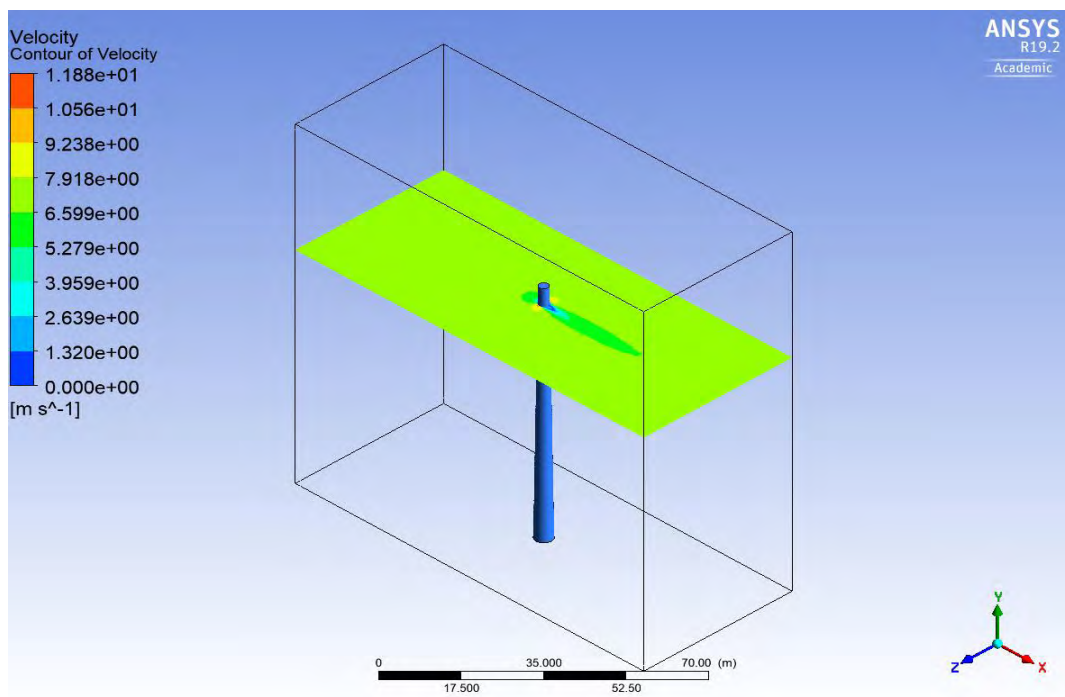
Σχήμα 6.7 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 0.5 μέτρα από το έδαφος ($y = 0.5$ m).

Plane $y = 10$ m



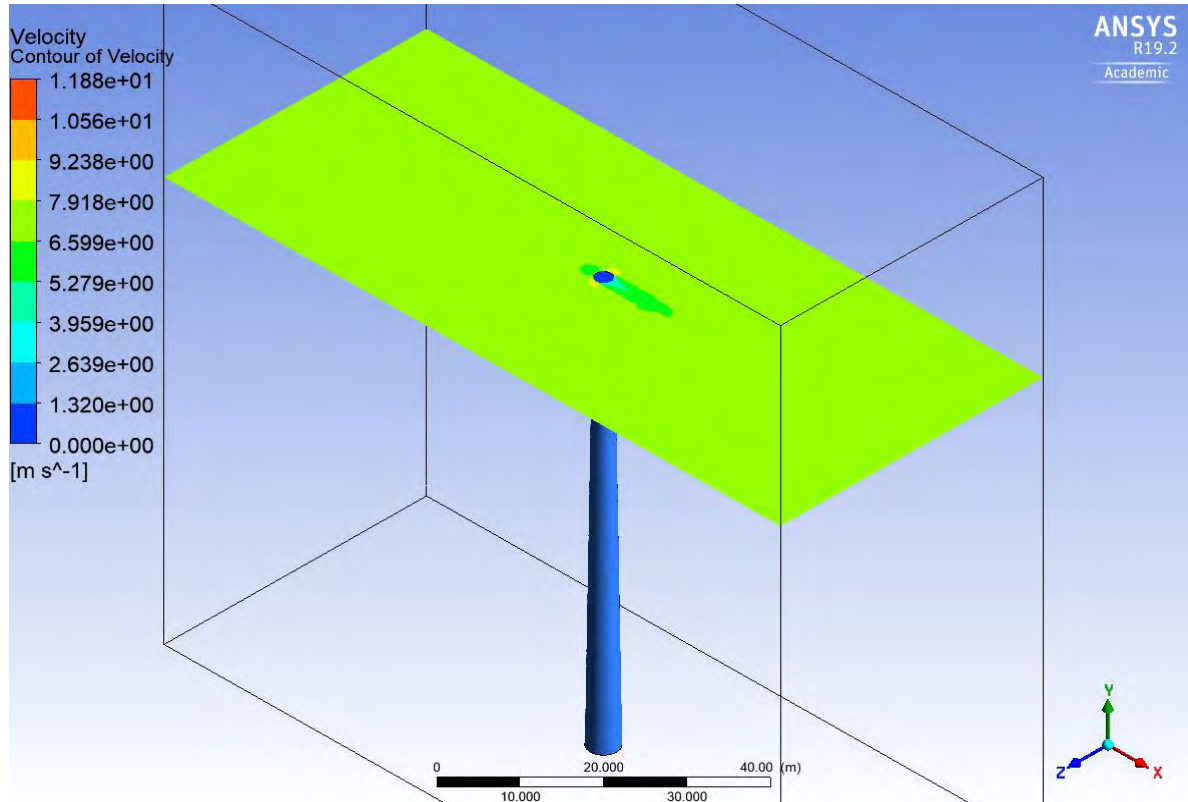
Σχήμα 6.8 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 10 μέτρα πάνω από το έδαφος ($y = 10m$).

Plane $y = 65$ m



Σχήμα 6.9 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 65 μέτρα πάνω από το έδαφος ($y = 65m$).

Plane $y = 70$ m

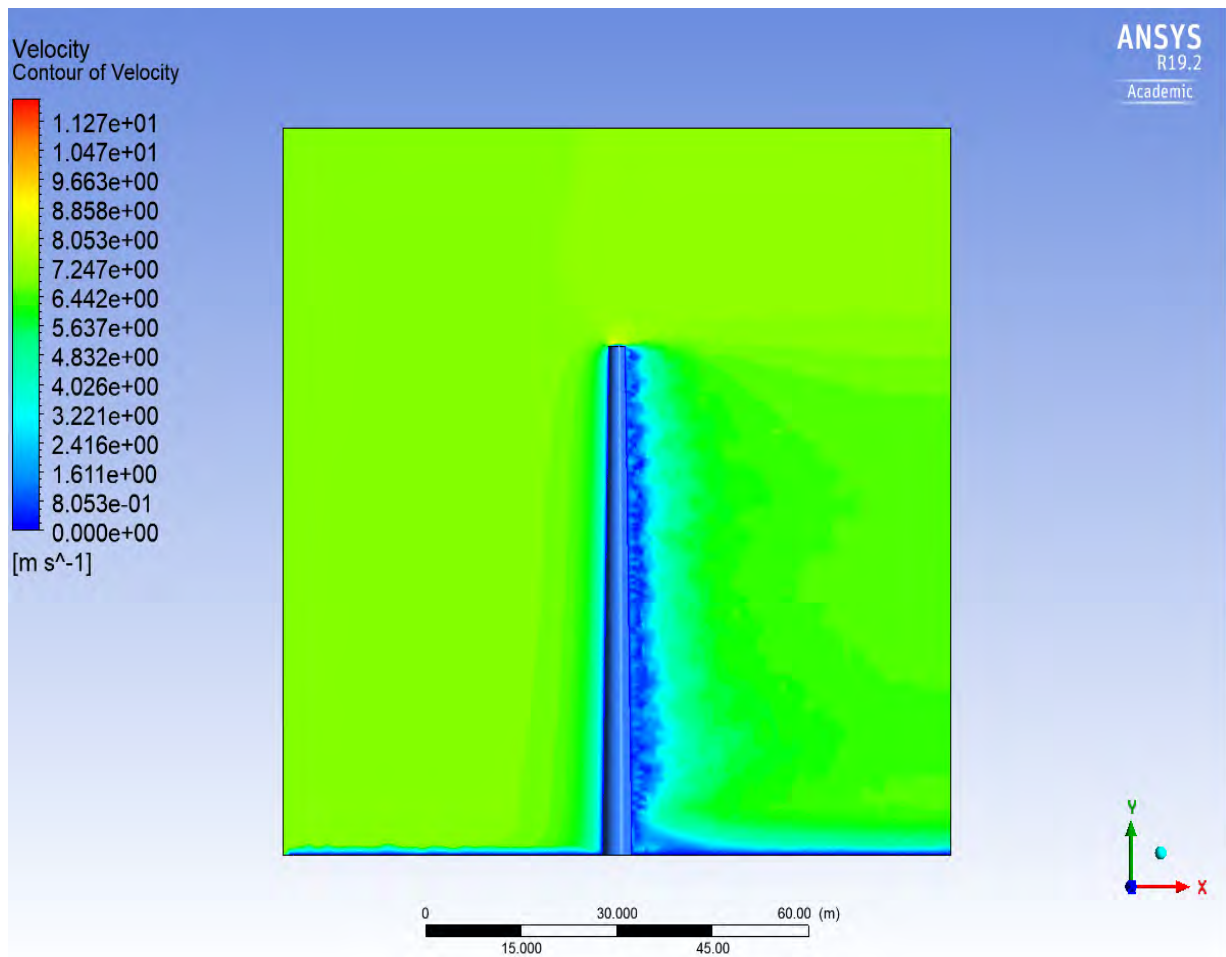


Σχήμα 6.10 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο στην κορυφή του πυλώνα ($y = 70\text{m}$).

Με εξαίρεση την επιφάνεια που βρίσκεται στην κορυφή του πυλώνα φαίνεται στις υπόλοιπες επιφάνειες ότι οι ταχύτητες δεν είναι ίδιες στον ολόκο του πυλώνα της Α/Γ. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαμέτρου του πυλώνα που διαφέρει καθώς αλλάζει το ύψος.

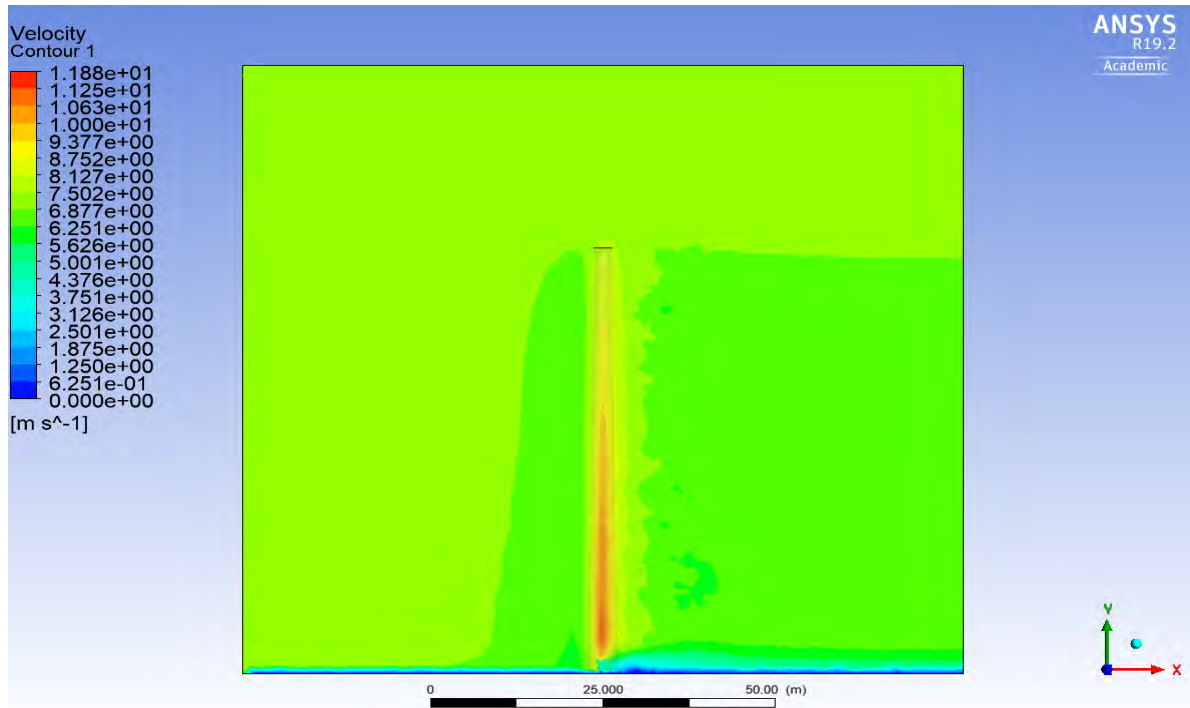
Plane $z = 0$

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.



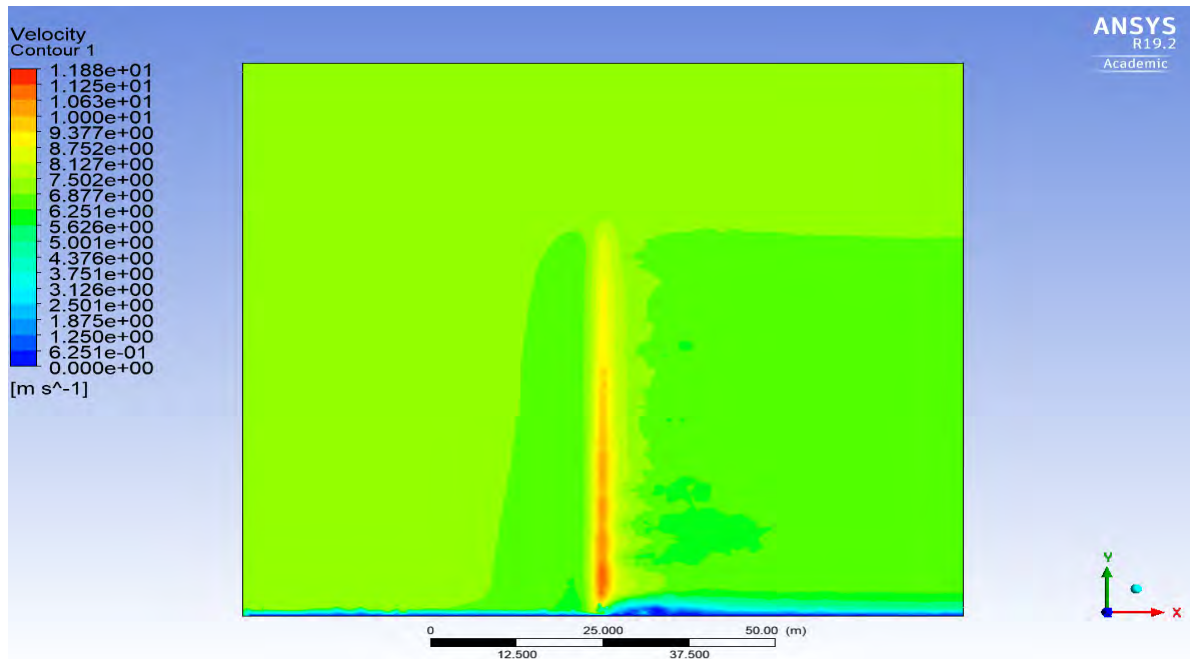
Σχήμα 6.11 : Ισοταχείς σε επίπεδο στον άξονα συμμετρίας z ($z = 0$ m).

Plane z = -2,5 m



Σχήμα 6.12 : Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα ($z = -2.5m$).

Plane z = +2,5 m

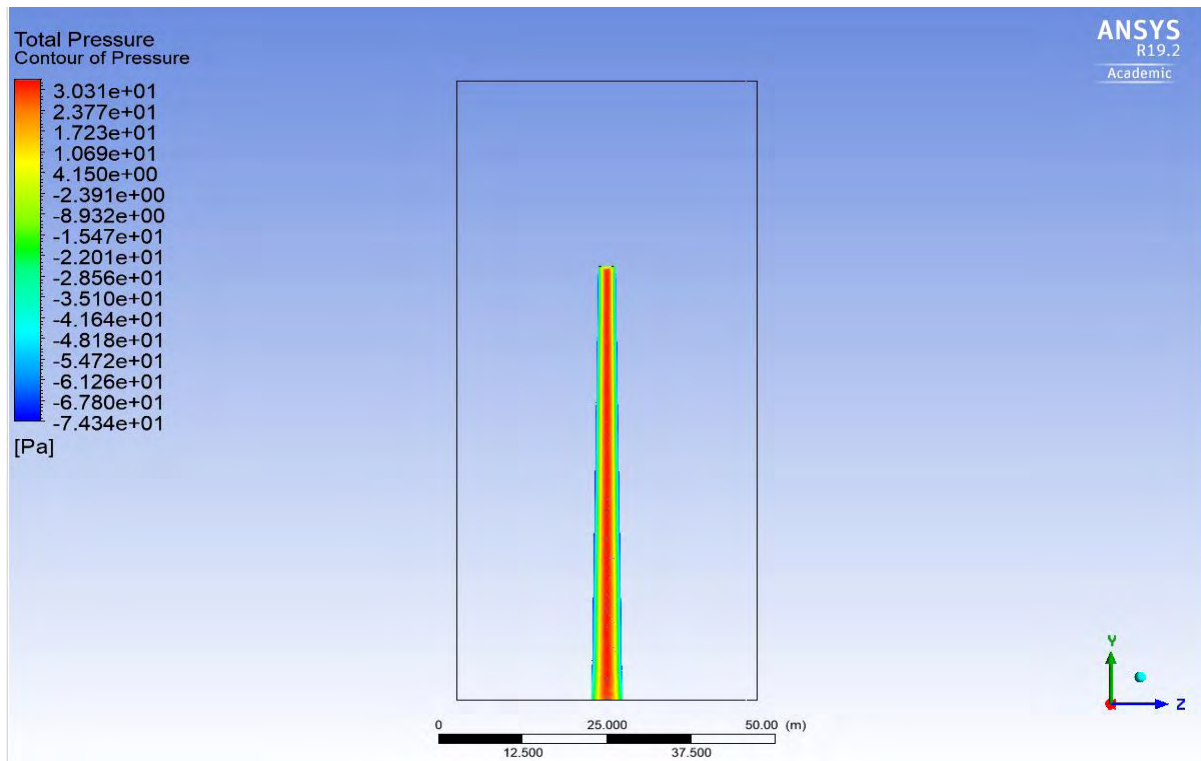


Σχήμα 6.13 : Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα ($z = 2.5m$).

