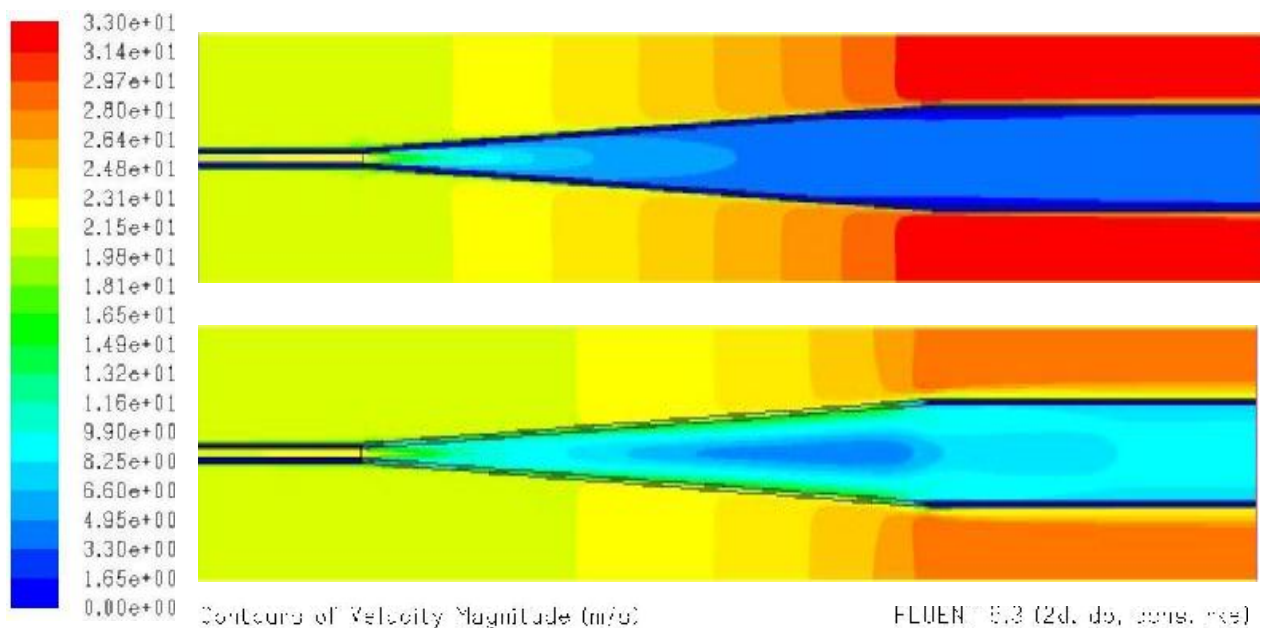


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

C.F.D. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗ ΜΕ  
ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :

- ✉ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΕΝΗ (4910)
- ✉ ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (4355)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

- ✉ ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ
- ✉ ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην CFD ανάλυση ενός συμμετρικού διαχύτη με τη χρήση πορώδους υλικού στα τοιχώματα του.

Αρχικά με τη χρήση λογισμικών προγραμμάτων όπως το Gambit και το Fluent θέτουμε όλα τα δεδομένα μας και πραγματοποιούμε όλες τις απαραίτητες ενέργειες για να εξάγουμε αποτελέσματα σχετικά με την έρευνα μας. Τα αποτελέσματα αυτά όπως θα δούμε και παρακάτω είναι πολύ ενδιαφέροντα ως προς την τελική απόδοση μίας ενσωληνωμένης ανεμογεννήτριας με διαχύτη γιατί αντικαθιστώντας τα τοιχώματα του διαχύτη με πορώδες υλικό παρατηρείται αλλαγή στο οριακό στρώμα και κατά συνέπεια βελτίωση της απόδοσης της.

Ευχαριστούμε θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές μας κ. Θεοδωροπούλου Μαρία και κ. Θεοδωρόπουλο Νικόλαο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφεραν για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Παπαδοπούλου Μαρία-Ελένη  
Νικολακόπουλος Παναγιώτης  
Μάιος 2012

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση και η ανάλυση του πεδίου ροής σε δυο δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Συγκεκριμένα αναλύεται και στα δυο μοντέλα η κατανομή του οριακού στρώματος κατά μήκος του κλειστού αγωγού ανεμογεννήτριας και κυρίως στα εσωτερικά τοιχώματα του διαχύτη με πορώδες και συμπαγές υλικό. Επίσης μελετάται η κατανομή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος των αγωγών καθώς και οι μεταβολές των πιέσεων.

Στην αρχή, με το λογισμικό “Gambit” σχεδιάζονται οι προτεινόμενες γεωμετρίες των μοντέλων και κατασκευάζονται τα αντίστοιχα υπολογιστικά πλέγματα. Στην συνέχεια, με το υπολογιστικό πακέτο “Fluent CFD” της “ANSYS Inc” επιλύεται αριθμητικά η ροή του συμβατικού μοντέλου και του προτεινομένου μοντέλου.

Στην συνέχεια, εξάγονται αποτελέσματα και δεδομένα από το “Fluent CFD” και ταξινομούνται σε πίνακες που κατασκευάστηκαν με το πρόγραμμα “Excel” του πακέτου “Microsoft office” των “Windows”. Επίσης από το πρόγραμμα “Excel” δημιουργούνται συγκριτικά διαγράμματα και γίνονται υπολογισμοί προς σύγκριση των δυο μοντέλων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την αντικατάσταση του συμβατικού τοιχώματος ενός διαχύτη με πορώδες υλικό, ο διαχύτης έχει μεγαλύτερη ισχύ. Ακόμα μία ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια χρησιμοποιώντας διαχύτη με πορώδες υλικό παράγει περισσότερο έργο από μια ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια με έναν απλό διαχύτη.

# Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

**ΠΡΟΛΟΓΟΣ**.....σελ.1

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**.....σελ.2

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**.....σελ.3

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

1. Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.....σελ.4
  - 1.1. Πλεονεκτήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας.....σελ.6
  - 1.2. Μειονεκτήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας.....σελ.7
2. Αιολική ενέργεια.....σελ.8
  - 2.1. Πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.....σελ.10  
Μειονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.....σελ.11
  - 2.2. Πυκνότητα ισχύος ανέμου.....σελ.12

## **ΘΕΩΡΙΑ**

1. Ανεμογεννήτριες.....σελ.14
  - 1.1. Πλεονεκτήματα ανεμογεννητριών.....σελ.21
  - 1.2. Μειονεκτήματα ανεμογεννητριών.....σελ.22
  - 1.3. Περιοχή λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας.....σελ.22
2. Ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια.....σελ.24
3. Η έννοια του οριακού στρώματος και τα χαρακτηριστικά του μεγέθη.....σελ.33
  - 3.1. Διαχωρισμός ή αποκόλληση του οριακού στρώματος.....σελ.38
  - 3.2. Το οριακό στρώμα στην επιφάνεια της γης.....σελ.40
4. Όριο του Betz.....σελ.41
5. Τα πορώδη υλικά.....σελ.47
6. Περιγραφή υπολογιστικού μοντέλου.....σελ.49
7. Πειραματική διαδικασία.....σελ.52
  - 7.1. Σχεδιασμός μοντέλου και αριθμητική του επίλυση.....σελ.53

## **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ**

- Γενικά.....σελ.61
1. Αποτελέσματα.....σελ.64
  2. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....σελ.80
  3. Υπολογισμός ισχύος εγκατάστασης.....σελ.88

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**.....σελ.96

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**.....σελ.97

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

## 1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας** (ΑΠΕ ή ήπιες μορφές ενέργειας ) είναι οι πηγές ενέργειας που δεν προέρχονται από ορυκτά καύσιμα και τα αποθέματα των οποίων ανανεώνονται, θεωρώντας τα έτσι πρακτικά ανεξάντλητα. Σε αυτήν την κατηγορία συγκαταλέγονται αρκετές μορφές ενέργειας που αναλύουμε παρακάτω.

- Η **αιολική ενέργεια** είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από την μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μηχανές με τις οποίες εκμεταλλευόμαστε το φαινόμενο αυτό ονομάζονται ανεμογεννήτριες και διακρίνονται σε δύο είδη: “Οριζοντίου άξονα” και “Καθέτου άξονα”. Στη συνέχεια της πτυχιακής αναλύουμε την αιολική ενέργεια εκτενέστερα.

- Η **ηλιακή ενέργεια** που χαρακτηρίζει το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες. Στο σύνολο της είναι πρακτικά ανεξάντλητη αφού προέρχεται από τον ήλιο συνεπώς δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευση της.

- Η **γεωθερμική ενέργεια** είναι ενέργεια που εξέρχεται από το εσωτερικό της γης στην επιφάνεια της. Οι δυνατότητες της εξαρτώνται από τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών. Τα γεωθερμικά αυτά ρευστά εμφανίζονται στην επιφάνεια είτε με μορφή θερμού νερού ή ατμού είτε αντλούνται με γεώτρηση και αφού χρησιμοποιηθεί η θερμική τους ενέργεια γίνεται επανέγχυση του ρευστού στο έδαφος με δεύτερη γεώτρηση. Έτσι ενισχύεται η μακροβιότητα των αποθεμάτων και αποφεύγεται η θερμική ρύπανση του περιβάλλοντος. Η γεωθερμική ενέργεια παρόλο που δεν ανανεώνεται σε κλίμακα χιλιετιών, την κατατάσσουμε στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

- Η **ενέργεια των κυμάτων** είναι η ενέργεια που εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.

· Η **παλιρροϊκή ενέργεια** εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα παράγοντας ηλεκτρισμό.

· Η **υδροηλεκτρική ενέργεια** είναι η ενέργεια που παράγεται από την πτώση του νερού των μικρών ή μεγάλων ποταμών, υδρορευμάτων και πηγών σε υδροτροχούς με αποτέλεσμα την περιστροφή τους και την παραγωγή μηχανικού έργου ή ηλεκτρικού ρεύματος.

· Η **ενέργεια που προέρχεται από την βιομάζα**. Με τον όρο βιομάζα ονομάζουμε οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς όπως το ξύλο, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα κ.λπ. και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα.

Παρότι πρόκειται για τις πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, στις αρχές του 20ου αιώνα, μετά την ανακάλυψη των μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου, ο κόσμος στράφηκε κυρίως στη χρήση άνθρακα και υδρογονανθράκων αφήνοντας σε δεύτερη μοίρα τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Επειδή για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας αλλά και επειδή πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, «φιλικές» προς το περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν στην ατμόσφαιρα διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, τους αποδόθηκε ο όρος ήπιες μορφές ενέργειας.

Οι βασικοί παράγοντες που οδήγησαν στην αναβίωση του ενδιαφέροντος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν η επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που έχουν αυξηθεί έντονα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά και η ατμοσφαιρική ρύπανση που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη και μεγάλο μέρος της οποίας οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Ένας άλλος εξίσου σημαντικός παράγοντας ήταν η ενεργειακή ασφάλεια καθώς οι περισσότερες βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες εξαρτώνται απόλυτα από τα ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο. Οι χώρες που έχουν πλούσια κοιτάσματα πετρελαίου είναι τα κράτη της Αραβικής Χερσονήσου και του Περσικού Κόλπου που δεν ήταν ποτέ σταθεροί σύμμαχοι των Δυτικών Χωρών και το γεγονός αυτό κάνει την ενεργειακή ανασφάλεια πολύ μεγαλύτερη σχετικά με τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## **1.1 Πλεονεκτήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας**

- Είναι ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα και συμβάλουν στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των 6 αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) στην ατμόσφαιρα.

- Βοηθούν ώστε να υπάρχει ενεργειακή αυτάρκεια και ανεξαρτησία μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών αλλά και μεγαλύτερων χωρών καθώς αποτελεί εναλλακτική πρόταση άντλησης ενέργειας σε σχέση με το πετρέλαιο για παράδειγμα το οποίο είναι μη ανανεώσιμος ενεργειακός πόρος.

- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.

- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.

- Για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής. Επιπλέον το λειτουργικό κόστος είναι χαμηλό και δεν επηρεάζεται από τις

διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

- Δίνουν την δυνατότητα οικονομικής αναζωογόνησης σε υποβαθμισμένες περιοχές δημιουργώντας θέσης εργασίας και αποκεντρώνεται το ενεργειακό σύστημα εξαιτίας της γεωγραφικής τους διασποράς. Καταργείται η ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής γιατί παράγεται ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του τοπικού πληθυσμού και δεν είναι αναγκαία η μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

- Τέλος τα τελευταία χρόνια επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις με αποτέλεσμα να προσελκύουν πολλούς ενδιαφερόμενους επενδυτές.

## **1.2 Μειονεκτήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας**

- Ο συντελεστής απόδοσης τους είναι αρκετά χαμηλός της τάξης του 30% ή και χαμηλότερος. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και για αυτό το λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.

- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.

- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.

- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.

- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών.



- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.

Παρατηρούμε ότι τα μειονεκτήματα είναι σαφώς λιγότερα από τα πλεονεκτήματα άρα είναι προφανές ότι η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μια συμφέρουσα επιλογή και μια πράξη συνείδησης ως προς το περιβάλλον. Τέλος από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης της σχολής των οικολογικών οικονομικών, η οποία έχει κάποια επιρροή στο οικολογικό κίνημα.

## 2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

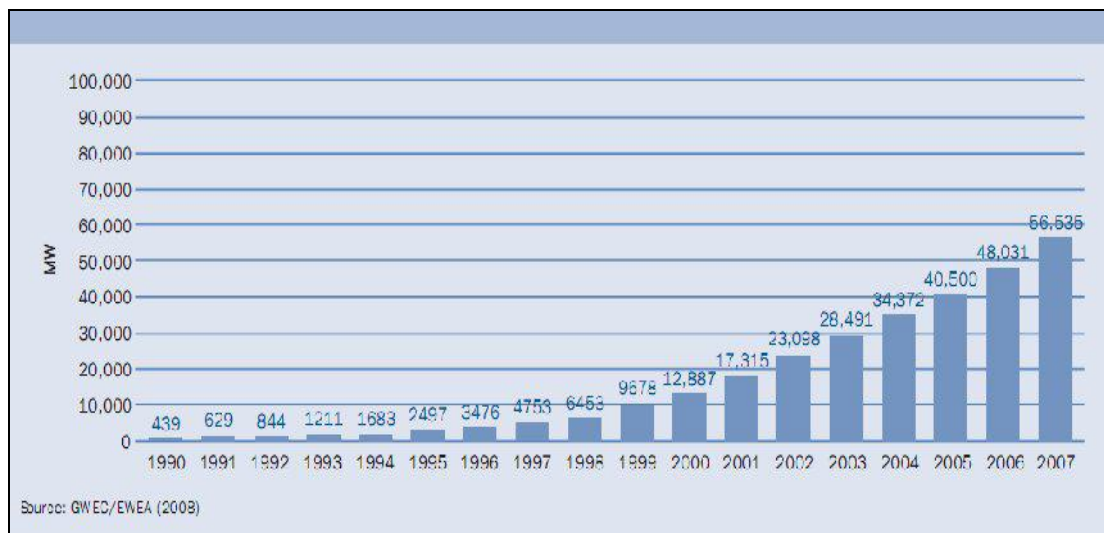


**Αιολική ενέργεια** ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου η οποία δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Το ποσοστό της ηλιακής ενεργείας που μετατρέπεται σε αιολική είναι περίπου 0.2% .

Ο άνεμος δημιουργείται όταν μετακινούνται μάζες αέρα από ζώνες υψηλής πίεσης (αντικυκλώνες) προς ζώνες χαμηλής πίεσης (κυκλώνες). Οι θερμές μάζες διαστέλλονται και ανυψώνονται, αφήνοντας περισσότερο χώρο στις ψυχρότερες και βαρύτερες που υπάρχουν στις γειτονικές ζώνες. Οι θερμές αέριες μάζες κατά την ανύψωση τους ψύχονται και κατευθύνονται προς τις χαμηλότερες ζώνες, ενώ οι ψυχρές αέριες μάζες με την σειρά τους θερμαίνονται και ανυψώνονται, έχοντας έτσι μια συνεχή κίνηση των αέριων μαζών δηλαδή τους ανέμους.

Στην ελληνική μυθολογία μέσω του Αίολου, θεού του ανέμου αναγνωρίζεται η σημασία της αιολικής ενέργειας που έπαιζε σημαντικό ρόλο στις μεταφορές και στην παραγωγική διαδικασία. Ο ρόλος αυτός διατηρήθηκε μέχρι και τα μεταβυζαντινά χρόνια, στη χώρα μας όμως διατηρήθηκε μέχρι τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα σε περιοχές όπως οι νησιωτικές όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι αξιοποιήσιμη. Όμως η χρήση του άνθρακα και του πετρελαίου περιόρισαν σημαντικά τις εφαρμογές της. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, ιδιαίτερα

μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις και σε συνδυασμό με τα οξυμένα περιβαλλοντικά προβλήματα οι άνθρωποι έδειξαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.



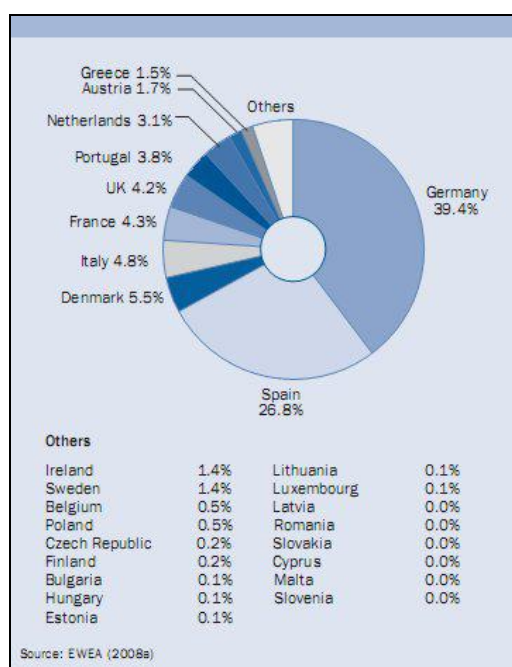
Σχήμα 1.1: Εγκατεστημένη ισχύς από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη.

Η αιολική ενέργεια δεδομένου ότι δε ρυπαίνει το περιβάλλον και θεωρητικά είναι ανεξάντλητη, διότι ανανεώνεται συνεχώς, την κατατάσσουμε στις ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αν υπήρχε η δυνατότητα, με την σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια από το 1990 μέχρι και το 2007, στην Ευρώπη. Όπως εύκολα διακρίνουμε, η εγκατεστημένη ισχύς παρουσιάζει μια σχεδόν εκθετική αύξηση. Ο βασικός λόγος για την παρατηρούμενη αυτή ανοδική πορεία της αιολικής ενέργειας είναι όπως προαναφέραμε το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το σχήμα 1.2 που δείχνει το μερίδιο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη που κατείχε το κάθε ευρωπαϊκό κράτος στο τέλος του έτους 2007. Αξίζει να

σημειωθεί ότι η Ελλάδα κατείχε μόλις το 1.5% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη.



Σχήμα 1.2: Ποσοστό που κατείχε η κάθε ευρωπαϊκή χώρα της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια στην Ευρώπη κατά το έτος 2007.

## 2.1 Πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια από τις πιο ελκυστικές λύσεις στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς παρουσιάζει μια πλειάδα πλεονεκτημάτων τα οποία είναι τα εξής:

- Ο άνεμος ως «καύσιμο» είναι άφθονο, ανεξάντλητο, αποκεντρωμένο και δωρεάν.
- Είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμη αφού λαμβάνετε ως μηχανική ενέργεια και η μετατροπή της σε ηλεκτρική έχει πολύ καλή απόδοση, χωρίς την παρεμβολή θερμοδυναμικών φαινομένων Carnot με μειονεκτήματα την πτώση της απόδοσης και άλλων συναφών παραμέτρων.
- Είναι ενεργειακή μορφή που συμπεριφέρεται φιλικά προς το περιβάλλον και οι επιπτώσεις είναι μικρές σε σύγκριση με τα συμβατικά

καύσιμα γιατί δεν εκλύονται στην ατμόσφαιρα αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι. Χαρακτηριστικά η χρήση μιας ανεμογεννήτριας 600KW, σε κανονικές συνθήκες αποτρέπει την απελευθέρωση 1200 τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως που θα αποβάλλονταν στο περιβάλλον αν είχε χρησιμοποιηθεί άλλη πηγή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ο άνθρακας.

- Ο εξοπλισμός εκμετάλλευσης της είναι απλός στην κατασκευή και την συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.

- Η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η φθηνότερη μορφή ενέργειας. Η τιμή εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό της περιοχής και από τη χρηματοδότηση ή μη του εκάστοτε προγράμματος παραγωγής αιολικής ενέργειας.

- Τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα προσφέροντας πολλές θέσεις εργασίας, σε παγκόσμιο επίπεδο. Η βιομηχανία αυτή αποκτά ένα όλο και περισσότερο διεθνή χαρακτήρα, καθώς ωριμάζει σταδιακά, επεκτείνεται και δημιουργεί κατασκευαστικές δραστηριότητες σε νέες αγορές.

- Μπορεί να βοηθήσει στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χώρων, καθώς και να αποτελέσει εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου και του άνθρακα ενισχύοντας έτσι την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια.

- Η αιολική ενέργεια πάνω από όλα έχει φέρει έναν άνεμο αλλαγής στα ενεργειακά και περιβαλλοντικά δεδομένα, ενώ δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την οικονομική ανάπτυξη περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό και τη διασφάλιση ενός βιώσιμου μέλλοντος για εμάς και τα παιδιά μας.

## **2.2 Μειονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.**

Τον εικοστό αιώνα η αιολική ενέργεια αντικαταστάθηκε από άλλες πηγές ενέργειας, λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε σε σύγκριση με τις υπόλοιπες «πυκνότερες» μορφές ενέργειας. Τα κυριότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η αιολική ενέργεια είναι τα εξής:

- Η χαμηλή ροή αξιοποίησης της κινητικής ενέργειας του ανέμου (Watt/m<sup>2</sup>) κατατάσσει την αιολική ενέργεια στις «αραιές» μορφές ενέργειας.

Τυπικές τιμές ροής της αξιοποιούμενης αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 200~400 W/m<sup>2</sup>. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών ή τη χρήση μηχανών μεγάλων διαστάσεων, για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης της συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα 500 W/m<sup>2</sup>.

- Περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού γιατί η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου περιορίζεται σε ένα μικρό φάσμα ταχύτητας του.

- Εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ικανοποιητικών ταχυτήτων ανέμου και παρουσιάζει διακυμάνσεις ως προς την απόδοση ισχύος που οφείλονται στη μεταβαλλόμενη κατά τη διάρκεια της ημέρας, του μήνα και του έτους της έντασης του ανέμου.

- Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας που απορροφάται από τις ανεμογεννήτριες από την αιολική ενέργεια, χάνεται λόγω των αεροδυναμικών και των μηχανικών απωλειών και περιορισμών.

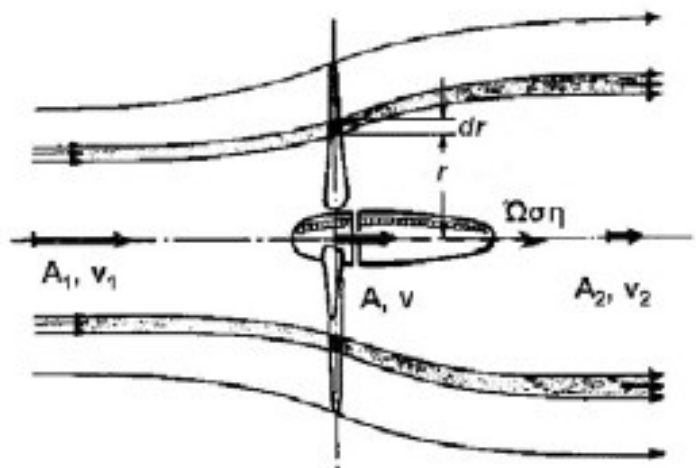
- Απαιτείται πολύς χρόνος για την έρευνα και τη χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, ώστε να εντοπιστούν τα ευνοϊκά σημεία, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος έρευνας.

- Σε περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας, αλλά ακόμα και την χρησιμοποίηση επιπλέον πηγών ενέργειας όπως σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με γεννήτριες Diesel κλπ. Με το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος και επιπλέον απώλειες ενέργειας κατά την φάση μετατροπής και αποθήκευσης, καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης και εξασφάλισης της ομαλής λειτουργίας.

### **2.3 Πυκνότητα ισχύος του ανέμου.**

Ο άνεμος περιέχει ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό με τη χρήση των ανεμογεννητριών (Α/Γ). Η ποσότητα ηλεκτρισμού που

παράγουν οι Α/Γ εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας του διερχόμενου ανέμου μέσω της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια της Α/Γ στη μονάδα του χρόνου. Αυτή η ροή ενέργειας ονομάζεται πυκνότητα ισχύος του ανέμου. Ειδικότερα, οι δρομείς των Α/Γ ελαττώνουν την ταχύτητα του ανέμου από την αδιατάρακτη ταχύτητα  $V_1$  πολύ πριν από το δρομέα στη μειωμένη ταχύτητα ροής του αέρα  $V_2$  πίσω από αυτόν (βλ. σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Ροή του ανέμου μέσω μιας Α/Γ.

Η διαφορά στην ταχύτητα του ανέμου είναι ένα μέτρο της αποσπώμενης από αυτόν κινητικής ενέργειας που περιστρέφει το δρομέα και την ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο άλλο άκρο του συστήματος μετάδοσης της κίνησης.

Η ισχύς που θεωρητικά εξάγεται από μια Α/Γ περιγράφεται από την εξίσωση:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot n \cdot \rho \cdot A \cdot U_1^3 \quad (1.1)$$

Όπου:  $\rho$  : είναι η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $C_p$  : ο συντελεστής ισχύος,  
 $U_1$  : η ταχύτητα του αέρα ( $\text{m/s}$ )

$\eta$  : η μηχανική/ηλεκτρική απόδοση  
 $A$  : το εμβαδό του δίσκου του δρομέα ( $m^2$ ).

Σε ιδανικές συνθήκες, η μέγιστη τιμή του  $C_p$  (γνωστή ως "όριο Betz") είναι:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (1.2)$$

δηλαδή μια  $A/\Gamma$  μπορεί θεωρητικά να αποσπάσει το 59,3% του ενεργειακού περιεχόμενου της ροής του αέρα. Υπό πραγματικές συνθήκες, όμως, ο συντελεστής ισχύος δεν υπερβαίνει την τιμή  $C_p=0,5$ , αφού περιλαμβάνει όλες τις αεροδυναμικές απώλειες της ανεμογεννήτριας. Πράγματι, στις περισσότερες τεχνικές δημοσιεύσεις η τιμή του  $C_p$  περιλαμβάνει όλες τις απώλειες και στην ουσία, αποτελεί συντόμευση του  $C_p \times \eta$ .

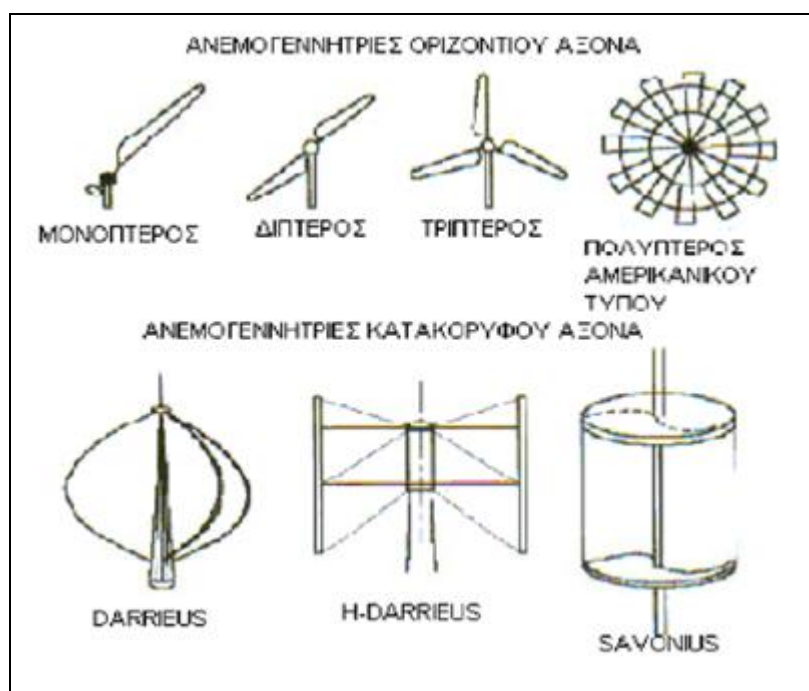
## ΘΕΩΡΙΑ

### 1.ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) σε ηλεκτρική ενέργεια λέγονται ανεμογεννήτριες ( $A/\Gamma$ ) ή ανεμοηλεκτρικές γεννήτριες. Σκοπός των ανεμογεννητριών είναι η αξιοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου και η μετατροπή της σε ωφέλιμη ενέργεια, δηλαδή σε οποιαδήποτε εύχρηστη μορφή ενέργειας, άμεσα απολήψιμης από τον άνθρωπο.

Μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και εφαρμοσθεί περισσότεροι τύποι ανεμοκινητήρων από οποιαδήποτε άλλο τύπο συσκευών και διατάξεων σε συστήματα παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (βλ. σχήμα 1.4),

χωρίς όμως να επιτευχθεί μέχρι σήμερα ο επιθυμητός βαθμός εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου.



Σχήμα 1.4: Τύποι ανεμογεννητριών.

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου (βλ. σχήμα 1.5) οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες “**οριζόντιου**” και οι ανεμογεννήτριες “**κατακόρυφου**” άξονα.

- Στις ανεμογεννήτριες **οριζόντιου άξονα**, ο δρομέας τους είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου (head on) και του εδάφους.

- Στις ανεμογεννήτριες **κατακόρυφου άξονα**, ο δρομέας τους παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.

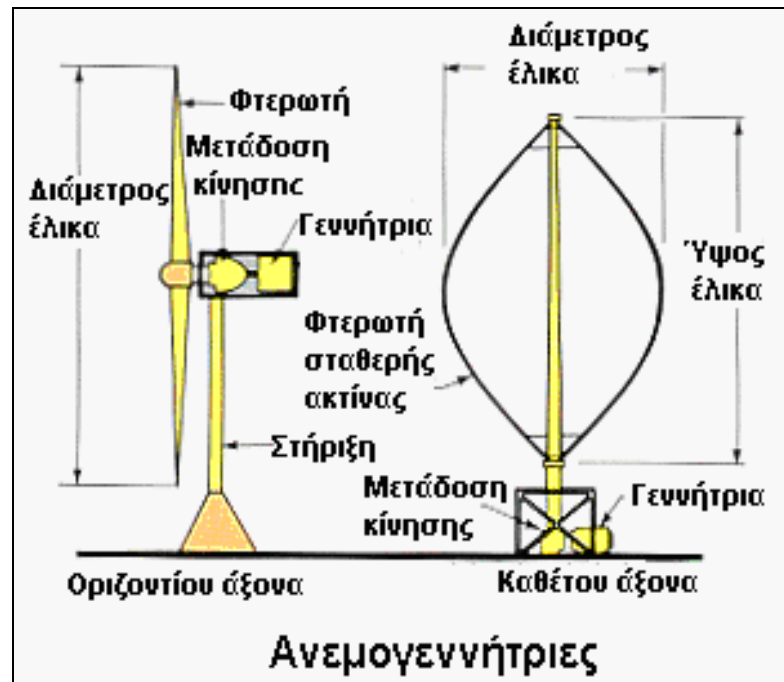
Ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται και σε:

- Αυτόνομες (μη συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού). Είναι ιδανικές για εξοχικές κατοικίες απομακρυσμένες από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται συσσωρευτές

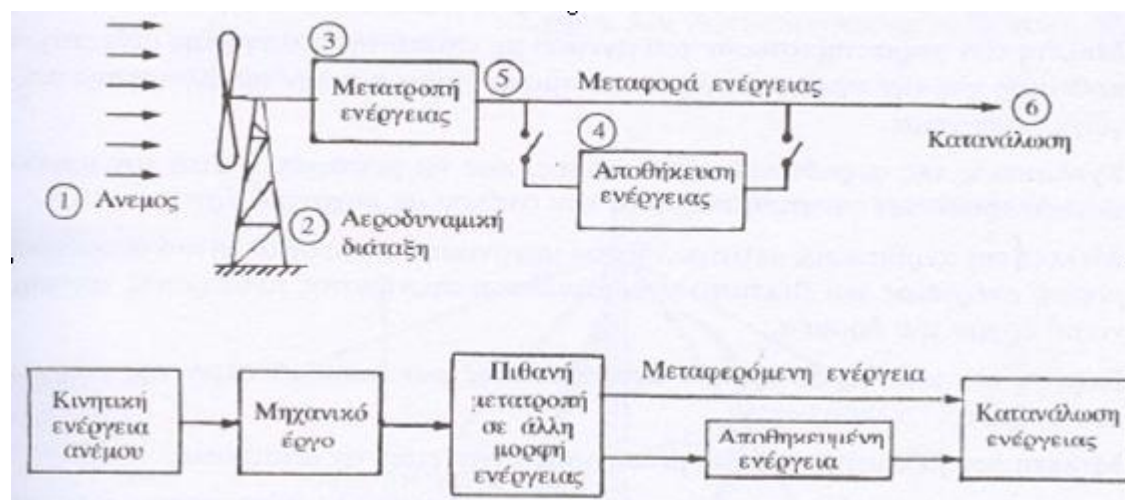


(μπαταρίες) για την αποθήκευση της ενέργειας καθώς και εγκατάσταση μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

- Συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού. Στην εφαρμογή αυτή η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο. Δεν χρειάζεται η αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρίες, απαιτείται όμως η εγκατάσταση μετατροπέα.



