

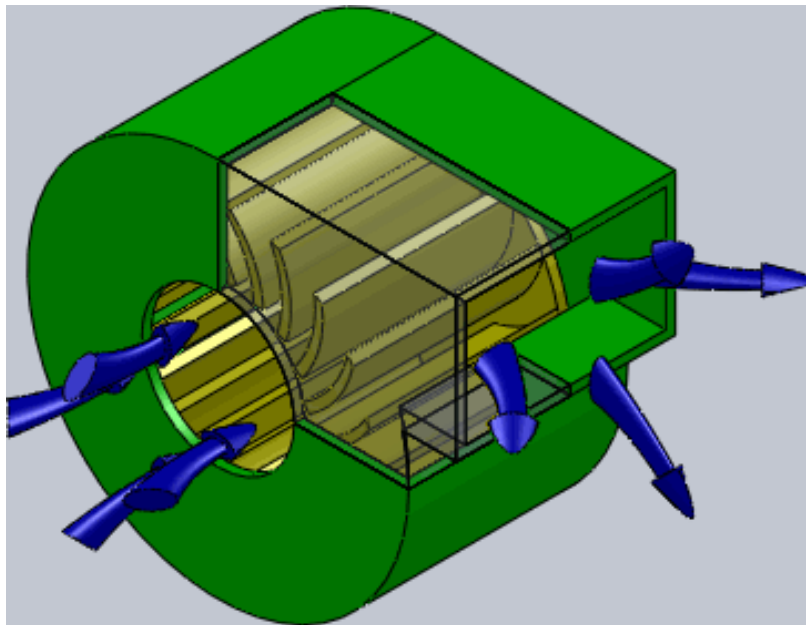
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΠΑΡΟΧΗΣ 50.000 m<sup>3</sup>/hr ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ 100mmH<sub>2</sub>O



ΤΥΟΝΑ ΠΡΕΜΠΙΜΠΑΝ (Α.Μ. 6500)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στον σχεδιασμό ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα με παροχή 50.000 m<sup>3</sup>/hr και στατική πίεση 100 mmH<sub>2</sub>O. Οι ανεμιστήρες είναι σημαντικές μηχανές καθώς έχουν εφαρμογές στον κλιματισμό για θερμική άνεση, στην ψύξη οχημάτων, μηχανών αλλά και ηλεκτρονικών διατάξεων, στην παραγωγή ενέργειας ενώ ταυτόχρονα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι κάθε επιχείρησης και βιομηχανίας.

Αρχικά γίνεται μια γενικότερη εισαγωγή στους ανεμιστήρες, στις έννοιες και αρχές που σχετίζονται με αυτούς. Στη συνέχεια γίνεται ανάπτυξη της θεωρίας ανεμιστήρων και πιο συγκεκριμένα του μηχανισμού λειτουργίας των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων. Μέσα από την ανάλυση αυτή γίνεται ο σχεδιασμός και η εξαγωγή αριθμητικών παραμέτρων και αποτελεσμάτων, απαραίτητων για την επίτευξη αυτού. Τέλος γίνεται μια σύντομη αναφορά στις χρήσεις και τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου που σχεδιάστηκε.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ανδρέα Γιαννόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την σημαντική βοήθειά του και τις εύστοχες παρατηρήσεις του. Επίσης ευχαριστώ πολύ τον αδερφό μου Τίτσι Πρεμπίμπαη, φοιτητή της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις συμβουλές του και την γενικότερη υποστήριξή του.

Πρεμπίμπαη Τίονα

Απρίλιος 2016

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιαδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Η σπουδάστρια