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

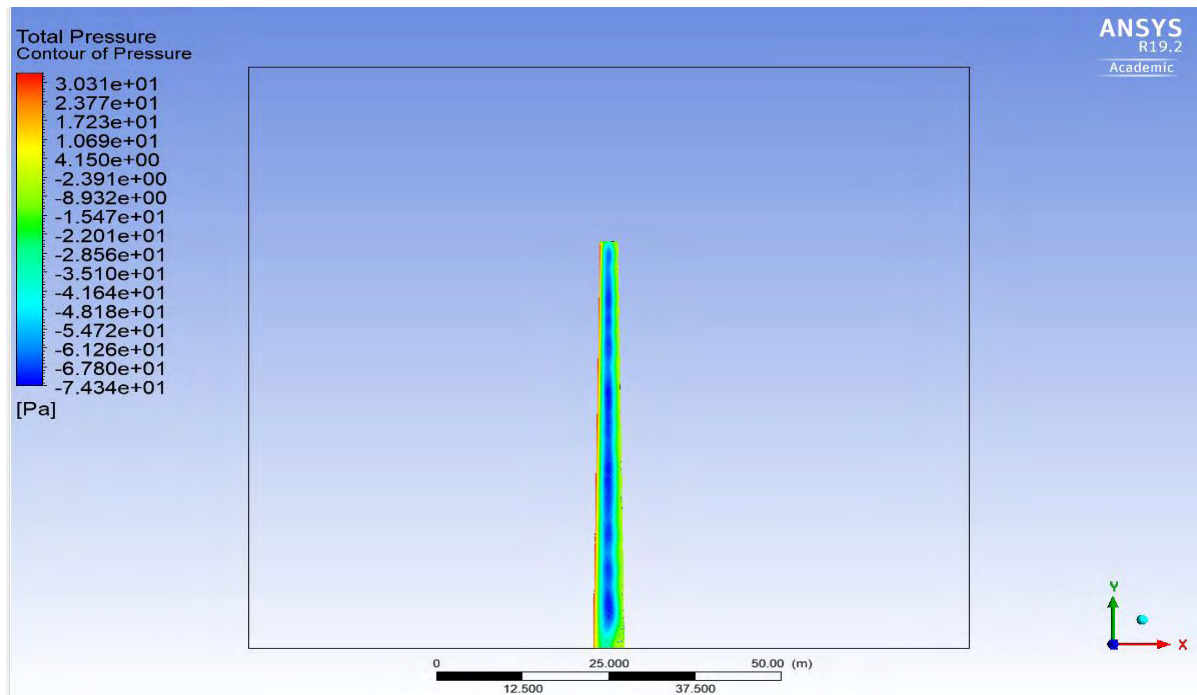
$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6.1)$$

Λόγω του ομοιόμορφου προφίλ της ταχύτητας η ολική πίεση που δέχεται ο πυλώνας είναι ίδια σε όλη την επιφάνεια του. Η μέγιστη πίεση που δέχεται ο πυλώνας είναι 34.73 Pa.



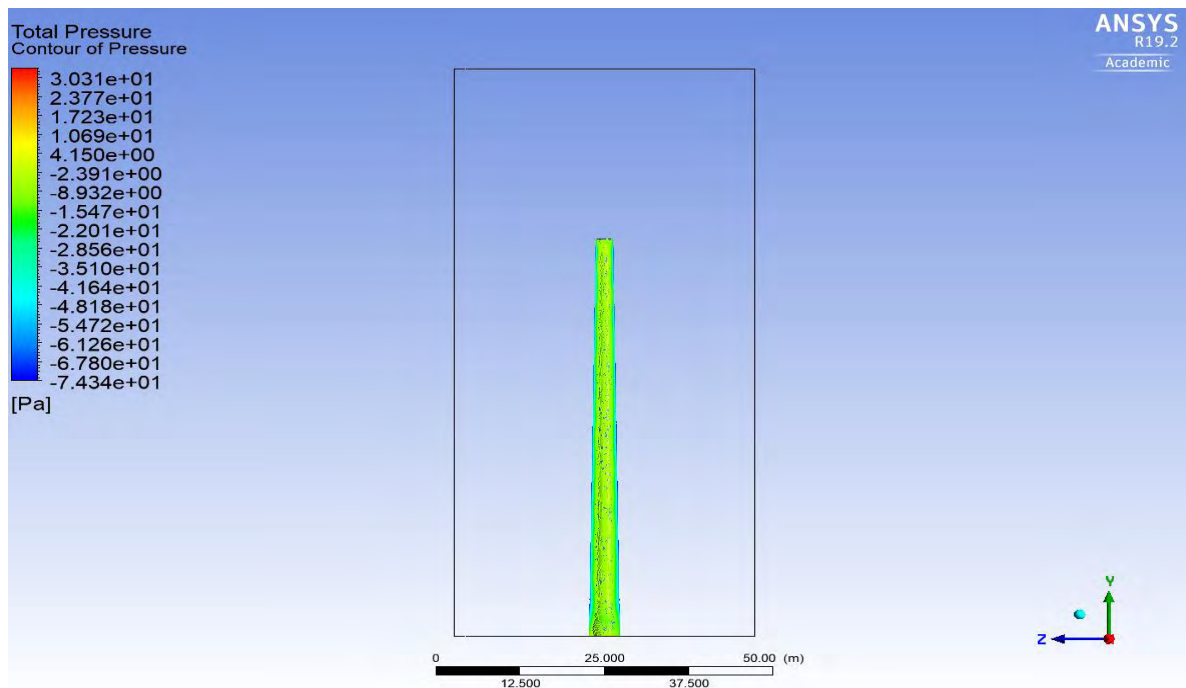
Σχήμα 6.14 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (Inlet).

Στον άξονα z η τιμή της ολικής πίεσης είναι -74.34 Pa.



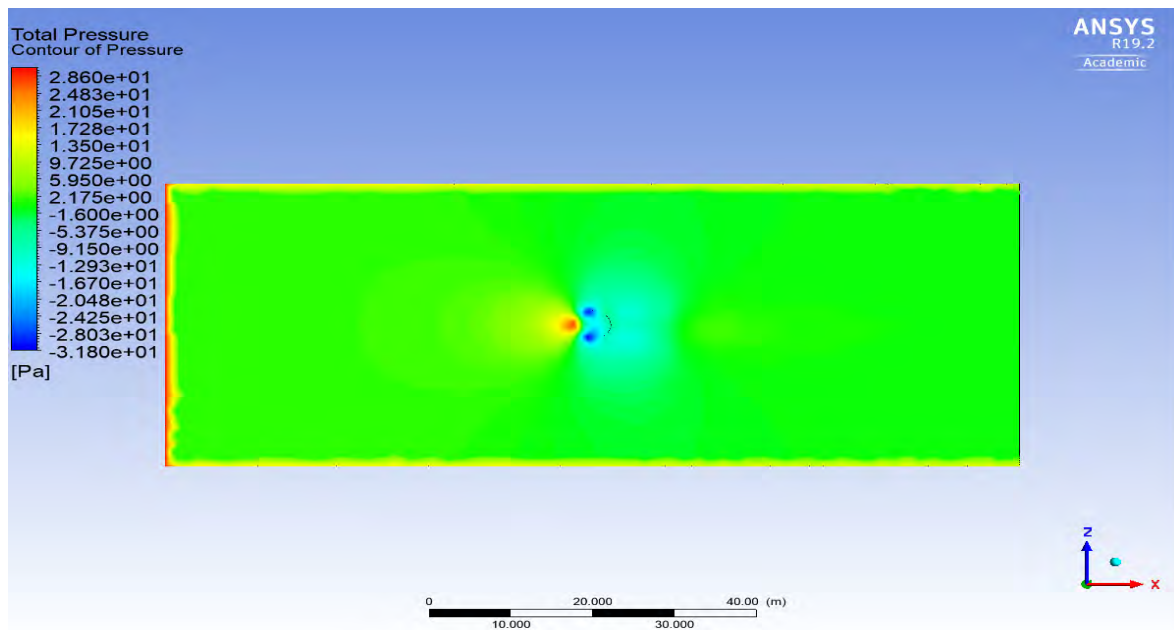
Σχήμα 6.15 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του πυλώνα (άξονας + z).

Στο πίσω μέρος του πυλώνα (υπήνεμος) αναμένονται πολύ μικρές τιμές ολικής πίεσης. Οι τιμές κυμαίνονται από -13.7 Pa έως -1.5 Pa.



Σχήμα 6.16 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου (Outlet).

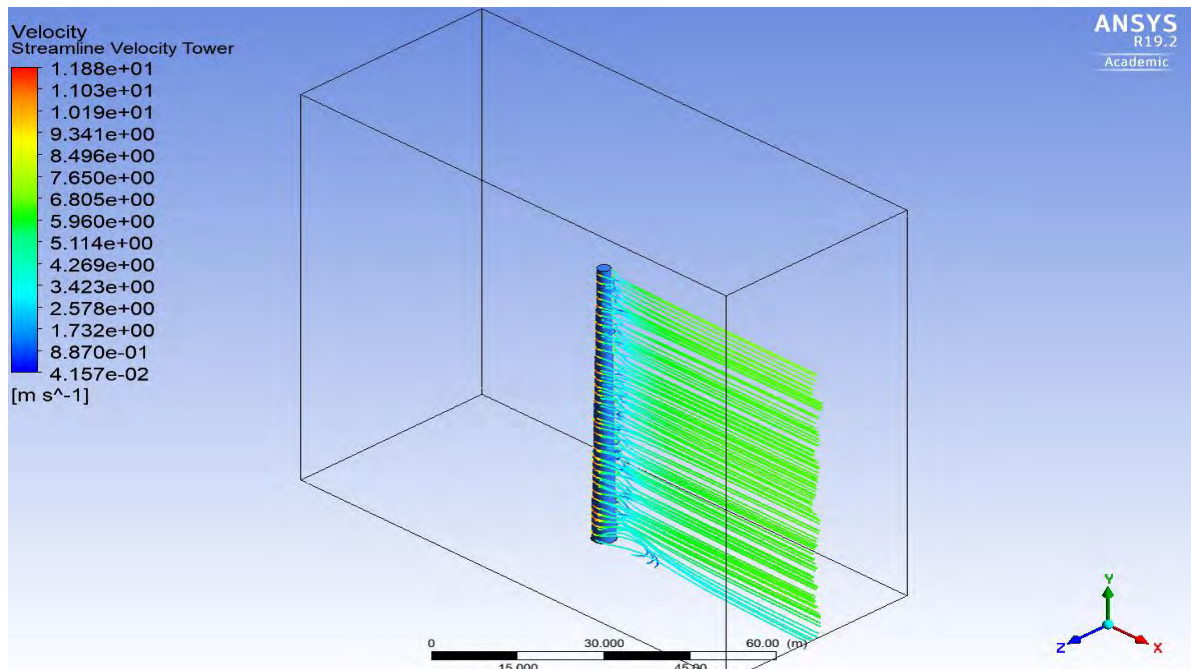
- **Total Pressure on Ground**



Σχήμα 6.17 : Κατανομή ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του εδάφους ($y = 0$).

- **Γραμμές ροής ταχύτητας**

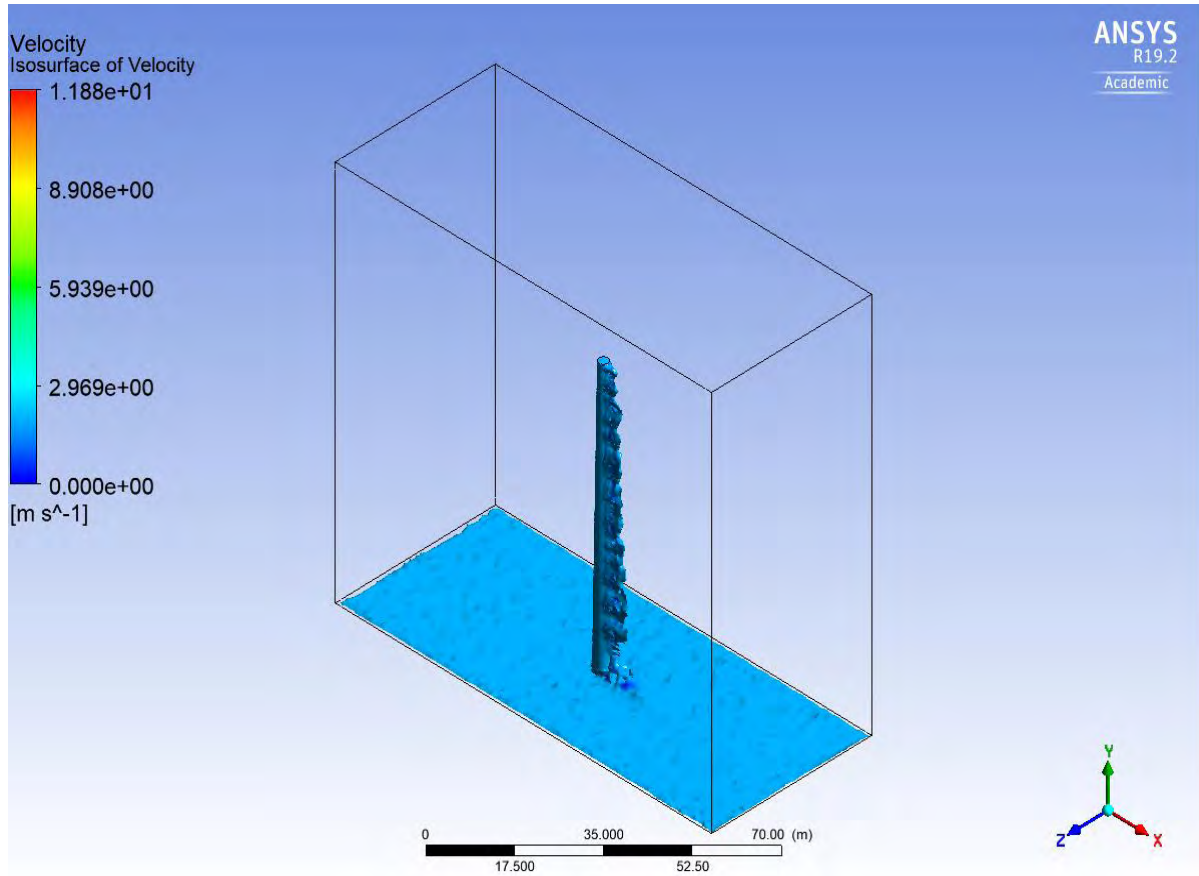
Στην παρακάτω εικόνα οπτικοποιούνται οι γραμμές ροής και οι στροβιλισμοί που δημιουργούνται μετά την αποκόλληση της ροής.



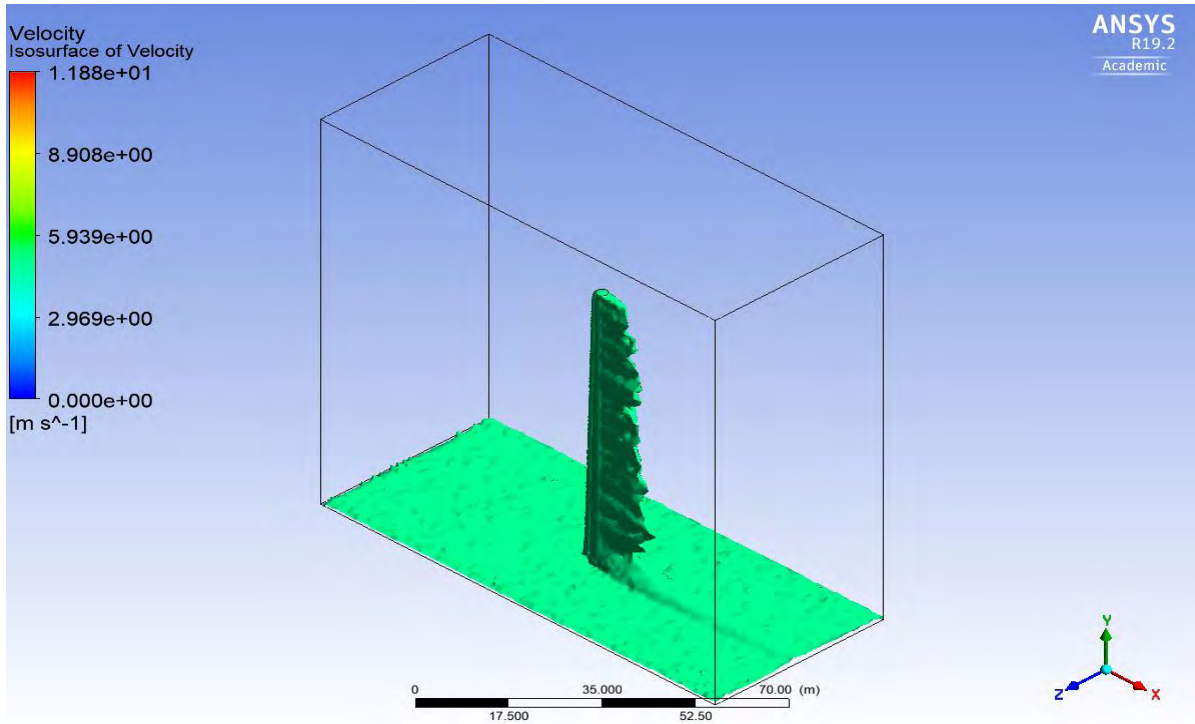
Σχήμα 6.18 : Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πυλώνα.

- **Επιφάνειες ίσης ταχύτητας**

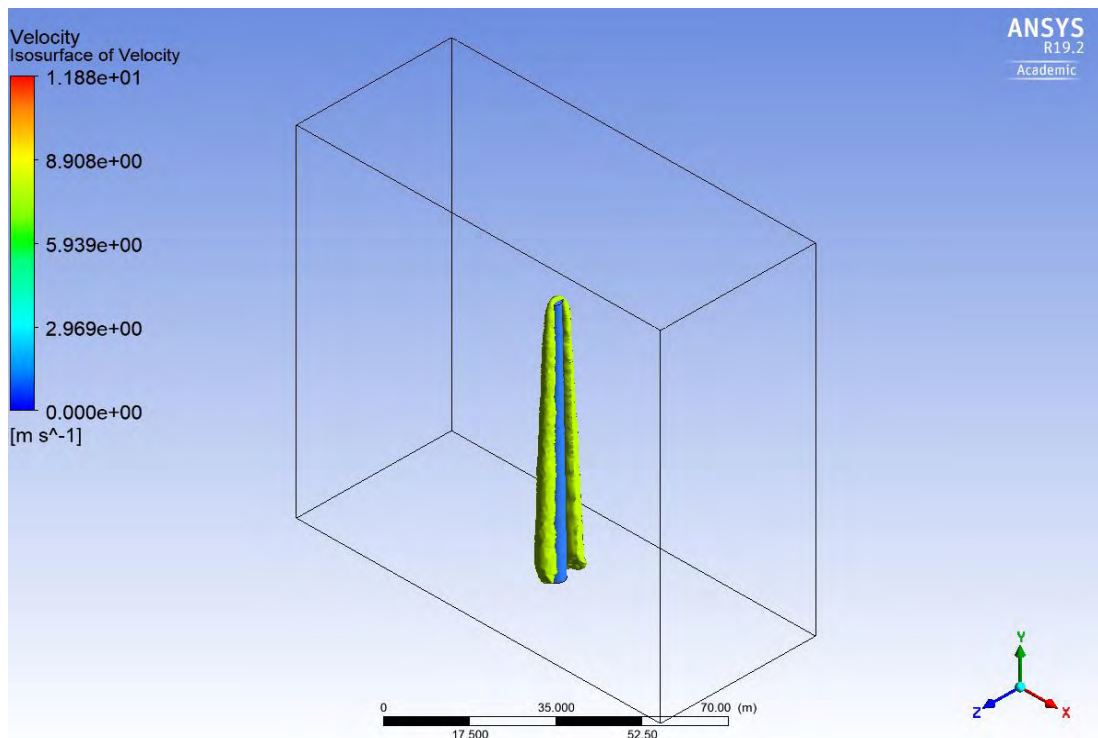
Μέσω της εντολής Isosurface γίνεται η επιλογή να εμφανιστούν όπου υπάρχουν επιφάνειες ίσης ταχύτητας. Επίσης, διακρίνεται που αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας και που οι μικρότερες στο υπολογιστικό πεδίο. Ενδεικτικά παρακάτω για τιμές της ταχύτητας 2m/s, 5 m/s, 8 m/s, 10 m/s.