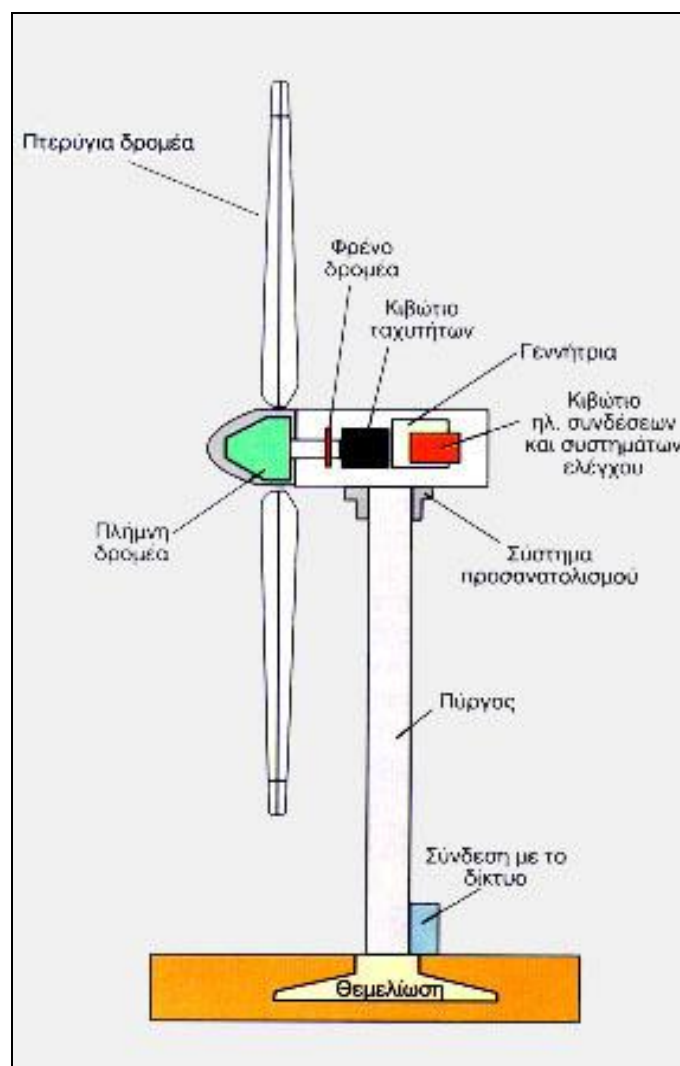
Σχήμα 1.5: Ανεμογεννήτρια: Οριζόντιου άξονα και καθέτου άξονα.



Σχήμα 1.6: Ροή ενέργειας σε ανεμογεννήτρια.

Ακόμα οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται και ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους ή ακριβέστερα ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής “λ” σε ταχύστροφες ή σε αργόστροφες.

Οι ανεμογεννήτριες από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχουν περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζοντίου ή κάθετου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.α.).



Σχήμα 1.7: Τα μέρη που αποτελείται μια ανεμογεννήτρια.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια, καθώς και η ροή της

ενέργειας όπου από κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική, παρουσιάζεται παρακάτω (βλ. σχήμα 1.6).

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα (βλ. σχήμα 1.7) αποτελείται από τα εξής μέρη :

- Το δρομέα, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.

- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.

- Την ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της Α/Γ.

- Το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

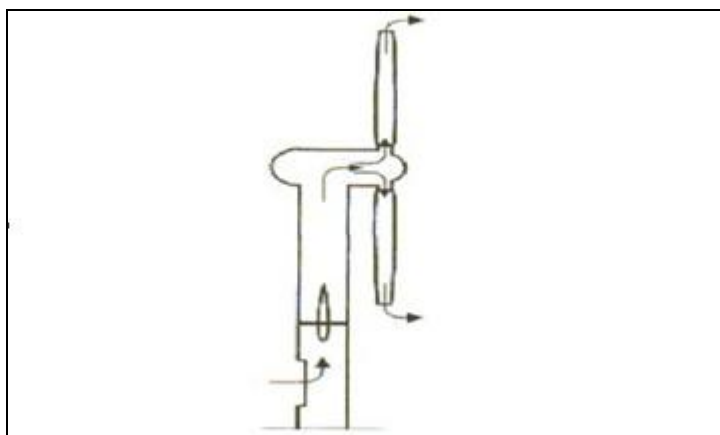
- Το σύστημα προσανατολισμού, που αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.

- Τον πύργο, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.

- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Μερικοί από τους βασικούς τύπους ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, εκτός από τους τύπου έλικας με ένα, δύο ή τρία πτερύγια, με τοποθέτηση της πτερωτής ανάντη ή κατόντη του πύργου στηρίξεως και τους πολυπτέρυγους

αργόστροφους “αμερικανικούς” ανεμόμυλους, είναι και οι αιολικές μηχανές τύπου “Andreau-Enfield” (βλ. σχήμα 1.8).

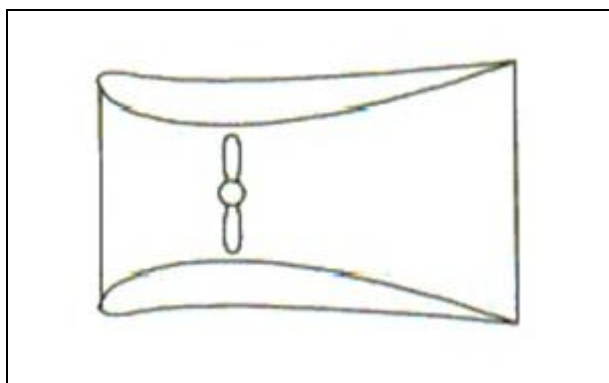


Σχήμα 1.8: Ανεμόμυλος τύπου “Andreau-Enfield”.

Ο εν λόγω ανεμόμυλος τύπου “Andreau-Enfield” (βλ. σχήμα 1.8).αποτελείται από μία έλικα αεροπλάνου, με κοίλα πτερύγια, που κάτω από την επίδραση του ανέμου περιστρέφεται και ενεργεί σαν φυγοκεντρική αντλία αέρα. Το ρεύμα αέρα που εισροφάται από τη βάση του πύργου αποβάλλεται από τα ακροπτερύγια ,κινώντας ενδιάμεσως ένα δρομέα στο εσωτερικό του πύργου. Μια μεγάλη αντίστοιχη εγκατάσταση ισχύος 100 kW κατασκευάσθηκε και λειτούργησε στην Αλγερία την περίοδο 1950-60. Όμως η λειτουργία της διεκόπη σύντομα λόγω κάποιων προβλημάτων. Οι μηχανές του τύπου αυτού δεν χρησιμοποιούνται σήμερα αν και είναι σχετικά ελαφρές, επειδή παρουσιάζουν πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης.

Ένας άλλος τύπος αιολικής μηχανής οριζόντιου άξονα είναι η χρήση αεροπορικής έλικας μέσα σε περίβλημα τύπου “Venturi” (βλ. σχήμα 1.9). Η παρουσία του περιβλήματος και η χρησιμοποιούμενη διάταξη οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας του αέρα, ιδιαίτερα στην περιοχή του λαιμού του ακροφυσίου όπου τοποθετείται συνήθως και η πτερωτή. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της προτεινόμενης διάταξης, είναι και η μείωση των αεροδυναμικών απωλειών. Όμως η διάταξη εμφανίζει αυξημένο βάρος και κόστος κατασκευής και το κυριότερο, προβλήματα διαρκούς προσανατολισμού στη διεύθυνση του ανέμου. Αν και η διερευνούμενη διάταξη

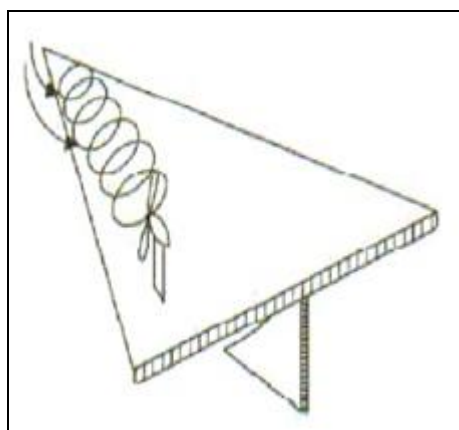
δεν χρησιμοποιείται ευρέως, εξακολουθεί να προκαλεί το ενδιαφέρον των ερευνητών με στόχο τη βελτιστοποίησή της.



---

Σχήμα 1.9 : Περίβλημα τύπου “Venturi”.

Μια άλλου τύπου ανεμογεννήτρια βασίζεται στην τεχνητή δημιουργία αεροδυναμικής δίνη. Πράγματι σε πολύ κεκλιμένες τριγωνικές πτέρυγες (τύπου Δέλτα) δημιουργείται τοπική αύξηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, λόγω της δημιουργίας στροβίλων κυκλοφορίας γύρω από την πτέρυγα, (βλ. σχήμα 2.1). Βέβαια και στην περίπτωση αυτή έχουμε αυξημένη δυσχέρεια περιστροφής του συστήματος.



---

Σχήμα 2.1: Ανεμογεννήτρια βασισμένη στην τεχνητή δημιουργία αεροδυναμικής δίνη.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt. Οι τυπικές διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 500 kW οριζοντίου άξονα είναι διάμετρος δρομέα 40 μέτρα και ύψος 40-50 μέτρα, ενώ αυτής των τριών MW οι διαστάσεις είναι διάμετρος δρομέα 80 μέτρα με ύψος 80–100 μέτρα αντίστοιχα. Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με δύο ή τρία πτερύγια, σε ποσοστό 90 %. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500 Kw και μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας.

## 1.1 Πλεονεκτήματα ανεμογεννητριών

- Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι αισθητά αθόρυβες. Το επίπεδο της έντασης του ήχου σε απόσταση 40 m από μια ανεμογεννήτρια είναι 50-60 db(A), που είναι αντίστοιχο με την ένταση μιας συζήτησης. Δεδομένης δε της απαιτούμενης ελάχιστης απόστασης των ανεμογεννητριών από γειτονικούς οικισμούς το επίπεδο αυτό είναι ακόμη χαμηλότερο, της τάξης των 30 db(A) περίπου, που αντιστοιχεί στο επίπεδο θορύβου ενός ήσυχου καθιστικού.

- Ενώ μία ανεμογεννήτρια χρησιμοποιεί μόνο 36 m<sup>2</sup> έκταση γης για να παράγει 1,2 έως 1,8 εκατομμύρια kWh το χρόνο, μία τυπική μονάδα βιοκαυσίμου θα απαιτούσε 1.540.000 m<sup>2</sup> δασώδους έκτασης με ιπιές και αντίστοιχα οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες θα απαιτούσαν μία έκταση γης της τάξης των 14.000 m<sup>2</sup> για να παράγουν την ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, σε ετήσια βάση.

- Η λειτουργία των ανεμογεννητριών δεν απαιτεί πρώτες ύλες, εκτός από την αιολική ενέργεια, και το παραγόμενο προϊόν μεταφέρεται απευθείας στο δίκτυο της ΔΕΗ προς κατανάλωση και επομένως δεν απαιτείται κανενός είδους μετατροπή πρώτης ύλης ή προϊόντος.

- Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να στηθούν σε αγροκτήματα ή ράντσα, ωφελώντας έτσι την οικονομία των αγροτικών περιοχών, όπου βρίσκονται οι περισσότερες από τις καλύτερες τοποθεσίες από την άποψη του ανέμου. Οι αγρότες μπορούν να συνεχίσουν να εργάζονται στη γη, καθώς οι

ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μόνον ένα μικρό μέρος της γης. Οι ιδιοκτήτες των εγκαταστάσεων για την παραγωγή αιολικής ενέργειας πληρώνουν ενοίκιο στους αγρότες για τη χρήση της γης.

## 1.2 Μειονεκτήματα ανεμογεννητριών

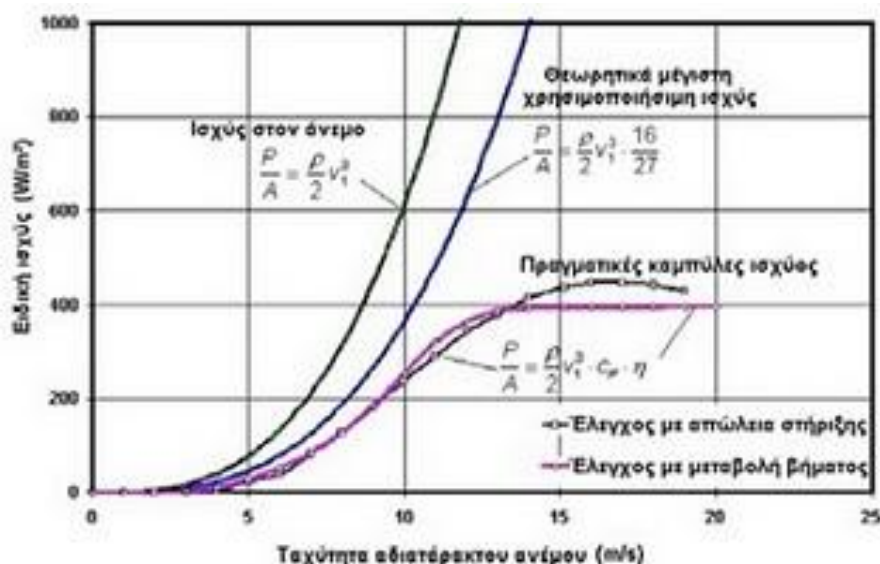
- Υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ειδικά μάλιστα για μεμονωμένες περιπτώσεις αιολικών μηχανών μικρού μεγέθους.
- Υπάρχει το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης που δημιουργείται από την ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα περιστρεφόμενα πτερύγια της πτερωτής.
- Η εγκατάσταση μιας τεράστιας ανεμογεννήτριας σε μια όχι και τόσο ανοιχτή περιοχή δημιουργεί άσχημη οπτική εντύπωση. Αντίθετα η εγκατάσταση της ίδιας ανεμογεννήτριας σε μια αχανή έκταση περνά σχεδόν απαρατήρητη.
- Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς ή θανατώσεις πουλιών, κυρίως αποδημητικών γιατί τα ενδημικά «συνηθίζουν» την παρουσία των μηχανών και τις αποφεύγουν. Γι' αυτό καλύτερα να μην κατασκευάζονται αιολικά πάρκα σε δρόμους μετανάστευσης πουλιών.
- Ακόμα δεν υπάρχουν δυνατότητες για οικονομική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και επιβάλλεται να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών σταθμών για το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών.

## 1.3 Περιοχή λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται διαφορετικά περιεχόμενα και απολήψεις ισχύος ανάλογα με το συντελεστή ισχύος και τις αποδοτικότητες μιας Α/Γ.

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (1.1) ένα βασικό ζήτημα της πυκνότητας ισχύος του ανέμου αποτελεί η εξάρτησή της από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, εάν διπλασιαστεί η ταχύτητα, η ισχύς που περιέχεται στον άνεμο θα αυξηθεί κατά οκτώ φορές. Στην πράξη όμως η σχέση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος μιας Α/Γ και της ταχύτητας του ανέμου

δεν είναι τόσο ρητή. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες στο σχήμα 2.2 η πραγματική καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ περιγράφεται συνήθως ως προς τέσσερις διακριτές περιοχές της ταχύτητας του ανέμου, οι οποίες αναλύονται στον πίνακα 1.1 (ενδεικτικές τιμές αυτές του σχήματος 2.2)



Σχήμα 2.2: Παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του δίσκου του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

Από τις τέσσερις αυτές περιοχές, η Α/Γ παράγει και παρέχει ισχύ μόνο στο εύρος των ταχυτήτων του ανέμου που καθορίζονται από τις περιοχές 2 και 3. Στην περιοχή 1 (κάτω από την ταχύτητα εκκίνησης) δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια στον άνεμο ώστε να παραχθεί εκμεταλλεύσιμη ισχύς. Στην περιοχή 4 (πέρα από την ταχύτητα διακοπής) η παραγόμενη ισχύς διατηρείται σταθερή ή αρχίζει να μειώνεται, ενώ σε πολύ δυνατούς ανέμους μπορεί και να διακόπτεται η λειτουργία της Α/Γ για να αποτραπεί κάποια ζημία σε αυτή. Τότε, οι άνεμοι είναι πάρα πολύ μεγάλης έντασης για να δικαιολογηθεί η πρόσθετη δομική αντοχή και το επιπλέον κόστος σχετικά με το μικρό αριθμό ωρών ανά έτος κατά τις οποίες παρατηρούνται ταχύτητες ανέμου εντός της περιοχής.

Η πυκνότητα ισχύος του ανέμου εξαρτάται επίσης από την πυκνότητα του αέρα. Αυτή σε μεγαλύτερα ύψη μειώνεται και, κατά συνέπεια, μειώνεται και η διαθέσιμη ισχύς. Η επίδραση αυτή μπορεί να επιφέρει μείωση στην



παραγωγή ισχύος των Α/Γ σε ψηλά βουνά κατά τουλάχιστον 40% έναντι της ισχύος που θα μπορούσε να παραχθεί με τις ίδιες ταχύτητες ανέμου στο επίπεδο της θάλασσας. Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται αντίστροφα από τη θερμοκρασία, οπότε οι πιο χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τις μεγαλύτερες πυκνότητες του αέρα και τη μεγαλύτερη παραγωγή αιολικής ισχύος.

Περιοχή Λειτουργίας	Περιγραφή λειτουργίας: Παραγόμενη ισχύς συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου.	Ενδεικτικό εύρος ταχύτητας του ανέμου (αναφορικά με το σχήμα 2.2)
Περιοχή 1	Οι ταχύτητες του ανέμου είναι πολύ μικρές για παραγωγή εκμετάλλευσης ηλεκτρικής ισχύος.	0 έως ταχύτητα "εκκίνησης" ~4 m/s.
Περιοχή 2	Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αυξανόμενη με την ταχύτητα του ανέμου.	Ταχύτητα "εκκίνησης" έως "ονομαστική" ταχύτητα του ανέμου 4~13 m/s.
Περιοχή 3	Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με σταθερό ρυθμό (ονομαστική ισχύς). Η απόδοση των πτερυγίων της Α/Γ μειώνεται σκόπιμα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου.	"Ονομαστική" ταχύτητα ανέμου έως ταχύτητα "διακοπής" 13~20 m/s.
Περιοχή 4	Δεν παράγεται ισχύς. Οι άνεμοι είναι πολύ δυναμικοί ώστε να δικαιολογείται η πρόσθετη αντοχή και δαπάνη για το μικρό αριθμό ωρών ανά έτος πέραν της ταχύτητας "διακοπής".	Ταχύτητα "διακοπής" έως ταχύτητα "επιβίωσης" 20 m/s ("ή περισσότερο) έως την ονομαστική ταχύτητα επιβίωσης σε θυελλώδεις ανέμους.

Πίνακας 1.1: Οι τέσσερις περιοχές της καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας.

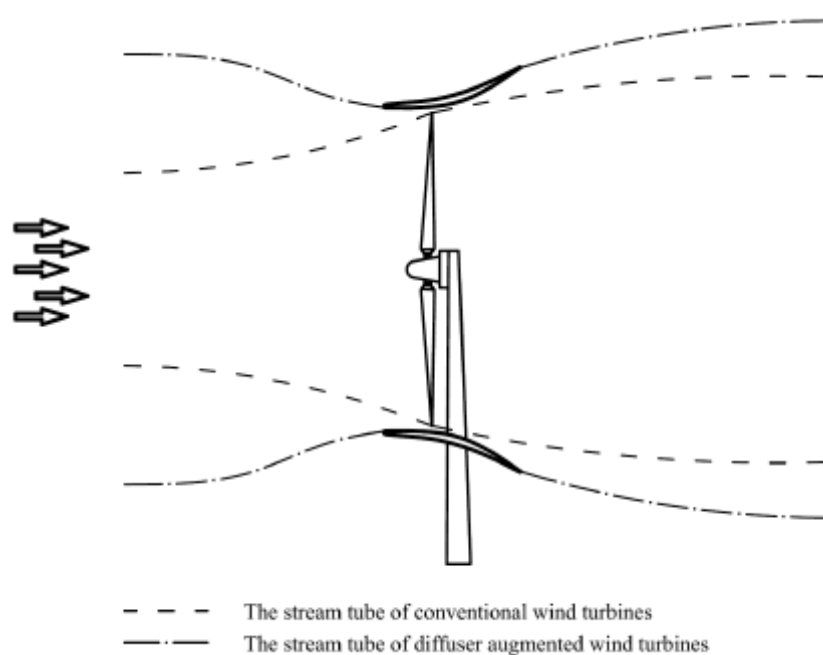
## 2. Ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια

Ένας από τους κύριους σκοπούς της εξέλιξης των ανεμογεννητριών είναι η αύξηση της ισχύος στην έξοδο της τουρμπίνας. Σύμφωνα με την εξίσωση :

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot n \cdot \rho \cdot U_1^3 \cdot A \quad (1.1)$$

(βλ. σελ. 8) υπάρχουν δύο παράμετροι που επηρεάζουν την τιμή της ισχύος, η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων και η ταχύτητα του ανέμου.

Οπότε η ισχύς εξόδου μπορεί να αυξηθεί, αυξάνοντας μια από τις δύο παραμέτρους. Σύμφωνα με το όριο του Betz για τις συμβατικές ανεμογεννήτριες ο συντελεστής της ισχύος είναι μια παράμετρος που μας περιορίζει. Μια από τις μεθόδους για να αυξηθεί η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα διαχύτη γύρω από τον ρότορα. Αυτή η μέθοδος μερικές φορές αναφέρεται και σαν ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια με διαχύτη (Diffuser-Augmented Wind Turbine, DAWT). Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται πως μεταβάλλεται ο ροϊκός σωλήνας του αέρα σε μία συμβατική οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτρια (HAWT) με την εφαρμογή ενός διαχύτη.



Σχήμα 2.3: Μεταβολή ροϊκού σωλήνα του αέρα μεταξύ συμβατικής ανεμογεννήτριας και DAWT.

Ο διαχύτης περιμετρικά του ρότορα αυξάνει την ροή του αέρα διαμέσου της επιφάνειας σάρωσης των πτερυγίων, έτσι αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα στον ρότορα. Όποτε η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μίας συμβατικής

ανεμογεννήτριας. Οι ενσωληνωμένες ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερη ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας του ρότορα από τις ανεμογεννήτριες χωρίς διαχύτη. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του διαχύτη γύρω από τις πτερωτές είναι ότι η μέγιστη θεωρητική ισχύς των ενσωληνωμένων ανεμογεννητριών δεν περιορίζεται από το όριο του Betz και σχετίζεται με τη διαφορά πίεσης και το ρυθμό της ροής στον διαχύτη. Μέσω αναλυτικής προσομοίωσης ο Riegler, έδειξε ότι ο μέγιστος συντελεστής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με διαχύτη είναι 3,3 φορές μεγαλύτερος από το όριο του Betz μιας συμβατικής ανεμογεννήτριας.

Ένα από τα μειονεκτήματα της χρήσης διαχύτη είναι η αύξηση του βάρους της κατασκευής και η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον τοποθετώντας ένα διαχύτη γύρω από μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα εξαλείφεται η ανεξαρτησία της τουρμπίνας από την κατεύθυνση του ανέμου το οποίο είναι ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα (VAWT) [3].

Ο ίδιος ο Betz αναγνώρισε την δυναμική μιας ενσωληνωμένης ανεμογεννήτριας (DAWT) το 1929. Επίσης ήταν ο πρώτος που διατύπωσε τη θεωρία της ενσωληνωμένης στην οποία υπέθετε ότι η στατική πίεση στην έξοδο μιας ενσωληνωμένης ανεμογεννήτριας είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Ένας άλλος περιορισμός που τέθηκε από την θεωρία του ήταν ότι η περιοχή εξόδου (λαιμός) του αέρα πρέπει να είναι μικρή έτσι οδηγούμαστε σε μικρή κλίμακα «δίσκου ενέργειας». Από αυτά τα συμπεράσματα εγκαταλείφθηκε η ιδέα των ενσωληνωμένων ανεμογεννητριών μέχρι τη δεκαετία του 1950 όπου ο Ιάπωνας ερευνητής Sanuki δημοσίευσε μερικά πειραματικά αποτελέσματα ανεμογεννήτριας περιμετρικώς περιορισμένη όπου παρουσίαζε κέρδος στην ισχύ εξόδου της τάξεως του 88% σε σχέση με το όριο Betz. Αυτή η δημοσίευση ακολουθήθηκε από τον Iwasaki το 1953 ο οποίος βρήκε μια αύξηση της ενέργειας της τάξεως του 30% τοποθετώντας τον ρότορα σε έναν κυλινδρικό αγωγό συνεχής ροής. Την ίδια εποχή οι Βρετανοί ερευνητές Lilley και Rainbird δούλευαν πάνω σε μερικές θεωρητικές μελέτες για ενσωληνωμένους ανεμόμυλους που τις δημοσίευσαν το 1956. Σε αυτή τη μελέτη οι Lilley και Rainbird διαπίστωσαν ότι η αύξηση της αξονικής ταχύτητας και η μείωση των απωλειών στις πτερωτές είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για επιπρόσθετη αύξηση της ισχύς από έναν αγωγό. Στην

παραμετρική τους ανάλυση αναγνώρισαν δύο κρίσιμους σχεδιαστικούς παράγοντες, την πίεση εξόδου του διαχύτη και την κλίμακα της συστολής εισόδου. Αυτές οι δύο παράμετροι από μόνες τους λειτουργούσαν για την περεταίρω μείωση της εσωτερικής τριβής. Επίσης πρότειναν ότι η αύξηση της ροής στον λαιμό ενός διαχύτη μπορεί να γίνει μεγαλύτερη με την αύξηση της υποπίεσης στην έξοδο του διαχύτη.

Τελικά όπως αναφέρθηκε από τον Phillips, οι Lilley και Rainbird έλαβαν υπόψη τους το κόστος των συσκευών ενέργειας του ενσωληνωμένου ανεμόμυλου και κατέληξαν ότι ο βέλτιστος αγωγός γεωμετρικά είναι με μια κλίμακα εισόδου όχι περισσότερο από 1.5 και μια κλίμακα εξόδου 3.5 (σε σχέση με την γεωμετρία του ρότορα) έχοντας ένα κέρδος στην ισχύ εξόδου τουλάχιστον 65% σε σχέση με την παραγωγή μιας «γυμνής» τουρμπίνας με την ίδια γεωμετρία στον ρότορα.

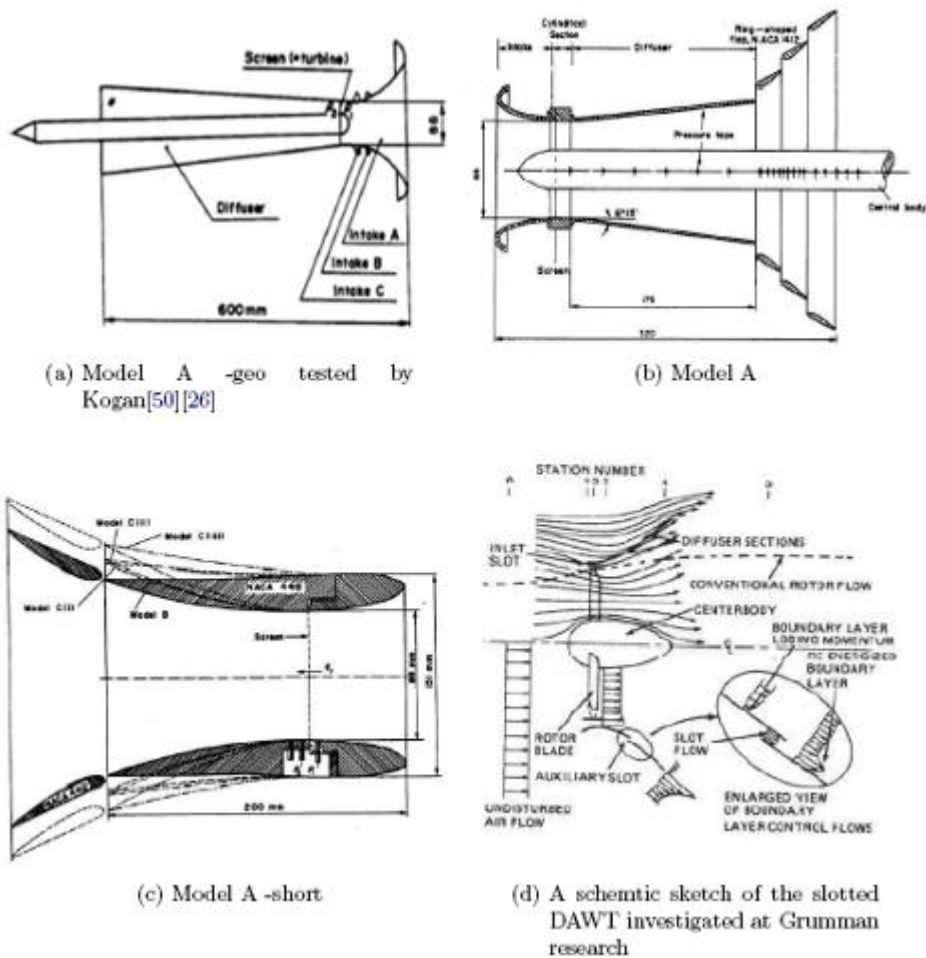
Μερικά χρόνια αργότερα στο τέλος της δεκαετίας του '50 μια ομάδα Ισραηλινών ερευνητών με επικεφαλή τον Kogan παρουσίασαν αποτελέσματα πάνω σε μελέτες για ανεμογεννήτριες με διαχύτη στο πανεπιστήμιο Ben Gurion του Ισραήλ όπου δοκίμασαν τρία διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών με διαχύτη (βλ. σχήμα 2.4). Η ομάδα του Kogan έδειξε ότι η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας στα μοντέλα ήταν και μέχρι της τάξης του 3,5. Ωστόσο, το μέγεθος του διαχύτη τα έκανε μη εμπορικά ανταγωνιστικά προϊόντα. Λόγω της φύσης της ροής του αέρα μέσα στον διαχύτη, ο διαχύτης δεν γινόταν να μικρύνει, γιατί έπρεπε να διατηρηθεί ο λόγος της εισόδου-εξόδου και αντίστοιχα οι χαμηλές πιέσεις στην έξοδο. Αποδείχτηκε ότι διαχύτης με γωνία διάχυσης μεγαλύτερη από  $9^{\circ}$  προκαλούσε σοβαρές διαταραχές στη ροή μέσα στο διαχύτη.

Το πρόβλημα της διαταραχής της ροής με την αύξηση της κλίσης του διαχύτη μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση πτερυγίων περιμετρικά στην έξοδο του διαχύτη (βλ. σχήμα 2.4b). Πίστευαν ότι με τα πτερύγια αυτά θα μπορούσε να μειωθεί η πίεση και κατά συνέπεια η ροή θα μπορούσε να ξεπεράσει τις θετικές πιέσεις που δημιουργούνται στην έξοδο του διαχύτη. Η εφαρμογή αυτή αποδείχτηκε ιδιαίτερα αποδοτική και ο συντελεστής της πίεσης εξόδου, όπως αναφέρθηκε, πήρε τιμές από  $-0,5 < C_{p_e} < -0,35$ . Ως εκ τούτου, αναδείχτηκε ένας μικρότερων διαστάσεων

διαχύτης με δυνατότητα αύξησης της απόδοσής. Η έρευνα του Kogan και Seginer's σταμάτησε το 1967.

Ο Igra, ένας πρώην φοιτητής του καθηγητή Kogan που αποφοίτησε από το τμήμα σχεδιασμού ανεμογεννητριών με διαχύτη (DAWT) συνέχισε την έρευνα των ανεμογεννητριών με διαχύτη στο πανεπιστήμιο Ben Gurion το 1974. Ο Igra ξεκίνησε με την παρατήρηση ότι η αύξηση της απόδοσης από έναν διαχύτη, εξαρτάται άμεσα από την υποπίεση στον ρότορα και στη έξοδο του διαχύτη. Αποτέλεσμα της υποπίεσης είναι η δημιουργία «κενού» μέσα στο διαχύτη και ως εκ τούτου την αύξηση της ροής της μάζας του αέρα. Από την θεωρητική και πειραματική εργασία, ο Igra κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η πίεση εξόδου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη για να έχει ο διαχύτης όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Μια ενδιαφέρουσα υπόθεση που βγήκε από την ανάλυση του Igra ήταν ότι υπέθεσε ότι το φορτίο του ρότορα ήταν ανεξάρτητο από την ανάκτηση της πίεσης και την πίεση εξόδου του διαχύτη. Ο Igra παρατήρησε επίσης ότι η ροή στο πίσω μέρος του διαχύτη δεν ήταν ομοιόμορφη σε όλη την περιοχή. Δύο διακριτές περιοχές εντοπίστηκαν, μια ροή δακτυλιοειδή στον τοίχο και μια ροή στον κέντρο του πυρήνα με χαμηλή ολική πίεση. Στο τέλος της δεκαετίας του '70 ο Igra επίσης κατασκεύασε μια πιλοτική μονάδα με διάμετρο 6 μέτρα με συνολικό μήκος 8 μέτρα (βλ. εικόνα 1.1a).