Τίονα Πρεμπίμπαη

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στον σχεδιασμό ενός Φυγοκεντρικού Ανεμιστήρα παροχής όγκου  $50.000 \text{ m}^3/\text{h}$  και στατικής πίεσης  $100\text{mmH}_2\text{O}$ . Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες είναι μηχανές οι οποίες εκμεταλλευόμενες την φυγοκεντρική δύναμη δημιουργούν ροή μέσα σε ένα ρευστό. Η λειτουργία αυτή έχει αμέτρητες εφαρμογές σε πολλούς τεχνολογικούς και παραγωγικούς τομείς.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε επτά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί ένα γενικό κεφάλαιο. Ορίζεται ο ανεμιστήρας και μελετώνται οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνεται ανάλογα με την αρχή λειτουργίας του, αλλά και ειδικότερες κατηγορίες όπως αυτές που διακρίνεται ανάλογα με το σχήμα των πτερυγίων του. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται και μια σύντομη αναφορά στις χρήσεις καθενός από αυτούς τους ανεμιστήρες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσονται βασικές έννοιες ρευστοδυναμικής που θα χρειαστούν παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα εισάγονται έννοιες σχετικές με τα ρευστά, όπως ο ορισμός του ρευστού, η διάκριση των ρευστών σε νευτωνικά και μη-νευτωνικά, η ροή, το ιξώδες, η πυκνότητα, η στατική και η δυναμική πίεση, ασυμπίεστα ρευστά κ.α. Επίσης γίνεται αναφορά της εξίσωσης συνέχειας και μέσω αυτής ορίζονται η παροχή όγκου και η μαζική παροχή, ενώ γίνεται και απόδειξη της εξίσωσης Bernoulli. Οι έννοιες αυτές θα βοηθήσουν τον αναγνώστη να κατανοήσει εις βάθος την λειτουργία του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην μελέτη της αεροτομής (airfoil). Το airfoil είναι ένα βασικό αεροδυναμικό σχήμα πτερυγίων που χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς για την δημιουργία συγκεκριμένων συνθηκών πίεσης. Στον συγκεκριμένο σχεδιασμό χρησιμοποιείται το σχήμα αυτό για τα πτερύγια.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής ανάλυση της θεωρίας των ανεμιστήρων. Ειδικότερα περιγράφεται τόσο η αρχή λειτουργίας των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων, όσο και τα μέρη που αποτελείται. Γίνεται διάκριση σε κατηγορίες ειδικά των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων. Επίσης αναπτύσσεται η θεωρία και οι νόμοι των ανεμιστήρων, δηλαδή συσχετίζονται οι βασικές ρευστοδυναμικές ποσότητες (παροχή, πίεση, ισχύς κλπ) με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα αλλά και με τις ιδιότητες του αέρα (ταχύτητα, πίεση κτλ.).

Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η μετάδοση κίνησης στον ανεμιστήρα. Γίνεται αναφορά στα βασικά εξαρτήματα (στοιχεία μηχανών) του συστήματος αυτού και περιγράφεται η συνδεσμολογία και η λειτουργία τους.

Το έκτο κεφάλαιο είναι το κεφάλαιο του σχεδιασμού. Έπειτα από τις βασικές γνώσεις πάνω στις ρευστοδυναμικές μηχανές, τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες και τους κινητήρες είναι δυνατός, με τη βοήθεια επιπλέον στοιχείων του κεφαλαίου αυτού, ο σχεδιασμός του ζητούμενου ανεμιστήρα. Πιο συγκεκριμένα το κεφάλαιο περιέχει τα βήματα που θα ακολουθούσε ένας κατασκευαστής για την κατασκευή και τα αριθμητικά αποτελέσματα των βασικών παραμέτρων και διαστάσεων. Χωρίζεται σε δύο μέρη: στον σχεδιασμό της πτερωτής και στον σχεδιασμό της μετάδοσης κίνησης.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη σύνοψη των αποτελεσμάτων αλλά και σχολιάζονται πιθανές εφαρμογές του συγκεκριμένου μοντέλου.

Η μελέτη που έγινε παρήγαγε όλα τα σημαντικά αποτελέσματα για την ακριβή παραγωγή του συγκεκριμένου τύπου, ο οποίος μπορεί να έχει πολλές χρήσεις ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε βιομηχανίας αλλά και του κάθε ατόμου ξεχωριστά.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

<b>1. ΓΕΝΙΚΑ.....</b>	<b>3</b>
1.1 Ανεμιστήρες.....	3
1.1.1 Ορισμός.....	3
1.1.2 Κατηγορίες.....	4
1.1.3 Χρήσεις.....	7
<b>2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....</b>	<b>9</b>
2.1 Ρευστά.....	10
2.1.1 Νευτωνικά και μη-Νευτωνικά ρευστά.....	11
2.1.2 Πυκνότητα και Ροή ρευστών.....	12
2.2 Πίεση.....	13
2.3 Εξίσωση Συνέχειας και Εξίσωση Bernoulli.....	15
2.4 Αριθμός Reynolds.....	19
<b>3. AIRFOIL.....</b>	<b>20</b>