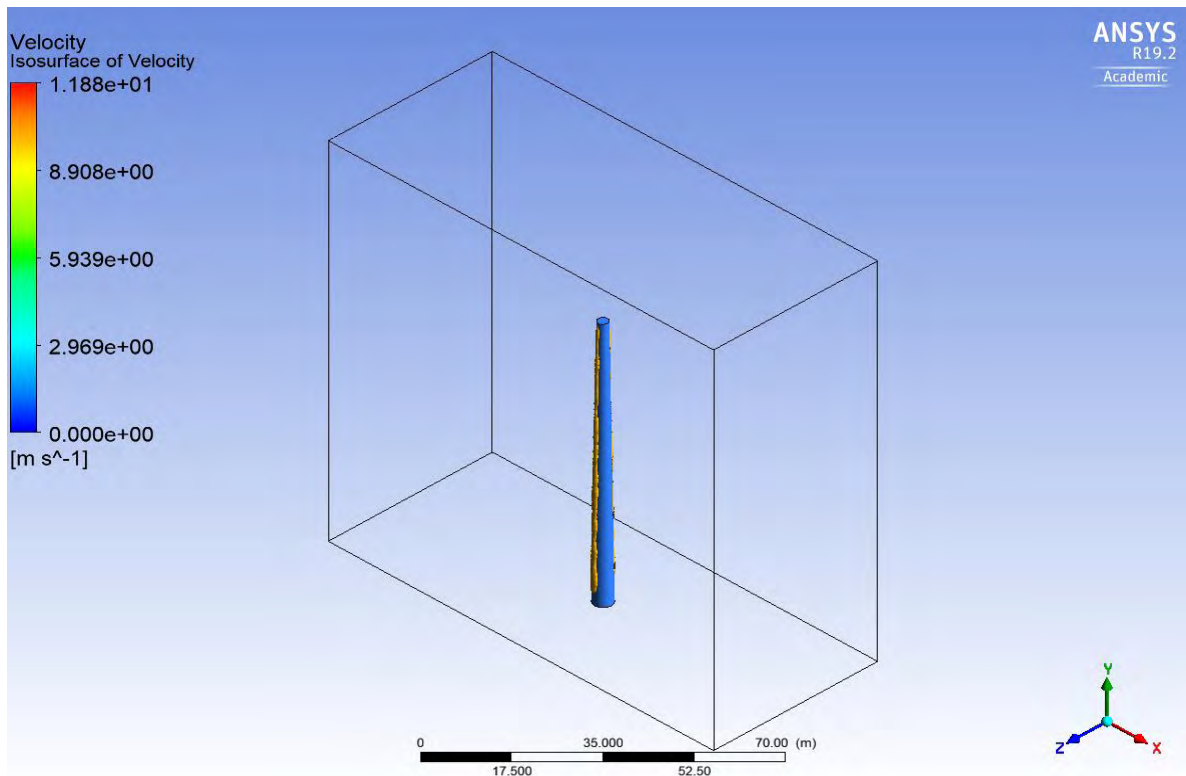
Σχήμα 6.19 : Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο.



Σχήμα 6.20 : Ταχύτητα 5 m/s στο υπολογιστικό πεδίο



Σχήμα 6.21 : Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο



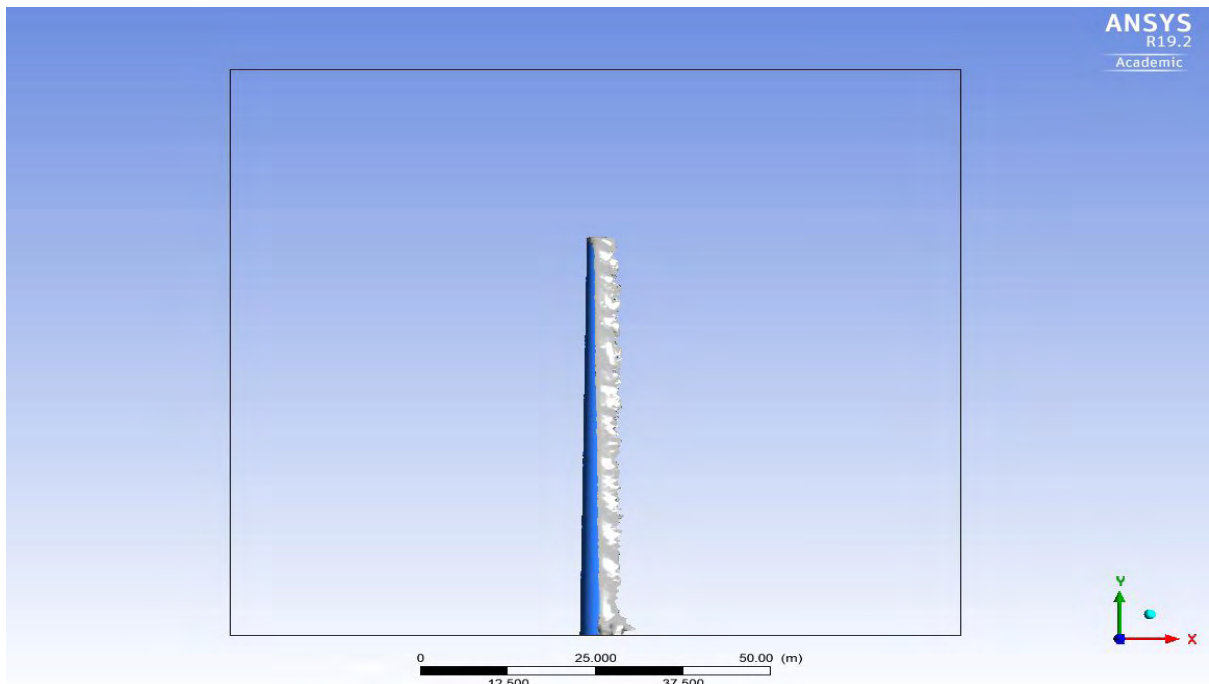
Σχήμα 6.22 : Ταχύτητα 10 m/s στο υπολογιστικό πεδίο

- **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 διατμητικές 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.

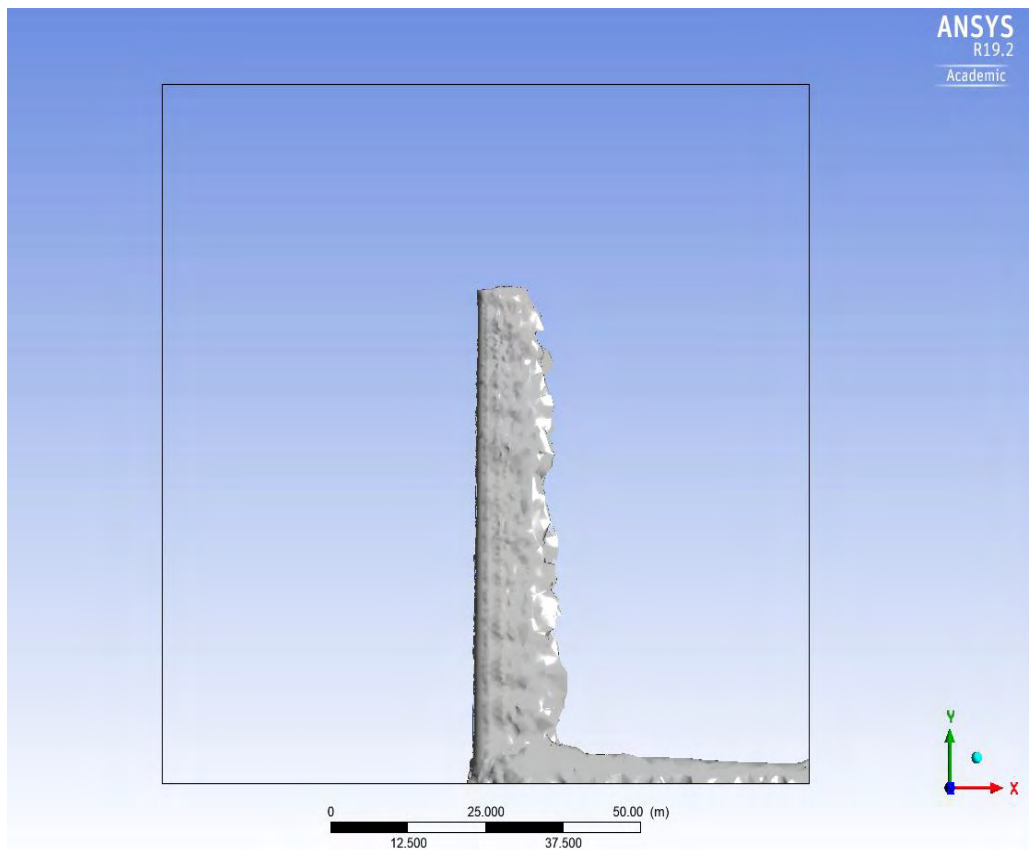
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται μετά τον πυλώνα (ολκός) λόγω αποκόλλησης της ροής και δημιουργίας μεγάλων δυνάμεων του ιξώδους. Με την εντολή Vortex Core Region οπτικοποιούνται στο πρόγραμμα CFD-Post σε διάφορα μεγέθη (levels).

Στροβιλότητα μεγέθους 0.1 (Vorticity Level 0.1)



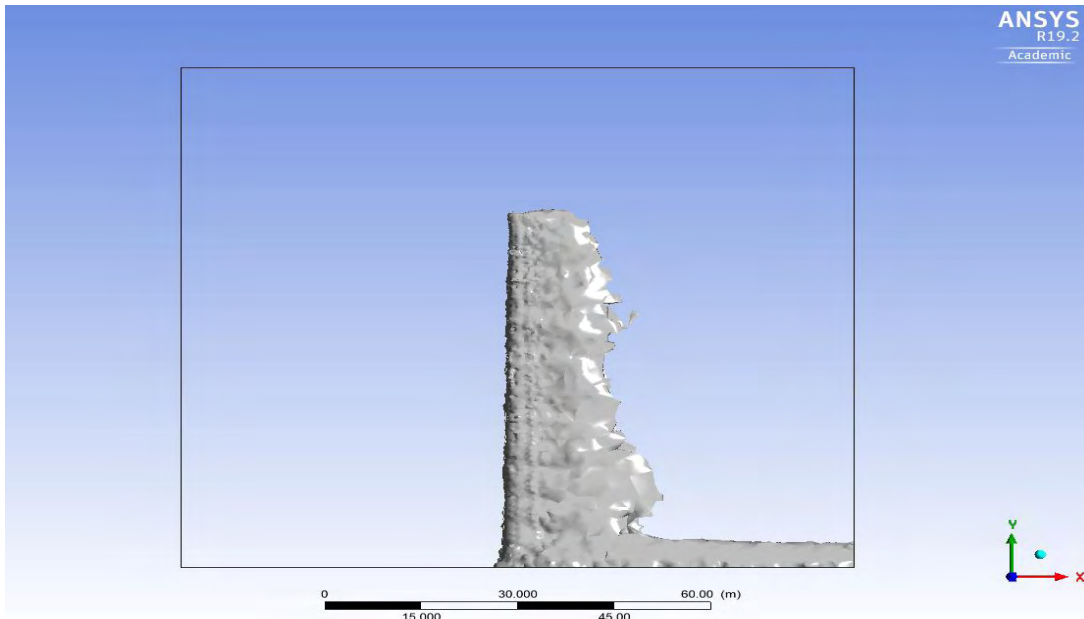
Σχήμα 6.23 : Στροβιλότητα $4.61 s^{-1}$

Στροβιλότητα μεγέθους 0.01 (Vorticity Level 0.01)



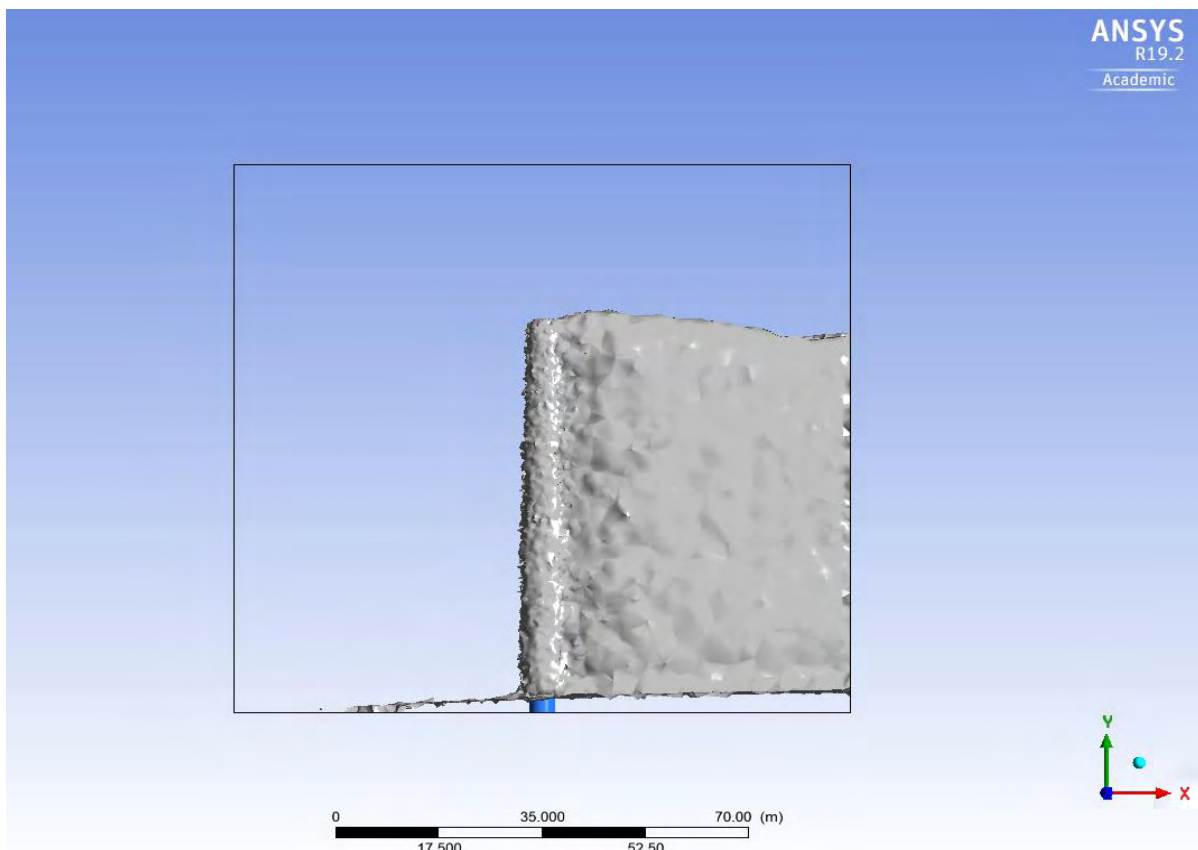
Σχήμα 6.24 : Στροβιλότητα $0.461 s^{-1}$.

Στροβιλότητα μεγέθους 0.005 (Vorticity Level 0.005)



Σχήμα 6.25 : Στροβιλότητα 0.23 s^{-1}

Στροβιλότητα μεγέθους 0.001 (Vorticity Level 0.001)



Σχήμα 6.26 : Στροβιλότητα 0.047 s^{-1} .

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

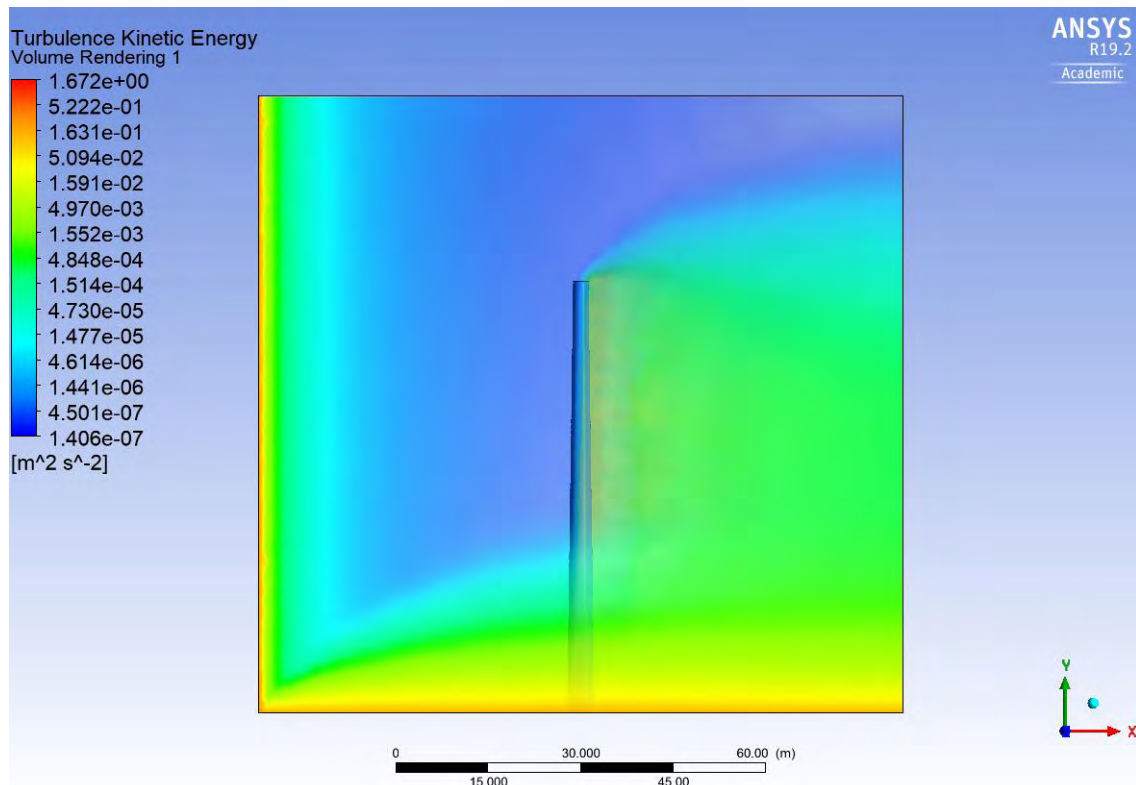
Η συνηθέστερη μεθοδολογία που ακολουθείται σήμερα στη μελέτη ασυμπίεστων τυρβωδών ροών βασίζεται στη χρήση χρονικά μέσων ποσοτήτων. Στη μεθοδολογία αυτή, η στιγμιαία ταχύτητα (u, v, w) σε τυχόν σημείο της τυρβώδους ροής αναλύεται στο άθροισμα της χρονικά μέσης τιμής της ταχύτητας ($\bar{u}, \bar{v},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

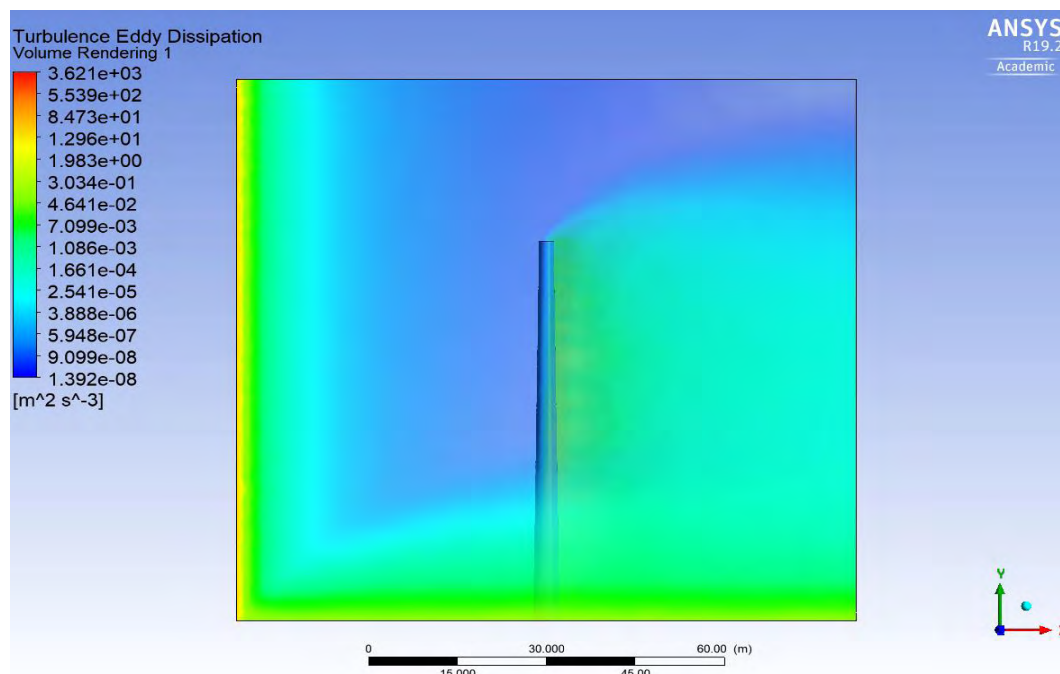
$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (\text{Μηχ. Ρευστών, Α. Λιακόπουλος, Β Έκδοση}) \quad (6.3)$$



Σχήμα 6.27α : Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους k (Volume Rendering).