Την ίδια εποχή, λόγω της πετρελαϊκής κρίσης το 1974, ο Foremann στην έρευνα στο Grumman στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής ξεκίνησε δική του εκτενή έρευνα και ανέπτυξε ανεμογεννήτριες με διαχύτη (DAWT) για να ελέγξει το οριακό στρώμα. Το σχήμα 2.4d δείχνει ένα σκίτσο με την αρχή λειτουργίας του αυλακωμένου διαχύτη. Περισσότερα από 100 διαφορετικά μοντέλα δοκιμάστηκαν μέσα στην αεροδυναμική σήραγγα. Τα μοντέλα ήταν αρχικά εξοπλισμένα όπως στην έρευνα του Igra με ένα περιφερειακό κάλυμμα για την προσομοίωση της πτώσης της πίεσης πάνω στον ρότορα. Αργότερα επιβεβαιώθηκε επίσης από τον Foremann ότι η τυρβώδης ροή ενός στροβίλου σε λειτουργία καθυστερεί στην πραγματικότητα το διαχωρισμό της ροής μέσα στον διαχύτη λόγω της μεταφοράς ορμής στο οριακό στρώμα. Από τον Foremann βρέθηκε ότι μια αύξηση του συντελεστή ισχύος στο 3 είναι δυνατόν να επιτευχθεί με μια κλίμακα περίπου από 2,5~3.



Σχήμα 2.4: Μοντέλα DAWT που δοκιμάστηκαν στο Πανεπιστήμιο του Ισραήλ Ben Gurion (a,b και c) και από τις Η.Π.Α. η έρευνα του Grumman (d).

Μερικά χρόνια αργότερα το 1977 ο Lewis ξεκίνησε μια πειραματική και θεωρητική έρευνα στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ο Lewis αναγνώρισε την αναλογία συρρίκνωσης κατά την είσοδο και την περιοχή του διαχύτη ως τα δύο κύρια χαρακτηριστικά της γεωμετρικής σχεδίασης. Από τη διατύπωση της ορμής βγήκε το συμπέρασμα ότι μια ανεμογεννήτρια με διαχύτη θα μπορούσε να παράγει 42,86% περισσότερη ενέργεια από ένα συμβατική απλή ανεμογεννήτρια. Όπως ο Igra και οι προκάτοχοι του, οι Lewis και Foremann σημείωσαν την σπουδαιότητα της προσπάθειας μείωσης του μεγέθους και του κόστους του διαχύτη.

Λόγω των ελπιδοφόρων πειραματικών αποτελεσμάτων από τα συστήματα με τις ανεμογεννήτριες με διαχύτη των Igra και Foreman, ανανέωσαν το ενδιαφέρον που εισήχθηκε στο τέλος της δεκαετίας του '70 ένα

μεγάλο εύρος υπολογιστικής, θεωρητικής και πειραματικής έρευνας για ανεμογεννήτριες με διαχύτη στην Αυστραλία, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, Ιαπωνία και Ευρώπη. Διαφορετικοί συντελεστές μέγιστης ισχύς αναφέρθηκαν και διαφορετικοί μηχανισμοί ελέγχου προτάθηκαν για να εξηγήσουν την αυξητική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας με διαχύτη. Για παράδειγμα το 1979 ο De Vries προσπαθεί να επισημάνει ότι η αύξηση της ισχύς των ανεμογεννητριών με διαχύτη διέπεται από τη δύναμη που ασκείται στην ροή. Για την αναλυτική του προσέγγιση βρήκε την ίδια σχέση όπως ο Igra, μολονότι με ένα ελαφρά διαφορετικό τρόπο, με μέγιστο συντελεστή ισχύς 0,7698. Όπως ο Loeffler, ο De Vries πρότεινε ένα μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο της μοναδικότητας. Το 1986 ο Dick δήλωσε ότι η συγκέντρωση μάζας της ανεμογεννήτριας με διαχύτη διέπεται εντελώς από την ακτινική δύναμη που ασκείται στη ροή. Επίσης μέσω της ανάλυσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων των Igra και Foreman παρουσίασε ότι οι αξονικές δυνάμεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση των ανεμογεννητριών με διαχύτη. Καταλήγει τελικά ότι ο μέγιστος συντελεστής ισχύος του 0,83 πρέπει να είναι εφικτός.

Αν και πολλοί ερευνητές έλαβαν υπόψη τους εμπορικές σκοπιμότητες, καμία προσπάθεια δεν μετέτρεψε τα υπό μελέτη σχέδια των ανεμογεννητριών με διαχύτη σε εμπορικά ανταγωνιστικά προϊόντα. Τελικά στις 2 Μαΐου του 1997 η εταιρία Vortec με βάση στην Νέα Ζηλανδία έθεσε σε λειτουργία μια ανεμογεννήτρια 17m ύψους με διαχύτη. Το πρωτότυπο των πολλών εκατομμυρίων δολαρίων, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.1b ήταν βασισμένο στην ανεμογεννήτρια του Foreman και είχε διάμετρο πτερυγίου 7,3m με αναμενόμενη ισχύ 1MW. Το σχέδιο της ανεμογεννήτριας βελτιστοποιήθηκε από τον Philips με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) στην οποία ο ρότορας έχει διαμορφωθεί ως ένας δίσκος ενέργειας σε μια σειρά μικρής κλίμακας πειράματα. Δυστυχώς τα αποτελέσματα της κανονικής κλίμακας ανεμογεννήτριας με διαχύτη έδειξαν μια αύξηση της τάξεως του 2,4 από το αναμενόμενο 9. Το πρόγραμμα αποδείχτηκε φιάσκο και η Vortec έκλεισε τις πόρτες της το 2001. Την ίδια περίοδο ο Van Bussel ασχολήθηκε και πάλι με τις θεωρίες για τις ανεμογεννήτριες με διαχύτη που είχαν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής και κατέληξε με τη βοήθεια της διατήρησης της ορμής ότι οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας

της ανεμογεννήτριας με διαχύτη είναι ίδιες με αυτές της απλής ανεμογεννήτριας. Συμπέρανε επίσης η πτώση της πίεσης κατά μήκος της τουρμπίνας είναι ανεξάρτητη από τον διαχύτη. Επιπλέον βρέθηκε ότι η ώση του ρότορα και το κάλυμμα του είναι αλληλοεξαρτώμενα αλλά η ώση του ρότορα αντίθετα από τον διαχύτη δεν είναι ανάλογη με τη ροή της μάζας. Τελικά σημειώθηκε από τον Van Bussel ότι με μια σημαντική μείωση της πίεσης θα μπορούσε ο συντελεστής ισχύος του ρότορα να πάρει την τιμή 2,5. Από την δουλειά του Van Bussel μπορεί να βγει το συμπέρασμα πως οι προσδοκίες της Vortec ήταν μη ρεαλιστικές και αρκετά υψηλές.



(a)

Το πιλοτικό σχέδιο μιας ενσωληνωμένης ανεμογεννήτριας από τον Igra. Η παραγόμενη ενέργεια είναι περίπου 1Kw με ταχύτητα αέρα 5m/s.



(b)

Η ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια του Vortec στην Νέα Ζηλανδία.

---

Εικόνα 1.1: Μερικές πραγματικής κλίμακας ενσωληνωμένες ανεμογεννήτριες.

Παρόλα αυτά το φιάσκο της Vortec δεν αποθάρρυνε τις έρευνες πάνω στις ανεμογεννήτριες με διαχύτη, οι οποίες συνεχίστηκαν σε διάφορες χώρες. Μικρές εταιρίες όπως η CITA στην Γαλλία, η KBE και Enflo στην Γερμανία (βλ.

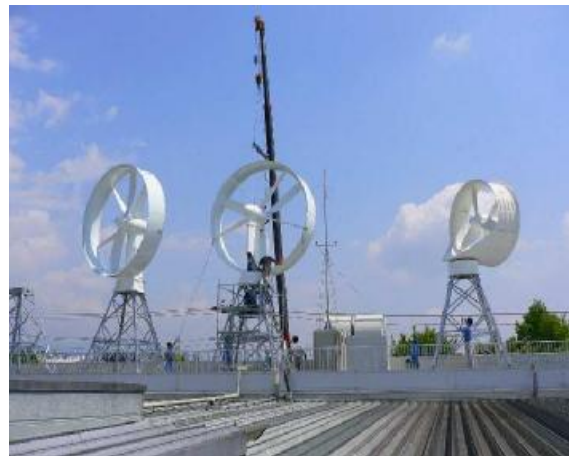


εικόνα 1.2a και 1.2b) η CATT στο Ηνωμένο Βασίλειο και η ιαπωνική εταιρία GH Craft (βλ εικόνα 1.2d) προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν την γενική ιδέα των ανεμογεννητριών αυτών σε μικρότερη κλίμακα χωρίς ιδιαίτερη αγοραστική επιτυχία μέχρι στιγμής. Αλλά η έρευνα και η ανάπτυξη συνεχίζεται ακόμα, όπως η πρόταση του Jamieson.



(a)

Ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια από την εταιρεία ΚΒΕ.



(b)

Ενσωληνωμένες ανεμογεννήτριες από την Ιαπωνική εταιρεία GH Graft



(c)

Ένα σχέδιο ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια από τον Flodesign U.S.A.



(d)

Ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια από την Γερμανική εταιρεία Enflo

---

Εικόνα 1.2.: Μερικές ενσωληνωμένες ανεμογεννήτριες επόμενης γενιάς.

Όπως ο Fletcher την δεκαετία του '80, ο Jamieson προσπάθησε να ενώσει την θεωρία του, βασιζόμενος σε λειτουργικές σχέσεις όπως του Dick

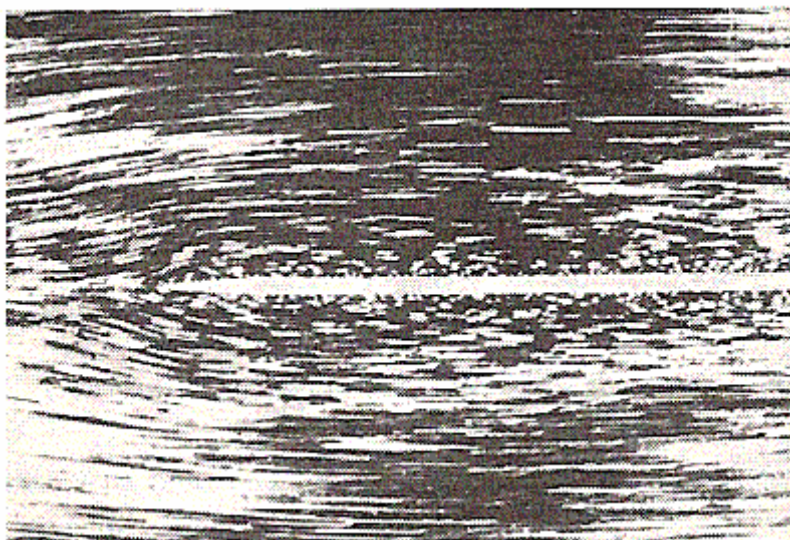
κατευθείαν με μια ανεμογεννήτρια με διαχύτη (DAWT BEM code) η οποία εφαρμόζεται στο λογισμικό πακέτο Bladed για σχέδιο ανεμογεννήτριας. Επίσης ανανεωμένο ενδιαφέρον για τη διαμόρφωση των ανεμογεννητριών με διαχύτη εμφανίστηκε στις Ηνωμένες πολιτείες της Αμερικής. Οι Werle και Pretz στη μελέτη τους πρότειναν μια εξίσωση της ορμής που θα ελέγχει τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Οι Werle και Pretz ήταν συνδεδεμένοι με την εταιρία Flodesign με έδρα την Μασαχουσέτη, η οποία ισχυρίστηκε το 2008 ότι ανέπτυξε μια ενσωληνωμένη ανεμογεννήτρια που παρήγαγε 3 με 4 φορές περισσότερη ισχύ από μια απλή ανεμογεννήτρια (βλ εικόνα 1.2c). Το σχέδιο είναι διαφορετικό με την έννοια ότι χρησιμοποίησαν έναν διαχύτη με τρύπες που θα έπρεπε να ενισχύει την ισχύ στη έξοδο. Σε μια πρόσφατη δημοσίευση ισχυρίστηκαν ότι υπερέβησαν το όριο Betz. Συμπερασματικά τις τελευταίες 6 δεκαετίες η διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας με διαχύτη έλαβε δίκαιο μερίδιο προσοχής χωρίς να έχει ιδιαίτερη εμπορική επιτυχία καμία εταιρία. Επίσης καμία εμπορική σχεδιαστική μελέτη για τις ανεμογεννήτριες με διαχύτη δεν έχει αναπτυχθεί μέχρι στιγμής και αυτό δείχνει ότι η επιστημονική κοινότητα εξακολουθεί να πρέπει να συμφωνήσει σε μια πλήρη θεωρία για τις ανεμογεννήτριες με διαχύτη.

### **3. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΗ**

Κατά τη μελέτη της ροής πραγματικών ρευστών, συναντάμε περιπτώσεις στις οποίες η κατανομή της πίεσης, όπως αυτή προκύπτει από τις μετρήσεις, προσεγγίζει την κατανομή που προβλέπει η θεωρία των ιδανικών ρευστών. Παραδείγματα τέτοιων ροών είναι η ροή ρευστού γύρω από επίπεδη πλάκα τοποθετημένη παράλληλα στο ελεύθερο ρεύμα και η ροή αέρα γύρω από αεροτομή. Στις περιπτώσεις αυτές η επίδραση του ιξώδους περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή του στερεού ορίου. Η συνθήκη μη ολίσθησης στα τοιχώματα του στερεού ορίου επιβάλλει μηδενική ταχύτητα κατά μήκος τους (τα ρευστά σωματίδια που έρχονται σε επαφή με το στερεό όριο προσκολλώνται

σε αυτό) και είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία βαθμίδας ταχύτητας κατά διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια του στερεού ορίου. Η λεπτή αυτή περιοχή γύρω από το στερεό όριο, μέσα στην οποία η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει από την τιμή μηδέν έως την τιμή  $U_{\infty}$ , που είναι η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος, ονομάζεται οριακό στρώμα (boundary layer).

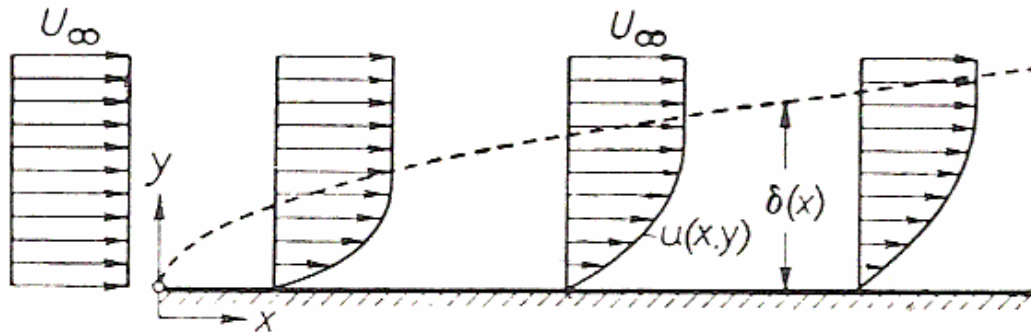
Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 1.3) φαίνεται το οριακό στρώμα που δημιουργείται κατά την κίνηση νερού γύρω από μια λεπτή, επίπεδη πλάκα. Οι γραμμές ροής γίνονται ορατές με τη βοήθεια σωματιδίων (συνήθως ρινίσματα αλουμινίου) τα οποία φωτίζονται κατάλληλα κατά τη διάρκεια της φωτογράφησης.



---

Εικόνα 1.3: Κίνηση νερού γύρω από μια λεπτή, επίπεδη πλάκα.

Το προφίλ της ταχύτητας (βλ. σχήμα 2.5) καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυξάνεται το πάχος του οριακού στρώματος κατά τη διεύθυνση της ροής από την επιβράδυνση όλο και μεγαλύτερης ποσότητας ρευστού, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 2.5: Το προφίλ της ταχύτητας και το πάχος του οριακού στρώματος κατά τη διεύθυνση της ροής.

Η διατμητική τάση δίνεται από τον πειραματικό νόμο της τριβής του Newton και είναι:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.4)$$

Φαίνεται δηλαδή ότι ακόμα και αν το ιξώδες του ρευστού είναι μικρό, η διατμητική τάση παίρνει μεγάλες τιμές εντός του οριακού στρώματος, εξαιτίας της μεγάλης βαθμίδας ταχύτητας μέσα σε αυτό. Το γεγονός αυτό υπαγορεύει ότι και για το σκοπό της μαθηματικής αντιμετώπισης του προβλήματος, η ροή γύρω από το στερεό σώμα πρέπει να χωριστεί σε δύο περιοχές. Το οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η τριβή παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ροής (shear flow) και στην υπόλοιπη περιοχή, έξω από το οριακό στρώμα, στην οποία η τριβή παίρνει τόσο μικρές τιμές ώστε να μπορεί να αγνοηθεί και η ροή στην περιοχή αυτή να προσεγγιστεί με τη βοήθεια της θεωρίας των ιδανικών ρευστών (potential flow).

Σημαντικό ρόλο στη μελέτη ροών γύρω από στερεά σώματα παίζουν και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του οριακού στρώματος. Αυτά είναι το πάχος του οριακού στρώματος (boundary layer thickness), που συνήθως συμβολίζεται με  $\delta$ , το πάχος μετατόπισης (displacement thickness), που συμβολίζεται με  $\delta_1$  και το πάχος ορμής (momentum thickness) που συμβολίζεται με  $\delta_2$ .

Για την καλύτερη κατανόηση των μεγεθών αυτών (βλ. σχήμα 2.5) θεωρούμε το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται γύρω από μια ακίνητη,

επίπεδη, λεπτή πλάκα που είναι τοποθετημένη παράλληλα σε ένα ομοιόμορφο ρεύμα ρευστού ταχύτητας  $U_{\infty}$ .

Ως πάχος  $\delta$  του οριακού στρώματος ορίζεται η κάθετη προς την επιφάνεια της πλάκας απόσταση, για την οποία η ταχύτητα  $U$  του ρευστού γίνεται ίση με το 99% της ελεύθερης ταχύτητας ροής  $U_{\infty}$ . Το πάχος  $\delta$  θα αυξάνει με την απόσταση από την οδηγούσα ακμή της πλάκας, εφ' όσον κατά μήκος αυτής το ρευστό θα επιβραδύνεται όλο και περισσότερο. Το πάχος  $\delta$  του οριακού στρώματος, για απόσταση  $x$  από την ακμή της πλάκας, δίνεται από τον τύπου:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\nu x}{u_{\infty}}} \quad (1.5)$$

όπου  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  ( $\mu$  = ιξώδες,  $\rho$  = πυκνότητα), είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού και το σύμβολο “ $\sim$ ” σημαίνει “είναι ανάλογο του”.

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω τύπο, το πάχος του οριακού στρώματος γύρω από μια επίπεδη πλάκα εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρευστού (ιξώδες, πυκνότητα), από την κινηματική κατάσταση του ελευθέρου ρεύματος (ελεύθερη ρευματική ταχύτητα  $U_{\infty}$ ) αλλά και από την απόσταση από την οδηγούσα ακμή της πλάκας κατά τη διεύθυνση της ροής.

Έχει αποδειχθεί ότι για την περίπτωση στρωτής ροής, ομογενούς και ασυμπίεστου ρευστού, γύρω από λεπτή, επίπεδη πλάκα μήκους  $l$  (πρόβλημα του Blasius), ο συντελεστής αναλογίας για τη σχέση (1.5) είναι 5. Δηλαδή το (μέγιστο) πάχος  $\delta$ , του οριακού στρώματος που δημιουργείται, δίνεται από την έκφραση:

$$\delta = 5 \sqrt{\frac{\nu l}{u_{\infty}}} \quad (1.6)$$

Αντίστοιχα, το αδιάστατο πάχος  $\frac{\delta}{l}$  του οριακού στρώματος, θα δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{5}{\sqrt{Re_l}} \quad (1.7)$$

όπου  $Re$  είναι ο αριθμός Reynolds της ροής που, ως γνωστόν, για ρευστό ιξώδους  $\mu$ , πυκνότητας  $\rho$  και ελεύθερης ρευματικής ταχύτητας  $U_{\infty}$  και για πλάκα μήκους  $l$ , δίνεται από τον τύπο:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot l}{\mu} = \frac{U_{\infty} \cdot l}{\nu} \quad (1.8)$$

Ως πάχος μετατόπισης ή πάχος μετάθεσης  $\delta_1$  ορίζεται το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, ταχύτητας ίσης με την ελεύθερη ροή, μέσα στο οποίο η παροχή του ρευστού είναι ίση με τη μείωση της παροχής μέσα στο οριακό στρώμα, λόγω επιβράδυνσης της ροής. Ο ορισμός του πάχους μετατόπισης προκύπτει από την ανάγκη ικανοποίησης της αρχής διατήρησης της μάζας. Η επιβράδυνση του ρευστού μέσα στο οριακό στρώμα έχει σαν συνέπεια τη μείωση της παροχής σε σχέση με την παροχή που θα υπήρχε εάν η πλάκα δεν βρισκόταν στην πορεία του ελεύθερου ρεύματος. Η αρχή διατήρησης της μάζας επιβάλλει μία προς τα άνω μετατόπιση των ρευματικών γραμμών, ώστε να αυξάνονται οι διατομές και να διατηρείται σταθερή η παροχή. Το πάχος μετατόπισης  $\delta_1$  δίνεται, ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από την οδηγούσα ακμή, από τον τύπο:

$$\delta_1 = \delta_1(x) = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (1.9)$$

Τέλος, η ανάγκη ικανοποίησης της αρχής διατήρησης της ορμής οδηγεί στον ορισμό του πάχους ορμής κατ' αναλογία με τον ορισμό του πάχους μετατόπισης. Ως πάχος ορμής, λοιπόν, ορίζεται το πάχος  $\delta_2$  ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, ταχύτητας ίσης με την ελεύθερη ροή, για το οποίο η

εισροή ορμής είναι ίση με την αντίστοιχη μείωση αυτής δια μέσου του οριακού στρώματος, λόγω επιβράδυνσης της ροής. Το πάχος ορμής  $\delta_2$  δίνεται, πάλι ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από την οδηγούσα ακμή, από τον τύπο:

$$\delta_2 = \delta_2(x) = \int_0^{\delta} \frac{U}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (2.0)$$

### 3.1 Διαχωρισμός ή Αποκόλληση του Οριακού Στρώματος

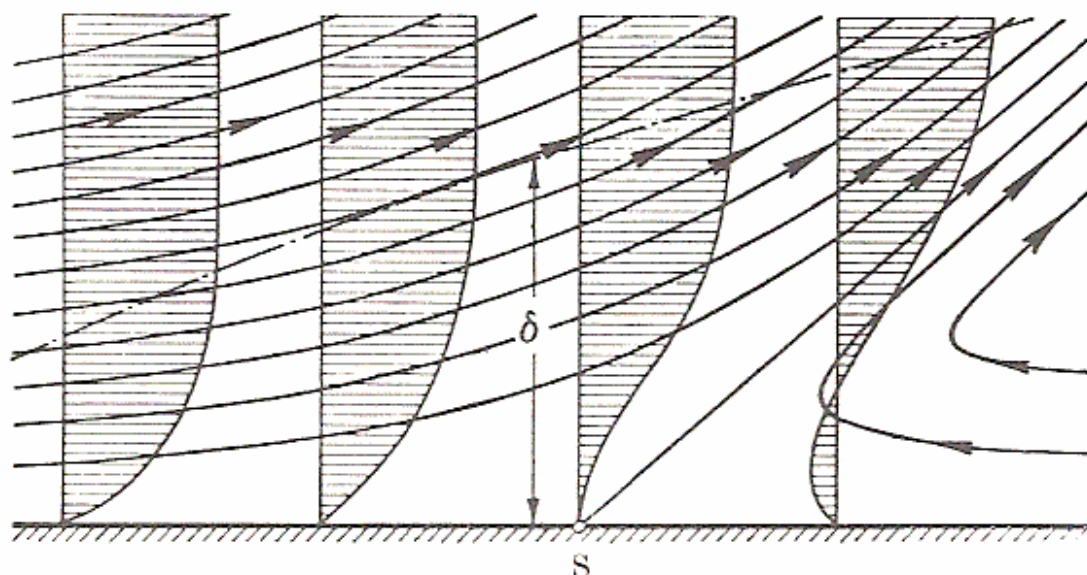
Πολλές φορές και κατά κύριο λόγο σε περιπτώσεις ροής γύρω από σώματα που δεν έχουν αεροδυναμικό σχήμα, όπως για παράδειγμα η σφαίρα και ο κύλινδρος, είναι δυνατόν τα επιβραδυνθέντα ρέοντα σωματίδια να μην παραμένουν εντός του οριακού στρώματος καθ' όλο το μήκος του στερεού ορίου. Είναι δηλαδή πιθανό να παρουσιαστεί μεγάλη αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος κατά την κατεύθυνση της ροής και να παρατηρηθεί εντός αυτού αναστροφή της ταχύτητας. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι δυνατό ρέοντα σωματίδια στην άμεση περιοχή του στερεού ορίου να κινηθούν έξω από το οριακό στρώμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διαχωρισμός ή αποκόλληση του οριακού στρώματος (boundary layer separation).

Η κύρια αιτία που οδηγεί στο ανεπιθύμητο αυτό φαινόμενο είναι η εμφάνιση αρνητικής βαθμίδας πίεσης (adverse pressure gradient,  $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ ).

Κατά τη διεύθυνση της ροής δηλαδή, αντί η πίεση να ελαττώνεται, υποβοηθώντας τη ροή, αυξάνεται, επιβραδύνοντάς την αρχικά και αντιστρέφοντάς την στη συνέχεια. Τότε τα ρέοντα σωματίδια που βρίσκονται μέσα στο οριακό στρώμα, λόγω της επιβράδυνσης και της μικρής τιμής της κινητικής τους ενέργειας, δεν μπορούν να προχωρήσουν πολύ μέσα στην περιοχή υψηλής πίεσης του οριακού στρώματος. Έτσι, το οριακό στρώμα αποκλίνει πлагίως από το στερεό όριο, αποκολλώμενο από αυτό, ενώ τα ρευστά σωματίδια που βρίσκονταν εντός του ακολουθούν κατά κανόνα τη

φορά της βαθμίδας πίεσης, κινούμενα κατά φορά αντίθετη αυτής του κυρίου ρεύματος.

Μια σχηματική αναπαράσταση (βλ. σχήμα 2.7) των γραμμών ροής σε περιπτώσεις αποκόλλησης καθώς και η εξέλιξη του προφίλ της ταχύτητας που συνδέεται με το φαινόμενο αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.7: Ρευματικές γραμμές στην περιπτώσεις αποκόλλησης του Οριακού Στρώματος.

Με βάση όλα τα παραπάνω, ως σημείο διαχωρισμού ορίζεται το σημείο εκείνο που αποτελεί το όριο αλλαγής διεύθυνσης της ροής μέσα στο οριακό στρώμα (σημείο  $S$  στο σχήμα). Το σημείο εκείνο, δηλαδή, στο οποίο η ταχύτητα του ρευστού αντιστρέφεται και αποκτά φορά αντίθετη αυτής του κυρίου ρεύματος. Όπως φαίνεται λοιπόν και από την εικόνα της εξέλιξης του προφίλ της ταχύτητας κατά μήκος του στερεού ορίου, για την περίπτωση αποκόλλησης, το σημείο διαχωρισμού  $S$  μπορεί να προσδιοριστεί από τον τύπο:

$$S \rightarrow \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (2.1)$$

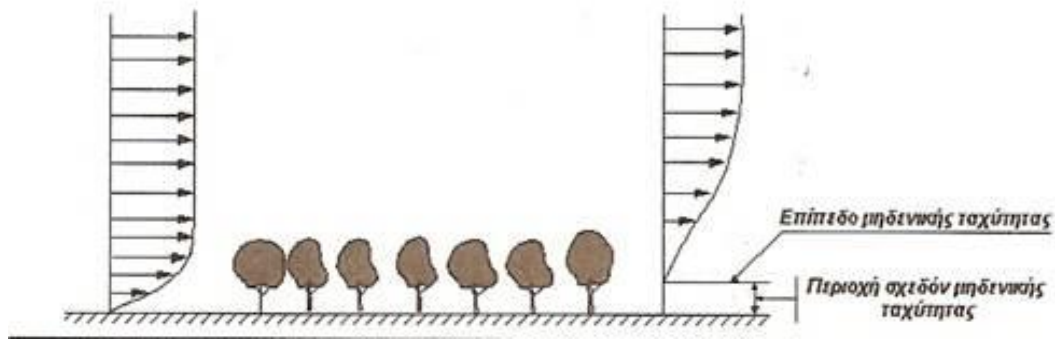


Το φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος χαρακτηρίζεται ως ανεπιθύμητο εξαιτίας των συνεπειών που η αποκόλληση αυτή επιφέρει στη ροή. Μερικές από τις σπουδαιότερες είναι η διαταραχή της ροής, η δημιουργία δινών, η μεγάλη απώλεια κινητικής ενέργειας και η αύξηση της αντίστασης σχήματος (form drag) εξαιτίας της διαφοροποίησης της κατανομής της πίεσης, η οποία μετά την αποκόλληση παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από την κατανομή πίεσης που προβλέπει η θεωρία των ιδανικών ρευστών. Για τους λόγους αυτούς είναι πολύ σημαντικό να είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε τις συνθήκες κάτω από τις οποίες παρατηρείται το φαινόμενο της αποκόλλησης. Η γνώση των συνθηκών αυτών μπορεί να μας βοηθήσει να αναπτύξουμε μεθόδους ώστε να καθυστερήσουμε ή και να αποφύγουμε πλήρως το φαινόμενο αυτό, διατηρώντας έτσι όλα τα πλεονεκτήματα μιας στρωτής ροής (χαμηλές τιμές αντίστασης – υψηλές τιμές κινητικής ενέργειας), κάτι που είναι πολύ σημαντικό από την άποψη των πρακτικών εφαρμογών.

### **3.2 Το οριακό στρώμα στην επιφάνεια της γης**

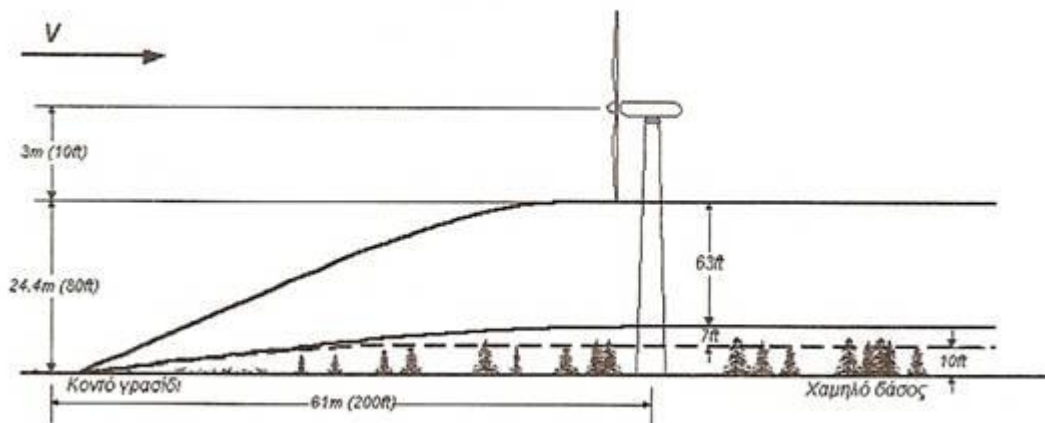
Η παρουσία συστοιχίας διαφόρων εμποδίων (πχ. Δέντρα, κτίρια κλπ) (βλ. σχήμα 2.8.1) έχει σαν αποτέλεσμα τον μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου μέχρι και το ύψος κορυφής αυτών, ενώ το οριακό στρώμα φαίνεται να αναπτύσσεται από την κορυφή των εμποδίων και κατάντη. Η ζώνη επιρροής του οριακού στρώματος είναι τουλάχιστον 5-6 φορές το μέσο ύψος των εμποδίων (βλ. σχήμα 2.8.1), για αυτό και η τοποθέτηση της πτερωτής μιας ανεμογεννήτριας θα πρέπει να βρίσκεται εκτός του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται. Εκτεταμένες έρευνες που αφορούν την ροή γύρω από κτίρια κατέλεξαν ότι η ζώνη επιρροής των κτιρίων περιλαμβάνει, δύο φορές το ύψος του κτιρίου ανάντη, δέκα φορές το ύψος του κτιρίου κατάντη και ύψος τουλάχιστον στο διπλάσιο του κτιρίου στην πέραν του κτιρίου περιοχή.

### Νέα Κατανομή Ταχύτητας Λόγω Εμποδίων



1

### Ζώνη Επιρροής Χαμηλών Εμποδίων καθ' Ύψος.



2

Σχήμα 2.8: Οριακό Στρώμα στην επιφάνεια της γης.

## 4.ΟΡΙΟ ΤΟΥ BETZ

Μία αιολική μηχανή δεν μπορεί να δεσμεύσει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου γιατί τότε η μάζα του αέρα που διαπερνά την πτερωτή μηχανή θα είχε στην συνέχεια μηδενική ενέργεια. Το μέγιστο ποσό της κινητικής ενέργειας που μπορεί να δεσμεύσει μια ιδανική αιολική μηχανή υπολογίστηκε από τον Betz.