<b>4. ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ.....</b>	<b>24</b>
4.1 Αρχή Λειτουργίας.....	24
4.2 Βασικά Μέρη.....	25
4.3 Κατηγορίες Φυγοκεντρικών Ανεμιστήρων.....	28
4.4 Θεωρία Ανεμιστήρων.....	30
4.5 Νόμοι Ανεμιστήρων.....	34
<b>5. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ.....</b>	<b>39</b>
5.1 Άτρακτοι.....	39
5.2 Έδρανα.....	42
5.3 Σφήνες.....	46
5.4 Τροχαλίες.....	47
5.5 Ιμάντες.....	48
5.6 Ηλεκτροκινητήρες.....	52
<b>6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....</b>	<b>53</b>
6.1 Δεδομένα.....	54
6.2 Μεταβλητές.....	55
6.3 Βήματα σχεδιασμού Πτερωτής.....	56
6.4 Υπολογισμός Μετάδοσης Κίνησης.....	69
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>79</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>80</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανεμιστήρες και ιδιαίτερα οι φυγοκεντρικοί αποτελούν μηχανές σχετικά απλές στη λειτουργία τους αλλά αρκετά πολύπλοκες στην μελέτη τους. Οι ανεμιστήρες ακολουθούν μια όχι και τόσο μακριά πορεία στον χρόνο. Ο πρώτος καταγεγραμμένος ανεμιστήρας ήταν ο “runkah” που χρησιμοποιήθηκε στη Μέση Ανατολή στις αρχές του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Είχε ένα πλαίσιο καλυμμένο από καμβά και κρεμόταν από το ταβάνι. Υπηρέτες, τραβούσαν ένα σκοινί συνδεδεμένο με το πλαίσιο, το οποίο κουνούσε τον ανεμιστήρα μπρος και πίσω.

Η βιομηχανική επανάσταση στα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα εισήγαγε τους ανεμιστήρες με ιμάντα, που τροφοδοτούνταν από νερόμυλους. Με την τοποθέτηση ξύλινων και μεταλλικών λεπίδων στους άξονες που χρησιμοποιούνταν για την κίνηση των μηχανών, αναπτύχθηκαν οι πρώτοι βιομηχανικοί ανεμιστήρες.

Ένας από τους πρώτους λειτουργικούς μηχανικούς ανεμιστήρες κατασκευάστηκε από τον Alexander Sablukon το 1832. Αποκάλεσε την εφεύρεσή του, ένα είδος φυγοκεντρικού ανεμιστήρα, μια αντλία αέρα (Air Pump). Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες δοκιμάστηκαν με επιτυχία σε ορυχεία και εργοστάσια κατά τα έτη 1832-1834. Όταν οι Thomas Edison και Nikola Tesla παρουσίασαν την ηλεκτρική ενέργεια στα τέλη του 18<sup>ου</sup> και στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα στο κοινό, εμφανίστηκε ο προσωπικός ηλεκτρικός ανεμιστήρας. Μεταξύ 1882 και 1886, ο Dr. Schuyler Skaats Wheeler ανέπτυξε τον επιτραπέζιο ανεμιστήρα με δύο λεπίδες, έναν τύπο ατομικού ηλεκτρικού ανεμιστήρα. Τον σφράγισε εμπορικά η Αμερικάνικη εταιρεία Crocker & Curtis electric motor company. Το 1882, ο Philip H. Diehl εισήγαγε τον ηλεκτρικό ανεμιστήρα οροφής. Ο Diehl θεωρείται ο πατέρας του σύγχρονου ηλεκτρικού ανεμιστήρα. Στα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα, οι ηλεκτρικοί ανεμιστήρες χρησιμοποιούνταν μόνο σε εμπορικές επιχειρήσεις ή σε ευκατάστατα νοικοκυριά. Οι ανεμιστήρες θέρμανσης που λειτουργούσαν με οινόπνευμα, πετρέλαιο ή κηροζίνη ήταν συνηθισμένοι στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Ο πρώτοι αμερικάνικης προέλευσης ανεμιστήρες, που κατασκευάστηκαν ανάμεσα στο 1890 και το 1920, ήταν πολύ στυλάτοι. Είχαν χάλκινες λεπίδες, πολλοί από αυτούς είχαν και χάλκινα κλουβιά, και παρότι ήταν πολύ καλά κατασκευασμένοι