- **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.



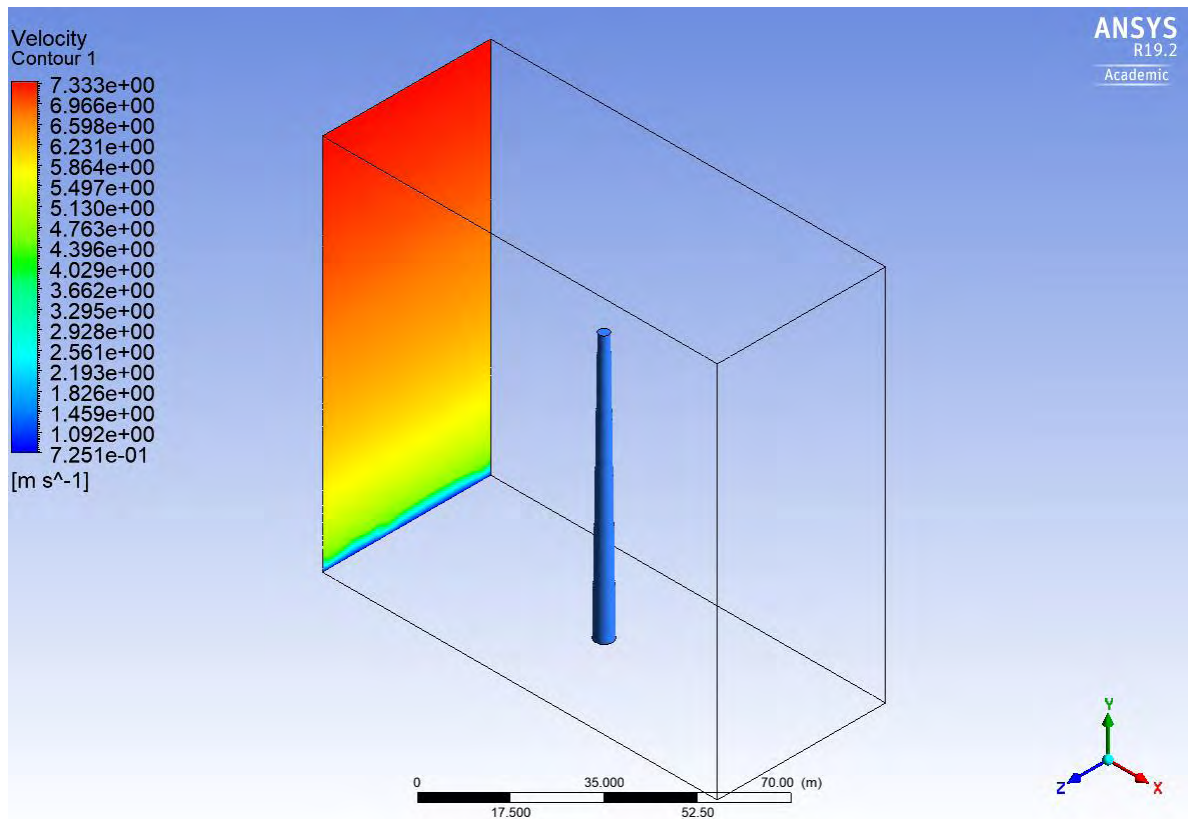
Σχήμα 6.27β : Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους ε (Volume Rendering).

6.2 Εκθετικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του Υ.Π.

Όπως στο ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας έτσι και στο εκθετικό μελετήθηκαν οι ταχύτητες σε επιφάνειες επιπέδων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Plane x = - 50 m (Inlet)

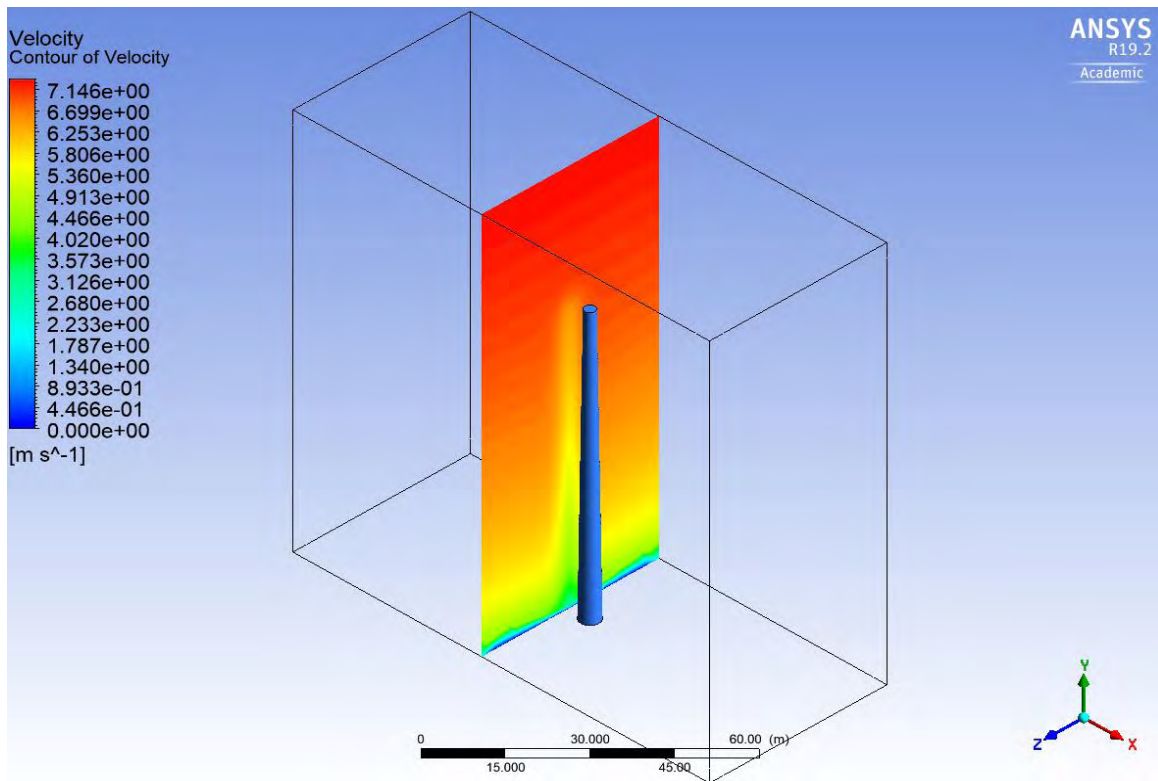
Στο παρακάτω σχήμα έγινε η εισαγωγή της συνοριακής εισόδου στο υπολογιστικό πεδίο δηλαδή το εκθετικό προφίλ ταχύτητας.



Σχήμα 6.28 : Εκθετικό προφίλ της ταχύτητας στην επιφάνεια εισόδου (Inlet).

Plane x = - 5 m

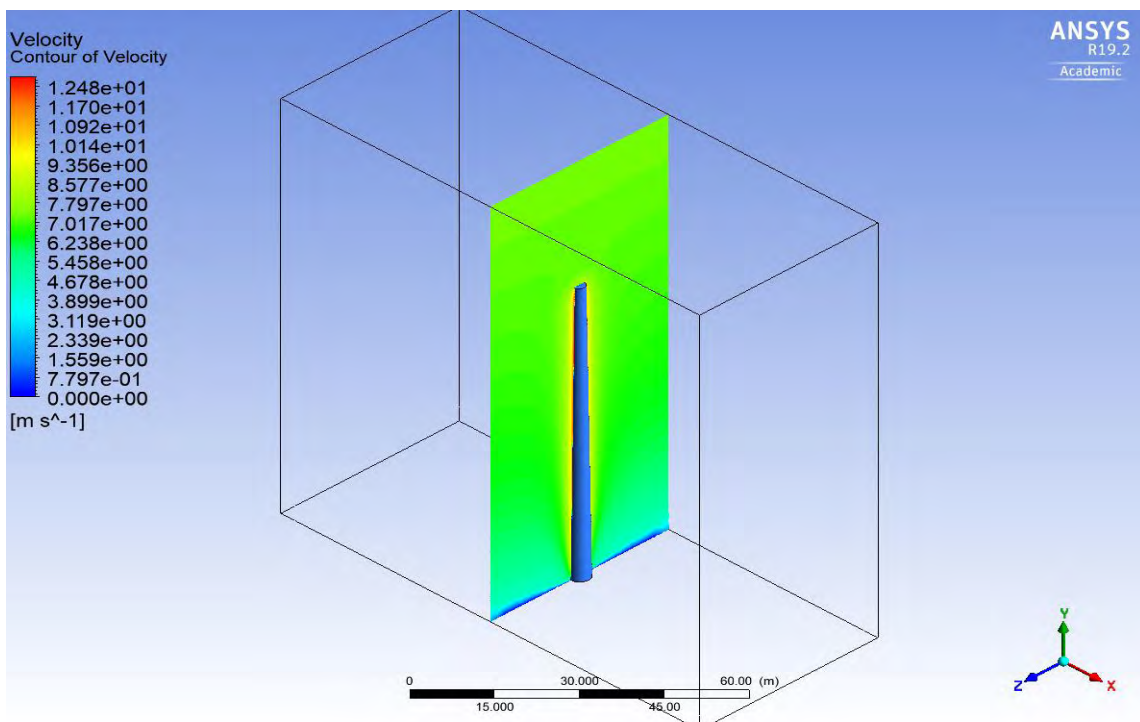
Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τις τιμές της ταχύτητας σε κατακόρυφο επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα. Κοντά στην βάση οι τιμές της ταχύτητας είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις τιμές κοντά στην κορυφή. Εδώ παρατηρούνται τις διαφορές που έχει το ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας με αυτό του εκθετικού. Σε απόσταση 5 μέτρα από το έδαφος η τιμή της ταχύτητας στην επιφάνεια αυτή είναι 3.5 m/s ενώ σε απόσταση 5 m από την κορυφή η τιμή είναι 6.5 m/s.



Σχήμα 6.29 : Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 5 μέτρα από κέντρο της βάσης του πυλώνα ($x = -5m$).

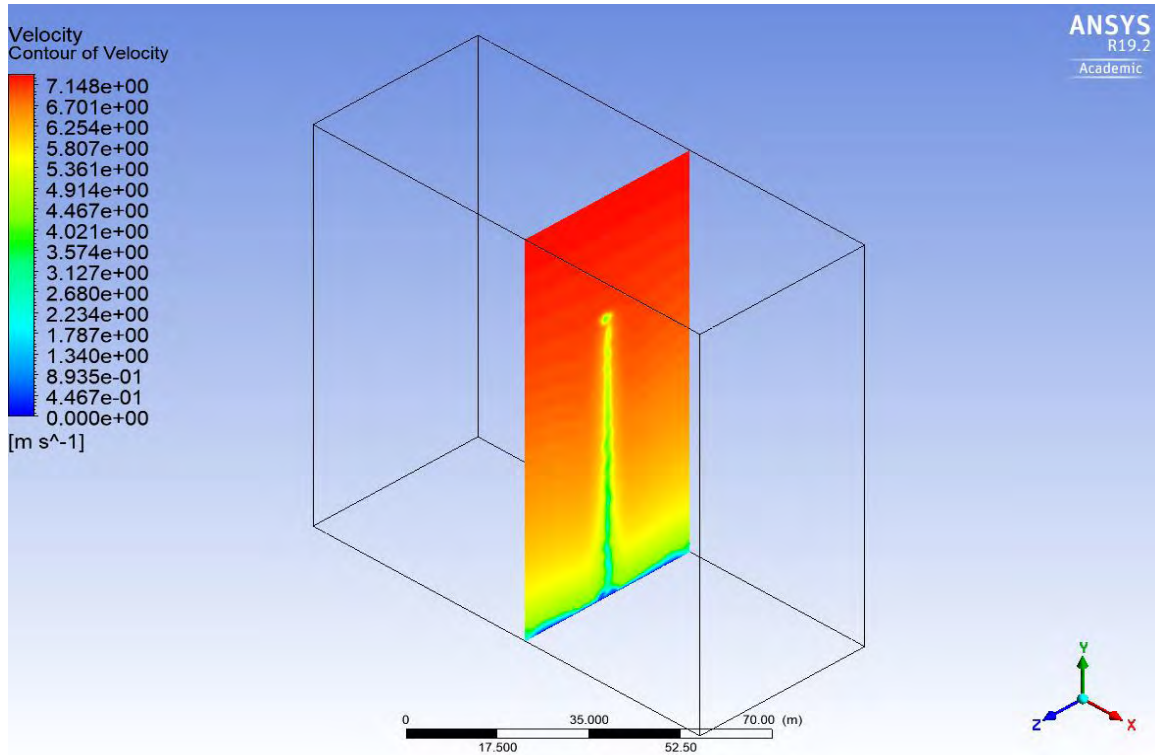
Plane $x = 0$ m

Στην επιφάνεια που ο άνεμος αλληλοεπιδρά με τον πυλώνα δημιουργούνται οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας. Η μέγιστη ταχύτητα είναι 12.87 m/s.



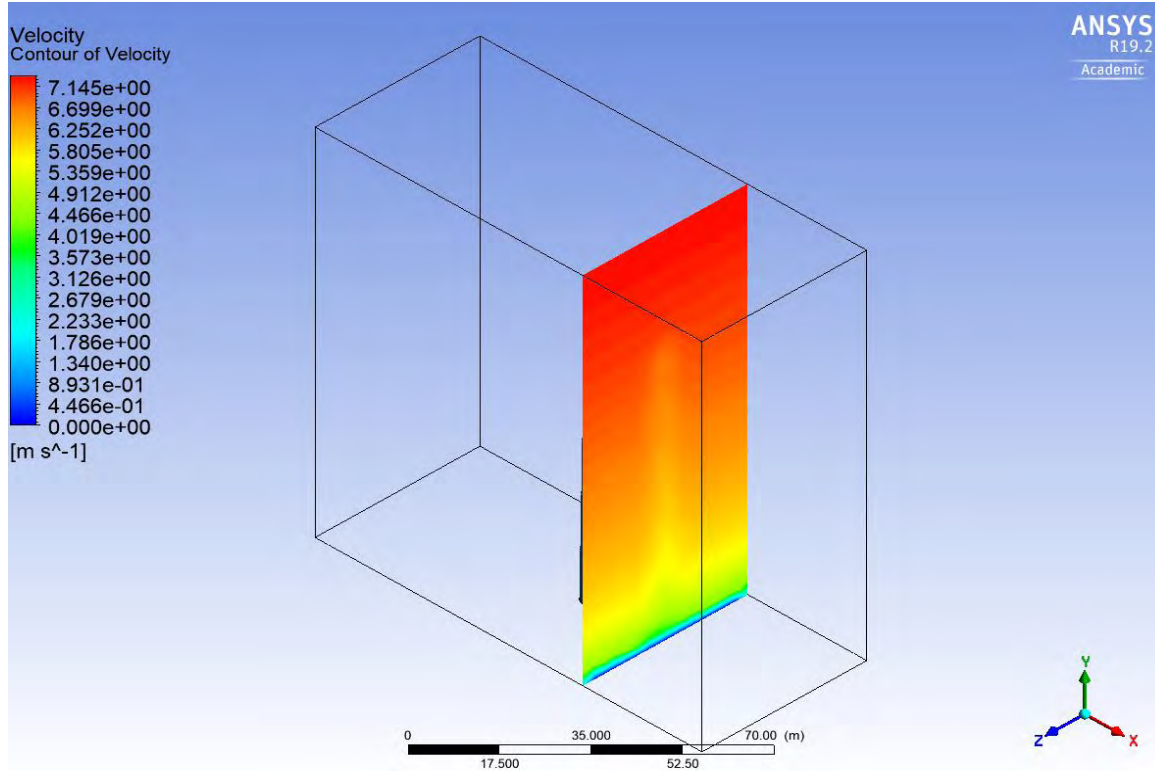
Σχήμα 6.30 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο στο κέντρο της βάσης του πυλώνα ($x = 0m$).