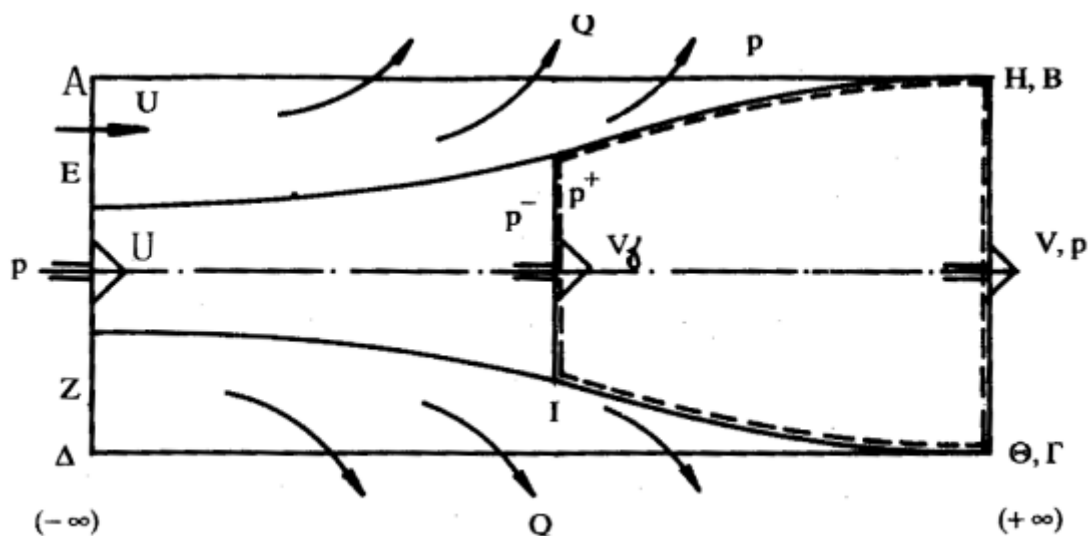
Ο Γερμανός φυσικός **Albert Betz** προσδιόρισε το 1919 ότι μια ανεμογεννήτρια μπορεί να απορροφήσει το πολύ το **59,3%** της ενέργειας του ανέμου που διέρχεται από την διατομή της (Νόμος του Betz). Το όριο του Betz είναι ανεξάρτητο από τη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας.

Σύμφωνα με την θεωρία του «**Δίσκου Ενέργειας**» ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από τον δρομέα θεωρείται ιδανικός, δηλαδή χωρίς απώλειες. Ο δρομέας εξετάζεται ως «μαύρο κουτί» διαμέσου του οποίου περνά ο αέρας που υφίσταται μεταβολή της ενέργειάς του, μεταβολή που ουσιαστικά εκφράζεται με πτώση της στατικής του πίεσης. Η πτερωτή θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό (δίσκος ενέργειας).

Ο Betz υπέθεσε ότι έχουμε μια ιδανική πτερωτή η οποία δεν φέρει το μηχανικό εξοπλισμό της πάνω στο άξονα περιστροφής και ο αριθμός των πτερυγίων μπορεί να είναι απεριόριστος, χωρίς να παρατηρείται αντίσταση από την διέλευση του αέρα από αυτά.

Αυτές οι προϋποθέσεις επιτρέπουν να θεωρηθεί ότι:

- Υπάρχουν ομοιόμορφες συνθήκες σε όλη την περιοχή σάρωσης της πτερωτής.
- Η ταχύτητα του αέρα, τόσο διαμέσου της πτερωτής όσο και μακριά από αυτή είναι αξονική.



Σχήμα 2.9: Επιφάνεια ελέγχου.

Η διάμετρος μίας ιδανικής πτερωτής (βλ. σχήμα 2.9), τοποθετημένη μέσα σε φλέβα κινούμενου αέρα ορίζει τον ροϊκό σωλήνα του ανεμοκινητήρα. Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) μπροστά από τον δίσκο έχει πίεση  $P$  και πλησιάζει τον δίσκο με ταχύτητα  $U$ . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και πίσω από τον δίσκο πολύ μακριά (στο άπειρο) όπου η πίεσή του αέρα θα έχει αποκατασταθεί από την πίεση του περιβάλλοντος  $P$ , η ταχύτητα του ανέμου είναι  $V$  μικρότερη από την  $U$  στην είσοδο ( $V < U$ ).

Λόγω διατήρησης της μάζας μέσα στον ροϊκό σωλήνα θα πρέπει η διατομή του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από την πτερωτή. Το ρευστό μετά τον δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτή πριν από τον δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά παραμένει η ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας. Η στατική πίεση του ρευστού μετά τον δίσκο θα είναι μικρότερη από την στατική πίεση πριν από τον δίσκο.

**Η Αρχή διατήρησης της μάζας** εκφράζεται από την σχέση:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_{\delta} \cdot V_s = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_s \quad (2.2)$$

όπου:  $\rho$  : η πυκνότητα του ρευστού,  
 $A_{\delta}$ : η διατομή του ροϊκού σωλήνα στον δίσκο ακτίνας  $R$  και  
 $V_s$ : η ταχύτητα πάνω στον δρομέα.

**Η Αρχή διατήρησης ορμής** ( $T$ : ωστική δύναμη) εκφράζεται από την σχέση:

$$T = \rho \cdot A_{\delta} \cdot V_s \cdot (U - V) \quad (2.3)$$

όπου:  $U$  : η ταχύτητα πολύ πριν φτάσει ο αέρας στον δίσκο και  
 $V$  : η ταχύτητα πολύ μετά τον δίσκο.

Η Αρχή διατήρησης της ενέργειας εκφράζεται από την σχέση:

$$V_s = \frac{1}{2}(U + V) \quad (2.4)$$

Η σχέση αυτή εκφράζει ότι η ταχύτητα του ανέμου πάνω στο δίσκο είναι το ημίθροισμα των ταχυτήτων του ανέμου πολύ πριν και πολύ μετά από το δίσκο (ανάντι και κατάντι).

Έχει επικρατήσει η εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής ή αλληλεπίδρασης  $\alpha$  (axial interference factor), της ταχύτητας του ανέμου, ως εξής:

$$\alpha = \frac{(U - V_s)}{U} \quad (2.5)$$

Ο συντελεστής αξονικής απαγωγής (θετική ποσότητα) εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα στον δίσκο. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$V_s = U(1 - \alpha) \quad (2.6)$$

$$V = U(1 - 2\alpha) \quad (2.7)$$

Η τελευταία σχέση δηλώνει ότι η ποσοστιαία επιβράδυνση μακριά κατάντι του δίσκου είναι διπλάσια της ποσοστιαίας επιβράδυνσης του ρευστού στο επίπεδο του δίσκου.

Ο άνεμος του ροϊκού σωλήνα που πλησιάζει το δίσκο έχει ισχύ:

$$N_- = \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \right] \cdot \dot{m} \quad (2.8)$$

ενώ κατάντι του δίσκου έχει μικρότερη ισχύ:

$$N_+ = \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right] \cdot \dot{m} \quad (2.9)$$

Έτσι η απώλεια ισχύος από το ρεύμα του ροϊκού σωλήνα είναι:

$$P = \dot{m} \cdot \left[ \frac{U^2 - V^2}{2} \right] \quad (3.1)$$

και αυτή ισούται με την ισχύ που δέσμευσε ο δίσκος.

Η εκτέλεση των πράξεων στην τελευταία σχέση δίνει ότι:

$$P = T \cdot V_s \quad (3.2)$$

σχέση που δηλώνει ότι η ισχύς που δεσμεύεται από τον αεροκινητήρα ισούται με την ώθηση που το ρευστό ασκεί πάνω στο δίσκο.

Οι προηγούμενες σχέσεις της ισχύς (3.1) του δρομέα και της ώσης (3.2) μπορούν , μετά την εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής (2.6) να γραφούν ως εξής:

$$P = 2 \cdot \rho \cdot A_\delta \cdot U^3 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (3.3)$$

$$T = 2 \cdot \rho \cdot A_\delta \cdot U^2 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) \quad (3.4)$$

Ορίζονται συντελεστές ισχύος και ώσης του δρομέα:

$$C_p = \frac{P}{\left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A_\delta \right)} \quad (3.5)$$

$$C_T = \frac{T}{\left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A_\delta \right)} \quad (3.6)$$

Η πρώτη σχέση υποδηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος που πλησιάζει το δίσκο (λίγο πριν από το δίσκο) και που μετατρέπεται

σε ισχύ πάνω στο δρομέα (  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_\delta \cdot U^3$  είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας  $U$  που περνάει από την επιφάνεια  $A_\delta$  ) ενώ η δεύτερη σχέση εκφράζει τον συντελεστή αντίστασης που παρουσιάζει ο δρομέας στη ροή ( μέγεθος χρήσιμο για τον υπολογισμό της δύναμης ανατροπής του πύργου στήριξης του ανεμοκινητήρα). Με εκτέλεση πράξεων προκύπτει:

$$C_p = 4 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (3.7)$$

$$C_t = 4 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) \quad (3.8)$$

Η σχέση (3.7) για τον συντελεστή ισχύος δηλώνει ότι αυτή έχει ακρότατο για τιμή αξονικής επαγωγής ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{1}{3} \quad \left( \frac{dC_p}{d\alpha} = 0 \right) \quad (3.9)$$

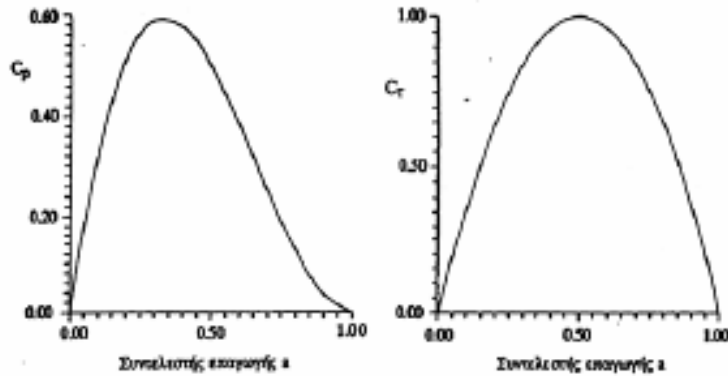
Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής παίρνει μέγιστη τιμή ίση με:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \cong 59\% \quad (4.1)$$

Η μέγιστη τιμή καλείται όριο του Betz. Προκύπτει λοιπόν ότι ο βέλτιστος δρομέας και κάτω από ιδανικές συνθήκες λειτουργεί μπορεί να δεσμεύσει μόνο το 59% της ισχύος του ανέμου. Το όριο αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο ο μέγιστο βαθμός απόδοσης του συστήματος για ιδανική έλικα. Στην περίπτωση με την βέλτιστη λειτουργία, η ταχύτητα  $U$  του ανέμου μειώνεται στα  $2/3$  πάνω στο δίσκο και στο  $1/3$  πολύ μακριά κατάντι του δίσκου. Είναι δηλαδή:

$$V_s = (2/3) \cdot U \quad (4.2)$$

$$V = (1/3) \cdot U \quad (4.3)$$



Σχήμα 3.1: Καμπύλη  $C_p$  απόδοσης δρομέα και συντελεστής ώσης ανεμοκινητήρα συναρτήσει του συντελεστή αξονικής επαγωγής( $\alpha$ ).

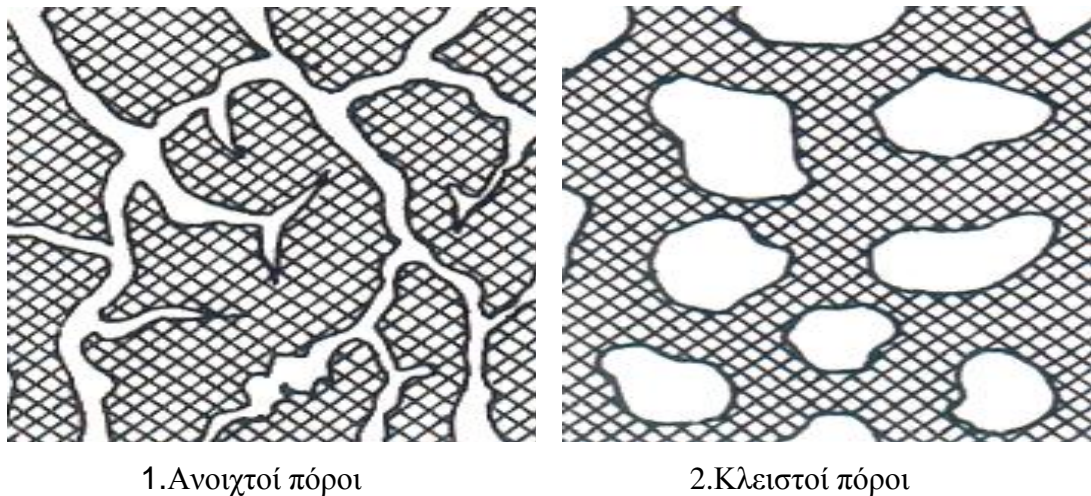
## 5. Τα πορώδη υλικά

Τα πορώδη υλικά εμφανίζονται στην καθημερινή μας ζωή σε μεγάλη συχνότητα σε σημαντικές μορφές που πολύ συχνά δεν τα παρατηρούμε. Τέτοια παραδείγματα είναι το έδαφος, τα πετρώματα, διάφορα παράγωγα της αργιλικής μάζας όπως τα προϊόντα γύψου, γυψοσανίδες, κεραμικά υλικά όπως: προϊόντα αγγειοπλαστικής, είδη υγιεινής, τούβλα, κεραμίδια, πορσελάνες, σε οπτικές εφαρμογές όπως: λάμπες, οπτικές ίνες, οπτικά παράθυρα, ενεργός άνθρακας, αφρολέξ, ξύλο και τα παράγωγα του, σφουγγάρια.

Τα πορώδη υλικά αποτελούν μια πολύ σημαντική κατηγορία υλικών σε πλήθος εφαρμογών βιομηχανικής ή περιβαλλοντικής σημασίας, όπως διεργασίες διαχωρισμού, ετερογενής κατάλυση, βελτιωμένη εξόρυξη πετρελαίου, αποθήκευση φυσικών πόρων, διαχείριση αποβλήτων, ηχοαπορρόφηση καθώς αποτελούν εξαιρετικά ηχομονωτικά υλικά κλπ. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη πόρων. Πόρος ονομάζεται κάθε χώρος μέσα στη δομή του πορώδους μέσου ανεξαρτήτως σχήματος ή μεγέθους. Το σχήμα και οι διαστάσεις τους καθορίζονται από το είδος του υλικού και την ιστορία διαγένεσης η οποία καθορίζει τον τελικό σχηματισμό.



Τα πορώδη υλικά (βλ. σχήμα 3.2) έχουν είτε ανοιχτούς, είτε κλειστούς πόρους.



Σχήμα 3.2: Κατηγορίες δομής πορώδων υλικών.

Το ποσοστό των πόρων του υλικού δίνεται από το πορώδες του υλικού,  $u$ , το οποίο προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$u = 1 - d \quad (\%) \quad (4.4)$$

όπου είναι :

$$d = \frac{\rho_R}{\rho} = \frac{\frac{m}{V_g - V_z}}{\frac{m}{V_g - V_z - V_h}} = \frac{V_g - V_z - V_h}{V_g - V_z} \quad (4.5)$$

Η σχέση (4.4) λόγω της σχέσης (4.5) γίνεται :

$$u = 1 - \frac{V_g - V_z - V_h}{V_g - V_z} = \frac{V_h}{V_g - V_z} \quad (\%) \quad (4.6)$$

Σημαντικό χαρακτηριστικό ενός πορώδη υλικού είναι το πορώδες ( $\epsilon$ ). Το πορώδες ( $\epsilon$ ) ενός υλικού ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των διακένων που παρουσιάζει ένα στρώμα του υλικού προς τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνει το στρώμα. Άλλα χαρακτηριστικά τους είναι η διαπερατότητα, η

αντοχή σε εφελκυσμό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί μερικές φορές να προκύψουν από τα συστατικά του εκάστοτε υλικού.

Οι πόροι των φυσικών υλικών διακρίνονται σε θαλάμους και λαιμούς. Θάλαμοι ονομάζονται οι μεγάλοι πόροι οι διαστάσεις των οποίων είναι συγκρίσιμες με αυτές των κόκκων. Οι λαιμοί είναι μικρότεροι πόροι και μοιάζουν με κανάλια που συνδέουν τους θαλάμους. Προσεγγιστικά, μπορεί να αποδοθεί μια χαρακτηριστική διάσταση στους θαλάμους ως η αποτελεσματική ακτίνα της σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τους πόρους. Η διαδικασία αυτή ορίζει τους πόρους σαν μέγιστα και ελάχιστα της μεγαλύτερης σφαίρας που εγγράφεται στους πόρους και έχει χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες προτυποποίησης ορισμένων μη στερεοποιημένων και στερεοποιημένων πετρωμάτων των ταμιευτήρων. Το πορώδες υλικό μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα δίκτυο στο οποίο τους κόμβους τοποθετούνται οι θάλαμοι ενώ στους δεσμούς τοποθετούνται οι λαιμοί. Το πορώδες αποδίδεται είτε όλο στους θαλάμους είτε στους λαιμούς ή ακόμη και να διαμοιραστεί στους δύο αυτούς τύπους πόρων. Κάθε πορώδες μέσο αποτελείται από τον πορώδη χώρο και το στερεό που διαχωρίζονται μεταξύ τους από τα τοιχώματα των πόρων, τα οποία σχηματίζουν μια διεπιφάνεια.

Οι πληροφορίες για τους πόρους είναι ουσιαστικά οι κατανομές μεγέθους τους οι οποίες μπορεί να αναφέρονται σε ένα αποτελεσματικό ή χαρακτηριστικό μέγεθος. Οι κατανομές εξαρτώνται από την πειραματική μέθοδο και το πρότυπο που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

## **8. Περιγραφή Υπολογιστικού Μοντέλου**

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) είναι ένας κλάδος της μηχανικής των ρευστών που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους για να επιλύσει αλλά και για να αναλύσει τα προβλήματα που αφορούν τις ροές των ρευστών. Συγκεκριμένα εμπεριέχει ειδικά ανεπτυγμένες αριθμητικές τεχνικές επίλυσης των εξισώσεων κίνησης

ρευστών για την επίτευξη τρισδιάστατων, εξαρτημένων από τον χρόνο λύσεων σε διάφορα προβλήματα ροών και σε διάφορες κλίμακες. Είναι εξοπλισμένο με ένα εύρος φυσικών μοντέλων τα οποία επεκτείνουν την καταλληλότητά του στην προσομοίωση εξειδικευμένων περιπτώσεων ροής, όπως για παράδειγμα μοντέλα πολυφασικών ροών, μοντέλα τύρβης κ.α. Οι υπολογιστές χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των υπολογισμών που απαιτούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των υγρών και των αερίων με τις επιφάνειες που ορίζονται από τις οριακές συνθήκες. Με υψηλής ταχύτητας υπερυπολογιστές, μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες λύσεις. Συνεχίζεται ωστόσο η έρευνα, για λογισμικό με βελτιωμένη απόδοση στην ακρίβεια και την ταχύτητα πολύπλοκων σεναρίων προσομοίωσης, όπως διηχητική ή τυρβώδης ροή.

Ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, στην προσπάθεια για την επίτευξη ενός όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικού αποτελέσματος, πρέπει να ικανοποιεί κάποια γενικά χαρακτηριστικά. Βασικά στοιχεία του προγράμματος είναι:

- Η δημιουργία ενός πεπερασμένου πίνακα από σημεία (κόμβους) του ροϊκού πεδίου, που απαρτίζουν το υπολογιστικό πλέγμα.
- Η μετατροπή των μερικών διαφορικών εξισώσεων, σε ένα σύστημα όμοιων αλγεβρικών εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες συσχετίζουν τις τιμές των εκάστοτε μεταβλητών στους κόμβους του πεδίου με τις τιμές στους γειτονικούς κόμβους.
- Η μετατροπή των εξισώσεων σε κατάλληλη μορφή για την επίλυση τους από κάποια αξιόπιστη επαναληπτική τεχνική.
- Η παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της επαναληπτικής διαδικασίας.

Η αξιοπιστία μιας υπολογιστικής λύσης κρίνεται από τους παρακάτω όρους :

- **Γενικότητα εφαρμογής:** προσπάθεια δημιουργίας υπολογιστικού κώδικα με πεδίο εφαρμογής σε όσο τα δυνατόν περισσότερες ροϊκές περιπτώσεις, με τις λιγότερες δυνατές αλλαγές.
- **Ακρίβεια λύσης:** Οι αλγεβρικές εξισώσεις αποτελούν προσεγγίσεις των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η διαφορά μεταξύ των αριθμητικών

λύσεων των πρώτων και των αναλυτικών λύσεων των δευτέρων, δηλαδή το υπολογιστικό λάθος, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

- **Σύγκλιση:** Ιδιότητα μιας επαναληπτικής μεθόδου επίλυσης ενός συστήματος όμοιων αλγεβρικών εξισώσεων που οδηγεί στην ομαλή επίλυση τους. Μία αξιόπιστη μέθοδος συγκλίνει κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες.

- **Οικονομία λύσης:** Βασική ανάγκη μιας μεθόδου είναι το να είναι γρήγορη και οικονομική. Αυτή η ανάγκη για «υπολογιστική οικονομία» παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη δημιουργία κάθε υπολογιστικής μεθόδου.

**Τα πλεονεκτήματα του υπολογιστικού μοντέλου** από την αντίστοιχη πειραματική έρευνα είναι:

- Το χαμηλό κόστος, το πιο σπουδαίο πλεονέκτημα μιας υπολογιστικής πρόβλεψης. Στις περισσότερες εφαρμογές, το κόστος κατασκευής και τρεξίματος ενός υπολογιστικού προγράμματος είναι κατά πολλές τάξεις χαμηλότερο από το κόστος μιας αντίστοιχης πειραματικής διερεύνησης.

- Η ταχύτητα κατασκευής και εκτέλεσης μιας υπολογιστικής διερεύνησης σε αντιπαράθεση με μια αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση.

- Οι πλήρεις πληροφορίες που αποτυπώνονται σε ολόκληρη την επιφάνεια λύσης που μας ενδιαφέρει. Σε αντίθεση με το πείραμα, υπάρχουν ελάχιστες απρόσιτες περιοχές υπολογισμού και επίσης δεν υπάρχει διαταραχή ροής από τα όργανα λήψης μέτρησης.

- Η δυνατότητα εύκολης προσομοίωσης σε έναν θεωρητικό υπολογισμό των πραγματικών συνθηκών. Ένα υπολογιστικό πρόγραμμα δεν είναι δύσκολο να εξομοιώνει μικρές ή μεγάλες διαστάσεις, να χειρίζεται χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, τοξικές ή εύφλεκτες ουσίες ή να ακολουθεί πολύ γρήγορες ή πολύ αργές διαδικασίες.

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα θα πρέπει να επισημανθούν και τα **μειονεκτήματα** αυτής της μεθόδου. Ο υπολογισμός με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή επιλύει τις συνέπειες ενός μαθηματικού μοντέλου ενώ αντίθετα η πειραματική έρευνα παρατηρεί την πραγματικότητα. Το τελικό αποτέλεσμα του θεωρητικού υπολογισμού εξαρτάται από το μαθηματικό

μοντέλο και από την χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδο. Μια σωστή προσπάθεια πρόβλεψης θα πρέπει να είναι ένας συνετός συνδυασμός θεωρητικού υπολογισμού και πειράματος. Το ποσοστό συμμετοχής των δύο παραγόντων εξαρτάται από τη φύση του προς επίλυση προβλήματος, από τους στόχους της πρόβλεψης και από τους οικονομικούς και άλλους περιορισμούς της κατάστασης.

## **7. Πειραματική διαδικασία.**

### **Γενικά**

Αναπτύχθηκε ένα δισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για τη μελέτη του πεδίου ροής εντός ενός διαχύτη που κατά μήκος του, στην είσοδο και στην έξοδο, τοποθετήθηκαν κλειστοί αγωγοί. Μελετήθηκε και αναλύθηκε το μοντέλο αυτό ως προς την κατανομή του οριακού στρώματος σε όλο το μήκος του αλλά κυρίως στα τοιχώματα του διαχύτη. Επίσης μελετήθηκε η κατανομή της ταχύτητας του αέρα καθώς και οι μεταβολές των πιέσεων.

Στην συνέχεια εισήχθη μια πτερωτή (fan) στην είσοδο του διαχύτη, με τα χαρακτηριστικά ενός στροβίλου που έχει το μοντέλο στην πραγματικότητα. Οι παράμετροι του μοντέλου ανταποκρίνονται σε αυτά μίας ενσωληνωμένης ανεμογεννήτριας (Diffuser-Augmented Wind Turbine). Αφού πρώτα μελετήθηκε το μοντέλο αυτό της ενσωληνωμένης ανεμογεννήτριας (DAWT) αντικαταστάθηκαν τα τοιχώματα του διαχύτη με πορώδες υλικό και επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία στο καινούριο μοντέλο. Εξήχθησαν αποτελέσματα και από τα δυο μοντέλα και έγινε σύγκριση τους.

## 7.1 Σχεδιασμός μοντέλου και αριθμητική του επίλυση.

Το “Gambit” είναι γενικά ένα εμπορικό πακέτο λογισμικού για την κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος. Παρέχει την δυνατότητα τόσο να σχεδιάζονται γεωμετρίες όσο και να εισάγονται αυτές έτοιμες σχεδιασμένες από κάποια «βιβλιοθήκη» ή κάποιο συμβατό με αυτό σχεδιαστικό πακέτο.

Αρχικά στο λογισμικό “Gambit”, με βάση το αρχικό σύστημα συντεταγμένων οριοθετήθηκε, στην επιφάνεια του η υπό σχεδίαση γεωμετρική κατασκευή.

Η γεωμετρία του μοντέλου που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα “Gambit” είναι η παρακάτω:

Διαστάσεις, τετραγωνικής μορφής, αγωγού εισαγωγής:

- ύψος=20mm
- πλάτος=20mm
- μήκος=500mm
- πάχος πλευρών=10mm.

Διαστάσεις διαχύτη που ακολουθεί:

- ύψος είσοδου=20mm
- πλάτος εισόδου=20mm
- κλίση=3<sup>0</sup>
- μήκος=1740mm
- ύψος εξόδου=202mm
- πλάτος εξόδου=202mm
- πάχος πλευρών=10mm.

και διαστάσεις, τετραγωνικής μορφής, αγωγού εξαγωγής:

- ύψος=202mm

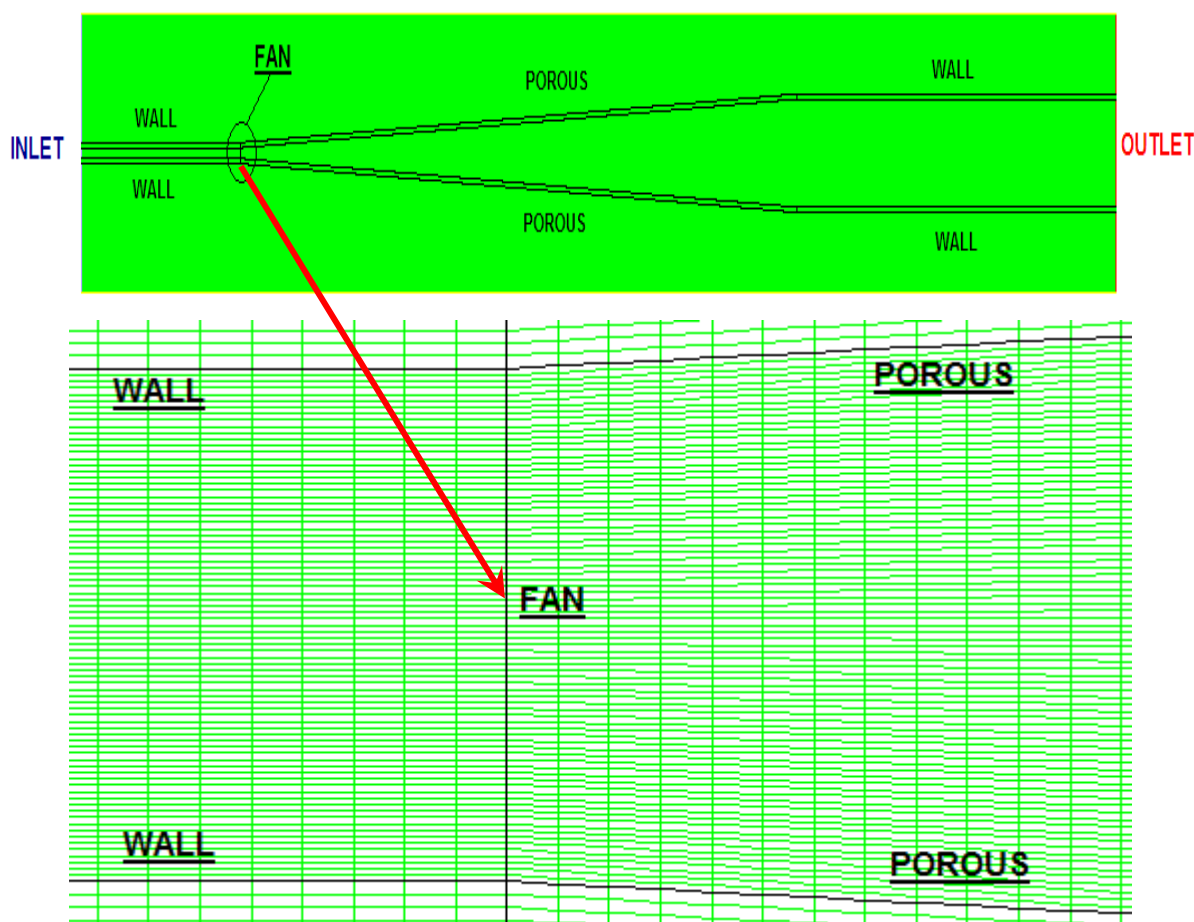
- πλάτος=202mm
- μήκος=1000mm
- πάχος πλευρών=10mm.

Ο σχεδιασμός συνεχίστηκε με την προεργασία για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος. Η προεργασία αποτελείται από τον χωρισμό της γεωμετρίας σε ξεχωριστές και διακριτές επιφάνειες. Έπειτα σε κάθε μια επιφάνεια δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα (Mesh), που στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το τετραγωνικό (Quad). Στο σύνολό του το υπολογιστικό πλέγμα (Mesh) απαριθμείται από 437.400 κελιά (cells).

Στο τελευταίο βήμα καθορίστηκαν οι οριακές συνθήκες (boundary types) της γεωμετρικής διάταξης (βλ. σχήμα 3.3) όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

- Όλες οι πλευρές των αγωγών ορίστηκαν ως “WALL” και ονομάστηκαν WALL.
- Όλες οι πλευρές του διαχύτη ορίστηκαν ως “POROUS\_JUMP” και ονομάστηκαν Porous.
- Η είσοδος οριοθετήθηκε ως “VELOCITY\_INLET” και ονομάστηκε INLET.
- Η έξοδος οριοθετήθηκε ως “OUTFLOW” και ονομάστηκε OUTLET.
- Η επιφάνεια που τοποθετήθηκε η πτερωτή οριοθετήθηκε ως “FAN” και ονομάστηκε FAN.

Εν συνεχεία το μοντέλο εισήχθη στο λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής «Fluent (CFD)» (Computational Fluid Dynamics) της “ANSYS Inc” που προσομοιώνει προβλήματα ροής ρευστών σε διάφορες διαστάσεις, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν ένα ρευστό. Το “Fluent” έχει τη δυνατότητα της προσομοίωσης διαφορετικών τύπων ρευστών όπως το ασυμπίεστο ή συμπιεστό ρευστό, το ιδεατό ή παχύρρευστο ρευστό, και ροών όπως η στρωτή ή η τυρβώδης ροή.



Σχήμα 3.3: Οριακές συνθήκες μοντέλου και διάταξη υπολογιστικού πλέγματος (Mesh).

Στη αρχή, μέσω των επιλογών του “Fluent” «διαβάστηκε» το αρχείο τύπου “Case Files” το οποίο δημιουργήθηκε στο “Gambit” και περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα σχεδιαστικά/κατασκευαστικά δεδομένα που χρειάζονται, ώστε να προχωρήσει η διαδικασία της αριθμητικής επίλυσης της ροής στην γεωμετρική διάταξη. Ακολούθως, μέσω της επιλογής: Grid→Check, γίνεται έλεγχος ορθότητας και κατασκευαστικής αρτιότητας του πλέγματος που έχει δημιουργηθεί στο “Gambit”.

Από την επιλογή : Grid→Info→size, πραγματοποιείται ενημέρωση για το συνολικό πλήθος των κελιών (cells), επιφανειών (faces) και σημείων (nodes) του πλέγματος (βλ. σχήμα 3.4) όπως είναι γνωστό, όσο πυκνότερο είναι το υπολογιστικό πλέγμα τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος αυτού.



Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	437400	879770	442367	1

Σχήμα 3.4: Πλήθος κελιών (cells), επιφανειών (faces) και σημείων (nodes) του πλέγματος (Mesh).

Στην συνέχεια, από τις επιλογές του “Define” καθορίστηκε το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για τη λύση, το μοντέλο της τύρβης, το υλικό που ρέει στη γεωμετρική διάταξη, οι συνθήκες λειτουργίας και οι οριακές συνθήκες όπως φαίνεται παρακάτω:

- **Για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη λύση:**

Define →Models→Solver, επιλέγοντας τις ακόλουθες επιλογές:

Solver: Pressure Based.

Formulation: Implicit,

Space: 2D

Velocity Formulation: Absolute,

Gradient Option: Green-Gauss Cell Based,

Porous Formulation : Superficial Velocity.

- **Για το μοντέλο της τύρβης:**

Define→Models→Viscous, επιλέγοντάς: Model: k-epsilon.