εσωτερικά, απείχαν πολύ από ασφαλείς για τα δάκτυλα, καθώς πολλοί από αυτούς είχαν ανοίγματα στο κλουβί τους αρκετά μεγάλα ώστε να χωράει μια ολόκληρη παλάμη ή ένα ολόκληρο χέρι μέσα τους. Πολλά παιδιά τραυμάτισαν σοβαρά τα χέρια και τα δάχτυλά τους με αυτούς τους ανεμιστήρες.

Κατά τη δεκαετία του 1920, οι βιομηχανικές πρόοδοι επέτρεψαν την μαζική παραγωγή ατσαλιού σε διάφορα σχήματα, ρίχνοντας τις τιμές - πράγμα που τους έκανε πιο προσιτούς στα νοικοκυριά. Μια δεκαετία μετά, σχεδιάστηκε ο πρώτος διακοσμητικός ανεμιστήρας. Πρίν από αυτόν τον ανεμιστήρα, που ονομάστηκε Ασημένιος Κύκνος (Silver Swan), οι πιο πολλοί οικιακοί ανεμιστήρες ήταν αρκετά απλοί. Το '50, κατασκευάστηκαν ανεμιστήρες που είχαν έντονα και φωτεινά χρώματα.

Παρότι οι ανεμιστήρες οικιακής χρήσης έγιναν λιγότερο δημοφιλείς με την εμφάνιση του κλιματιστικού (aircondition), οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα στη βιομηχανία και όπου αλλού απαιτείται ο εξαερισμός ή η μεταφορά αέρα, με την εμφάνιση να μην έχει τόσο σημαντικό ρόλο, όσο η λειτουργικότητα και η αποδοτικότητα του.

Καθημερινά γίνεται παραγωγή νέων ανεμιστήρων αλλά και μελέτη νέων μοντέλων. Το πρόβλημα της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα. Ο σχεδιασμός αυτός πρέπει να είναι ο βέλτιστος δυνατός, από άποψη αποδοτικότητας και χαρακτηριστικών.

Το πρόβλημα αυτό είναι ενδιαφέρον για πολλούς λόγους. Καταρχάς εμπλέκει πολλά επιστημονικά πεδία. Βασικότερο αυτών είναι η μηχανική των ρευστών, δηλαδή η επιστήμη που ασχολείται με την κίνηση των ρευστών: των υγρών και των αερίων. Η κατανόηση της ροής του αέρα μέσα αλλά και έξω από τον ανεμιστήρα προϋποθέτει τουλάχιστον την βασική γνώση ρευστομηχανικής. Η αεροδυναμική – παραπλήσια της ρευστοδυναμικής – είναι χρήσιμη για την μελέτη των πτερυγίων του ανεμιστήρα. Τα στοιχεία μηχανών συνθέτουν τον κινητήρα, δηλαδή το σύστημα που θα δώσει την απαραίτητη ισχύ για την λειτουργία του ανεμιστήρα. Μέσα σε αυτές τις συνθήκες είναι μόνο ικανή η μελέτη αυτού του ξεχωριστού μηχανήματος.

Το θέμα όμως, πέρα από το θεωρητικό ενδιαφέρον του, έχει φυσικά και το πρακτικό ενδιαφέρον. Πρακτικό ενδιαφέρον στην άμεση εφαρμογή του. Οι εφαρμογές των ανεμιστήρων είναι πολλές: από την ηλεκτρονική μέχρι την οικιακή και την βιομηχανική χρήση. Έτσι η σωστή μελέτη ενός τέτοιου σχεδιασμού είναι απαραίτητη για την ορθή και αποδοτική χρήση του.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται έχει περίπου την εξής δομή: πρώτα αναφέρονται περιληπτικά βασικά εργαλεία και βασικές θεωρητικές έννοιες που πρέπει να έχει ο αναγνώστης και έπειτα οι πρακτικές και οι εμπειρικές μεθοδολογίες. Παρόλο που έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια στην όσο το δυνατόν εισαγωγική μελέτη, κάποιο υπόβαθρο γνώσεων είναι απαραίτητο, τουλάχιστον σίγουρα για το θεωρητικό μέρος της εργασίας. Δηλαδή οι αναγνώστες πρέπει να γνωρίζουν βασικές