Plane $x = +5$ m



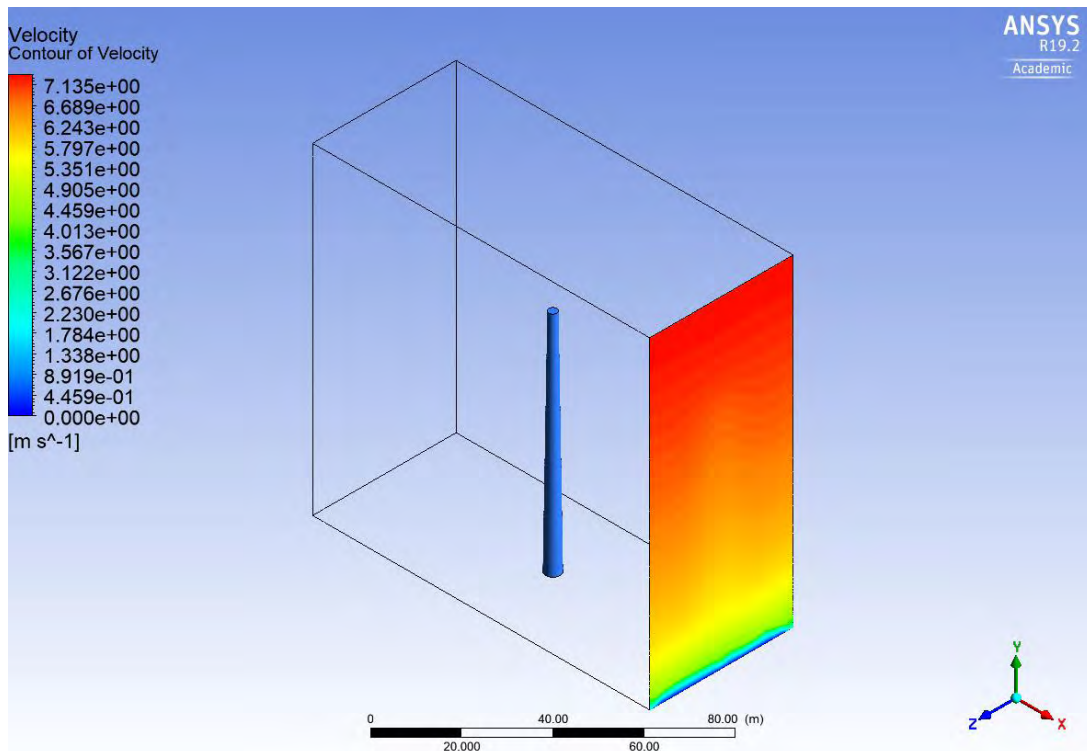
Σχήμα 6.31 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο 5 μέτρα μετά από το κέντρο της βάσης του πυλώνα ($x = 5m$).

Plane $x = 20$ m



Σχήμα 6.32 : Ισοταχείς σε κατακόρυφο επίπεδο σε απόσταση 20 μέτρα από το κέντρο βάσης του πυλώνα ($x = 20m$).

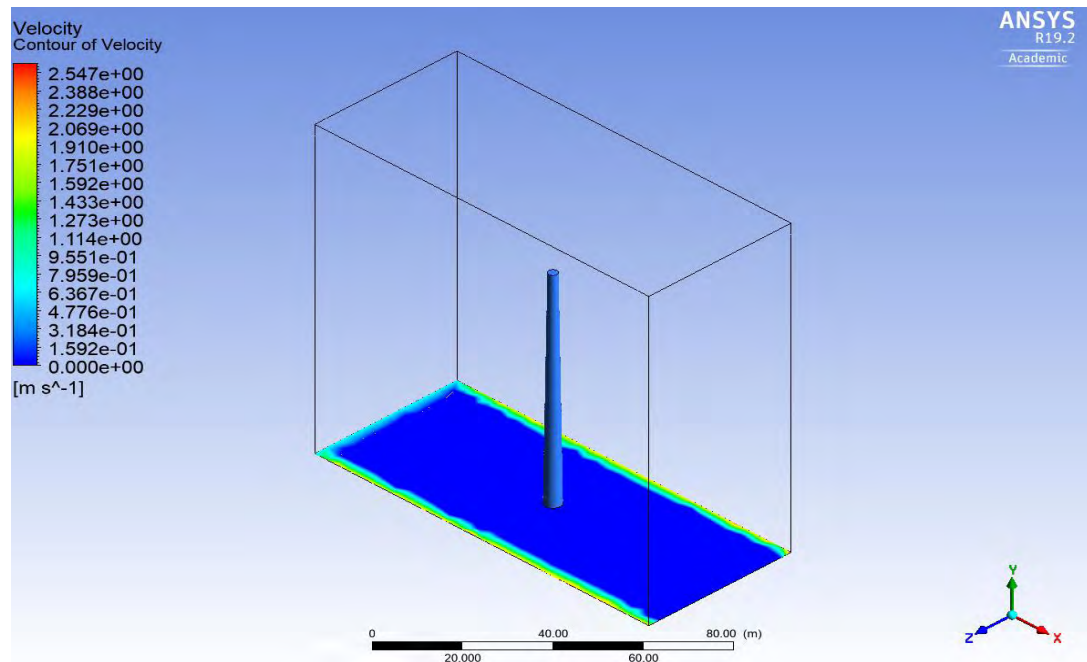
Plane x = 50 m (Outlet)



Σχήμα 6.33 : Ισοταχείς στην επιφάνεια εξόδου (Outlet).

Plane y = 0 m (Ground)

Λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης στο έδαφος δημιουργείται οριακό στρώμα με μηδενικές τιμές της ταχύτητας όπως βλέπουμε παρακάτω.

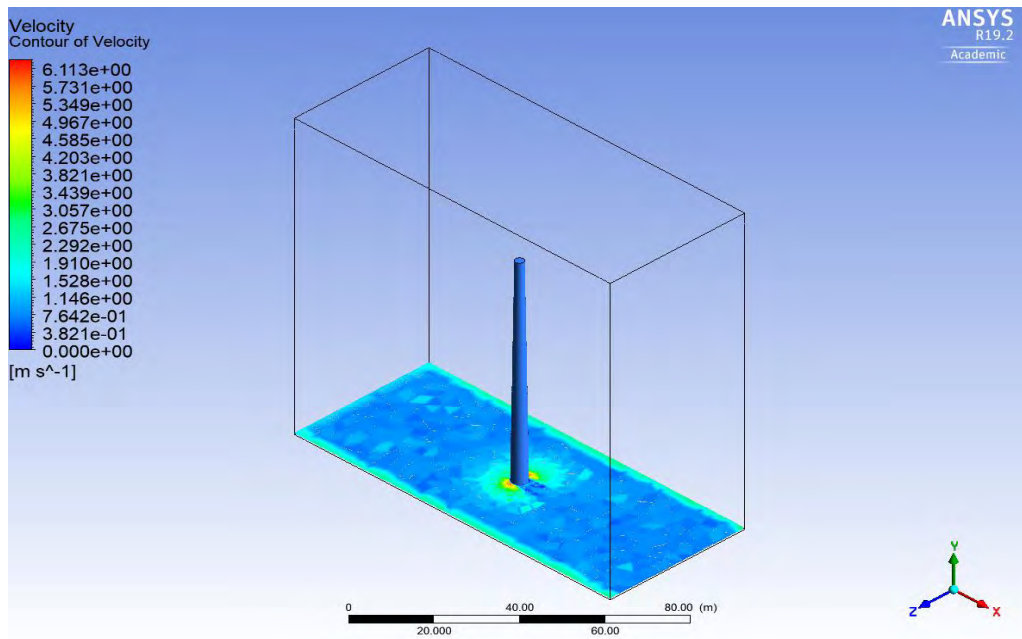


Σχήμα 6.34 : Κατανομή ταχύτητας στην επιφάνεια του εδάφους ($y = 0m$).

- Καθώς αυξάνεται το ύψος του πυλώνα παρατηρείται πως οι ταχύτητες κοντά στον πυλώνα (πλάγια) αυξάνονται. Ενδεικτικά για τις περιπτώσεις όπου η επιφάνεια απέχει από το έδαφος 0.5 m, 10 m, 35m, 60m. Τέλος, το προφίλ της ταχύτητας στην επιφάνεια της κορυφής του πυλώνα.

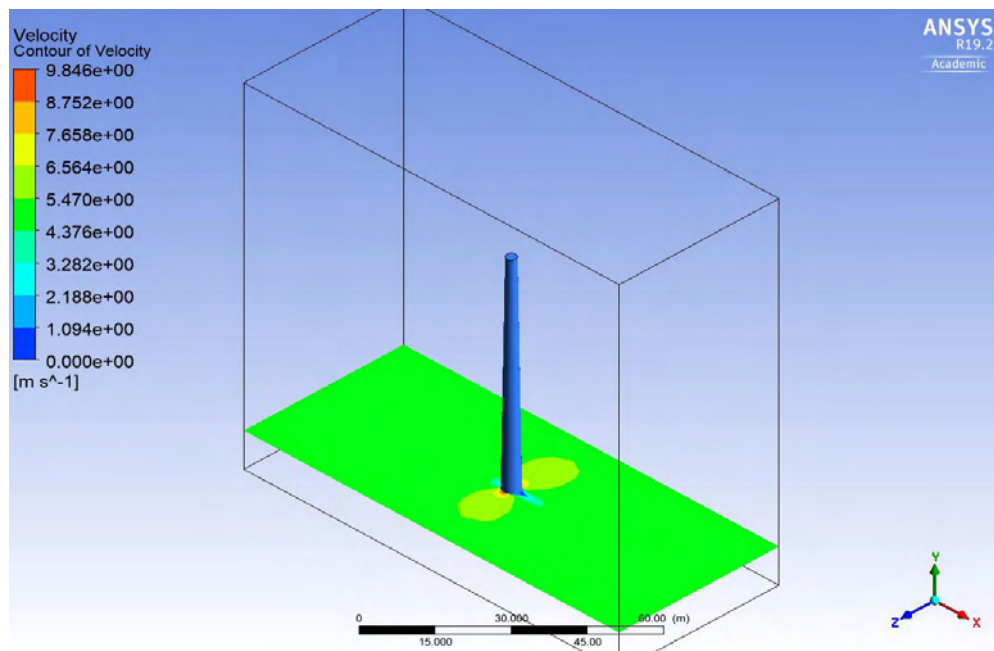
Στα 10 m από το έδαφος η μέγιστη ταχύτητα γύρω από τον πυλώνα είναι 9.85 m/s, στα 35m 11.88 m/s και στα 60 m 12.85 m/s.

Plane y = 0.5 m



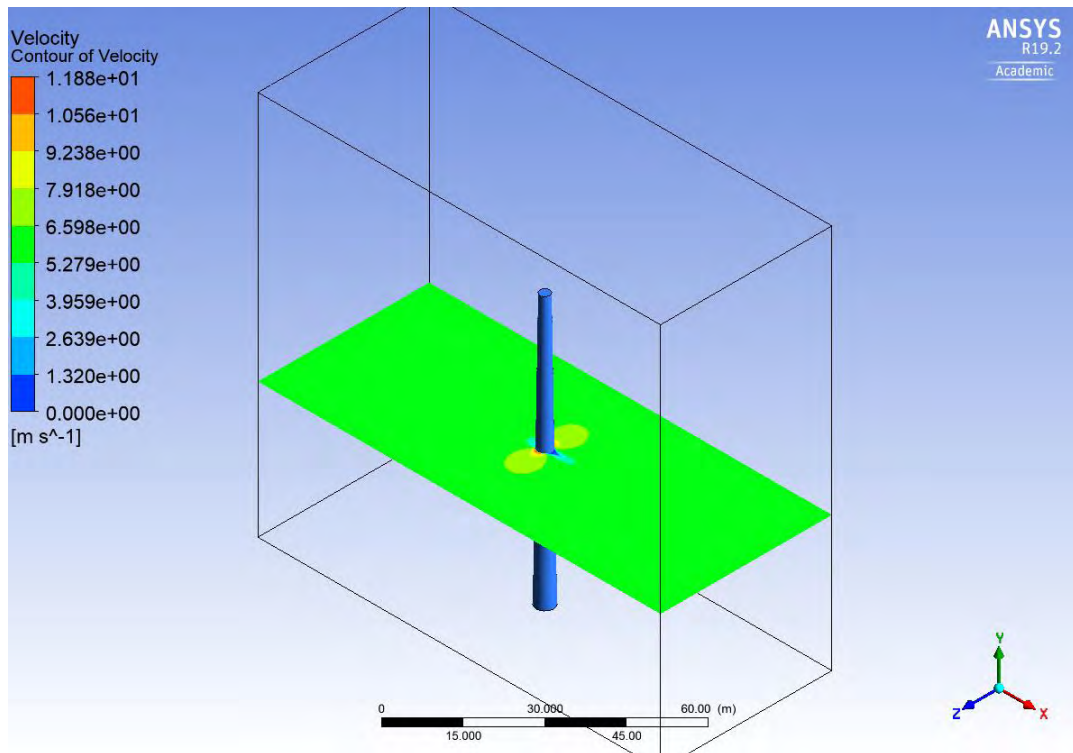
Σχήμα 6.35 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο 0.5m από το έδαφος ($y = 0.5m$).

Plane y = 10 m



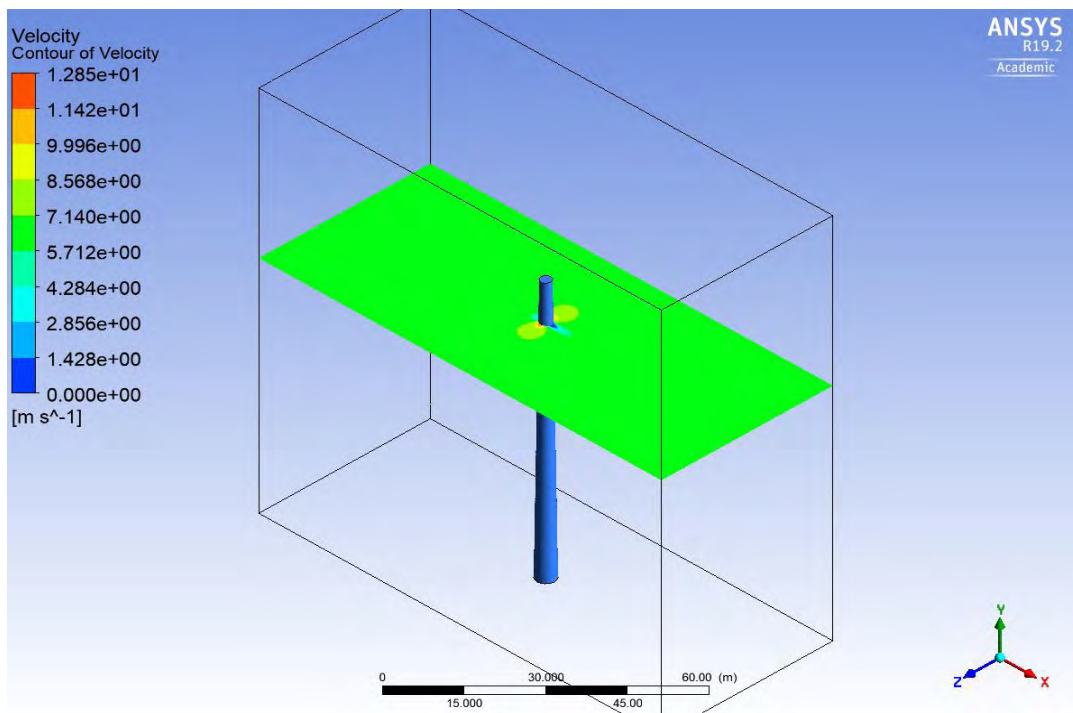
Σχήμα 6.36 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο 10 μέτρα από το έδαφος ($y = 10m$).

Plane y = 35 m



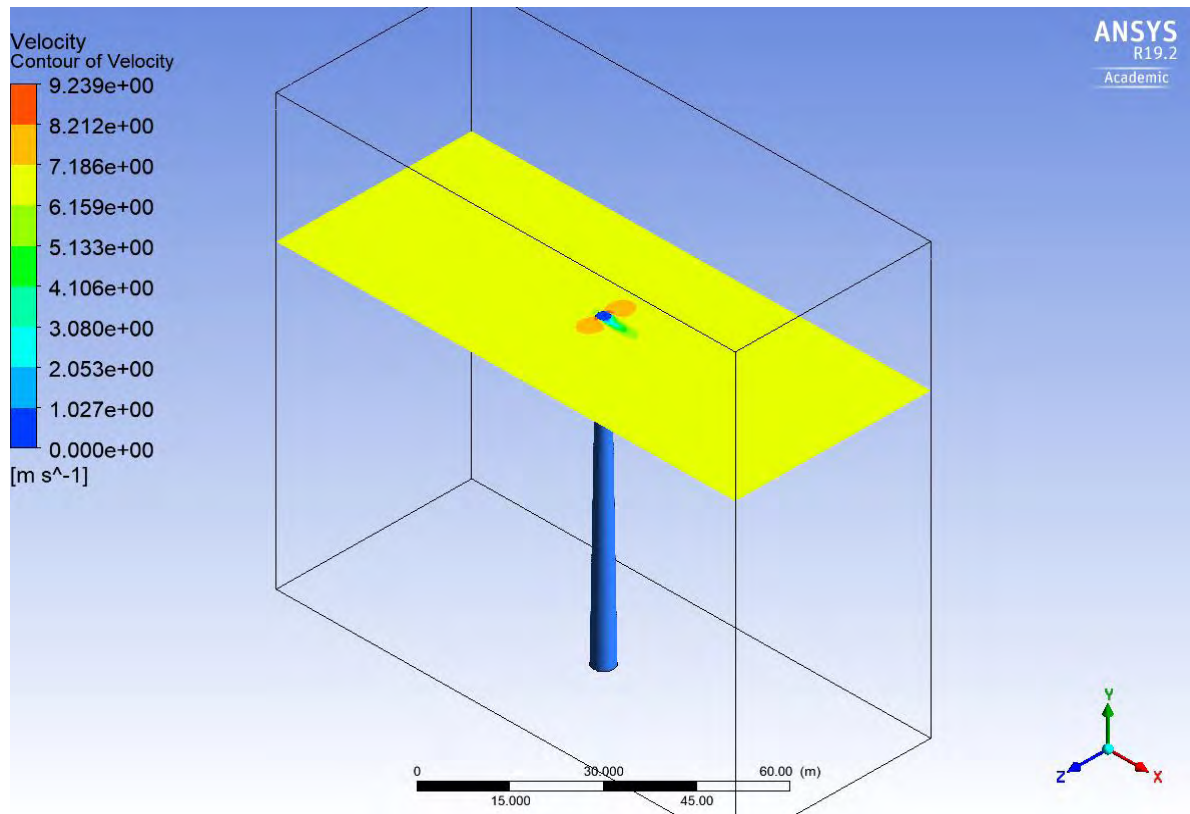
Σχήμα 6.37 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο που απέχει 35 μέτρα από το έδαφος ($y = 35m$).