- **Για το υλικό που ρέει στη γεωμετρική διάταξη:**

Define→Material, επιλέγοντας τα παρακάτω:

Material Type: Fluid

Fluent Fluid Materials: Air, με ιδιότητες:

Density ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1,225, constant.

Viscosity ( $\text{kg/m-s}$ ) = 1.7894e-05, constant.

• Για τις συνθήκες λειτουργίας:

Define→Operation Conditions, επιλέγοντας:

Operation Pressure (Pascal) = 101325,

Gravity =  $\hat{U}$

Gravitational Acceleration→ $\gamma$  ( $\text{m/s}^2$ ) = -9, 81

Specified Operation Density =  $\hat{U}$

Operation Density ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1,225

Στην συνέχεια ακολουθεί ο ορισμό των οριακών συνθηκών (boundary conditions) που συνδέεται άμεσα με τις οριακές συνθήκες των συνόρων (boundary types) της γεωμετρικής διάταξης που τέθηκαν στο “Gambit”.

• Για τις οριακές συνθήκες:

Define→Boundary Conditions, επιλέγοντας τα παρακάτω:

Zone: inlet

Type: velocity-inlet, Zone name: inlet

Momentum→

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary,

Reference Frame: Absolute,

Velocity Magnitude (m/s): 20, constant

Turbulence→

Specification Method: K and Epsilon

Turbulent Kinetic Energy ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) = 1, constant

Turbulent Dissipation Rate ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) = 1, constant

Zone: outlet

Type: pressure-outlet, Zone name: outlet

Momentum→

Gauge Pressure (Pascal): 0, constant

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary,  
Turbulence→  
Specification Method: K and Epsilon  
Backflow Turbulent Kinetic Energy ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) = 1, constant  
Backflow Turbulent Dissipation Rate ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) = 1, constant

Zone: Fluid

Type: fluid, Zone name: fluid, Material name: air,  
Motion→  
Motion type: Stationery.

Zone: Porous

Type: porous-jump, Zone name: porous,  
Face Permeability ( $\text{m}^2$ ):  $6.8\text{e-}10$   
Porous Medium Thickness (mm): 10  
Pressure-Jump Coefficient ( $C^2$ ) (1/m): 53000

Zone: Wall

Type: wall, Zone name: wall,  
Adjacent Cell Zone: fluid  
Shadow Face Zone: wall-shadow  
Momentum→  
Wall Motion: Stationary Wall  
Shear Condition: No slip  
Wall Roughness→  
Roughness Height (mm): 0, constant  
Roughness Constant: 0, constant

Zone: Fan

Type: fan, Zone name: fan,  
Pressure-jump Specification→  
Reverse Fan Direction Zone Average Direction :  $\vec{U}$   
X= -1, Y=0, Z=0,

Profile Specification of Pressure-Jump:  $\dot{U}$

Pressure-Jump Profile (Pascal): 1000, constant

Στην συνέχεια ακολουθεί ο καθορισμός της μεθόδου επίλυσης και από τις επιλογές του “Solve” επιλέχθηκαν:

- Solve→Controls→Solution:

Equations: Flow Turbulence

Pressure-Velocity Coupling: SIMPLE

Under-Relaxation Factors: Pressure=0, 3

Density= 1

Body Forces= 1

Momentum= 0, 7

Turbulent Kinetic Energy= 0, 8

Turbulent Dissipation Rate= 0, 8

Turbulent Viscosity=1

Discretization: Pressure: Standard

Momentum: Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy= Second Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate= Second Order Upwind

- Solve→Monitors→Residual:

Residual: continuity / x-velocity / y-velocity / z-velocity / k / epsilon:

Absolute Criteria= 1e-06

- Solve→Initialize→ Initialize:

Compute From: inlet,

Reference Frame: Relative to Cell Zone.

Στο σημείο αυτό , επιλέχθηκε ως αρχή της μεθόδου αριθμητικής επίλυσης την είσοδο «inlet».

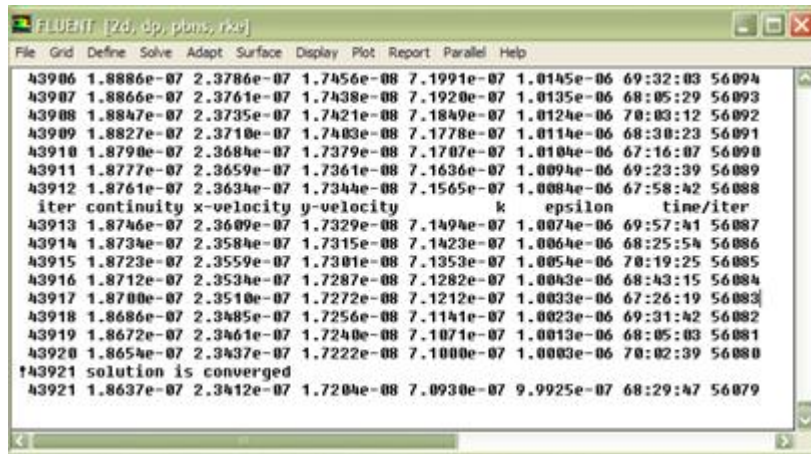
- Solve→Iterate:

Number of iterations= 60.000

Reporting interval = 1

UDF Profile Update Interval=1.

Το πρόγραμμα ξεκινάει το «τρέξιμο» μέχρι την εύρεση της λύσης, η οποία (βλ. εικόνα 1.4) επέρχεται μετά από 43.921 επαναλήψεις.



```
FLUENT [2d, dp, plots, rx2]
File  Grid  Define  Solve  Adapt  Surface  Display  Plot  Report  Parallel  Help
43906 1.8886e-07 2.3786e-07 1.7456e-08 7.1991e-07 1.0145e-06 69:32:03 56094
43907 1.8866e-07 2.3761e-07 1.7438e-08 7.1920e-07 1.0135e-06 68:05:29 56093
43908 1.8847e-07 2.3735e-07 1.7421e-08 7.1849e-07 1.0124e-06 70:03:12 56092
43909 1.8827e-07 2.3710e-07 1.7403e-08 7.1778e-07 1.0114e-06 68:30:23 56091
43910 1.8790e-07 2.3684e-07 1.7379e-08 7.1707e-07 1.0104e-06 67:16:07 56090
43911 1.8777e-07 2.3659e-07 1.7361e-08 7.1636e-07 1.0094e-06 69:23:39 56089
43912 1.8761e-07 2.3634e-07 1.7344e-08 7.1565e-07 1.0084e-06 67:58:42 56088
iter continuity x-velocity y-velocity k epsilon time/iter
43913 1.8746e-07 2.3609e-07 1.7329e-08 7.1494e-07 1.0074e-06 69:57:41 56087
43914 1.8734e-07 2.3584e-07 1.7315e-08 7.1423e-07 1.0064e-06 68:25:54 56086
43915 1.8723e-07 2.3559e-07 1.7301e-08 7.1353e-07 1.0054e-06 70:19:25 56085
43916 1.8712e-07 2.3534e-07 1.7287e-08 7.1282e-07 1.0043e-06 68:43:15 56084
43917 1.8700e-07 2.3510e-07 1.7272e-08 7.1212e-07 1.0033e-06 67:26:19 56083
43918 1.8686e-07 2.3485e-07 1.7256e-08 7.1141e-07 1.0023e-06 69:31:42 56082
43919 1.8672e-07 2.3461e-07 1.7240e-08 7.1071e-07 1.0013e-06 68:05:03 56081
43920 1.8654e-07 2.3437e-07 1.7222e-08 7.1000e-07 1.0003e-06 70:02:39 56080
!43921 solution is converged
43921 1.8637e-07 2.3412e-07 1.7204e-08 7.0930e-07 9.9925e-07 68:29:47 56079
```

Εικόνα 1.4: Εύρεση της λύσης από το πρόγραμμα «Fluent».

Στην συνέχεια, από τις επιλογές του “Plot” εξήχθηκαν τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα “Fluent” στο πρόγραμμα “Excel” για επεξεργασία. Τα αποτελέσματα που εξήχθηκαν είναι η ολική πίεση ( $P_{tot}$ ), στατική πίεση ( $P_{st}$ ) και την ταχύτητα του αέρα ( $U$ ).

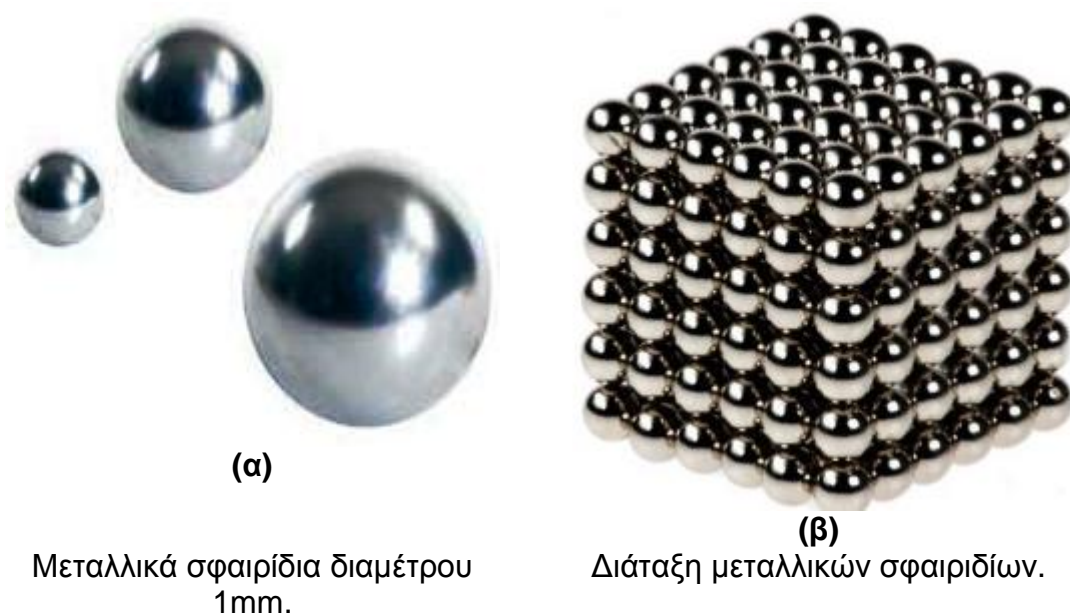
Οι τιμές των αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Αυτό όμως που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα είναι οι μεταβολές τους και γι’ αυτό στην ανάλυση που ακολουθεί όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αδιάστατα, δηλαδή επεξεργάζονται οι μεταβολές των τιμών αυτών.

## Αποτελέσματα – Υπολογισμοί

### Γενικά

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε αδιάστατη μορφή, με ολικό μήκος μοντέλου  $X_0=3240\text{mm}$  και ταχύτητα εισόδου  $U_0=20\text{m/s}$ . Το  $Y_0$  αντιπροσωπεύει το ολικό ύψος αλλά οι τιμές του είναι διαφορετικές σε κάθε επίπεδο και θα αναφερθούν παρακάτω στα αντίστοιχα επίπεδα. Στην περίπτωση του απλού μοντέλου η μέση ολική πίεση εισόδου έχει τιμή  $\bar{P}_{\text{tot.inlet}} = -894,1800494$  Pascal και στην περίπτωση του μοντέλου με πορώδες υλικό έχει τιμή  $\bar{P}_{\text{tot.inlet}} = -889,7771358$  Pascal. (Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα “Fluent” έχει ως βάση πίεσης την ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή η τιμή  $P=0$  Pascal είναι η ατμοσφαιρική πίεση).

Το πορώδες που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε αποτελείται από ανοξείδωτα μεταλλικά σφαιρίδια με διάμετρο  $D=1\text{mm}$  (βλ. σχήμα 3.5.α).



Σχήμα 3.5: Πορώδες υλικό.

Τα σφαιρίδια είναι ομοιόμορφα τακτοποιημένα (βλ. σχήμα 3.5β) σε άξονες X,Y,Z, δημιουργώντας ένα ομογενές πορώδες υλικό στις διαστάσεις του διαχύτη που έχει το μοντέλο μας. Τα χαρακτηριστικά που έχει το συγκεκριμένο πορώδες υλικό είναι :

- διαπερατότητα επιφανείας (face permability):  $6,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$
- συντελεστή μεταβολής της πίεσης (pressure-jump coefficient)( $c_2$ ):  $53000 \frac{1}{\text{m}}$

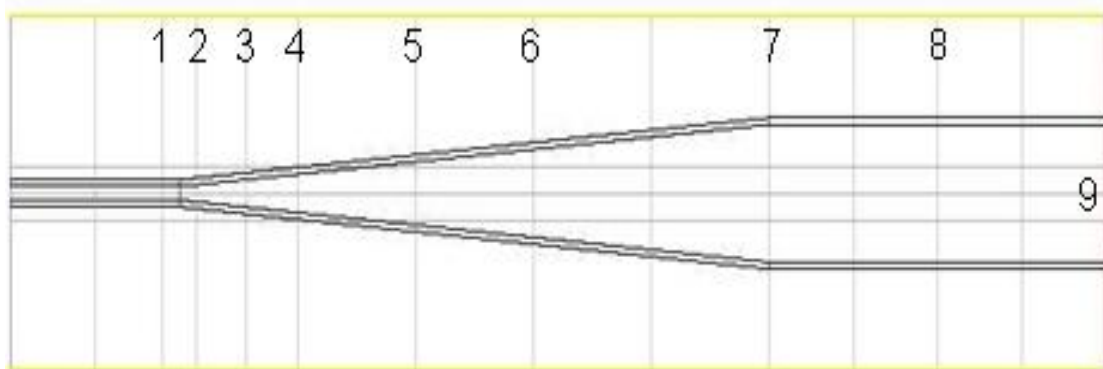
Αυτοί οι παράμετροι τέθηκαν στο υπολογιστικό πρόγραμμα “Fluent” μαζί με το πάχος του πορώδες υλικού, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 10mm.

Για να τρέξουμε το μοντέλο μας στο πρόγραμμα CFD “Fluent” τοποθετήσαμε μια πτερωτή (fan) στην είσοδο του διαχύτη, με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του στροβίλου που πραγματικά είχε το μοντέλο μας. Στο σχήμα 3.6.2 παρατηρούμε το σημείο που είναι τοποθετημένη η πτερωτή (fan), την είσοδο και έξοδο του αέρα στο μοντέλο, τα τοιχώματα του αγωγού πριν και μετά τον διαχύτη, τα τοιχώματα του διαχύτη όπου στην μια περίπτωση είναι συμπαγές υλικό και στην άλλη πορώδες υλικό, την κλίση του διαχύτη και οι πραγματικές διαστάσεις του μοντέλου.

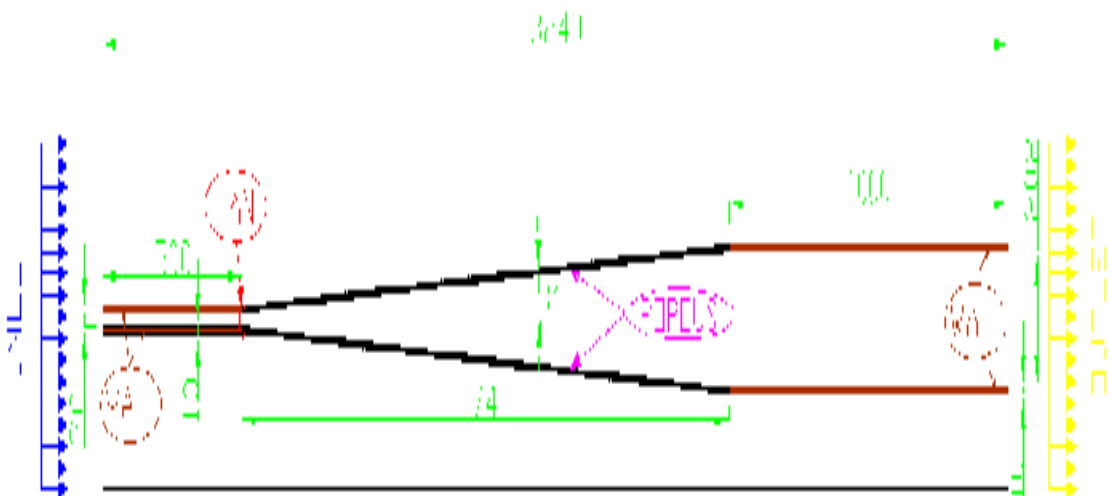
Το μοντέλο το έχουμε χωρίσει σε δεκατέσσερα κάθετα (κατ’ ύψος) και τρία οριζόντια (κατά πλάτος) επίπεδα προς ανάλυση (Σχήμα 3.6.1). Η επιλογή έγινε για να μπορέσουμε να δούμε την κατανομή της ροής και την μεταβολή αυτής. Τα επίπεδα είναι τα εξής:

- Κάθετο επίπεδο 1 στο σημείο  $X/X_0=0,138888888$  και με ολικό ύψος  $Y_0=20\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 50mm πριν την πτερωτή (fan) μέσα στον σωλήνα εισαγωγής.
- Κάθετο επίπεδο 2 στο σημείο  $X/X_0=0,169753086$  και με ολικό ύψος  $Y_0=25,22984\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 50mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη.
- Κάθετο επίπεδο 3 στο σημείο  $X/X_0=0,214506172$  και με ολικό ύψος  $Y_0=39,6\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 195mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη.
- Κάθετο επίπεδο 4 στο σημείο  $X/X_0=0,261728395$  και με ολικό ύψος  $Y_0=56,4\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 348mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη.
- Κάθετο επίπεδο 5 στο σημείο  $X/X_0=0,369135802$  και με ολικό ύψος  $Y_0=92,8\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 696mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη.

- Κάθετο επίπεδο 6 στο σημείο  $X/X_0=0,476543209$  και με ολικό ύψος  $Y_0=129,2\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 1044mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη.
- Κάθετο επίπεδο 7 στο σημείο  $X/X_0=0,691358024$  και με ολικό ύψος  $Y_0=202\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 1740mm μετά την πτερωτή (fan), στο τέλος του διαχύτη.
- Κάθετο επίπεδο 8 στο σημείο  $X/X_0=0,845679012$  και με ολικό ύψος  $Y_0=202\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται 2240mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον σωλήνα εξαγωγής.
- Οριζόντιο επίπεδο 9 στο σημείο  $Y/Y_0=0,5$ , με ολικό ύψος  $Y_0=20\text{mm}$ . Το επίπεδο αυτό βρίσκεται στο κέντρο του μοντέλου, χωρίζοντας το σε δύο συμμετρικά κομμάτια.



1



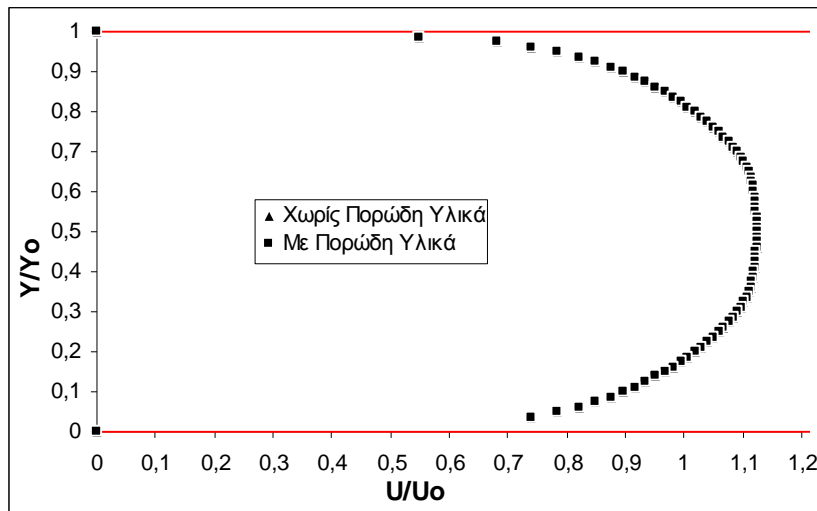
2

Σχήμα 3.6. Πειραματικό μοντέλο (1.Επίπεδα ανάλυσης, 2. Διαστάσεις μοντέλου.)

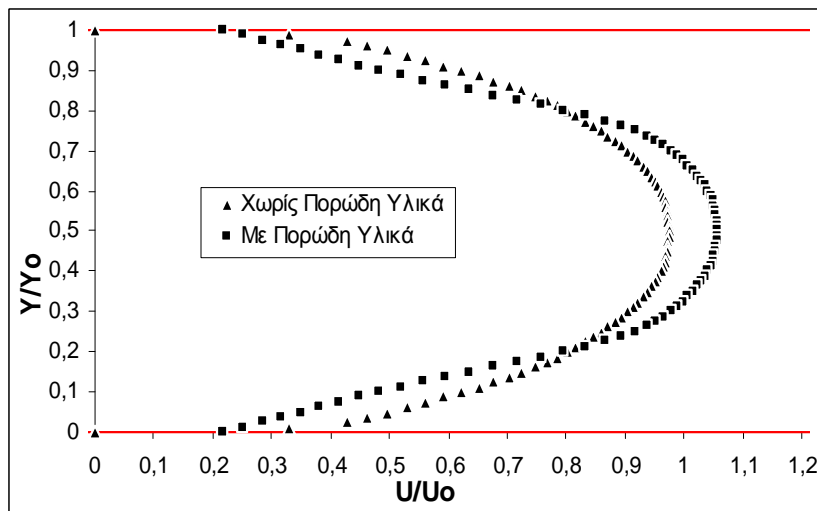


## 1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

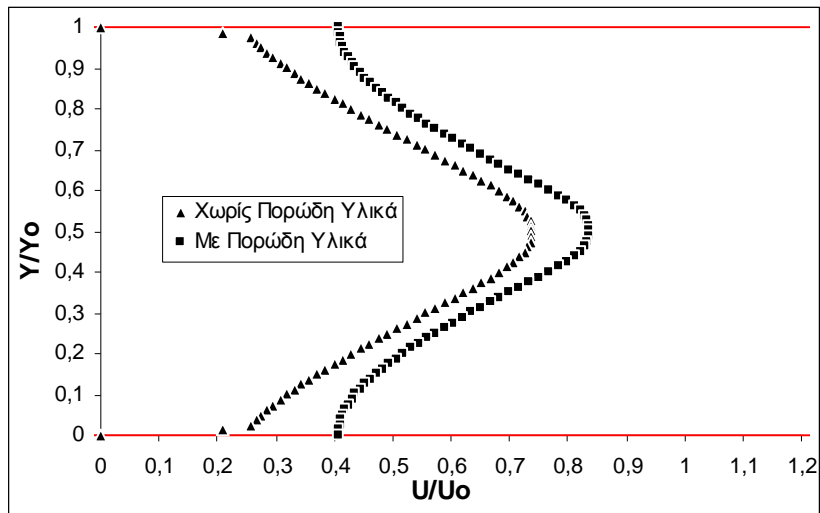
Ø Ακολουθούν τα διαγράμματα της αδιάστατης ταχύτητας  $U/U_0$  του αέρα, (όπου  $U$  είναι η τοπική ταχύτητα στο εκάστοτε επίπεδο και  $U_0$  είναι η ταχύτητα εισόδου του αέρα) ως προς το αδιάστατο ύψος  $Y/Y_0$ , (όπου  $Y$  το τοπικό ύψος του κάθε σημείου στο επίπεδο και  $Y_0$  το συνολικό ύψος του εκάστοτε επίπεδο που έχουμε επιλέξει). Στα διαγράμματα που παραθέτουμε παρακάτω (βλ. διαγράμματα 1.1-1.9) τα σημεία  $Y/Y_0=0$  και  $Y/Y_0=1$  είναι τα όρια του διαχύτη. Στο διάγραμμα 1.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα της αδιάστατης ταχύτητας  $U/U_0$  ως προς το αδιάστατο μήκος του διαχύτη  $X/X_0$ . Στο διάγραμμα αυτό τα σημεία  $X/X_0=0,155$  και  $X/X_0=0,747$  είναι τα όρια του διαχύτη.



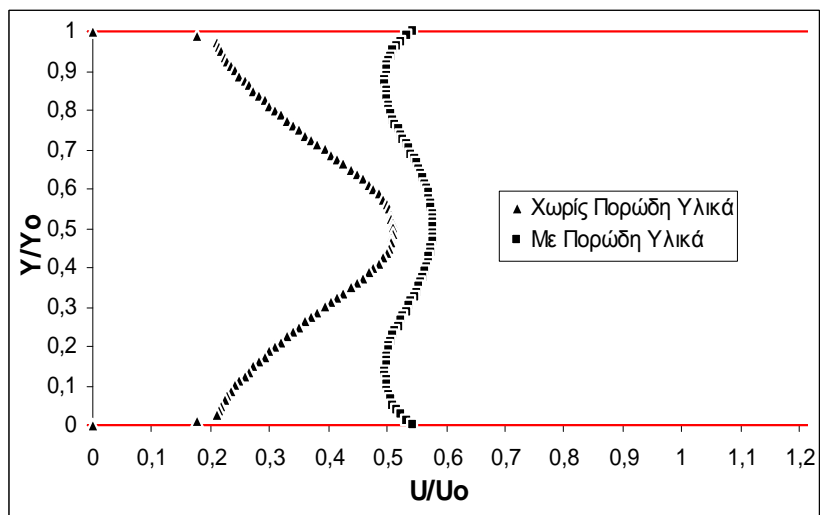
1



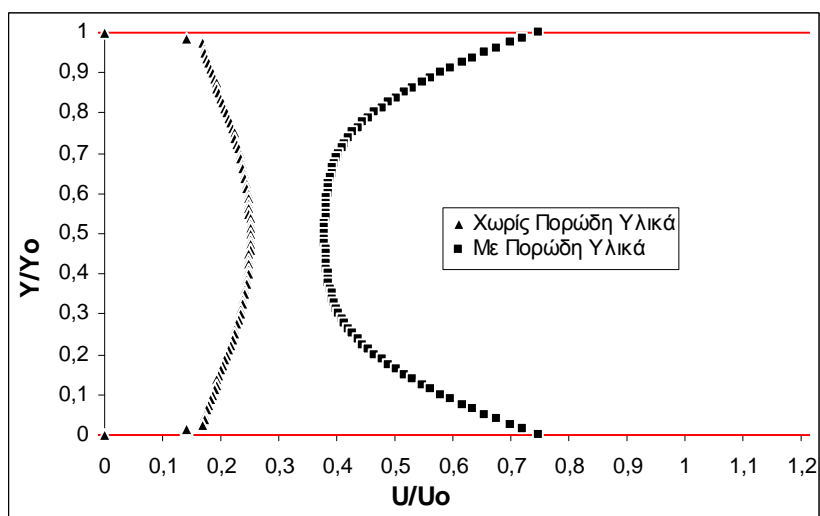
2



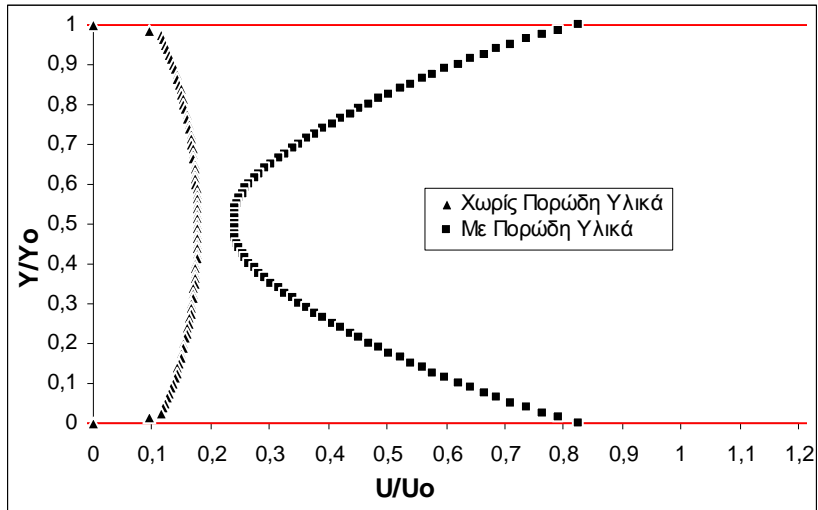
3



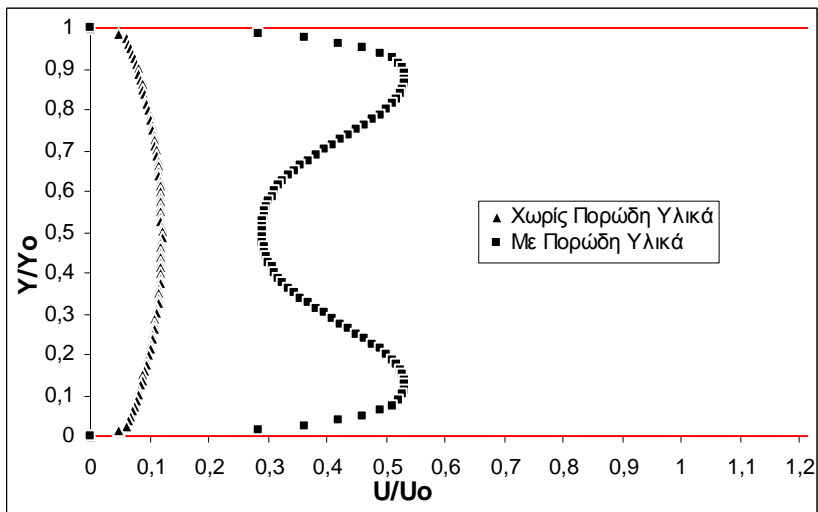
4



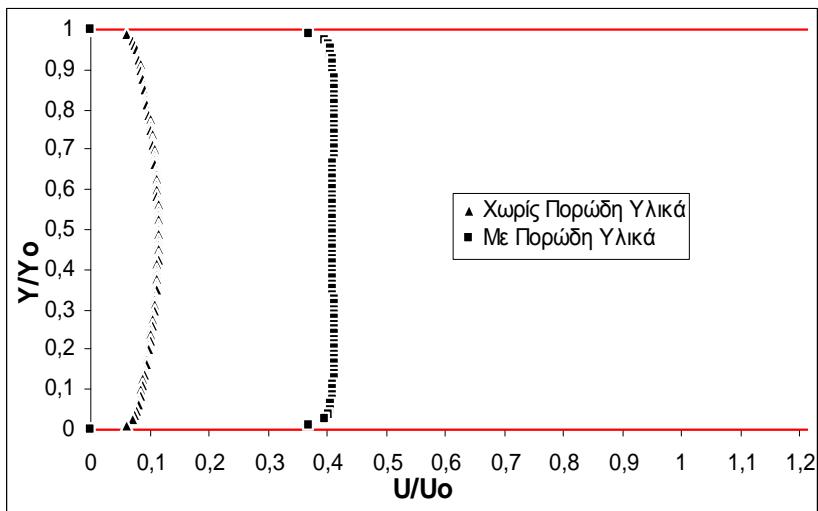
5



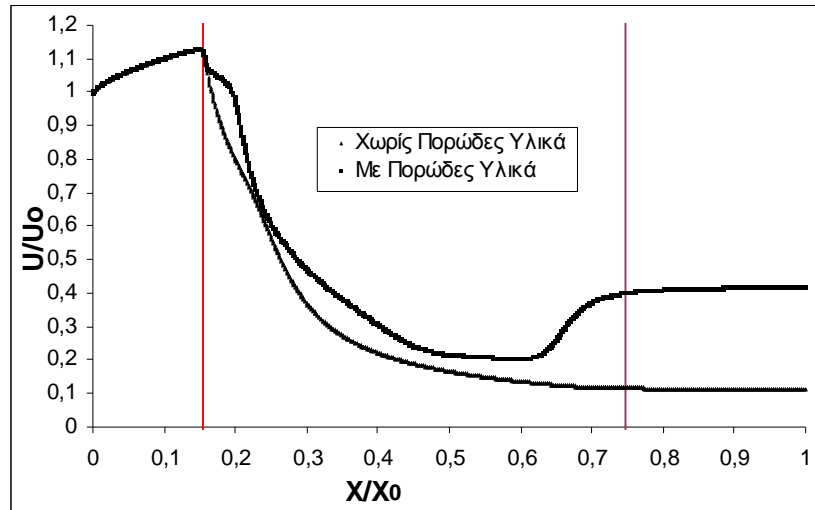
6



7



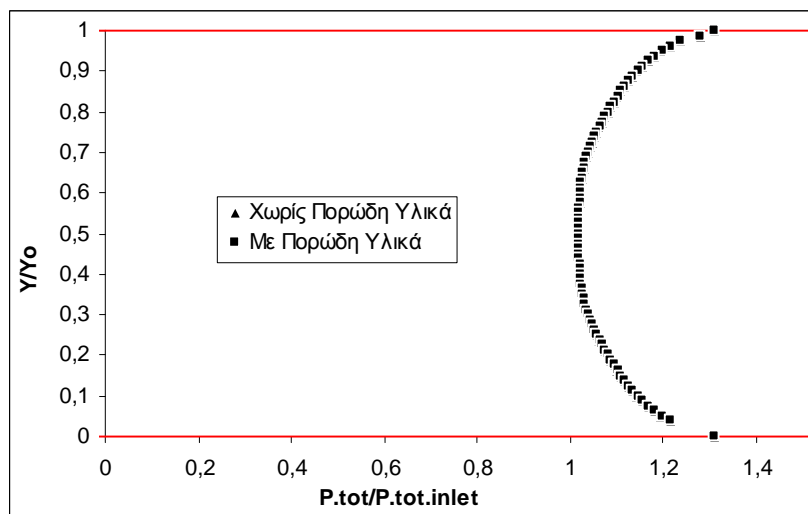
8



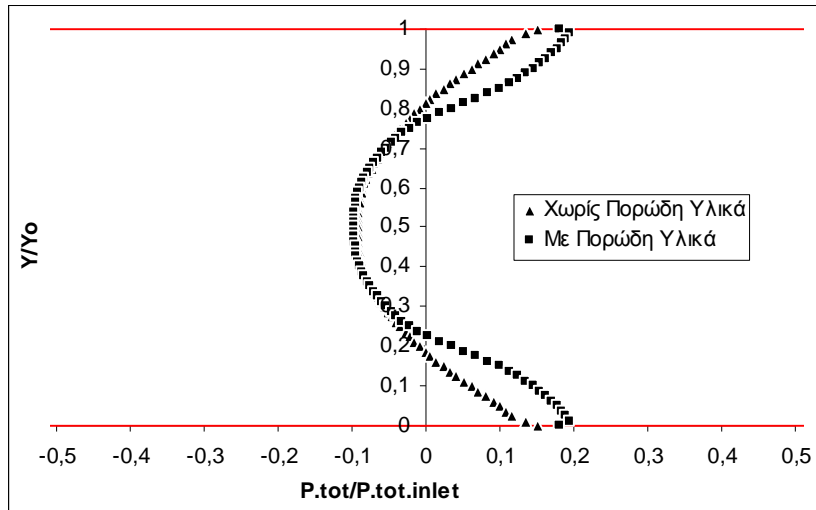
9

Διαγράμματα 1: Διαγράμματα αδιάστατης ταχύτητας.