έννοιες και μεθοδολογίες της Μαθηματικής Ανάλυσης, της Φυσικής και της Μηχανικής των υλικών. Όσον αφορά το πρακτικό κομμάτι του σχεδιασμού οι περισσότερες μέθοδοι είναι εμπειρικές γι' αυτό προτρέπω θερμά την αναζήτηση της αντίστοιχης βιβλιογραφίας στο τέλος για την βαθύτερη μελέτη αυτών. Ακόμα η εργασία, πέρα από τα σχέδια, έχει εμπλουτιστεί με πολλές εικόνες και διαγράμματα για την ποιοτική μελέτη και την οπτική αίσθηση των στοιχείων του ανεμιστήρα.

Τέλος η εργασία αυτή ευελπιστώ να συμβάλλει στη νέα γνώση ως μια σύντομη αλλά συγκεντρωτική και χρήσιμη μελέτη πάνω στους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες και να αποτελέσει πηγή πληροφοριών για άλλους σπουδαστές πάνω σε σχετικά θέματα

## **1. ΓΕΝΙΚΑ**

### **1.1 ANEMISΤΗΡΕΣ**

#### **1.1.1 Ορισμός**

Ο ανεμιστήρας είναι μια μηχανή, που χρησιμοποιείται για να δώσει ενέργεια στο ρευστό και συγκεκριμένα στο αέριο ή τον αέρα. Η κατασκευή του αποτελείται από μια περιστρεφόμενη διάταξη πτερυγίων γύρω από έναν άξονα, στον οποίο το ρευστό εισέρχεται παράλληλα με δεδομένη ταχύτητα και πίεση και εξέρχεται αξονικά ή ακτινικά (ανάλογα με τον τύπο του ανεμιστήρα, Εικόνα 1.1) σε εξωτερικές κατευθύνσεις με αυξημένη ταχύτητα και πίεση.

Η περιστρεφόμενη διάταξη πτερυγίων μαζί με την πλήμνη, που ονομάζονται *δρομέας* ή *στροφέας*, συνήθως επικαλύπτονται από ένα κέλυφος – περίβλημα κυλινδρικού σχήματος, για την επίτευξη συγκεκριμένου προσανατολισμού και καλύτερης συγκέντρωσης του ρευστού.



Εικόνα 1.1: Ανεμιστήρες

Οι ανεμιστήρες λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές πιέσεις, αν και μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής πίεσης, και παράγουν μεγάλο όγκο ρευστού. Μπορεί να είναι διαφόρων ειδών ανάλογα με το σχήμα των πτερυγίων τους, την διάταξη του στροφέα και του κελύφους.

### 1.1.2 Κατηγορίες

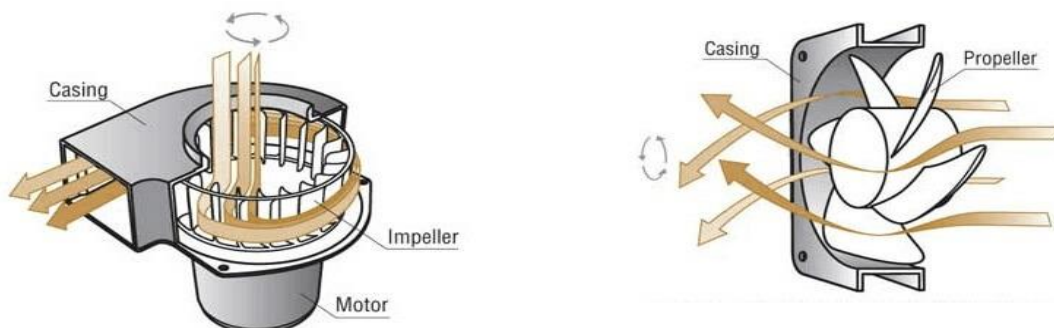
Η κύρια λειτουργία του ανεμιστήρα είναι να εκτρέπει τον αέρα με την βοήθεια των πτερυγίων του, σε εξωτερικές κατευθύνσεις ώστε να παράγει διαφορά πίεσης. Η εκτροπή πραγματοποιείται από την δύναμη που ασκεί το πτερύγιο στον αέρα, γνωστή και ως δύναμη ανύψωσης πτερυγίου (ή αεροτομής), όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Υπάρχουν δύο βασικές κατευθύνσεις του αέρα στο εσωτερικό του ανεμιστήρα, η *αξονική* και η *φυγοκεντρική*.