Plane y = 60 m



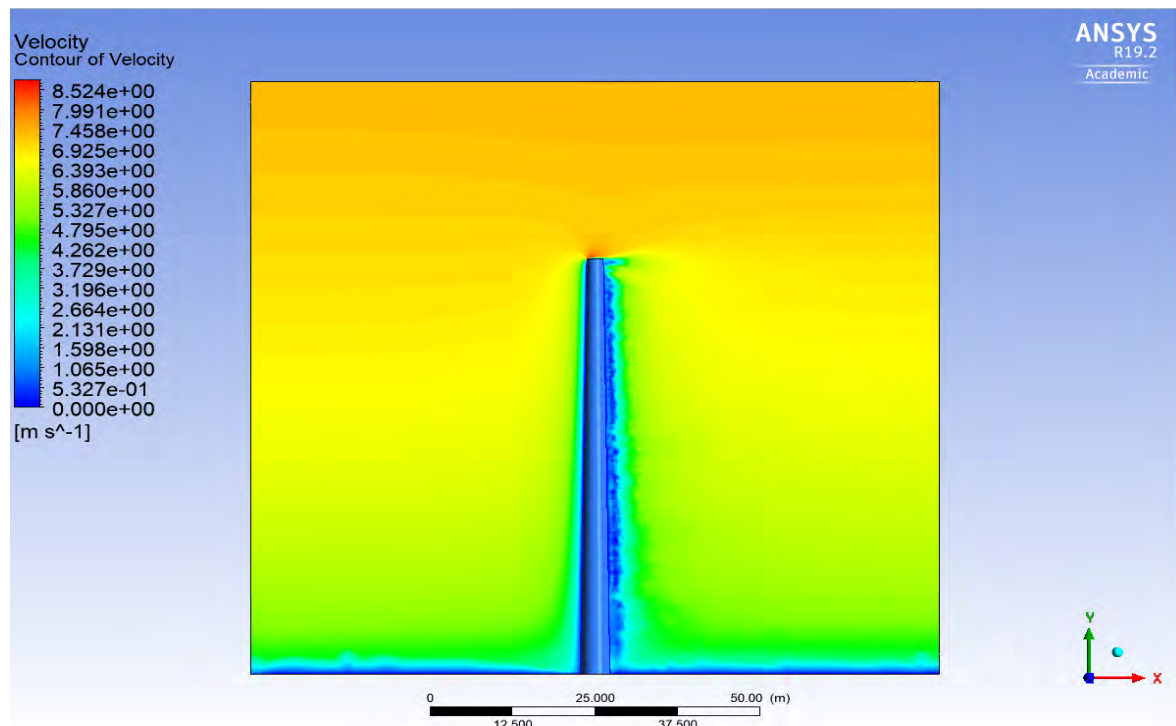
Σχήμα 6.38 : Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 60 μέτρα από το έδαφος ($y = 60m$).

Plane $y = 70$ m



Σχήμα 6.39 : Ισοταχείς σε οριζόντιο επίπεδο στην κορυφή του πυλώνα ($y = 70$ m).

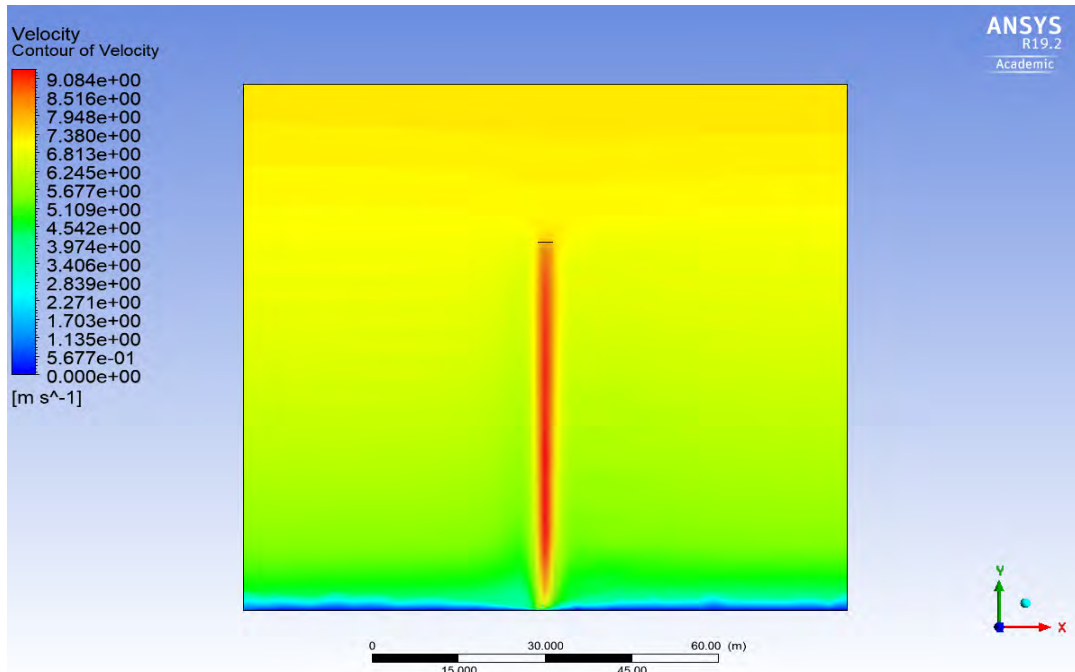
Plane $z = 0$ m



Σχήμα 6.40 : Ισοταχείς σε επίπεδο στον άξονα συμμετρίας z ($z = 0$ m).

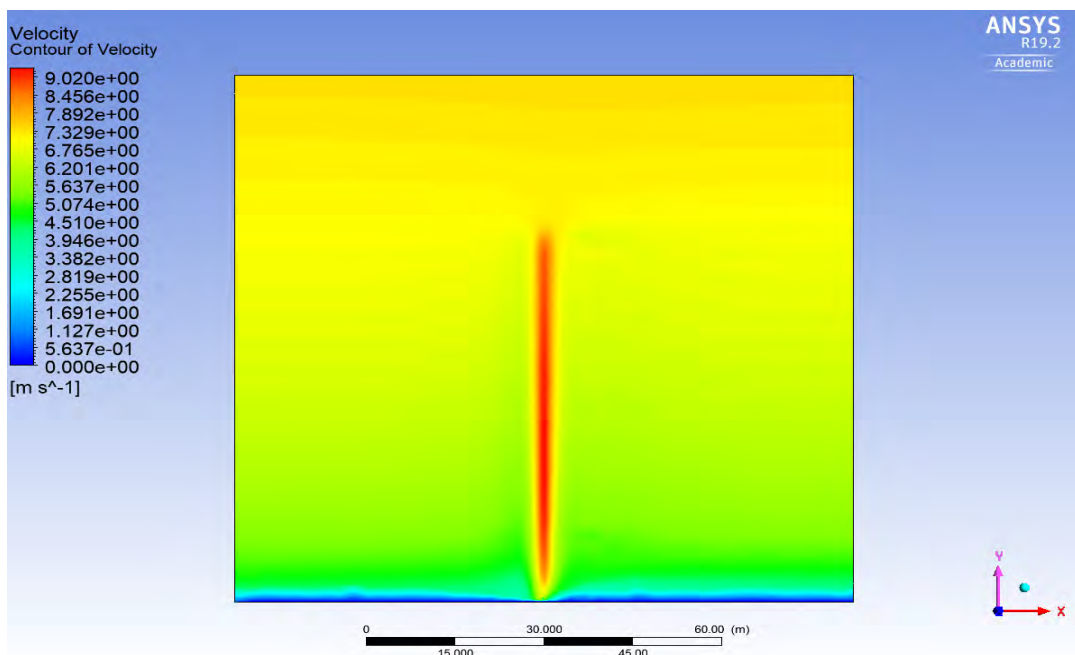
Παρατηρούμε ότι στις επιφάνειες στο επίπεδο $z = 0$ m εμφανίζονται μεγάλες τιμές της ταχύτητας μετά την κατεύθυνση της ροής όπου αλληλοεπιδρά με τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Οι τιμές της ταχύτητας είναι ίδιες και στις δύο πλευρές του πυλώνα μετά την αποκόλληση της ροής.

Plane $z = -2.5$ m



Σχήμα 6.41 : Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα ($z = 2.5$ m).

Plane $z = 2.5$ m



Σχήμα 6.42 : Ισοταχείς σε επίπεδο που απέχει 2.5 μέτρα από το κέντρο της βάσης του πυλώνα ($z = 2.5$ m).

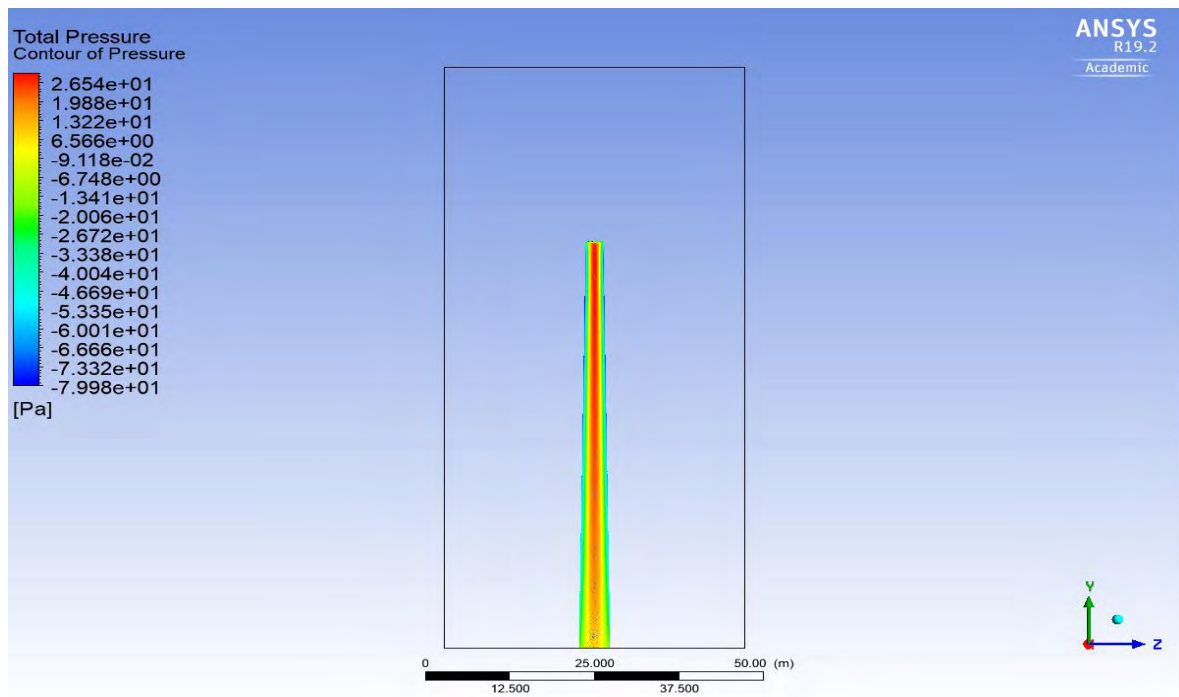
- Κατανομή της ολικής πίεσης (πίεσης ανακοπής στην παράπλευρη επιφάνεια του πυλώνα), (Total Pressure)

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

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

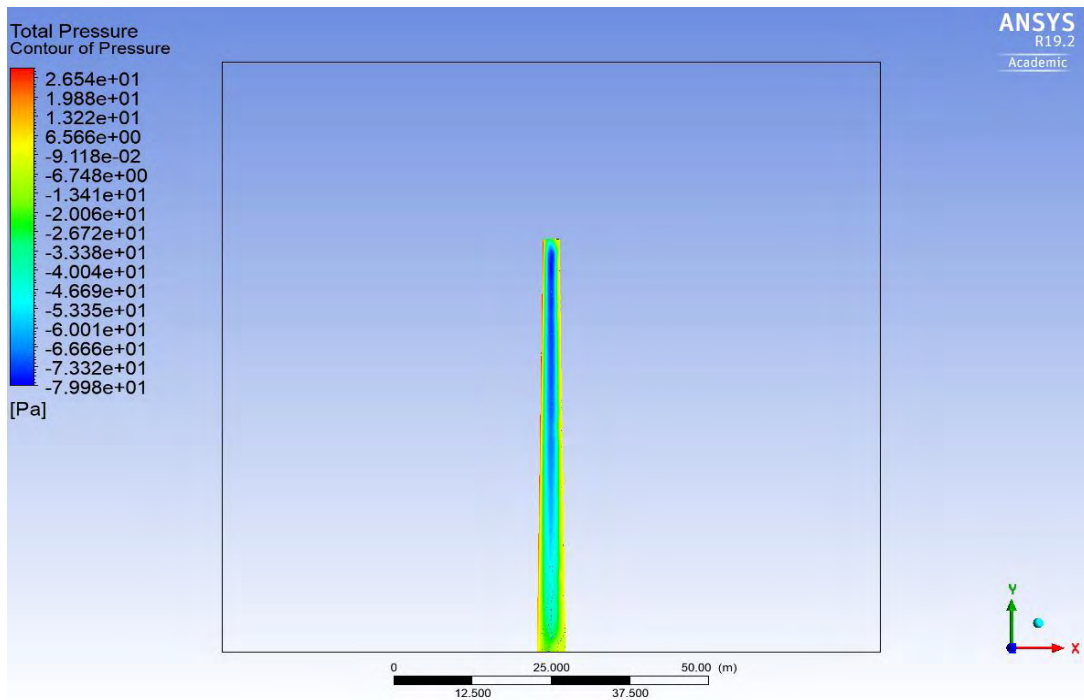
Εναλλακτικά, η ολική πίεση αναφέρεται στην ελληνική βιβλιογραφία και ως πίεση ανακοπής.

Λόγω του εκθετικού προφίλ ταχύτητας παρατηρείται ότι η ολική πίεση δεν είναι η ίδια σε όλη την επιφάνεια του πυλώνα. Κοντά στην βάση η τιμή της φτάνει τα 10 Pa ενώ κοντά στην κορυφή όπου η τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι η μεγαλύτερη φτάνει τα 29 Pa.



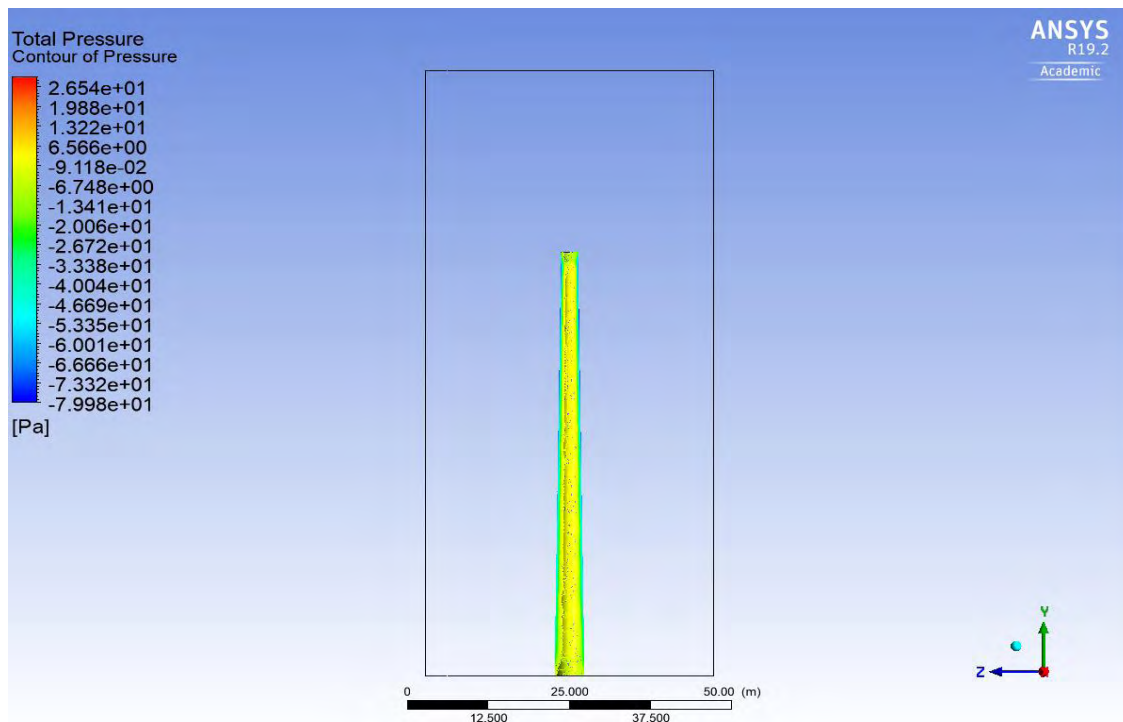
Σχήμα 6.43 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εισόδου (Inlet).

Στον άξονα z η τιμή της ολικής πίεσης κοντά στην βάση είναι -19 Pa ενώ κοντά στην κορυφή - 79 Pa.



Σχήμα 6.44 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του πυλώνα (άξονας + z).

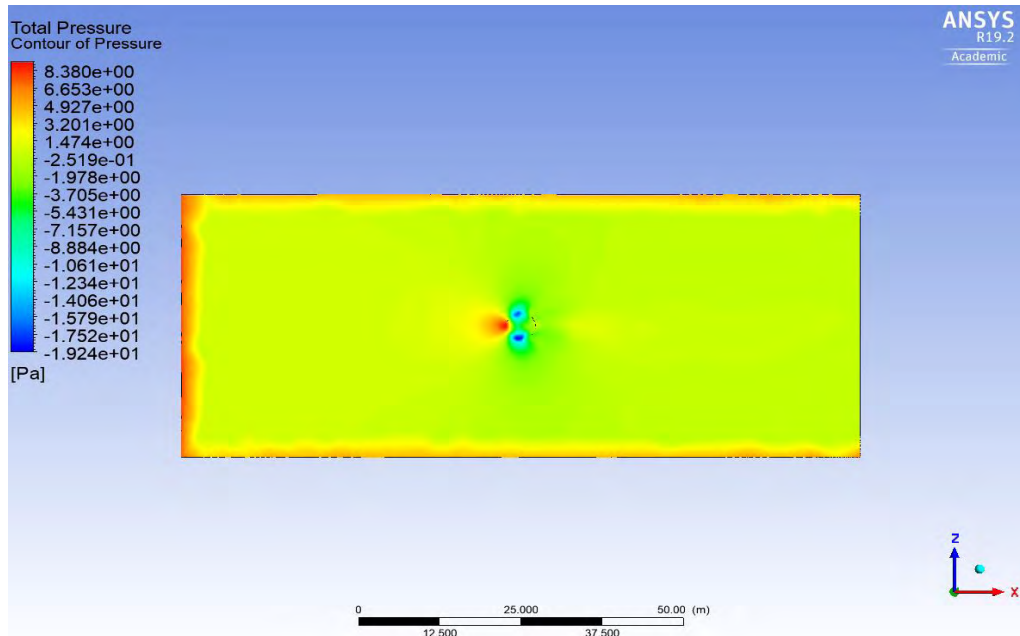
Στο πίσω μέρος του πυλώνα (υπήνεμο) λόγω των στροβιλισμών που δημιουργούνται αναμένονται οι μικρότερες τιμές της ολικής πίεσης. Η τιμή της ολικής πίεσης είναι 5.65 Pa με μικρές διαφορές καθώς το ύψος αλλάζει.



Σχήμα 6.45 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του πυλώνα όπως φαίνεται από την πλευρά εξόδου(άξονας - x).