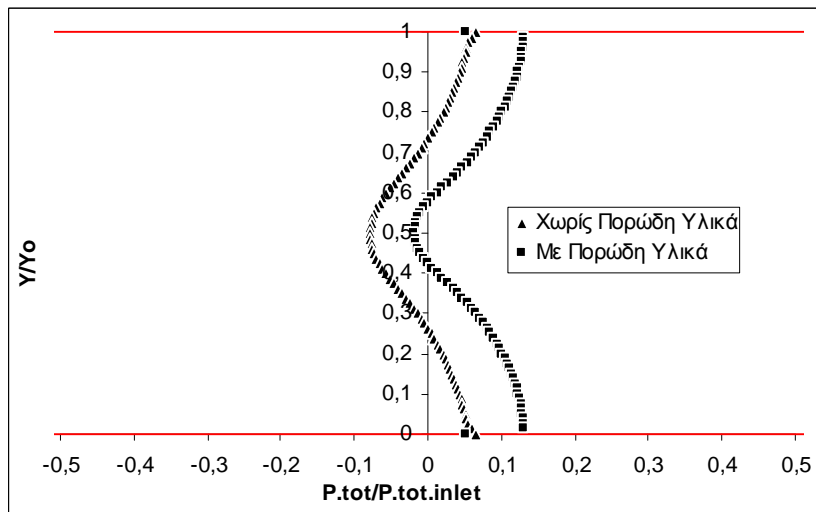
Ø Ακολουθούν τα διαγράμματα της αδιάστατης ολικής πίεσης  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}$  (όπου  $P_{tot}$  είναι η τοπική ολική πίεση στο εκάστοτε επίπεδο, ως προς  $\bar{P}_{tot.inlet}$  που είναι η μέση ολική πίεση στην είσοδο του μοντέλου μας, με τιμή  $\bar{P}_{tot.inlet} = -900\text{Pascal}$ ) ως προς το αδιάστατο ύψος  $Y/Y_0$ . Στα διαγράμματα που παραθέτουμε παρακάτω (βλ. διαγράμματα 2.1-2.9) τα σημεία  $Y/Y_0=0$  και  $Y/Y_0=1$  είναι τα όρια του διαχύτη. Στο διάγραμμα 2.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα της αδιάστατης ολικής πίεσης  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}$  ως προς το αδιάστατο μήκος του διαχύτη  $X/X_0$ . Στο διάγραμμα αυτό τα σημεία  $X/X_0=0,155$  και  $X/X_0=0,747$  είναι τα όρια του διαχύτη.



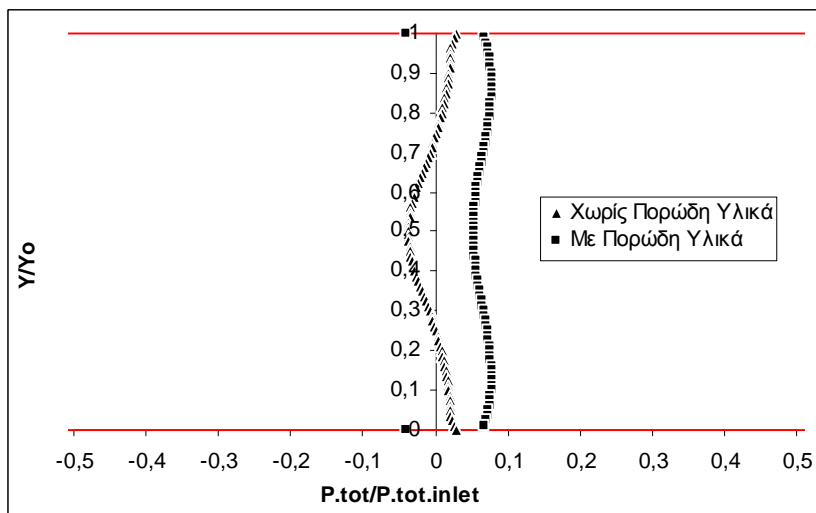
1



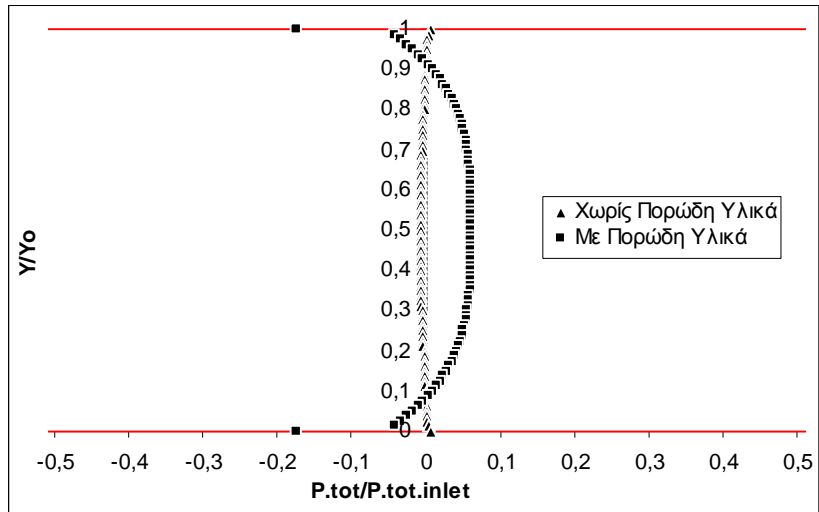
2



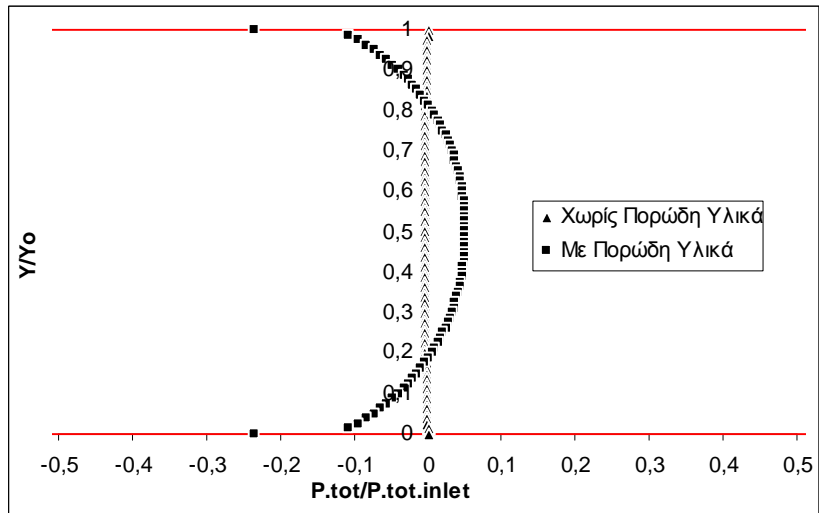
3



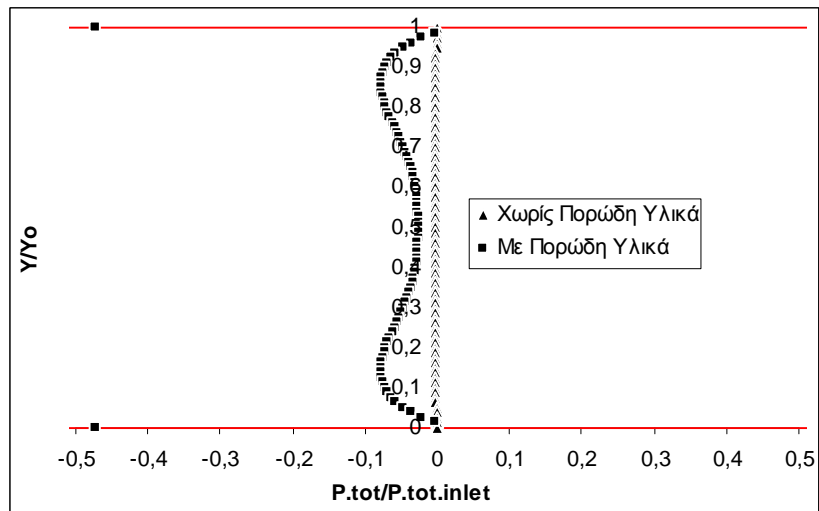
4



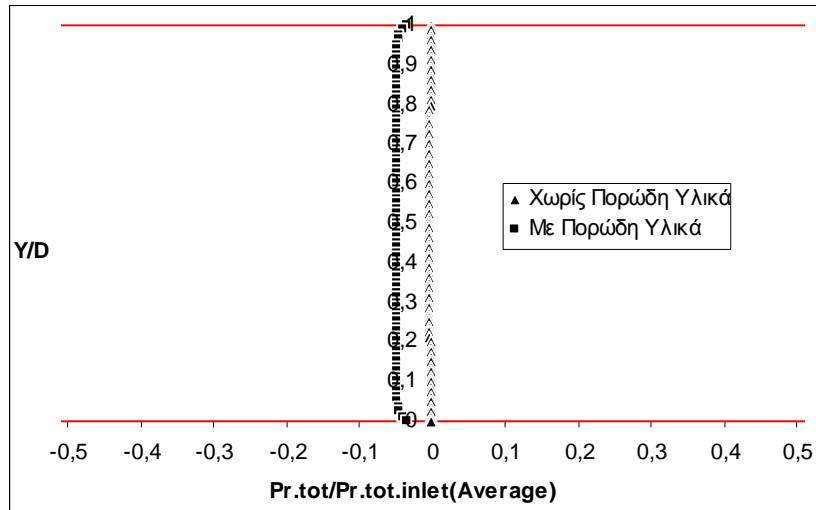
5



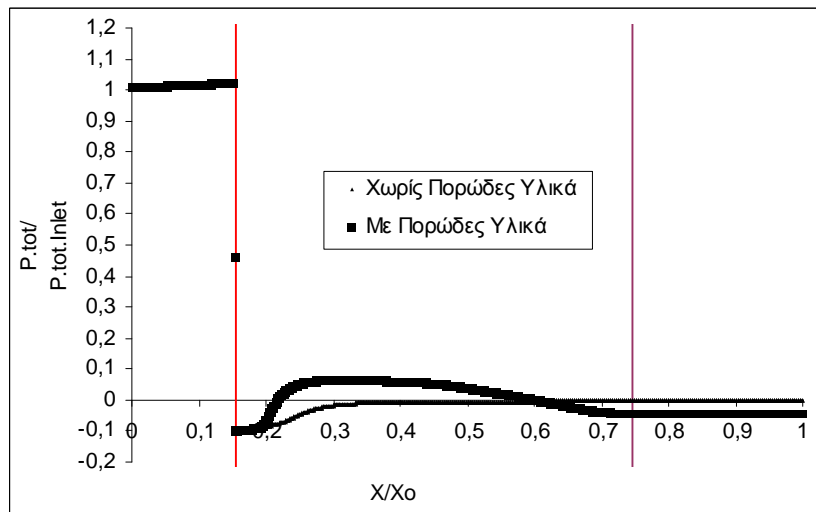
6



7



8

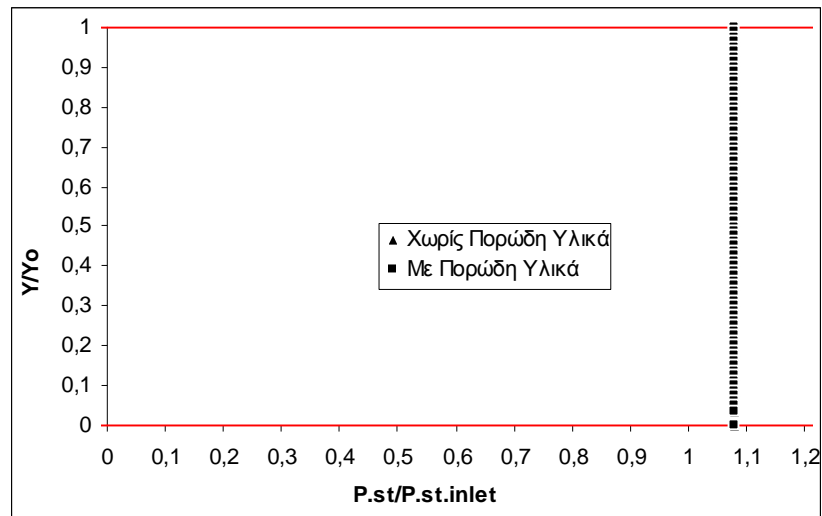


9

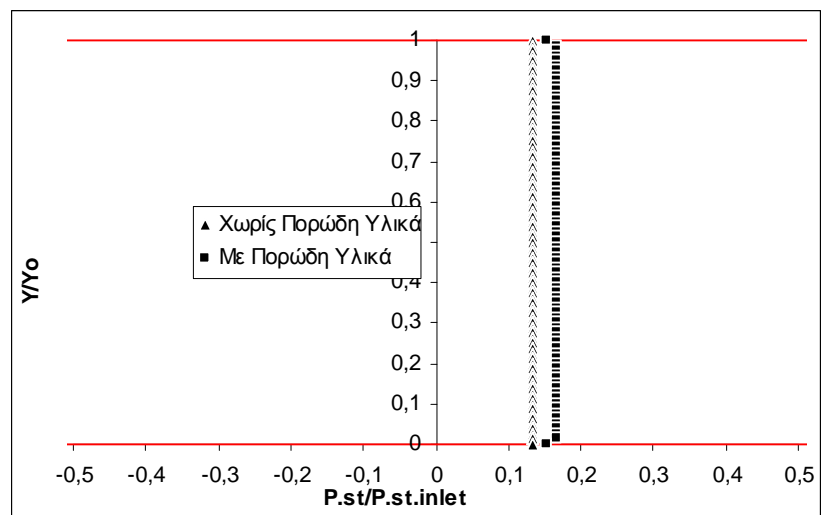
Διαγράμματα 2: Διαγράμματα αδιάστατης ολικής πίεσης.

Ø Ακολουθούν τα διαγράμματα της αδιάστατης στατικής πίεσης  $P_{st}/\bar{P}_{st.inlet}$  (όπου  $P_{st}$  είναι η τοπική στατική πίεση στο εκάστοτε επίπεδο, ως προς  $\bar{P}_{st.inlet}$  που είναι η μέση στατική πίεση στην είσοδο του μοντέλου μας, με τιμή  $\bar{P}_{st.inlet} = -1130 \text{ Pascal}$ ) ως προς το αδιάστατο ύψος  $Y/Y_0$ . Στα διαγράμματα που παραθέτουμε παρακάτω (βλ. διαγράμματα 3.1-2.9) τα σημεία  $Y/Y_0=0$  και  $Y/Y_0=1$  είναι τα όρια του διαχύτη. Στο διάγραμμα 3.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα της αδιάστατης στατικής πίεσης  $P_{st}/\bar{P}_{st.inlet}$  ως προς το αδιάστατο μήκος

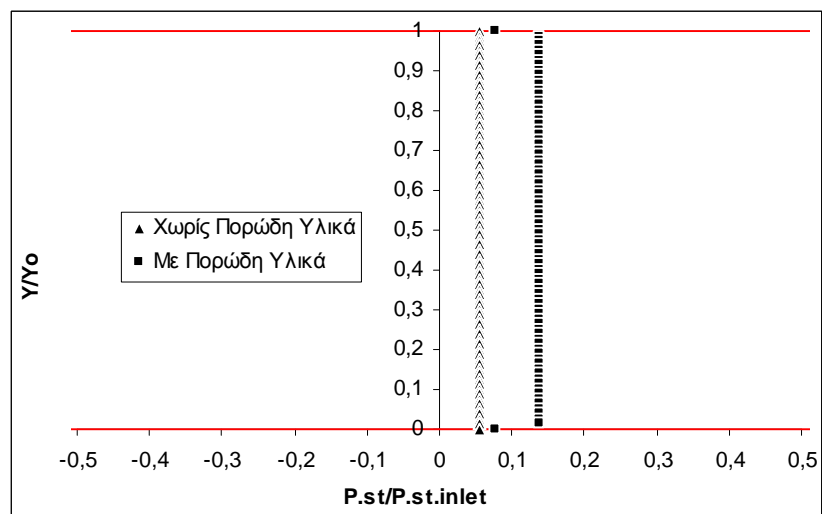
του διαχύτη  $X/X_0$ . Στο διάγραμμα αυτό τα σημεία  $X/X_0=0,155$  και  $X/X_0=0,747$  είναι τα όρια του διαχύτη.



1

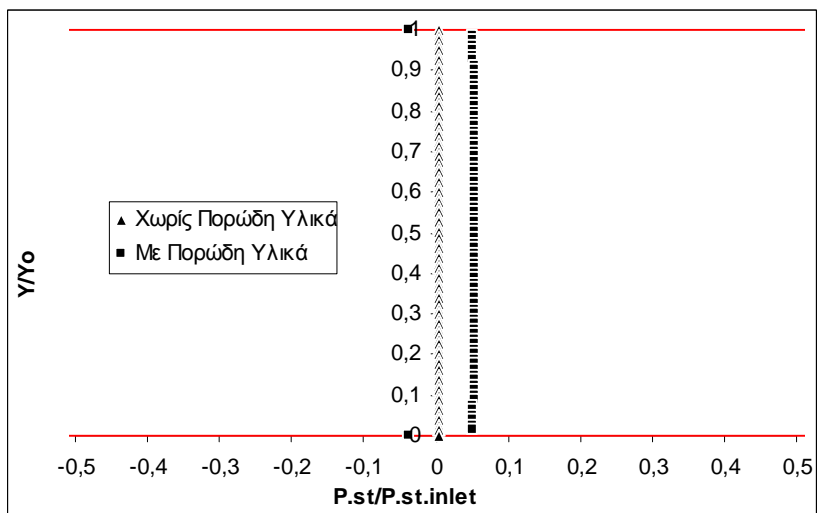
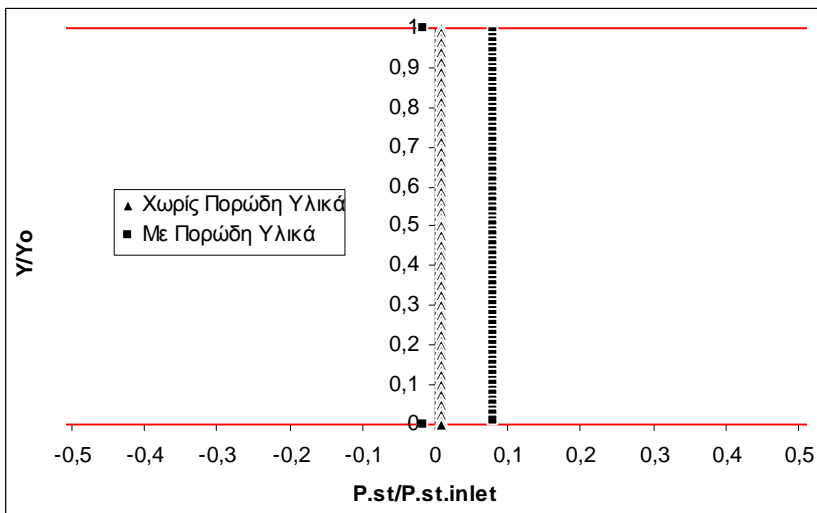
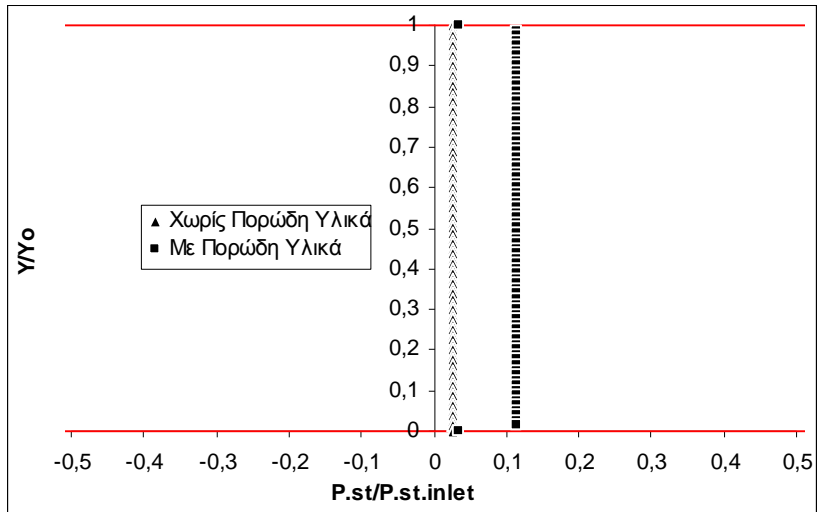


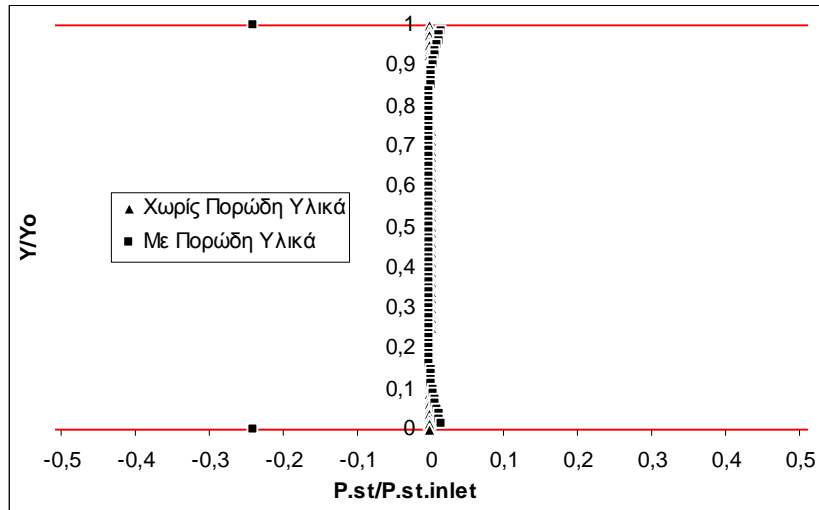
2



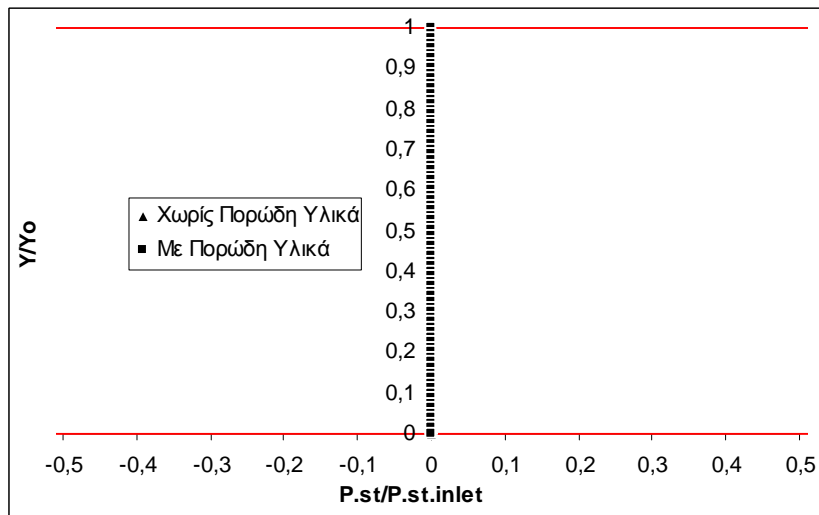
3



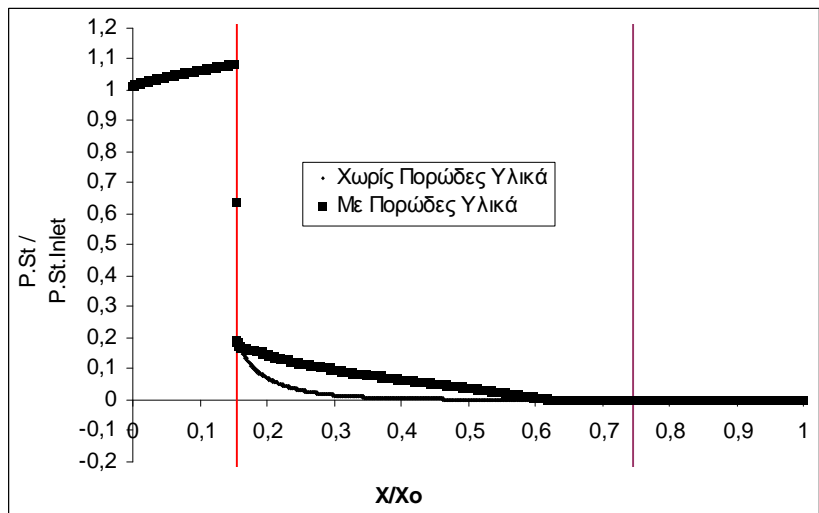




7



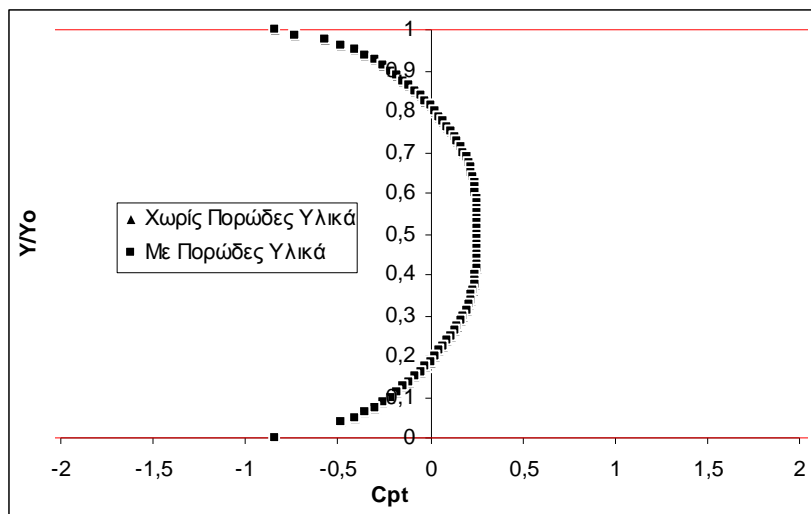
8



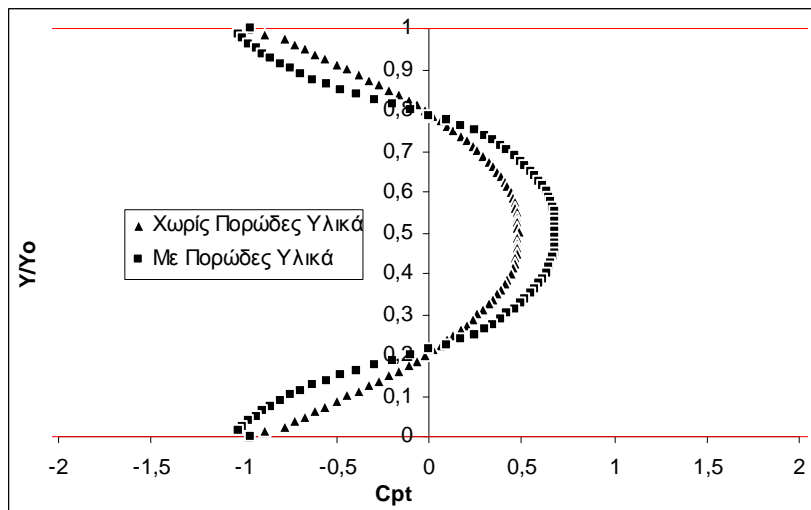
9

Διαγράμματα 3: Διαγράμματα αδιάστατης στατικής πίεσης.

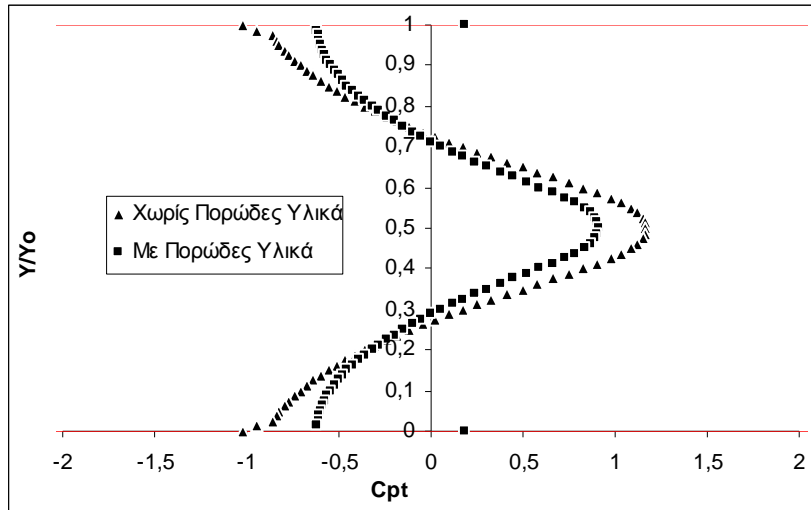
Ø Ακολουθούν τα διαγράμματα του συντελεστή ολικής πίεσης  $C_{p,tot}$ , ως προς το αδιάστατο ύψος  $Y/Y_0$ . Στα διαγράμματα που παραθέτουμε παρακάτω (βλ. διαγράμματα 4.1-4.9) τα σημεία  $Y/Y_0=0$  και  $Y/Y_0=1$  είναι τα όρια του διαχύτη. Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ολικής πίεσης  $C_{p,tot}$  ως προς το αδιάστατο μήκος του διαχύτη  $X/X_0$  όπου τα σημεία  $X/X_0=0,155$  και  $X/X_0=0,747$  είναι τα όρια του διαχύτη.