Στην αξονική η εισαγωγή του αέρα στο στροφέο γίνεται πολύ απλά παράλληλα προς την πλήμνη του ανεμιστήρα, δηλαδή αξονικά, ομοίως και η εξαγωγή του από αυτόν.

Στην περίπτωση του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα γίνεται εκμετάλλευση της φυγοκεντρικής δύναμης που υφίσταται στον αέρα. Η περιστρεφόμενη κίνηση του αέρα, εξαιτίας της κεντρομόλου επιτάχυνσης που αποκτά, έχει ως αποτέλεσμα την δύναμη αυτή, η οποία είναι ακτινική και κατευθύνεται «προς τα έξω». Έτσι ο αέρας ακολουθεί διαφορετική πορεία, κατά την οποία εισέρχεται αξονικά στο στροφέο και εξέρχεται ακτινικά σε κατευθύνσεις που τον οδηγούν προς τα έξω.

Όλοι οι ανεμιστήρες παράγουν πίεση μέσω της αλλαγής του διανύσματος της ταχύτητας ροής στο εσωτερικό του στροφέο (πτερύγια). Τα πτερύγια μεταφέρουν ενέργεια στον αέρα αυξάνοντας την ταχύτητα του καθώς αυτός διασχίζει τις επιφάνειες τους. Αποτέλεσμα της παραπάνω ενέργειας είναι :

- ο Στους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες αναπτύσσονται εφαπτομενικές και ακτινικές συνιστώσες ταχύτητας, ενώ,
- ο Στους αξονικούς εφαπτομενικές και αξονικές συνιστώσες ταχύτητας.



Εικόνα 1.2: Φυγοκεντρικός Ανεμιστήρας (Αριστερά) και Αξονικός Ανεμιστήρας (Δεξιά).

Έτσι, οι ανεμιστήρες διαιρούνται κατ' εξοχήν στους (Εικόνα 1.2) :