- **Total Pressure on Ground**

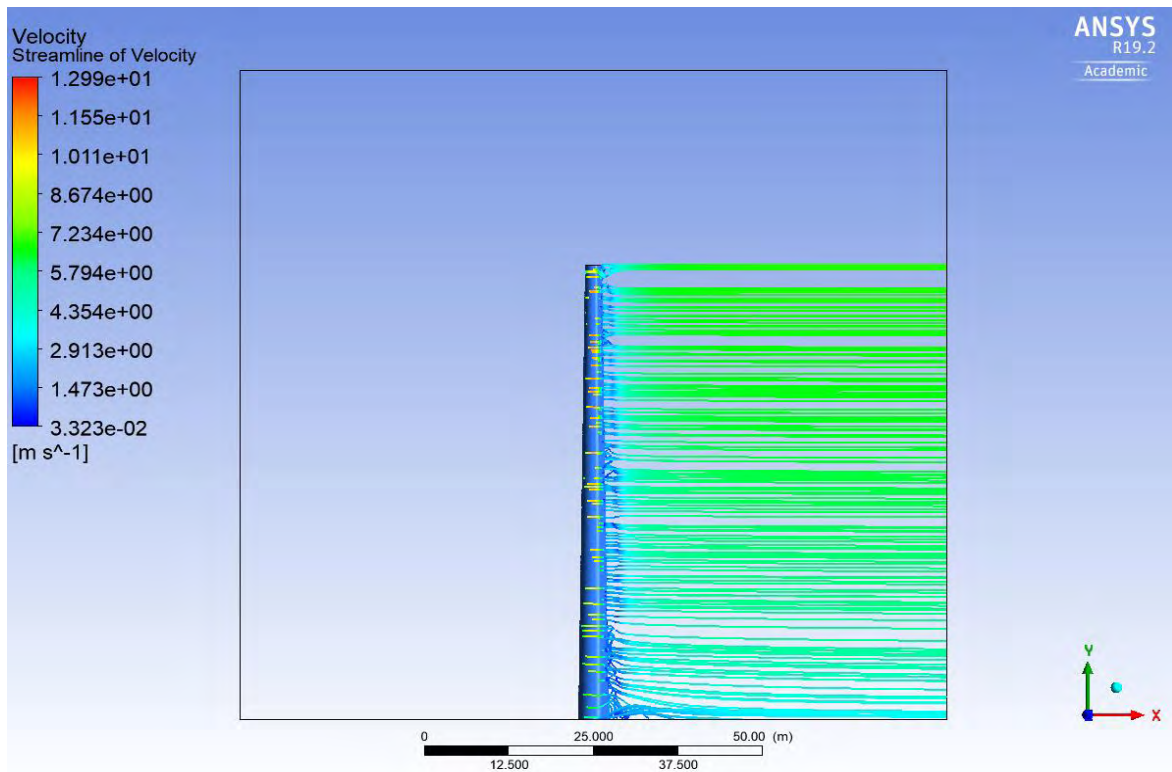
Στην επιφάνεια του εδάφους κοντά στον πυλώνα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές της ολικής πίεσης. Η τιμή της φτάνει τα 9.24 Pa ενώ στις 2 επιφάνειες μετά την αλληλοεπίδραση του ανέμου με την κατασκευή είναι -19.24 Pa.



Σχήμα 6.46 : Κατανομή της ολικής πίεσης (total pressure) στην επιφάνεια του εδάφους.

- **Γραμμές ροής**

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.

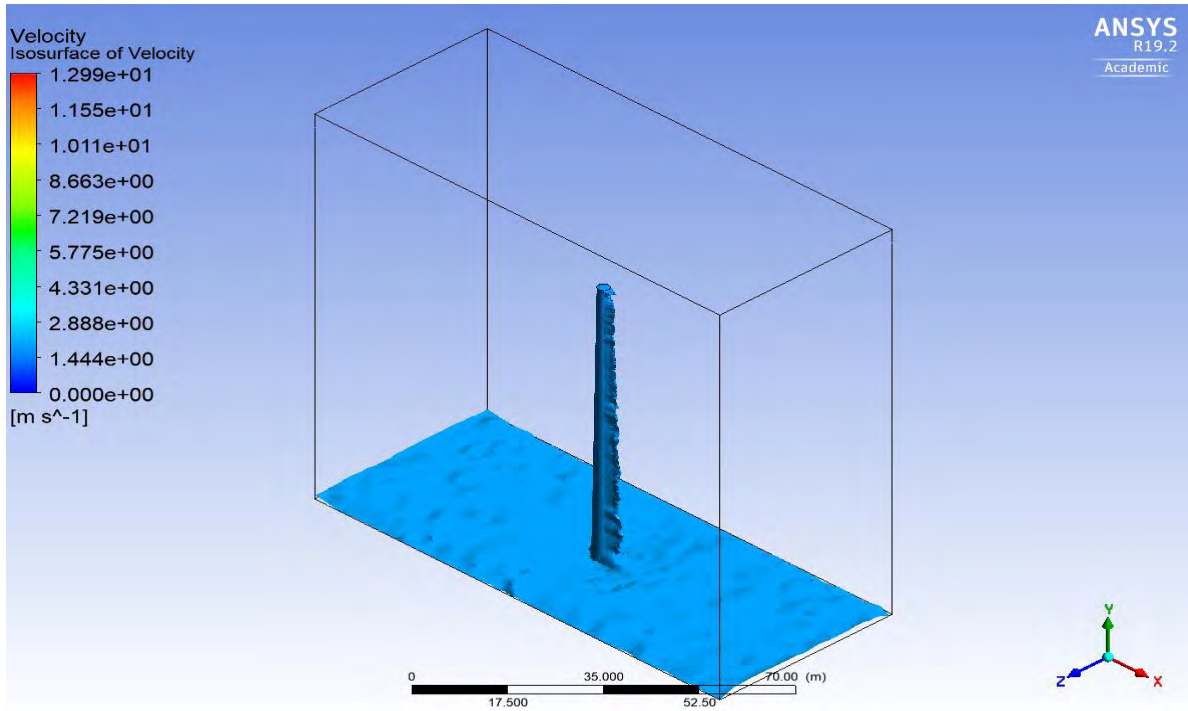


Σχήμα 6.47 : Γραμμές ροής ταχύτητας μετά τον πλώνα.

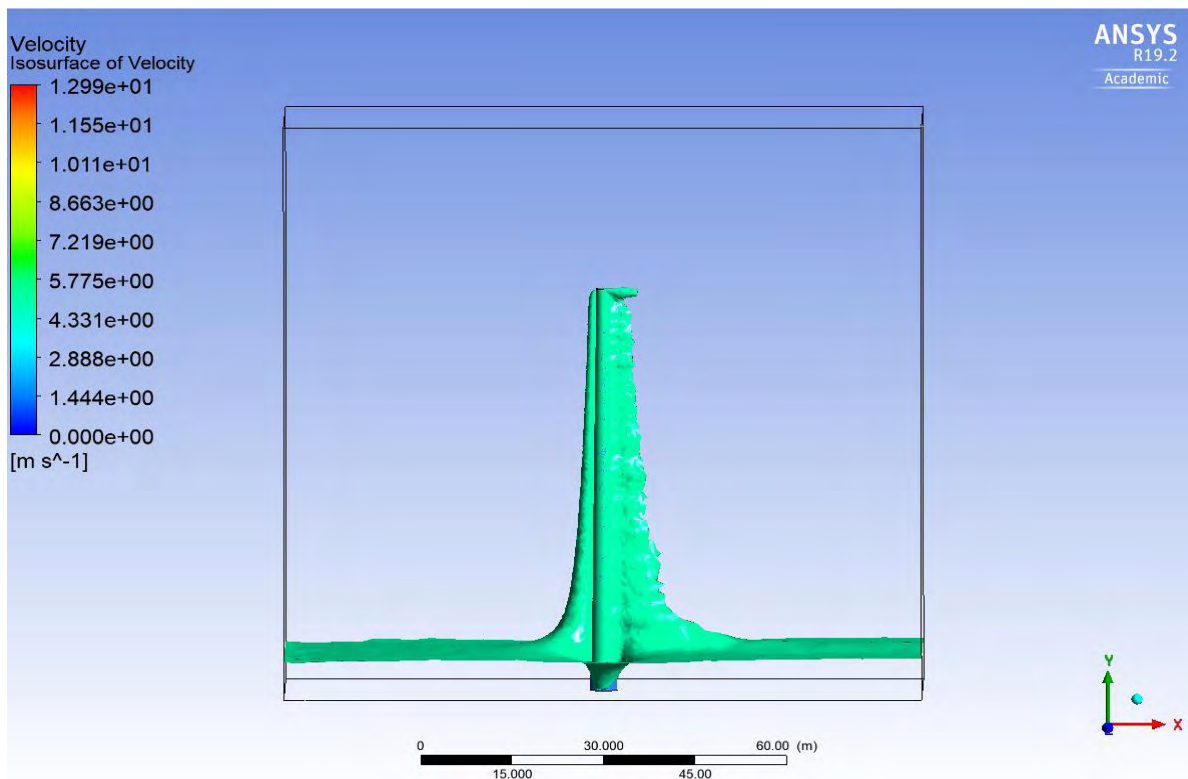
- **Επιφάνειες ίσης ταχύτητας**

Isosurface of Velocity

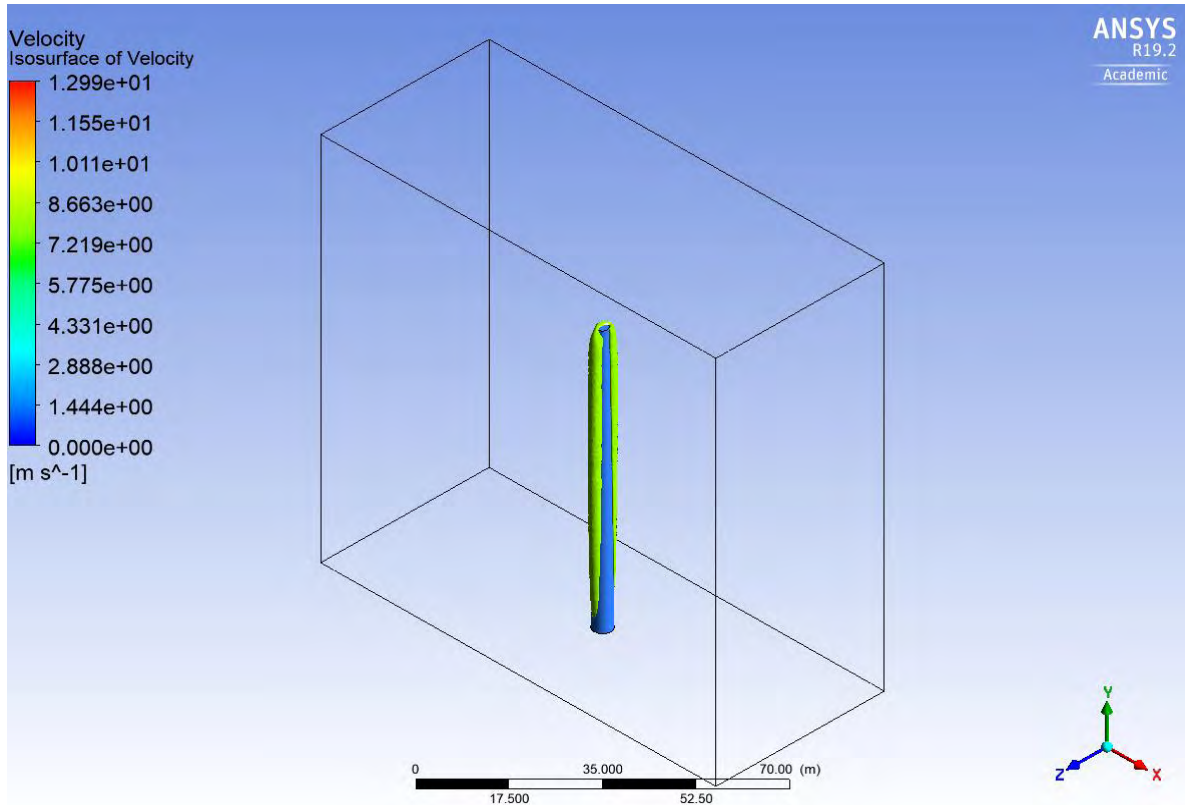
Όπως και στο ομοιόμορφο προφίλ παραπάνω μέσω της εντολής Isosurface εμφανίζονται οι μικρότερες και που οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας στο υπολογιστικό πεδίο. Οι τιμές που παρουσιάζονται παρακάτω είναι για 2 m/s, 5 m/s, 8 m/s και 10 m/s.



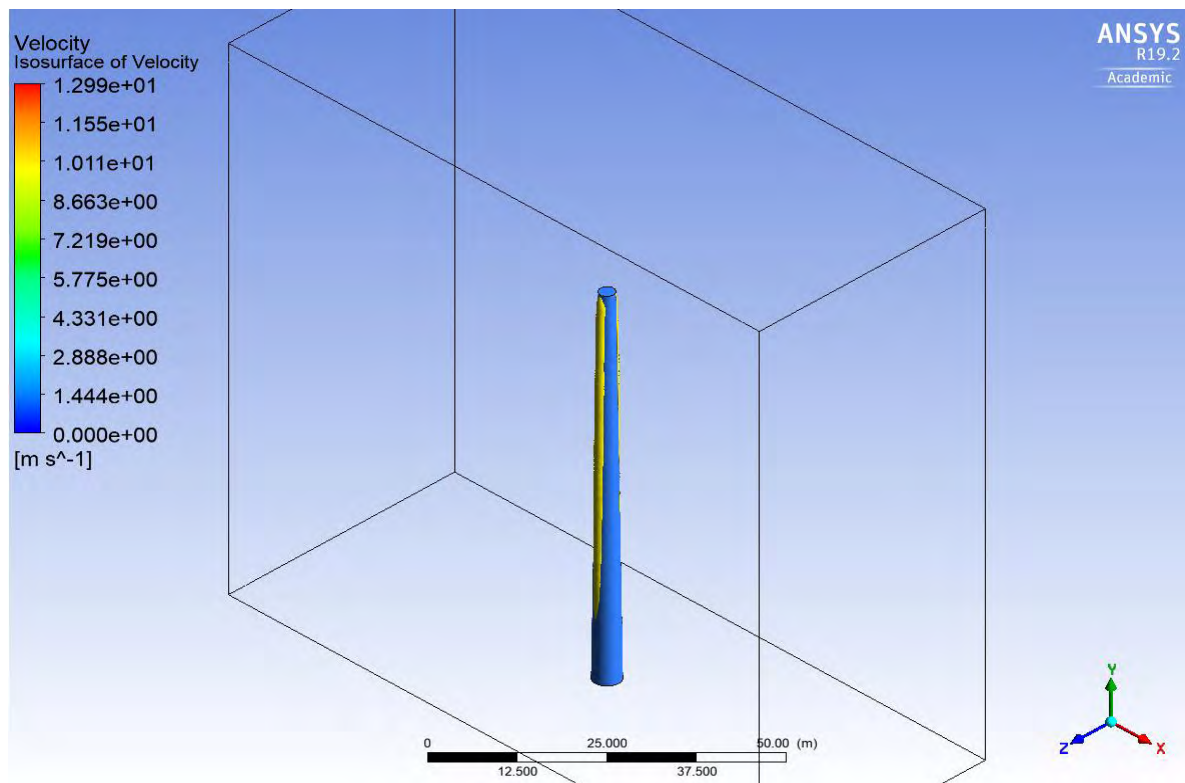
Σχήμα 6.48 : Ταχύτητα 2 m/s στο υπολογιστικό πεδίο



Σχήμα 6.49 : Ταχύτητα 5 m/s στο υπολογιστικό πεδίο.



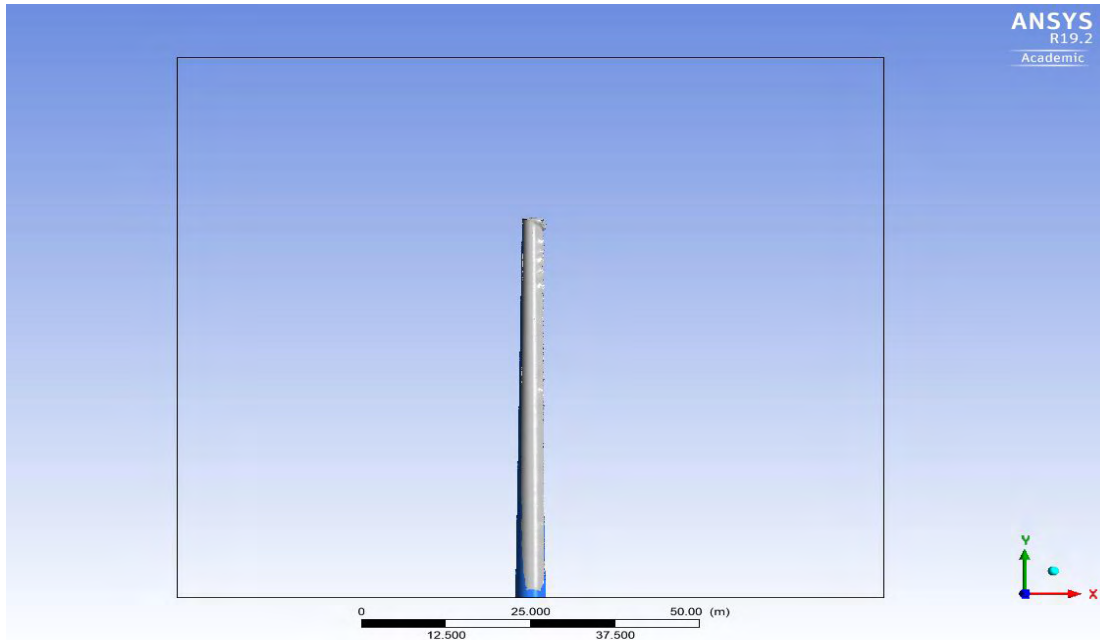
Σχήμα 6.50 : Ταχύτητα 8 m/s στο υπολογιστικό πεδίο



Σχήμα 6.51 : Ταχύτητα 10 m/s στο υπολογιστικό πεδίο

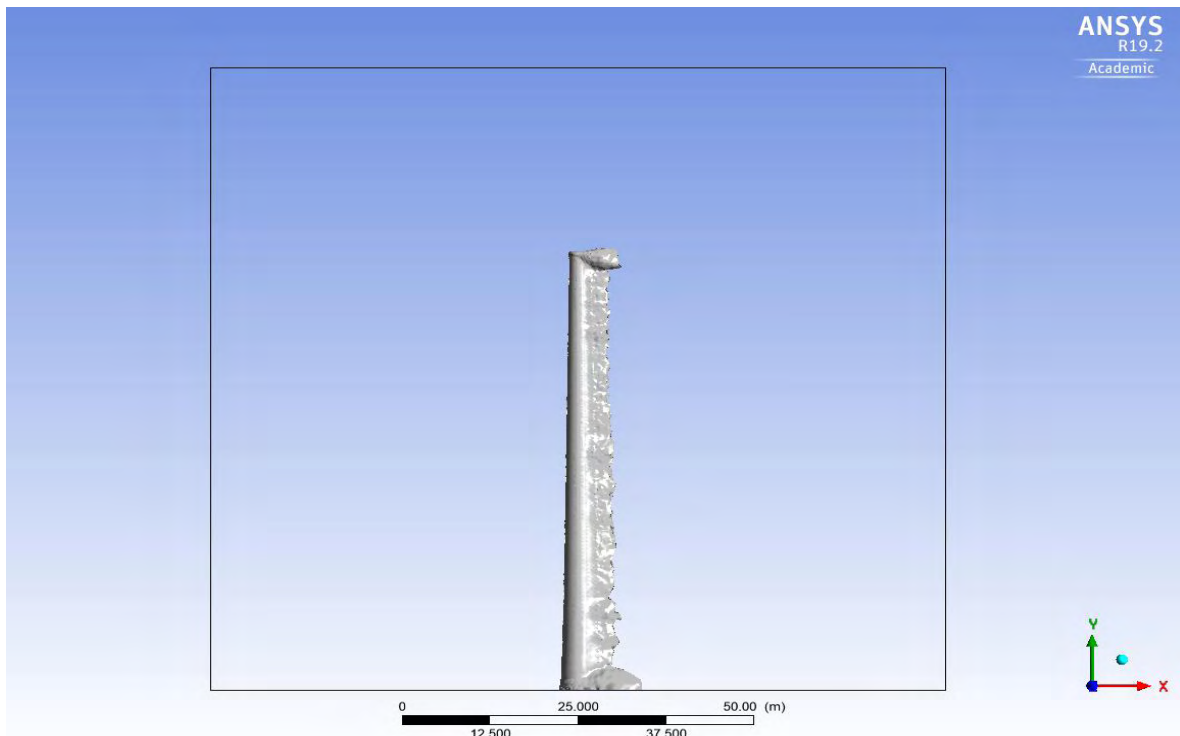
- Στην συνέχεια μέσω της εντολής Vortex Core Region υπολογίστηκε η στροβιλότητα που αναπτύσσεται σε διάφορα μεγέθη (levels). Παρακάτω παρατηρείται πως οι τιμές της στροβιλότητας είναι αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά του εκθετικού προφίλ με το ομοιόμορφο προφίλ σταθερής ταχύτητας.