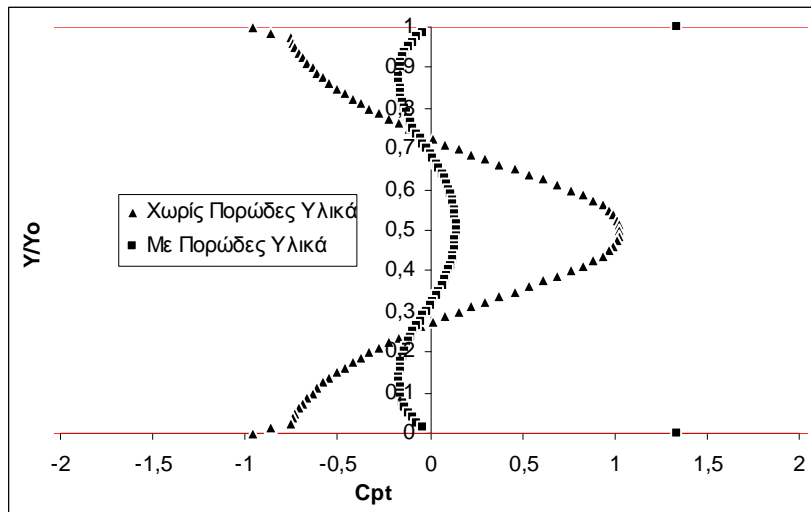
1



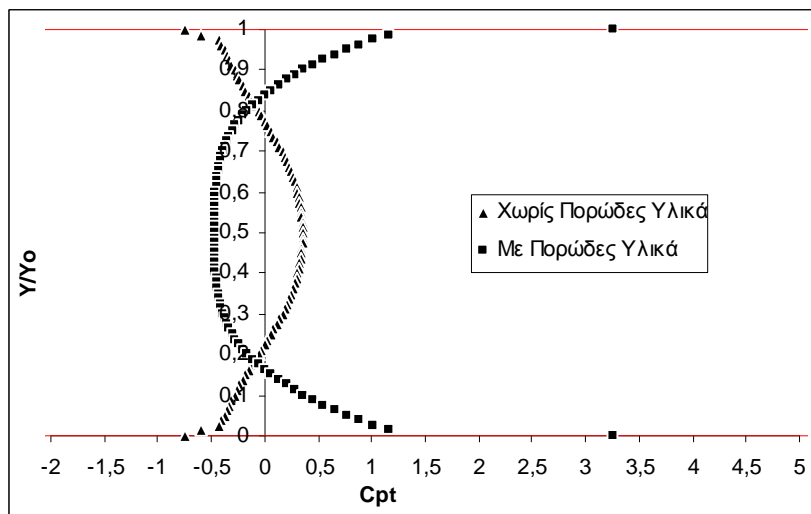
2



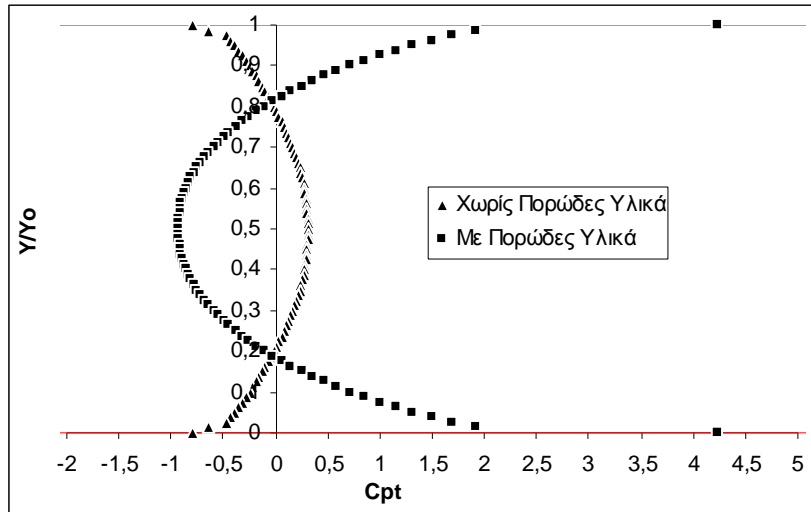
3



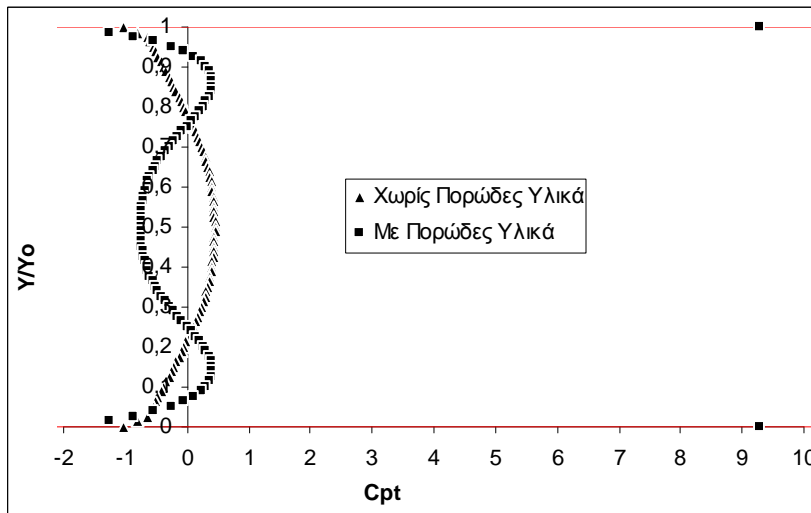
4



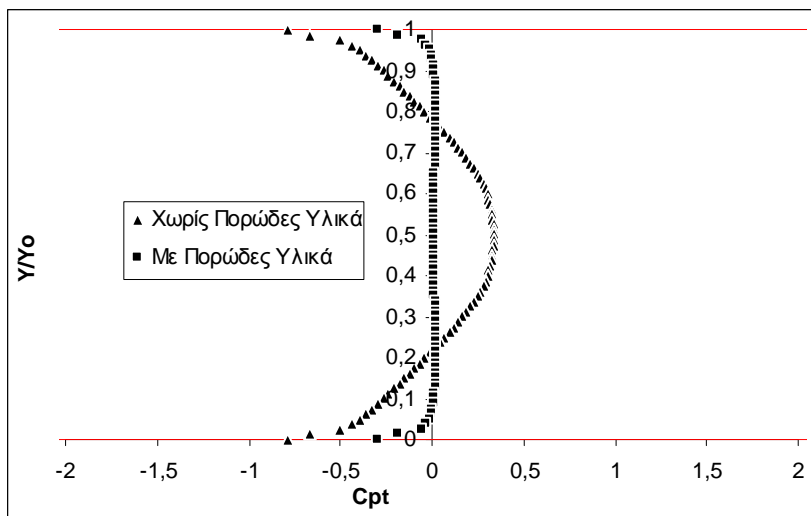
5



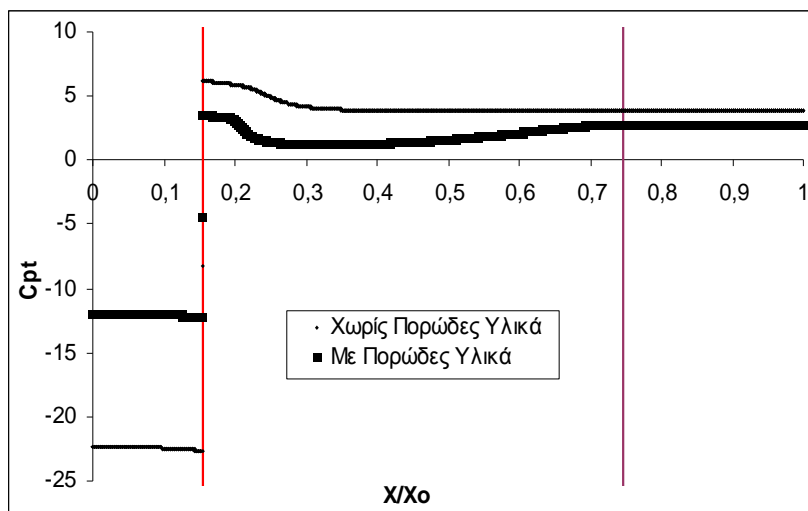
6



7



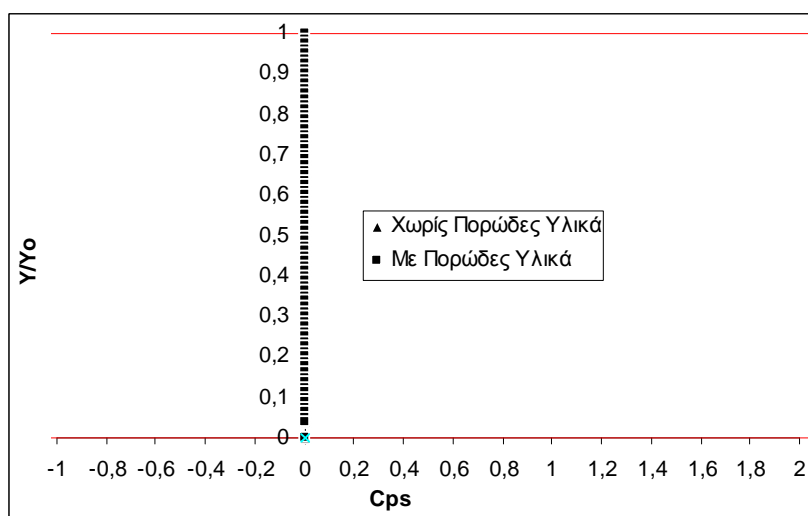
8



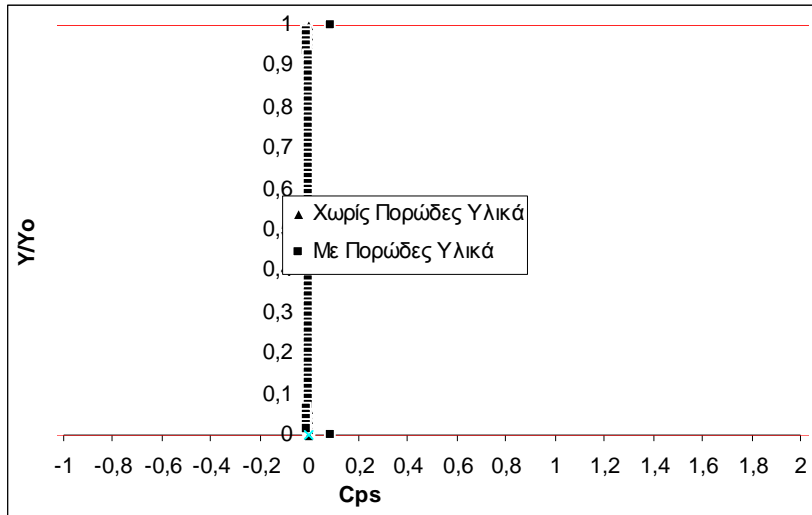
9

Διαγράμματα 4: Διαγράμματα συντελεστή ολικής πίεσης.

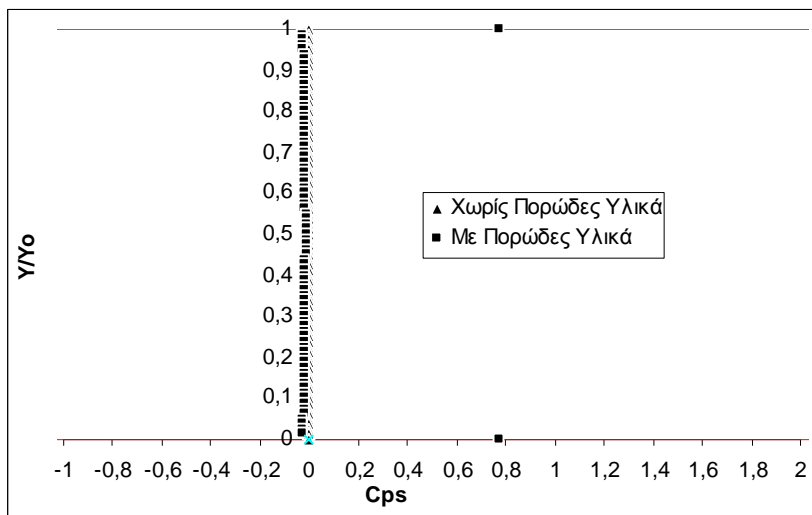
Ø Ακολουθούν τα διαγράμματα του συντελεστή στατικής πίεσης  $C_{p, st}$ , ως προς το αδιάστατο ύψος  $Y/Y_o$ . Στα διαγράμματα που παραθέτουμε παρακάτω (βλ. διαγράμματα 5.1-5.9) τα σημεία  $Y/Y_o=0$  και  $Y/Y_o=1$  είναι τα όρια του διαχύτη. Στο διάγραμμα 5.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή στατικής πίεσης  $C_{p, st}$ , ως προς το αδιάστατο μήκος του διαχύτη  $X/X_o$  όπου τα σημεία  $X/X_o=0,155$  και  $X/X_o=0,747$  είναι τα όρια του διαχύτη.



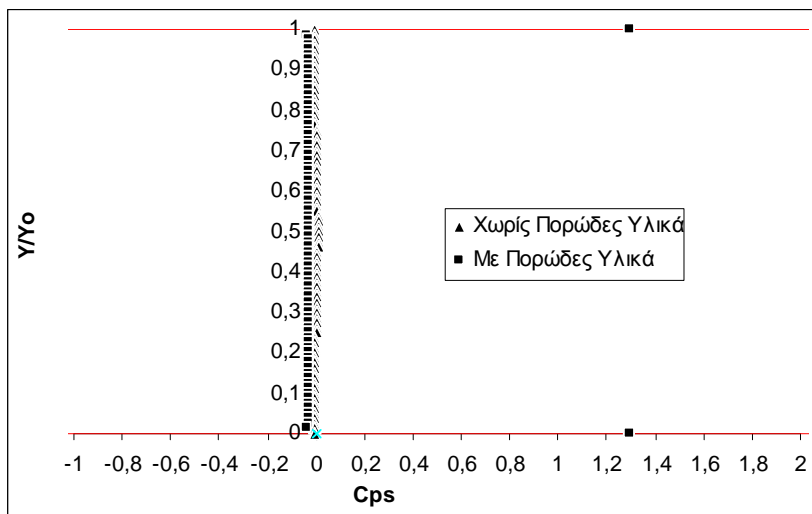
1



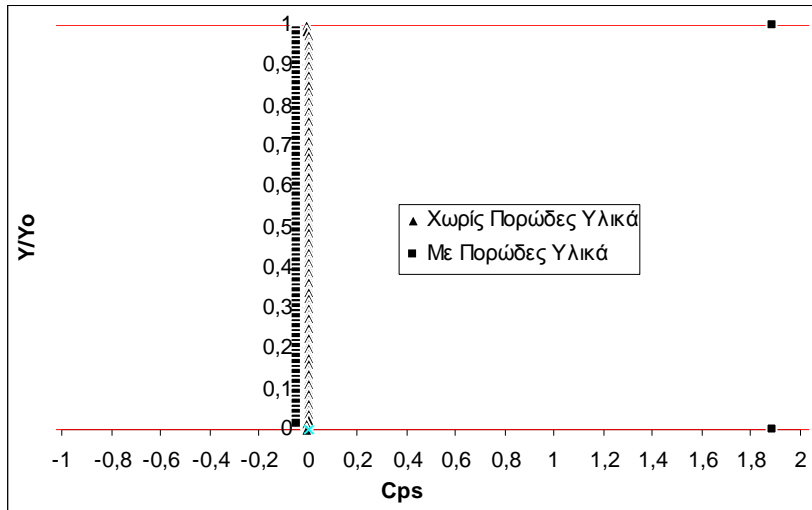
2



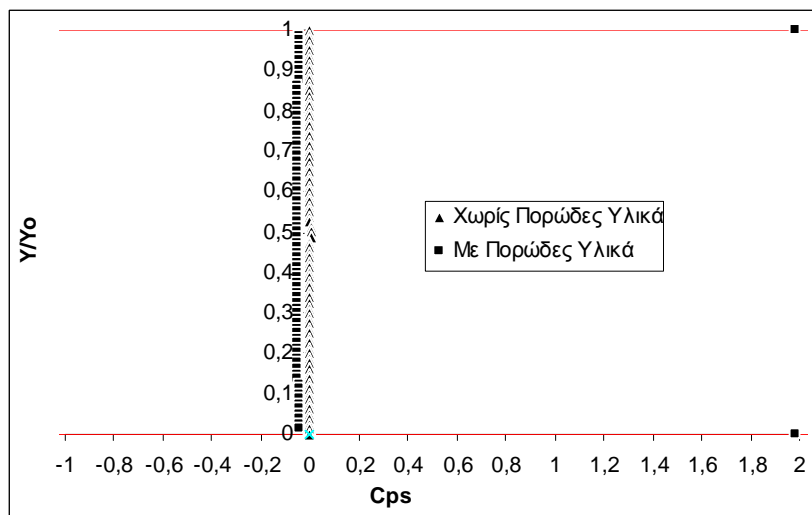
3



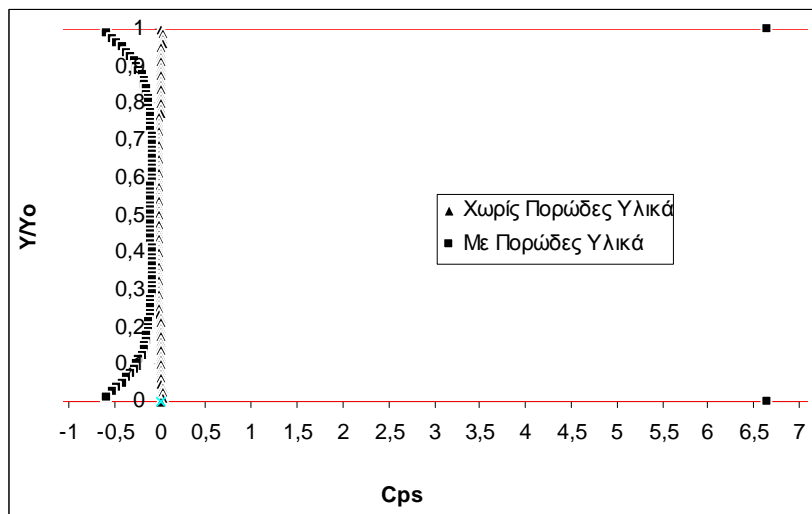
4



5

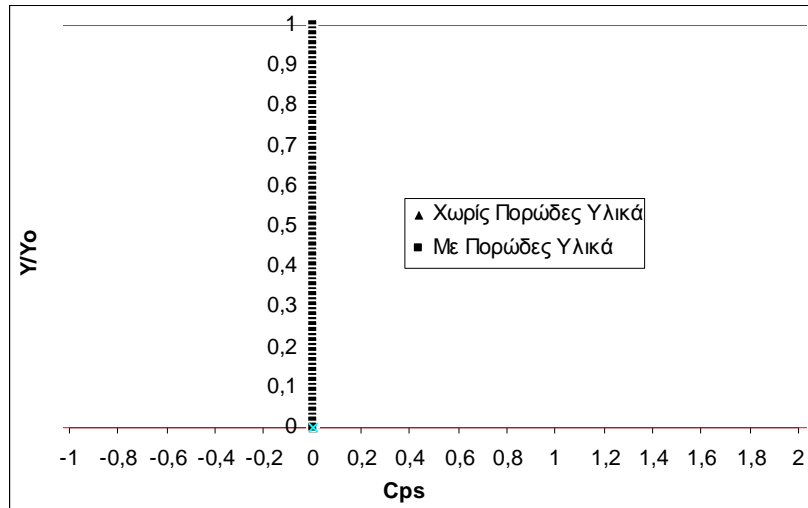


6

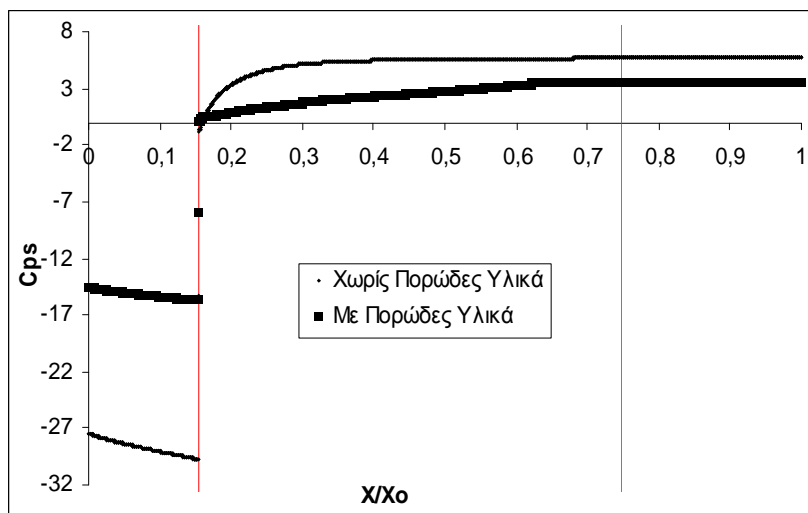


7





8



9

Διαγράμματα 5: Διαγράμματα συντελεστή στατικής πίεσης.

## 2. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στα διαγράμματα 1.1-1.9 παρουσιάζονται οι αδιάστατες τιμές των ταχυτήτων του απλού μοντέλου και του μοντέλου με το πορώδες υλικό. Όπως παρατηρούμε στο επίπεδο 1 στο σημείο  $X/X_0=0,1388889$ , που βρίσκεται 50mm πριν την πτερωτή (Fan) μέσα στον αγωγό εισαγωγής (βλ. διάγραμμα 1.1), δεν παρουσιάζεται διαφορά στην κατανομή της ταχύτητας του αέρα μεταξύ του μοντέλου με το πορώδες υλικό και αυτού χωρίς πορώδες υλικό.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα τοιχώματα δεν είναι από πορώδες υλικό αλλά από συμπαγές υλικό. Στο επίπεδο 2 στο σημείο  $X/X_0=0,169753086$ , δηλαδή 50mm μετά την πτερωτή (fan) εντός του διαχύτη (βλ. διάγραμμα 1.2), παρατηρείται μια αύξηση της μέσης ταχύτητας κατά 10% στο μοντέλο με το πορώδες υλικό σε σχέση με αυτό χωρίς πορώδες υλικό.

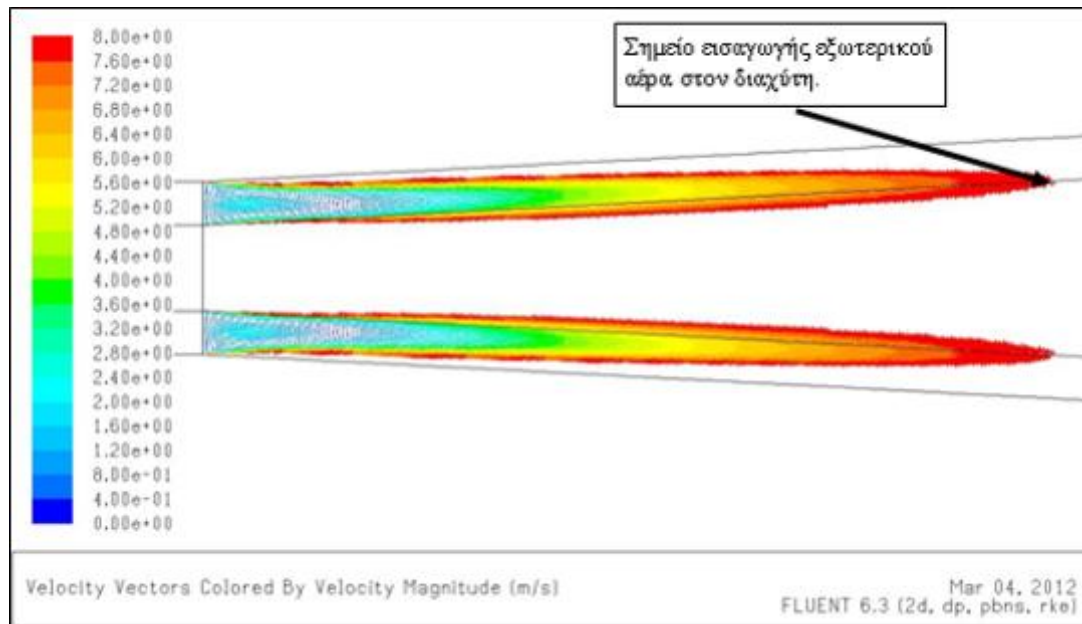
Εξετάζοντας αρχικά το μοντέλο με το πορώδες υλικό και συγκεκριμένα από την είσοδο του διαχύτη μέχρι το επίπεδο 3 στο σημείο  $X/X_0=0,214506172$ , παρατηρούμε ότι ο εσωτερικός αέρας του διαχύτη εισχωρεί στο πορώδες υλικό του τοιχώματος. Παράλληλα, από την εξωτερική πλευρά του τοιχώματος, εισχωρεί και ο εξωτερικός αέρας στο τοίχωμα με το πορώδες υλικό αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή του εσωτερικού αέρα. Αποτέλεσμα αυτού (βλ. εικόνα 1.5.1) είναι ο εσωτερικός αέρας, μέσα στο πορώδες υλικό, να παρασύρεται από τον εξωτερικό αέρα που έχει εισχωρήσει, ώστε και τα δυο ρεύματα αέρα να καταλήγουν μέσα στον διαχύτη,. Από το επίπεδο 3 στο σημείο  $X/X_0=0,214506172$ , ο εσωτερικός αέρας του διαχύτη δεν εισχωρεί πλέον στο τοίχωμα με το πορώδες υλικό γιατί η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα που έχει διαπεράσει το πορώδες υλικό και εισέρχεται μέσα στον διαχύτη, είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του εσωτερικού αέρα κοντά στο τοίχωμα. Ο εξωτερικός αέρας, στο επίπεδο 3, εισχωρεί στο πορώδες υλικό με ταχύτητα  $U/U_0=0,95$  και εξέρχεται από αυτό, μέσα στον διαχύτη, με  $U/U_0=0,4$ , δηλαδή μειώνεται κατά 58% η ταχύτητα του κατά την διέλευση του από το πορώδες υλικό. Η μέγιστη ταχύτητα εισόδου του εξωτερικού αέρα (βλ. εικόνα 1.5.2) μέσα στον διαχύτη παρουσιάζεται στα συμμετρικά σημεία  $X/X_0=0,570987654$ ,  $Y/Y_0=1$  και  $X/X_0=0,570987654$ ,  $Y/Y_0=0$  (με  $Y_0=162\text{mm}$ ) όπου εισέρχεται στο πορώδες υλικό με ταχύτητα  $U/U_0=1$  και εξέρχεται με  $U/U_0=0,9$ .

Σε έναν απλό διαχύτη, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα 1.1-1.8., η μέγιστη ταχύτητα του αέρα παρουσιάζεται στο κέντρο του. Στην περίπτωση του διαχύτη με πορώδες υλικό αυτό δεν ισχύει λόγω του φαινομένου που περιγράψαμε παραπάνω. Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα 1.4 η ταχύτητα στα τοιχώματα του διαχύτη είναι ίση με την μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο αυτού και όσο κινούμαστε κατά μήκος του διαχύτη (βλ διάγραμμα 1.5 και διάγραμμα 3.6) η ταχύτητα του αέρα στα τοιχώματα του είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στο κέντρο του. Μπαίνοντας ο αέρας, μετά το τέλος του

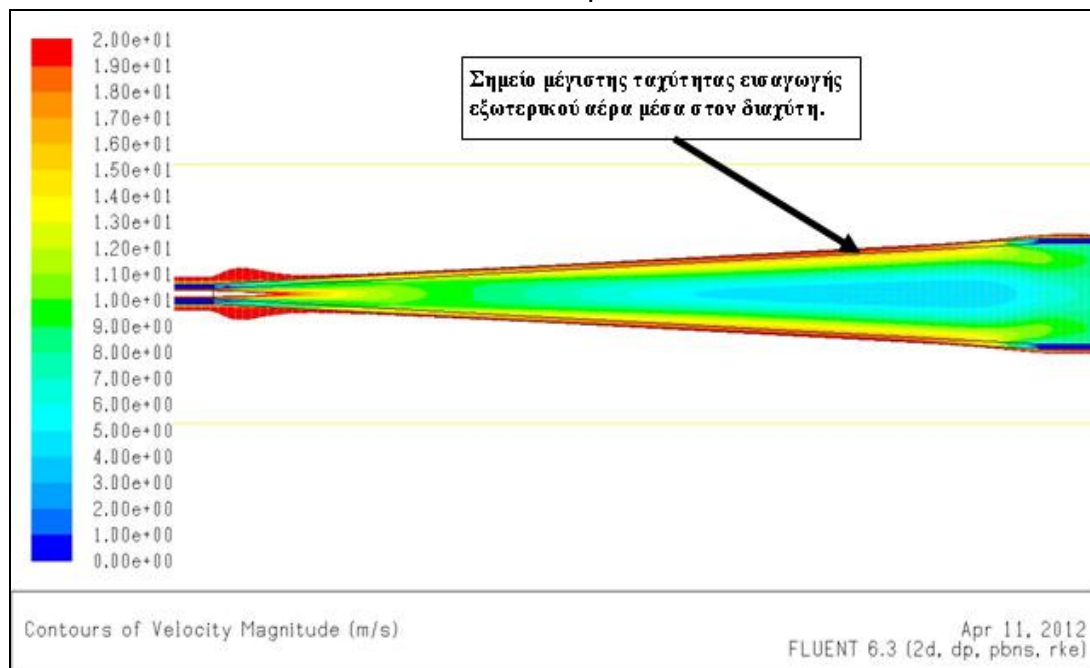
διαχύτη, στον αγωγό (χωρίς πορώδες υλικό), η ταχύτητα στα τοιχώματα του διαχύτη μειώνεται απότομα, σε σχέση με την μέση ταχύτητα του αέρα. Στο επίπεδο 8 στο σημείο  $X/X_0=0,845679012$ , η κατανομή της ταχύτητας και στις δυο περιπτώσεις (απλού μοντέλου και μοντέλου με πορώδες υλικό) έχει την ίδια μορφή αλλά η μέση ταχύτητα του αέρα στο μοντέλο με το πορώδες υλικό είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την μέση ταχύτητα του αέρα στο μοντέλο χωρίς πορώδες.

Στο μοντέλο με το πορώδες υλικό το οριακό στρώμα (βλ. διάγραμμα 1.2), από την αρχή του διαχύτη παρουσιάζει μετατόπιση προς τα εμπρός κάτι το οποίο δεν γίνεται στο απλό μοντέλο. Στο σημείο  $X/X_0=0,262345679$ , δηλαδή 350mm μετά την είσοδο του διαχύτη, παρατηρούμε ότι το οριακό στρώμα έχει μετατοπιστεί  $X/X_0=0,0463$  σε σχέση με το απλό μοντέλο. Στην συνέχεια (βλ. διάγραμμα 1.4 έως διάγραμμα 1.6), καθώς ο εξωτερικός αέρα εισχωρεί μέσω του πορώδους υλικού στο εσωτερικό του διαχύτη, η μετατόπιση αυξάνεται και πλέον το οριακό στρώμα προσθέτει ενέργεια στο αέρα μέσα στον διαχύτη. Στο σημείο  $X/X_0=0,324074074$  δηλαδή 550mm μετά την είσοδο του διαχύτη, παρατηρούμε ότι το οριακό στρώμα έχει μετατοπιστεί  $X/X_0=0,462962963$ . Στο τέλος του διαχύτη (βλ. διάγραμμα 1.7), καθώς ο αέρας εισέρχεται στον αγωγό με τα συμπαγή τοιχώματα, το οριακό στρώμα μετατοπίζεται απότομα προς τα πίσω και αφαιρεί ενέργεια από τον εσωτερικό αέρα όπως ακριβώς συμβαίνει και στο απλό μοντέλο.

Στα διαγράμματα 2.1-2.9 παρουσιάζονται οι αδιάστατες τιμές της ολικής πίεσης του απλού μοντέλου και του μοντέλου με το πορώδες υλικό. Στο επίπεδο 1 στο σημείο  $X/X_0=0,138888888$  (βλ. διάγραμμα 2.1), δηλαδή 50mm πριν την πτερωτή (fan), δεν παρουσιάζονται διαφορές στην ολική πίεση μεταξύ των δυο μοντέλων. Στο επίπεδο 2 στο σημείο  $X/X_0=0,169753086$  (βλ. διάγραμμα 2.2), δηλαδή 50mm μετά την πτερωτή (fan) μέσα στον διαχύτη, παρουσιάζεται και στις δυο περιπτώσεις αύξηση της ολικής πίεσης  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}=1,1$  στο κέντρο του διαχύτη. Στο ίδιο επίπεδο, ολική πίεση του μοντέλου με το πορώδες υλικό, πλησιάζοντας στα τοιχώματα του διαχύτη, μειώνεται περισσότερο από αυτή του απλού μοντέλου με την διαφορά να φτάνει  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}=0,8$ .



1



2

Εικόνα 1.5: Εικόνες από υπολογιστικό πρόγραμμα “Fluent” (1.Σημείο εισόδου εξωτερικού αέρα μέσα στον διαχύτη, 2. Μέγιστη ταχύτητα εισαγωγής εξωτερικού αέρα στον διαχύτη.)

Στο απλό μοντέλο (βλ. διάγραμμα 2.2 έως διάγραμμα 2.8) η ολική πίεση μειώνεται στο κέντρο του διαχύτη και αυξάνεται κοντά στα τοιχώματα, μέχρι να γίνει ομοιόμορφη. Στο μοντέλο με το πορώδες υλικό (βλ. διάγραμμα 2.2 έως διάγραμμα 2.6) η μείωση της ολικής πίεσης στο κέντρο του διαχύτη είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη μέση του επιπέδου και η αύξηση της κοντά στα τοιχώματα του διαχύτη είναι εξίσου μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα να μην

εξομαλύνεται. Η τιμή της (βλ. διάγραμμα 2.7) κοντά στα τοιχώματα φτάνει μέχρι  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}=0,48$  ενώ στο κέντρο του διαχύτη μέχρι  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}=0,7$ .

Στο επίπεδο 8 στο σημείο  $X/X_0=0,845679012$  (βλ. διάγραμμα 2.8), που βρίσκεται 500mm μετά το τέλος του διαχύτη μέσα στον απλό αγωγό, η ολική πίεση, στο μοντέλο με το πορώδες υλικό, έχει σταθεροποιηθεί και οι τοπικές τιμές της είναι ίσες με την μέση τιμή του επιπέδου. Το ίδιο γίνεται και στο απλό μοντέλο με την διαφορά ότι η μέση τιμή της ολικής πίεσης είναι  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}=0,05$  μικρότερη από αυτή του μοντέλου με το πορώδες υλικό.

Στο επίπεδο 9 στο σημείο  $Y/Y_0=0,5$  (με  $Y_0=20mm$ ) (βλ. διάγραμμα 2.9) το μοντέλο χωρίζεται σε δύο συμμετρικά επίπεδα (κατά μήκος) και παρατηρούμε την κατανομή της ολικής πίεσης στο κέντρο του. Όπως προαναφέραμε παρατηρούμε την αύξηση της ολικής πίεσης και στις δυο περιπτώσεις, στην εισόδου του διαχύτη, κατά την διέλευση του αέρα από την πτερωτή (fan). Μέσα και κατά μήκος του διαχύτη η ολική πίεση του μοντέλου με το πορώδες υλικό μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι η ολική πίεση του απλού μοντέλου. Η ολική πίεση του απλού μοντέλου στο σημείο  $X/X_0=0,32$  σταθεροποιείται μέχρι την έξοδο του μοντέλου ενώ στο μοντέλο με το πορώδες υλικό συνεχίζει να μειώνεται μέχρι το σημείο  $X/X_0=0,33$  και στην συνέχεια αυξάνεται μέχρι την τιμή  $P_{tot}/\bar{P}_{tot.inlet}=0,1$  στην έξοδο του διαχύτη και παραμένει στην τιμή αυτή μέχρι την έξοδο του μοντέλου.