Στροβιλότητα μεγέθους 0.1 (Vorticity level 0.1)



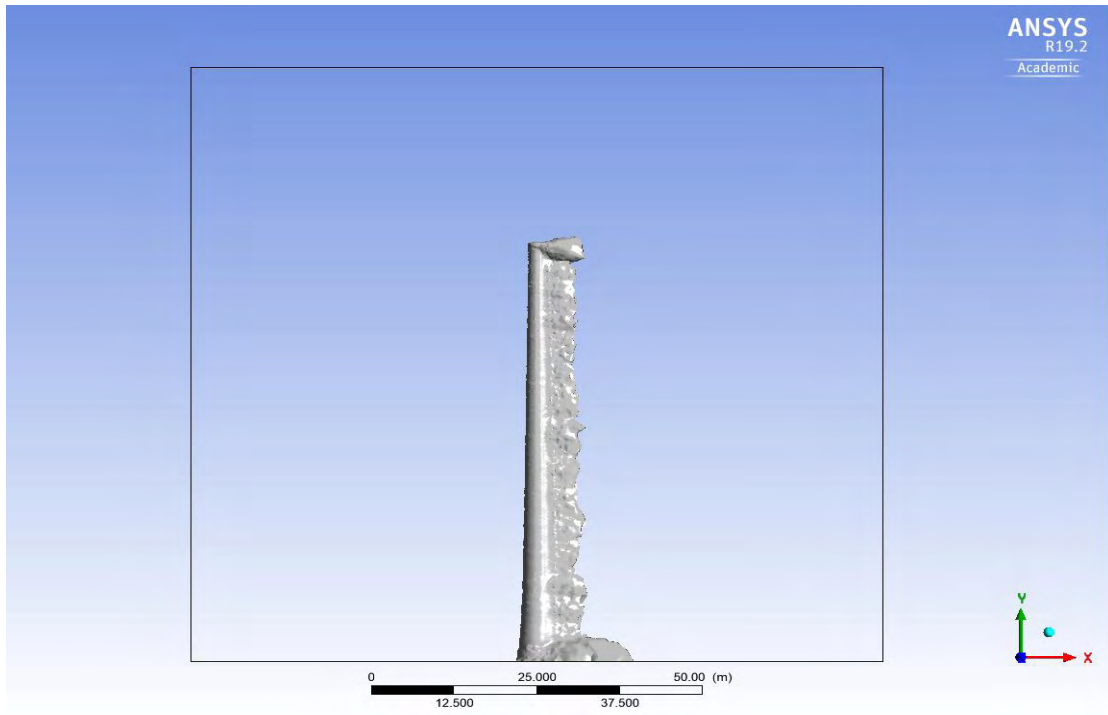
Σχήμα 6.52 : Στροβιλότητα $11.41 s^{-1}$.

Στροβιλότητα μεγέθους 0.01 (Vorticity level 0.01)



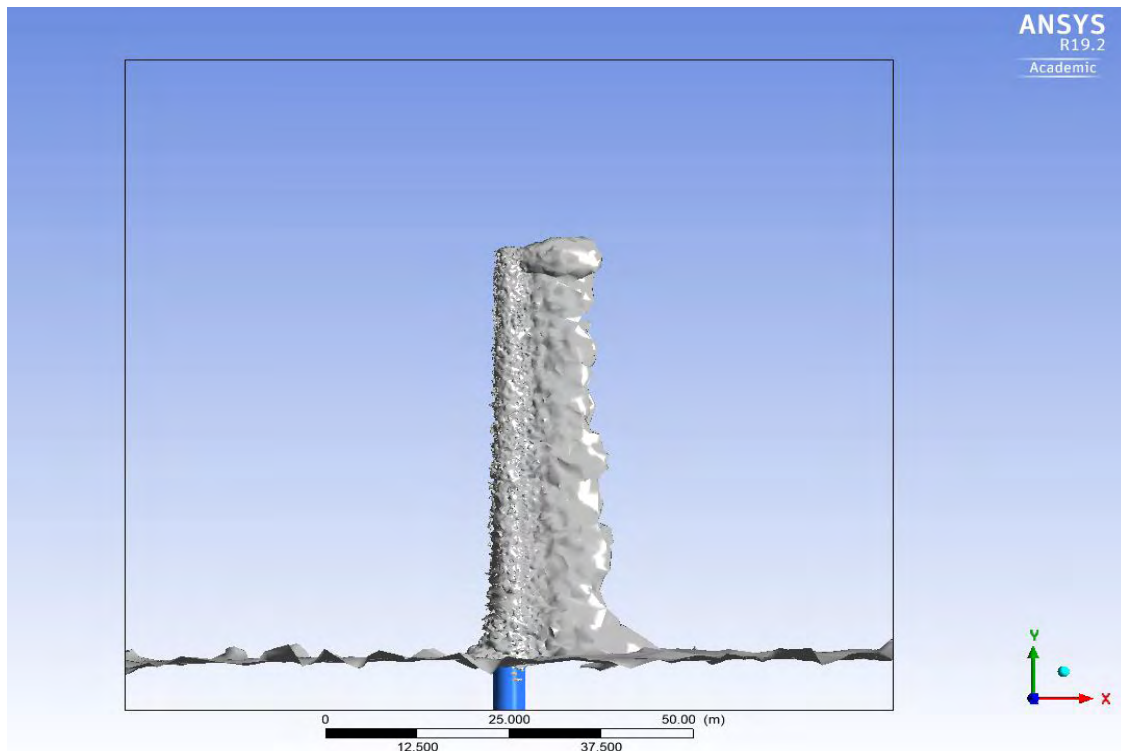
Σχήμα 6.53 : Στροβιλότητα $1.14 s^{-1}$

Στροβιλότητα μεγέθους 0.005 (Vorticity level 0.005)



Σχήμα 6.54 : Στροβιλότητα 0.57 s^{-1}

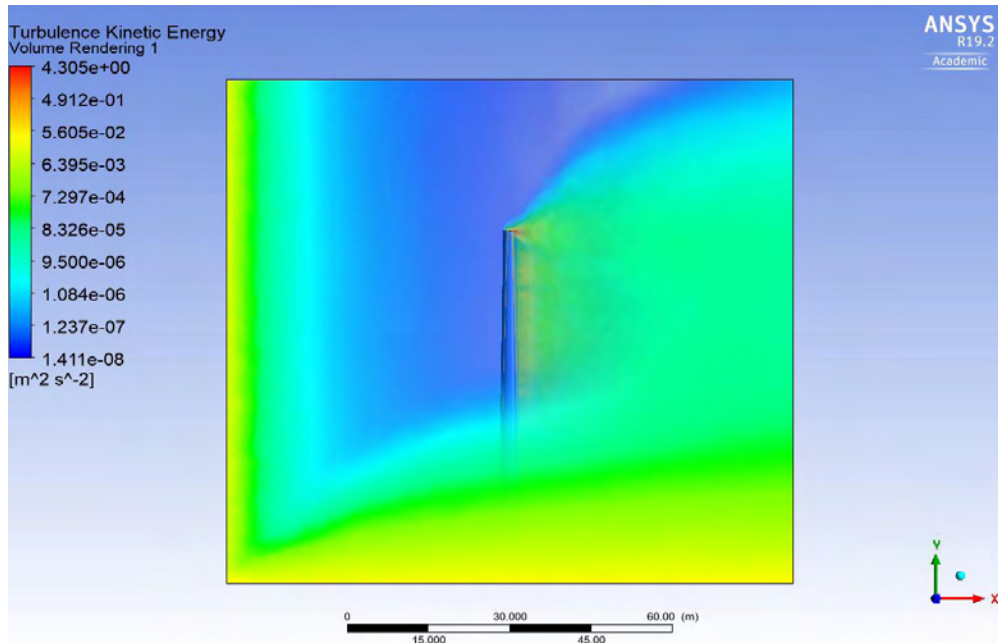
Στροβιλότητα μεγέθους (Vorticity level 0.001)



Σχήμα 6.55 : Στροβιλότητα 0.114 s^{-1}

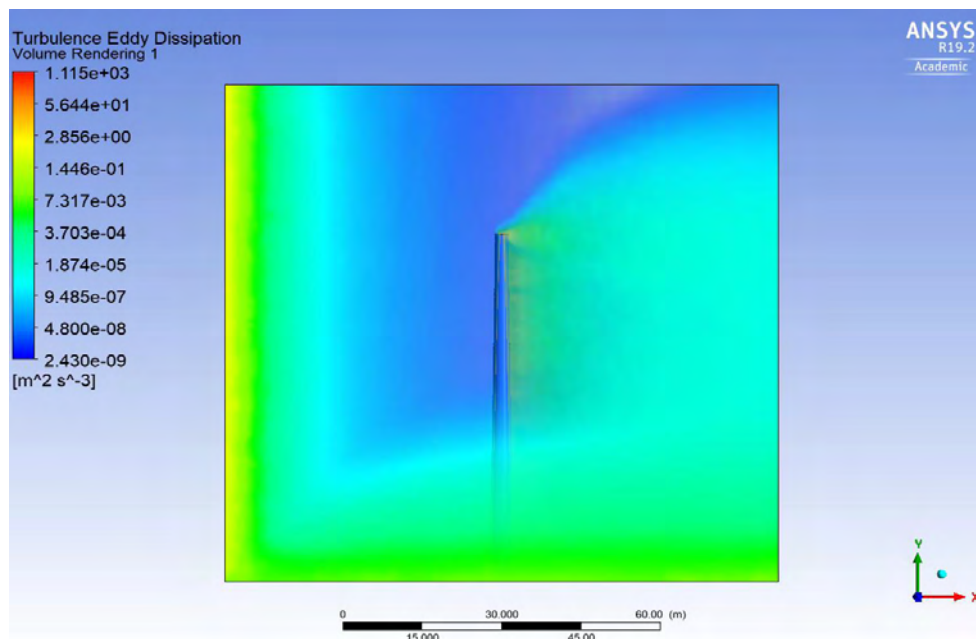
- **Κινητική ενέργεια της τύρβης (Turbulence Kinetic Energy), (k)**

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.



Σχήμα 6.56α : Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους k (Volume Rendering).

- **Ρυθμός καταστροφής της κινητικής ενέργειας της τύρβης (μετατροπής σε θερμότητα), (Turbulence Kinetic Energy dissipation rate), (ϵ)**



Σχήμα 6.56β : Απεικόνιση της κατανομής του μεγέθους ϵ (Volume rendering).

6.3 Σύγκριση δυνάμεων σταθερού και εκθετικού προφίλ

Η συνισταμένη δύναμη του ανέμου που ασκείται στον πυλώνα υπολογίζεται στο πρόγραμμα μετεπεξεργασίας του CFX στις τρεις κατευθύνσεις (x, y, z). Λαμβάνουμε τις εξής τιμές:

➤ Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας

$F_x = 3626.5 \text{ N}$
$F_y = 162.32 \text{ N}$
$F_z = - 89.3 \text{ N}$

Πίνακας 6.1 : Συνιστώσες της ολικής δύναμης που ασκείται στον πυλώνα λόγω του ανέμου.

Για να γίνει έλεγχος εάν η αριθμητική λύση ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της μάζας συγκρίνεται η παροχή μάζας στην είσοδο και έξοδο του υπολογιστικού πεδίου.

Mass Flow Inlet : 36913 kg / s (παροχή μάζας στην είσοδο)

Mass Flow Outlet : - 36913 kg / s (παροχή μάζας στην έξοδο)

Επομένως η εξίσωση διατήρησης της μάζας ικανοποιείται για ολόκληρο το υπολογιστικό πεδίο.

➤ Εκθετικό προφίλ ταχύτητας

$F_x = 1001.3 \text{ N}$
$F_y = 216.31 \text{ N}$
$F_z = - 218.76 \text{ N}$

Πίνακας 6.2 : Συνιστώσες της ολικής δύναμης που ασκείται στον πυλώνα λόγω του ανέμου για το εκθετικό προφίλ ταχύτητας.

Για να γίνει έλεγχος εάν η αριθμητική λύση ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της μάζας συγκρίνεται η παροχή μάζας στην είσοδο και έξοδο του υπολογιστικού πεδίου.

Mass Flow Inlet : 34000 kg / s (παροχή μάζας στην είσοδο)

Mass Flow Outlet : - 34000 kg / s (παροχή μάζας στην έξοδο)

Παρατηρείται ότι η εξίσωση διατήρησης της μάζας ικανοποιείται για ολόκληρο το Υ.Π.

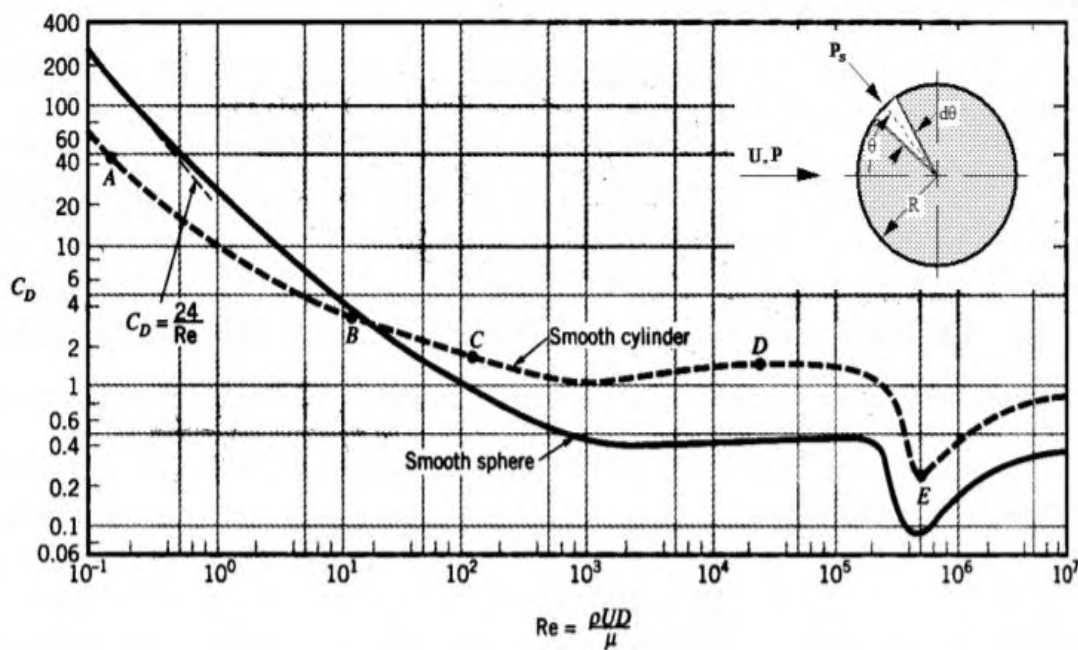
6.4 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα για λείο κύλινδρο

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 6.57 : Συντελεστής αντίστασης λείου κυλίνδρου και λείας σφαίρας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds (Fox & McDonald, 4th ed., Munson B.R., Young D.F., Okiiski T.H. "Fundamentals of Fluid Mechanics" 5th ed. John Wiley & Sons p.526, 2006).

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

- Για το ομοιόμορφο προφίλ της ταχύτητας 7 m/s :

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

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

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, στο 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 έναν πυλώνα ανεμογεννήτριας. Το ύψος του 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. Στην αρχή θεωρήθηκε ένα ομοιόμορφο προφίλ σταθερής ταχύτητας των 7 m/s στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου και στην συνέχεια 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 $k - \epsilon$, ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως στην υπολογιστική ρευστοδυναμική για ανάλυση ρευστού σε συνθήκες τυρβώδους ροής. Το μοντέλο επιλύθηκε 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 χρησιμοποιήθηκαν δεν παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους 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.
- ✓ 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).
- ✓ 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.

- ✓ Λόγω του ομοιόμορφου προφίλ της ταχύτητας και οι ολικές πιέσεις (πίεση αποκοπής, total pressure) είναι κατά προσέγγιση σταθερές σε όλο το ύψος του πυλώνα σε αντίθεση με το εκθετικό προφίλ όπου παρατηρούμε πως οι πιέσεις κοντά στην βάση του πυλώνα είναι μικρότερες από αυτές που βρίσκονται κοντά στην κορυφή αφού κοντά στην βάση η ταχύτητα του ανέμου είναι πιο χαμηλή.
- ✓ Οι τιμές της στροβιλότητας είναι μεγαλύτερες στο εκθετικό προφίλ ταχύτητας από ότι στο ομοιόμορφο σταθερό για μετρήσεις του ίδιου μεγέθους (level).
- ✓ Στη βάση του πυλώνα η σύνδεση του κόλουρου κώνου με το επίπεδο του εδάφους δημιουργεί ένα πολύπλοκο πεδίο ροής που χρήζει περαιτέρω μελέτης.
- ✓ Στην περίπτωση του μοντέλου όπου ενσωματώνεται ομοιόμορφη ταχύτητα ανέμου στην είσοδο του Υ.Π., 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 κόλουρου 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.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λιακόπουλος Α. *Μηχανική Ρευστών*, 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
2. Μπεργελές Γ., *Ανεμοκινητήρες*, Εκδόσεις Συμεών, 2006
3. Μπιζιώνης Β., Μπιζιώνης Δ., “*Ηλιακή και Αιολική Ενέργεια: Θεωρία και εφαρμογές*”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
4. Ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές για Βιώσιμη Αγροτική Ανάπτυξη Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο Ειδική έκθεση αριθ. 05/2018.
5. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (www.cres.gr)
6. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (www.ypeka.gr)
7. Ανάπτυξη αιολικών πάρκων συνολικής ισχύς 830,3 MW (Αιολικά Πάρκα Κρήτης Έλικα Α.Ε.)
8. Hogg S., Crabtree C. J., *UK Wind Energy Technologies*, 1st Edition, 2016
9. Durbin P.A., Medic G., *Fluid Dynamics with a Computational Perspective*, Cambridge University Press, 2014.
10. Stevens R. J.A.M., Meneveau C. “Flow structure and turbulence in wind farms”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 49:311-339, 2017.
11. CFX User Manual
12. www.e-nautilia.gr
13. www.energypress.gr
14. www.ecopress.gr
15. www.simtec.gr
16. www.eon.com
17. www.wind-energy-the-facts.org
18. www.keyshone.com
19. www.ge.com
20. www.asnys.com
21. www.sharcnet.ca