Στα διαγράμματα 3.1-3.9 παρουσιάζονται οι αδιάστατες τιμές της στατικής πίεσης του απλού μοντέλου και του μοντέλου με το πορώδες υλικό. Όπως παρατηρούμε στο επίπεδο 1 στο σημείο  $X/X_0=0,138888888$  (βλ. διάγραμμα 3.1), δηλαδή 50mm πριν την πτερωτή (fan), η στατική πίεση δεν παρουσιάζει διαφορές μεταξύ των δυο μοντέλων. Στο επίπεδο 2 στο σημείο  $X/X_0=0,169753086$  (βλ. διάγραμμα 3.2), δηλαδή 50mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη, η στατική πίεση και για στις δυο περιπτώσεις αυξάνεται κατά  $P_{st}/\bar{P}_{st.inlet}=0,95$ . Η αύξηση της στατικής πίεσης συνεχίζεται κατά μήκος του διαχύτη με την διαφορά ότι στην περίπτωση του απλού μοντέλου (βλ. διάγραμμα 3.2 έως διάγραμμα 3.7) ο ρυθμός της αύξησης της είναι μεγαλύτερος από το μοντέλου με το πορώδες υλικό. Στο επίπεδο 8 στο σημείο  $X/X_0=0,845679012$  (βλ. διάγραμμα 3.8), που βρίσκεται 500mm μετά το τέλος του διαχύτη μέσα στον απλό αγωγό, η στατική πίεση και στις δυο

περιπτώσεις έχει την ίδια τιμή. Στο επίπεδο 9 στο σημείο  $Y/Y_0=0,5$  (με  $Y_0=20\text{mm}$ ) (βλ. διάγραμμα 3.9), το μοντέλο χωρίζεται σε δύο συμμετρικά επίπεδα (κατά μήκος) και παρατηρούμε την κατανομή της στατικής πίεσης στο κέντρο του. Όπως προαναφέραμε παρατηρούμε την αύξηση της στατικής πίεσης και στις δυο περιπτώσεις, στην εισόδου του διαχύτη, κατά την διέλευση του αέρα από την πτερωτή (fan). Μέσα και κατά μήκος του διαχύτη η στατική πίεση του απλού μοντέλου αυξάνεται απότομα και σταθεροποιείται στο σημείο  $X/X_0=0,35$ , όπου και μένει σταθερή μέχρι την έξοδο, ενώ η στατική πίεση του μοντέλου με το πορώδες υλικό αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό και σταθεροποιείται στο σημείο  $X/X_0=0,62$  όπου επίσης μένει σταθερή μέχρι την έξοδο.

Στα διαγράμματα 4.1-4.9 παρουσιάζεται ο συντελεστής ολικής πίεσης ( $C_{p_{tot}}$ ) στο απλό μοντέλου και στο μοντέλο με το πορώδες υλικό. Ο συντελεστής ολικής πίεσης ( $C_{p_{tot}}$ ) προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$C_{p_{tot}} = \frac{P_{tot} - \overline{P_{tot}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \overline{V}^2} \quad (4.7)$$

Όπου:  $P_{tot}$  = τοπική ολική πίεση του επιπέδου (Pascal),  
 $\overline{P_{tot}}$  = η μέση ολική πίεση του επιπέδου (Pascal),  
 $\rho$  = η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $\overline{V}$  = η μέση ταχύτητα του αέρα στο επίπεδο (m/s).

Όπως παρατηρούμε στο επίπεδο 1 στο σημείο  $X/X_0=0,138888888$  (βλ. διάγραμμα 4.1), δηλαδή 50mm πριν την πτερωτή (fan), μέσα στον απλό αγωγό, οι τιμές του συντελεστής ολικής πίεσης δεν παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ των δυο μοντέλων. Στο επίπεδο 2 στο σημείο  $X/X_0=0,169753086$  (βλ. διάγραμμα 4.2), δηλαδή 50mm μετά την πτερωτή (fan), μέσα στον διαχύτη, η τιμή του συντελεστής ολικής πίεσης του μοντέλου με το πορώδες υλικό παρουσιάζει αύξηση στο κέντρο του διαχύτη και μείωση κοντά στα τοιχώματα, σε σχέση με το απλό μοντέλο.

Στο απλό μοντέλο, στην αρχή του διαχύτη (βλ. διάγραμμα 4.1 και διάγραμμα 4.4), παρουσιάζεται αύξηση της τιμής του συντελεστής ολικής πίεσης στο κέντρο του διαχύτη από  $C_{p_{tot.}}=0,3$  σε  $C_{p_{tot.}}=1,3$ , αλλά με τις τιμές κοντά στα τοιχώματα του διαχύτη να παραμένουν σταθερές. Στην συνέχεια (βλ. διαγράμματα 4.5 έως διαγράμματα 4.8) χωρίς να μεταβάλλονται οι τιμές κοντά στα τοιχώματα του διαχύτη μειώνονται στο κέντρο του μέχρι την τιμή  $C_{p_{tot.}}=0,3$  και διατηρούνται σταθερές μέχρι την έξοδο.

Στο μοντέλο με το πορώδες υλικό, στην αρχή του διαχύτη (βλ. διάγραμμα 4.2 και διάγραμμα 4.3) παρουσιάζεται αύξηση του συντελεστή ολικής πίεσης στο κέντρο του από  $C_{p_{tot.}}=0,3$  σε  $C_{p_{tot.}}=1$ . Στην συνέχεια και μέχρι το τέλος του διαχύτη (βλ. διάγραμμα 4.4 και διάγραμμα 4.6), ο συντελεστής ολικής πίεσης, στο κέντρο του, μειώνεται απότομα από  $C_{p_{tot.}}=1$  σε  $C_{p_{tot.}}=-1$ . Οι τιμή του συντελεστή ολικής πίεσης κοντά στα τοιχώματα του διαχύτη (βλ. διάγραμμα 4.2 και διάγραμμα 4.7), αυξάνεται και από  $C_{p_{tot.}}=-1,1$  στην είσοδο του διαχύτη γίνεται  $C_{p_{tot.}}=4,2$  στο τέλος του.

Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις από την μέση τιμή του συντελεστή ολικής πίεσης ( $\bar{C}_{p_{tot.}}$ ) του οριζοντίου επιπέδου στο κέντρο του μοντέλου. Στο απλό μοντέλο, ο συντελεστής ολικής πίεσης στο αγωγό εισαγωγής έχει τιμή  $C_{p_{tot.}}=-23$  ενώ στο μοντέλο με το πορώδες υλικό στον διαχύτη, ο συντελεστής ολικής πίεσης στο αγωγό εισαγωγής έχει τιμή  $C_{p_{tot.}}=-12,5$ .

Στο απλό μοντέλο, κατά την διέλευση του αέρα από την πτερωτή (fan), παρουσιάζεται απότομη αύξηση του συντελεστή ολικής πίεσης και από αρνητική τιμή παίρνει θετική τιμή  $C_{p_{tot.}}=6,8$ . Το ίδιο συμβαίνει και στο μοντέλο με το πορώδες υλικό, αλλά με μικρότερη αύξηση σε  $C_{p_{tot.}}=4$ .

Στο απλό μοντέλο, από την είσοδο του διαχύτη και μέχρι το σημείο  $X/X_0=0,35$  ο συντελεστής ολικής πίεσης μειώνεται σε  $C_{p_{tot.}}=4,5$  και διατηρείται στην τιμή αυτή μέχρι την έξοδο του μοντέλου. Στο μοντέλο με το πορώδες υλικό, ο συντελεστής ολικής πίεσης, από την είσοδο του διαχύτη παρουσιάζει σταθερή τιμή μέχρι και το σημείο  $X/X_0=0,2145$ . Στο σημείο αυτό εισχωρεί αέρας από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό του διαχύτη μέσω του πορώδες υλικού και παρουσιάζεται μια απότομη πτώση του συντελεστή ολικής πίεσης στην τιμή  $C_{p_{tot.}}=1,3$  στο σημείο  $X/X_0=0,27$ . Έπειτα

ο συντελεστής ολικής πίεσης διατηρείται σταθερό μέχρι το σημείο  $X/X_0=0,42$  όπου παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση μέχρι το σημείο  $X/X_0=0,7$  μέχρι την τιμή  $C_{p_{tot}}=2,8$  όπου και διατηρείτε σταθερή μέχρι την έξοδο του μοντέλου.

Στα διαγράμματα 5.1-5.9 παρουσιάζεται ο συντελεστής στατικής πίεσης ( $C_{p_{st}}$ ) στο απλό μοντέλου και στο μοντέλο με το πορώδες υλικό. Ο συντελεστή στατικής πίεσης ( $C_{p_{st}}$ ) προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$C_{p_{st}} = \frac{P_{st} - \bar{P}_{st}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}^2} \quad (4.8)$$

Όπου:  $P_{st}$  = τοπική στατική πίεση του επιπέδου (Pascal),,

$\bar{P}_{st}$  = η μέση ολική πίεση του επιπέδου (Pascal),

$\rho$  = η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

$\bar{V}$  = η μέση ταχύτητα του αέρα στο επίπεδο (m/s).

Στα κάθετα επίπεδα κατά μήκος και των δυο μοντέλων δεν παρουσιάζονται διαφορές στον συντελεστή στατικής πίεσης ( $C_{p_{st}}$ ). Μια διαφορά που παρουσιάζεται (βλ. διαγράμματα 5.2 έως διαγράμματα 5.7) είναι ότι στο μοντέλο με το πορώδες υλικό, στα τοιχώματα του διαχύτη, από την είσοδο και μέχρι την έξοδο του, ο συντελεστής στατικής πίεσης αυξάνεται στην τιμή  $C_{p_{st}}=6,7$ .

Στο διάγραμμα 5.9 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή στατικής πίεσης ( $\bar{C}_{p_{st}}$ ) του οριζοντίου επιπέδου στο κέντρο του μοντέλου. Στο απλό μοντέλο ο συντελεστή στατικής πίεσης στο αγωγό εισαγωγής έχει τιμή  $C_{p_{st}}=-30$  ενώ στο μοντέλο με το πορώδες υλικό έχει τιμή  $C_{p_{st}}=-16$ .

Στο απλό μοντέλο, από την είσοδο του διαχύτη, μετά την πτερωτή (fan), μέχρι το σημείο  $X/X_0=0,4$  ο συντελεστής στατικής πίεσης αυξάνεται απότομα σε  $C_{p_{st}}=5,5$  όπου και διατηρείτε στην τιμή αυτή μέχρι την έξοδο του μοντέλου. Στο μοντέλο με το πορώδες υλικό, από την είσοδο του διαχύτη, μετά την πτερωτή (fan), παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση του συντελεστή στατικής πίεσης μέχρι το σημείο  $X/X_0=0,64$  στην τιμή  $C_{p_{st}}=3,2$  όπου και διατηρείται σταθερή μέχρι την έξοδο του μοντέλου.



### 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Ø Η ισχύς ενός διαχύτη δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$W_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_0^2 \cdot \Delta CP_T \cdot A_0 \cdot U_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot U_0^3 \cdot \Delta CP_T \quad (4.9)$$

$$\text{Όπου} \quad \Delta CP_T = \frac{\overline{P}_{t \text{ in}} - \overline{P}_{t \text{ out}}}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (5.1)$$

Άρα η 4.9 από την 5.1 γίνεται:

$$W_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot U_0^3 \cdot \frac{(\overline{P}_{t \text{ in}} - \overline{P}_{t \text{ out}})}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_0^2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow W_D = (\overline{P}_{t \text{ in}} - \overline{P}_{t \text{ out}}) \cdot A_0 \cdot U_0 \quad (5.2)$$

Όπου:

$\Delta CP_T$  = Μεταβολή συντελεστή ολικής πίεσης από την είσοδο στην έξοδο του διαχύτη,

$\overline{P}_{t \text{ in}}$  = μέση τιμή ολικής πίεσης στην είσοδο του διαχύτη (Pascal),

$\overline{P}_{t \text{ out}}$  = μέση τιμή ολικής πίεσης στην έξοδο του διαχύτη (Pascal),

$U_0$  = ταχύτητα εισόδου του αέρα (m/s)

$A_0$  = επιφάνεια της εισόδου του διαχύτη (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα (1,225 kg/m<sup>3</sup>)

• Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς του απλού διαχύτη χωρίς πτερωτή (fan) στην είσοδο του:

$$\text{Είναι: } W_D = (\bar{P}_{t_{in}} - \bar{P}_{t_{out}}) \cdot A_o \cdot U_o$$

$$\text{Όπου: } \bar{P}_{t_{in}} = 12,4 \text{ Pascal,}$$

$$\bar{P}_{t_{out}} = 2,48 \text{ Pascal,}$$

$$U_o = 20 \text{ m/s}$$

$$A_o = 0,0004 \text{ m}^2$$

Οπότε η 5.2 γίνεται :

$$W_D = (12,4 - 2,48) \left( \frac{\text{kgf}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 0,0004 \text{ (m}^2) \cdot 20 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0,07936 \left( \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \right) = \underline{0,07936 \text{ Watt}}$$

• Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς του διαχύτη με πορώδες υλικό στα τοιχώματα του χωρίς πτερωτή (fan) στην είσοδο του:

$$\text{Είναι: } W_D = (\bar{P}_{t_{in}} - \bar{P}_{t_{out}}) \cdot A_o \cdot U_o$$

$$\text{Όπου: } \bar{P}_{t_{in}} = 7,76 \text{ Pascal,}$$

$$\bar{P}_{t_{out}} = 47,4 \text{ Pascal,}$$

$$U_o = 20 \text{ m/s}$$

$$A_o = 0,0004 \text{ m}^2$$

Οπότε η 5.2 γίνεται :

$$W_D = (7,76 - 47,4) \left( \frac{\text{kgf}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 0,0004 \text{ (m}^2) \cdot 20 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = -0,31712 \left( \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \right) = \underline{-0,31712 \text{ Watt}}$$

• Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς του απλού διαχύτη με πτερωτή (fan) στην είσοδο του:

$$W_D = (\overline{P}_{t_{in}} - \overline{P}_{t_{out}}) \cdot A_o \cdot U_o$$

Όπου:  $\overline{P}_{t_{in}} = 10,79$  Pascal,

$$\overline{P}_{t_{out}} = 2,49$$
 Pascal,

$$U_o = 20$$
 m/s

$$A_o = 0,0004$$
 m<sup>2</sup>

Οπότε η 5.2 γίνεται :

$$W_D = (10,79 - 2,49) \left( \frac{\text{kgf}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 0,0004 (\text{m}^2) \cdot 20 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0,0664 \left( \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \right) = \underline{0.0664 \text{ Watt}}$$

• Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς του διαχύτη με πορώδες υλικό στα τοιχώματα του με πτερωτή (fan) στην είσοδο του:

Είναι:  $W_D = (\overline{P}_{t_{in}} - \overline{P}_{t_{out}}) \cdot A_o \cdot U_o$

Όπου :  $\overline{P}_{t_{in}} = 7,82$  Pascal,

$$\overline{P}_{t_{out}} = 52,57$$
 Pascal,

$$U_o = 20$$
 m/s

$$A_o = 0,0004$$
 m<sup>2</sup>

Οπότε η 5.2 γίνεται :

$$W_D = (7,82 - 52,57) \left( \frac{\text{kgf}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 0,0004 (\text{m}^2) \cdot 20 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = -0,358 \left( \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \right) = \underline{-0,358 \text{ Watt}}$$

Θ Η ισχύς ενός στροβίλου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$W_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_0^2 \cdot (\Delta CP_{T_{in}} - \Delta CP_{T_{out}}) \cdot A_0 \cdot U_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot U_0^3 \cdot (\Delta CP_{T_{in}} - \Delta CP_{T_{out}})$$

Όπου: 
$$\Delta CP_{T_{in}} = \frac{\bar{P}_{t_o} - \bar{P}_{t_{in}}}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (5.3)$$

$$\Delta CP_{T_{out}} = \frac{\bar{P}_{t_o} - \bar{P}_{t_{out}}}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (5.4)$$

Είναι : 
$$\Delta CP_{T_{in}} - \Delta CP_{T_{out}} = \left( \frac{\bar{P}_{t_o} - \bar{P}_{t_{in}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot U_o^2} \right) - \left( \frac{\bar{P}_{t_o} - \bar{P}_{t_{out}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot U_o^2} \right) = \frac{(-\bar{P}_{t_{in}} + \bar{P}_{t_{out}})}{\frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot U_o^2} \quad (5.5)$$

Οπότε η 5.5 γίνεται:

$$W_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_o \cdot U_o^3 \cdot \frac{(-\bar{P}_{t_{in}} + \bar{P}_{t_{out}})}{\frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot U_o^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W_F = (-\bar{P}_{t_{in}} + \bar{P}_{t_{out}}) \cdot U_o \cdot A_o \quad (5.6)$$

Όπου:

$\Delta CP_{T_{in}}$  = μεταβολή του συντελεστή ολικής πίεσης στην είσοδο του διαχύτη  
από την είσοδο του μοντέλου,

$\Delta CP_{T_{out}}$  = μεταβολή του συντελεστή ολικής πίεσης στην έξοδο του διαχύτη  
από την είσοδο του μοντέλου,

$\bar{P}_{t_o}$  = μέση ατμοσφαιρική πίεση(Pascal),

$\bar{P}_{t\text{ in}}$  = μέση τιμή ολικής πίεσης πριν τον στρόβιλο(Pascal),

$\bar{P}_{t\text{ out}}$  = μέση τιμή ολικής πίεσης μετά τον στρόβιλο(Pascal),

$U_0$  = ταχύτητα εισόδου του αέρα (m/s),

$A_0$  = επιφάνεια της εισόδου του διαχύτη ( $m^2$ ),

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα ( $1,225 \text{ kgr}/m^3$ ).

- Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς του στρόβιλου στον απλό διαχύτη :

$$\text{Είναι: } W_F = \left( -\bar{P}_{t\text{ in}} + \bar{P}_{t\text{ out}} \right) \cdot U_0 \cdot A_0$$

Όπου:  $\bar{P}_{t\text{ in}} = -973,25 \text{ Pascal}$ ,

$\bar{P}_{t\text{ out}} = 10,79 \text{ Pascal}$ ,

$U_0 = 20 \text{ m/s}$

$A_0 = 0,0004 \text{ m}^2$

Οπότε η 5.6 γίνεται :

$$W_{F_{\text{απλού}}} = \left( -(-973,25) + 10,79 \right) \left( \frac{\text{kgr}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 0,0004 \text{ (m}^2) \cdot 20 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W_{F_{\text{απλού}}} = 7,87232 \left( \frac{\text{kgr} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \right) = \underline{7,87232 \text{ Watt}}$$

- Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς του στρόβιλου στον διαχύτη με πορώδες υλικό στα τοιχώματα του:

$$\text{Είναι: } W_F = \left( -\bar{P}_{t\text{ in}} + \bar{P}_{t\text{ out}} \right) \cdot U_0 \cdot A_0$$

Όπου:  $\bar{P}_{t\text{ in}} = -992,31 \text{ Pascal}$ ,

$\bar{P}_{t\text{ out}} = 7,62 \text{ Pascal}$ ,

$$U_0 = 20 \text{ m/s}$$

$$A_0 = 0,0004 \text{ m}^2$$

Οπότε η 5.6 γίνεται :

$$W_{F_{\text{Πορώδες}}} = (-(-992,31) + 7,62) \left( \frac{\text{kgf}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 0,0004 \text{ (m}^2) \cdot 20 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W_{F_{\text{Πορώδες}}} = 7,99944 \left( \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \right) = \underline{7,99944 \text{ Watt}}$$

**Το πραγματικό έργο** που απορροφάει ένας στρόβιλος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{W}_{\text{Rotor}}^0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_0^2 \cdot \Delta C P_{T_{\text{Rotor}}} \cdot U_{\text{Rotor}} \cdot A_{\text{Rotor}} \cdot \Delta T \quad (5.7)$$

Όπου:

$$\Delta C P_{T_{\text{Rotor}}} = \Delta C p_{T_{\text{in}}} - \Delta C p_{T_{\text{out}}} = \left( \frac{\bar{P}_{t_{\text{to}}} - \bar{P}_{t_{\text{in}}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot U_0^2} \right) - \left( \frac{\bar{P}_{t_{\text{to}}} - \bar{P}_{t_{\text{out}}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot U_0^2} \right) = \frac{(-\bar{P}_{t_{\text{in}}} + \bar{P}_{t_{\text{out}}})}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot U_0^2} \quad (5.8)$$

Από (5.7) και (5.8) έχουμε:

$$\dot{W}_{\text{Rotor}}^0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_0^2 \cdot U_{\text{Rotor}} \cdot A_{\text{Rotor}} \cdot \Delta T \cdot \frac{(-\bar{P}_{t_{\text{in}}} + \bar{P}_{t_{\text{out}}})}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot U_0^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{\text{Rotor}}^0 = (-\bar{P}_{t_{\text{in}}} + \bar{P}_{t_{\text{out}}}) \cdot U_{\text{Rotor}} \cdot A_{\text{Rotor}} \cdot \Delta T \quad (5.9)$$

Όπου:

$\Delta CP_{T_{Rotor}}$  = μεταβολή του συντελεστή ολικής πίεσης από την είσοδο στην  
έξοδο του στρόβιλου,

$\bar{P}_{t_{in}}$  = μέση τιμή ολικής πίεσης πριν τον στρόβιλο(Pascal),

$\bar{P}_{t_{out}}$  = μέση τιμή ολικής πίεσης μετά τον στρόβιλο(Pascal),

$U_0$  = ταχύτητα εισόδου του αέρα σε m/s,

$U_{Rotor}$  = ταχύτητα του αέρα στον στρόβιλο (m/s),

$A_{Rotor}$  = επιφάνεια του στρόβιλου ( $m^2$ ),

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ).

$\Delta T$  = χρόνος (Second) .

• Παρακάτω υπολογίζεται το πραγματικό έργο που απορροφάει ο  
στρόβιλος στο απλό μοντέλο:

$$\text{Είναι: } \dot{W}_{Rotor_{\text{απλό}}}^0 = (-\bar{P}_{t_{in}} + \bar{P}_{t_{out}}) \cdot U_{Rotor} \cdot A_{Rotor} \cdot \Delta T$$

Όπου :  $\bar{P}_{t_{in}} = -973,25 \text{ Pascal}$ ,

$\bar{P}_{t_{out}} = 10,79 \text{ Pascal}$ ,

$U_{Rotor} = 19,8459975 \text{ m/s}$

$$A_{Rotor} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 3,14159 \cdot \left(\frac{0,02}{2}\right)^2 = 3,14159 \cdot 10^{-04} \text{ m}^2$$

$\Delta T = 1 \text{ sec}$

Οπότε η (5.9) γίνεται:

$$\dot{W}_{Rotor_{\text{απλό}}}^0 = (-(-973,25) + 10,79) \left(\frac{\text{Kgr}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}\right) \cdot 19,8459975 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot 3,14159 \cdot 10^{-04} (\text{m}^2) \cdot 1(\text{s}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{Rotor_{\text{απλό}}}^0 = 6,13529 \left(\frac{\text{Kgr} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \overset{0}{W}_{\text{Rotor απλό}} = \underline{6,13529 \text{ Joule}}$$

• Παρακάτω υπολογίζεται το πραγματικό έργο που απορροφάει ο στρόβιλος στο μοντέλο με το πορώδες υλικό:

$$\text{Είναι: } \overset{0}{W}_{\text{Rotor πορώδες}} = \left( -\bar{P}_{t \text{ in}} + \bar{P}_{t \text{ out}} \right) \cdot U_{\text{Rotor}} \cdot A_{\text{Rotor}} \cdot \Delta T$$

$$\text{Όπου : } \bar{P}_{t \text{ in}} = -992,31 \text{ Pascal,}$$

$$\bar{P}_{t \text{ out}} = 7,62 \text{ Pascal,}$$

$$U_{\text{Rotor}} = 20,0890684 \text{ m/s}$$

$$A_{\text{Rotor}} = \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2 = 3,14159 \cdot \left( \frac{0,02}{2} \right)^2 = 3,14159 \cdot 10^{-04} \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 1 \text{ second.}$$

Οπότε η (5.9) γίνεται:

$$\overset{0}{W}_{\text{Rotor πορώδες}} = \left( -(-992,31) + 7,62 \right) \left( \frac{\text{Kgr}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \cdot 20,0890684 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot 3,14159 \cdot 10^{-04} (\text{m}^2) \cdot 1(\text{s}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \overset{0}{W}_{\text{Rotor πορώδες}} = 6,31072 \left( \frac{\text{Kgr} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \overset{0}{W}_{\text{Rotor πορώδες}} = \underline{6,31072 \text{ Joule}}$$



## Συμπεράσματα.

Από τους υπολογισμούς που έγιναν, προέκυψε η ισχύς του στροβίλου με τον απλό διαχύτη είναι  $W_{\text{Fαπλού}} = 7,7232 \text{ Watt}$  και η ισχύς του στροβίλου με τον διαχύτη με το πορώδες υλικό είναι  $W_{\text{Fπορώδες}} = 7,99944 \text{ Watt}$ . Η διαφορά τους είναι  $W_{\text{Fπορώδες}} - W_{\text{Fαπλού}} = (7,99944 - 7,7232) \text{ Watt} = \underline{0,27624 \text{ Watt}}$ . Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι αυξάνεται η απόδοσης του στροβίλου με την αντικατάσταση των τοιχωμάτων του διαχύτη με πορώδες υλικό.

Το πραγματικό έργο που απορροφά ο στρόβιλος του απλού μοντέλου είναι  $\overset{0}{W}_{\text{απλό}} = 6,13529 \text{ Joule}$  ενώ του μοντέλου με το πορώδες υλικό είναι  $\overset{0}{W}_{\text{πορώδες}} = 6,31072 \text{ Joule}$ . Παρατηρείται μια αύξηση του παραγομένου έργου κατά  $\overset{0}{W} = 0,17543 \text{ Joule}$  με την προσθήκη πορώδες υλικού στα τοιχώματα του διαχύτη.

Παρατηρούνται χαμηλές τιμές στην ισχύ και στο παραγόμενο έργο του στροβίλου και μικρές διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα γιατί οι διαστάσεις του στροβίλου που χρησιμοποιήσαμε είναι μικρές με μόλις 20mm διάμετρο. Οι αντίστοιχες τιμές και διαφορές θα είναι μεγαλύτερες αν χρησιμοποιηθούν στρόβιλοι με μεγαλύτερες διαστάσεις.

Η ισχύς του απλού διαχύτη προέκυψε  $W_D = 0,0664 \text{ Watt}$  και του διαχύτη με το πορώδες υλικό στα τοιχώματα του προέκυψε  $W_D = -0,358 \text{ Watt}$ . Η αρνητική τιμή στην δεύτερη περίπτωση οφείλεται στο γεγονός ότι εισχωρεί αέρας από το εξωτερικό περιβάλλον, μέσα από το πορώδες υλικό, στο εσωτερικό του διαχύτη. Η ενέργεια του εξωτερικού αέρα προστίθεται σε αυτή του εσωτερικού αέρα με αποτέλεσμα στο τέλος του διαχύτη η ενέργεια του να είναι πολύ μεγάλη.

Σε ποιο ολοκληρωμένα και ρεαλιστικά συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο σε πραγματικές συνθήκες με πορώδη υλικά τα όποια θα έχουν διαφορετική διάταξη και γεωμετρία.

## Βιβλιογραφίες

1. Αλεξιάκης Σ. Αλέξανδρος, Αιολική ενέργεια, Εκδόσεις Μιχάλη Σιδέρη.
2. Βαλαβανίδης Μάριος-Προκόπιος, Μακροσκοπική θεωρία διφασικής ροής σε πορώδη υλικά βάσει ολοκληρώσεων των φαινομένων κλίμακας πόρων, Πανεπιστήμιο Πατρών 1998.
3. Γκοτσόπουλος Χρήστος, Πτυχιακή εργασία «Νόμοι διατήρησης, Οριακές Συνθήκες, Τύρβη και η μοντελοποίηση της.», Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολογίας.
4. Διαγούπης Δ. Θεόδωρος, Διπλωματική Εργασία «Μελέτη, προσομοίωση και κατασκευή αντιστροφέα τάσης για τη σύνδεση ανεμογεννήτριας με το δίκτυο», Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.
5. Καλδέλλης Κλεάνθη Ιωάννης, Διαχείριση της αιολικής ενέργειας, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης 1999
6. Κορμανιώτης Ευάγγελος, Διπλωματική Εργασία «Έλεγχος του οριακού στρώματος», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών, Τομέας Εφαρμοσμένης Ανάλυσης.
7. Νικολάου Αργυρή και Καρφάκη Γεωργίου, Πτυχιακά εργασία «Ανεμογεννήτριες», Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολογίας.
8. Παπαζής Στυλιανός, Αξιολόγηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: προβλέψεις με εναλλακτικά σενάρια σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο, Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
9. Πάτσης Βύρωνας, Πτυχιακή εργασία «Πορώδη υλικά. Εφαρμογές στον έλεγχο και προστασία του περιβάλλοντος.», Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολογίας.
10. Στυλιανοπούλου Κωνσταντίνα και Χατζηρόδου Εμμανουέλλα, Πτυχιακά εργασία «Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο

- ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο», Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης.
11. Ρώτα Σ. Μαρία, Διπλωματική Εργασία «Σύγκριση κλασσικού και ελέγχου Βασισμένου σε ασαφή λογική ανεμογεννήτριας μονίμων μαγνητών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος.
  12. Akhgari Arash, Experimental investigation of the performance of a diffuser-augmented vertical axis wind Turbine, University of Tehran, 2007.
  13. De Vries O., Fluid Dynamic Aspects of Wind Energy Conversion. Number 243. AGARDograph, 1979.
  14. Fletcher C.A.J., Computational Analysis of Diffuser Augmented Wind Turbines. Energy Con. & Mgmt, 21: 175–183, 1981.
  15. C.A.J. Fletcher C.A.J., Diffuser Augmented Wind Turbine Analysis. 7th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Brisbane, August 18-22 1980.
  16. Gilbert B.L. and Foreman K.M., Experimental Demonstration of the Diffuser- Augmented Wind Turbine Concept. Journal of Energy, 3(4): 235 – 240, July-August 1979.
  17. Gilbert B.L. and Foreman K. M., Fluid Dynamics of Diffuser-Augmented Wind Turbines. Journal of Energy, 2(6): 368 – 374, Nov.-Dec. 1978.
  18. Hoerner S.F., Fluid Dynamic Drag. Hoerner Fluid Dynamics, June 1965.
  19. Hoopen P.D.C. ten, Master of Science Thesis: “An Experimental and Computational Investigation of a Diffuser Augmented Wind Turbine With an application of vortex generators on the diffuser trailing edge”. B.Sc. Faculty of Aerospace Engineering · Delft University of Technology.
  20. Igra O., Compact Shrouds for Wind Turbines. Energy Conv., 16: 149–157, 1977.

21. Igra O., Research and Development for Shrouded Wind Turbines. *Energy Conv. & Mgmt*, 21: 13–48, 1981.
22. Igra O. and Schulgasser K., Design and Construction of a Pilot Plant for a Shrouded Wind Turbine. Second International Symposium on Wind Energy Systems, October 3rd-6th 1978.
23. Inwood Sarah, Final Report: “Using Computational Fluid Dynamics to Solve Fluid Flow Problems”, Laboratory for Product and Process Design University of Illinois at Chicago. LPPD-Project Report: 08/05/2004.
24. Iwasaki M. The experimental and theoretical investigation of windmills. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, 2(8):181-229, dec.1953.
25. Jamieson P. Beating Betz - Energy Extraction Limits in a Uniform Flow Field. Garrad Hassan and Partners, 2008.
26. Jamieson P., Generalized limits for energy extraction in a linear constant velocity flow field. *Wind Energ.*, 11: 445 – 457, 2008.
27. Kirke, B., Developments in ducted water current turbines. U. of South Australia, 2005.
28. Kogan A. And Seginer A., Final report on shroud design. (T. A. E. Rept. 32A), 1963.
29. Kogan A. and Seginer A., Shrouded aerogenerator design study ii, axisymmetric shroud performance. (T. A. E. Rept. 32), 1963.
30. R.I. Lewis J.E. and Williams M.A., Abdelghaffar. A Theory and Experimental Investigation of Ducted Wind Turbines. *Wind Engineering*, 1(2): 104 – 125, 1977.
31. Loeffler A.L. Jr., Flow Field Analysis and Performance of Wind Turbines Employing Slotted Diffusers. *Transactions of the ASME: Journal of Solar Energy Engineering*, 103: 17 – 22, 1981.
32. Loeffler A.L. Jr., D. Vanderbilt. Inviscid Flow Through Wide Angle Diffuser with Actuator Disk. *AIAA JOURNAL*, 16(10): 17 – 22, Oct. 1978.
33. Phillips D.G., An Investigation on Diffuser Augmented Wind Turbine Design. Ph.D. Thesis, University of Auckland, 2003.

34. Rainbird W.J. and Lilley G.M., A Preliminary Report on the Design and Performance of a Ducted Windmill. (Report 102), 1956.
35. Riegler, G., Principles of energy extraction from a free stream by means of wind turbines. Wind Engineering, 1983. 7: p. 115-126.
36. Wind Energy: "The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited." Dr. Gerard J.W. van Bussel. Faculty of Aerospace Engineering. Delft University of Technology.
37. G.J.W. van Bussel. Development of a momentum theory for DAWT. Mie University Japan, 1998.
38. Von Betz A., Energieumsetzungen in Venturidusen. DieNaturwissenschaften, 10: 160–164, 1929.
39. Werle M.J., Shroud and Ejector Augmenters for Subsonic Propulsion and Power Systems. FLODESIGN INC, 2008.
40. Werle M.J. and Presz W.M. Jr., Ducted Wind/Water Turbines and Propellers Revisited. FLODESIGN INC, 2008.
41. <http://www.anemogennitria.gr/articles.htm>.
42. [www.cres.gr](http://www.cres.gr). Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(Κ.Α.Π.Ε.).
43. <http://www.enflo-windtec.ch>.Enflo
44. <http://www.GHCraft.com>.GHCraft
45. <http://gneng.blogspot.com/p/blog-page.html> «Αιολική ενέργεια».
46. [www.wel.teiher.gr](http://www.wel.teiher.gr). Ιστοσελίδα Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας & Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων.
47. <http://www.wind/-works.org/articles/vort/ closure/ end.html>. Vortec