- Αξονικούς
- Φυγοκεντρικούς

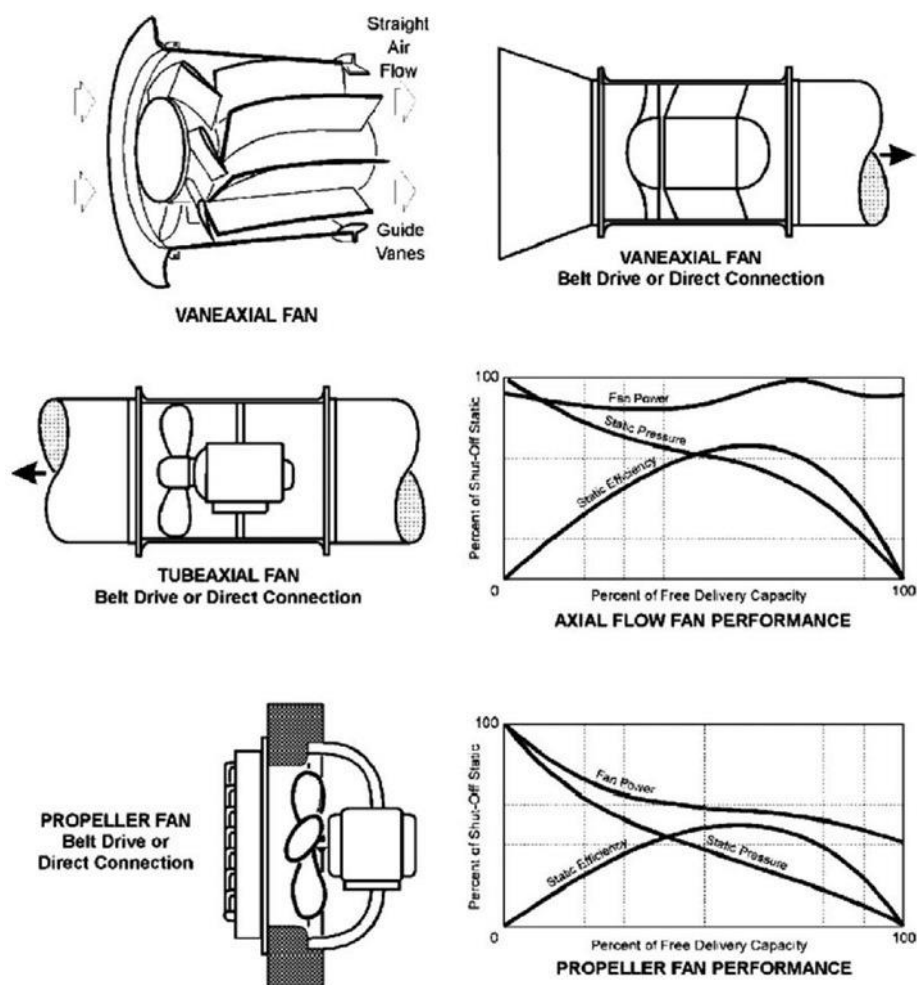
με υποκατηγορίες που είναι ανάλογες του σχήματος των πτερυγίων τους. Το πλεονέκτημα των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων έναντι των αξονικών, είναι ότι εκτός από την δύναμη εκτροπής του πτερυγίου, διαθέτουν μια επιπλέον δύναμη, την φυγόκεντρη, που ωθεί τον αέρα ακτινικά προς τα έξω. Το γεγονός αυτό καθιστά τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες πιο αποδοτικούς αφού παράγουν υψηλότερα ποσά στατικής πίεσης σε σχέση με τους αξονικούς σε ίσες διαμέτρους και περιστροφικής κίνησης των στροφείων. Απεναντίας, οι αξονικοί ανεμιστήρες, είναι πιο εύκολοι στην εγκατάσταση, διαθέτουν πιο συμπαγή κατασκευή καθώς και πιο αξιόλογη μελέτη πτερωτής.

Οι αξονικοί ανεμιστήρες παράγουν πίεση αποκλειστικά και μόνο με την αλλαγή του διανύσματος της ταχύτητας στο πτερύγιο και χωρίς καμία φυγοκεντρική δύναμη. Η διάταξή τους περιλαμβάνει το κέντρο του τροχού (άξονα) γύρω από τον οποίο εφαρμόζονται τα πτερύγια, και το κέλυφος. Η ροή αέρα που εκτρέπεται από τα πτερύγια σχηματίζει στην έξοδό του μια ελικοειδή μορφή. Ο κινητήρας εισάγεται είτε στον άξονα του τροχού στην πλευρά αναρρόφησης αέρα (είσοδος αέρα), είτε, εάν έχουμε μηχανισμό μετάδοσης κίνησης με τροχαλίες στην πλάγια πλευρά του ανεμιστήρα, ίσως και σε κάποια επάνω από εκείνον θέση. Μπορεί να είναι μικρών και μεγάλων διαστάσεων. Χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες :

- Propeller
- Tubeaxial
- Vaneaxial

Οι αξονικοί ανεμιστήρες τύπου propeller χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε χωρίς αεραγωγούς και έχουν έναν σχετικά μικρό λόγο διαμέτρων  $D_1/D_2$ , όπου  $D_1$  και  $D_2$  η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος της πτερωτής του ανεμιστήρα. Οι τύπου tubeaxial έχουν σχετικά μεγαλύτερο λόγο διαμέτρων και λειτουργούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής με αποτέλεσμα να παράγουν υψηλότερες πιέσεις. Οι τύπου vaneaxial είναι αξονικοί ανεμιστήρες όμοιοι με τους tubeaxial αλλά με οδηγητικά πτερύγια και ακόμη μεγαλύτερο λόγο διαμέτρων. Έτσι είναι οι πιο αποτελεσματικοί όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης, την παραγόμενη πίεση και ισχύ αλλά και τους παραγόμενους θορύβους. Γενικά όσο μεγαλύτερος ο λόγος διαμέτρων σε έναν ανεμιστήρα, τόσο μικρότερος ο ανεπιθύμητος θόρυβος.

Στην παρακάτω Εικόνα 1.3 φαίνονται οι κατηγορίες αυτές:



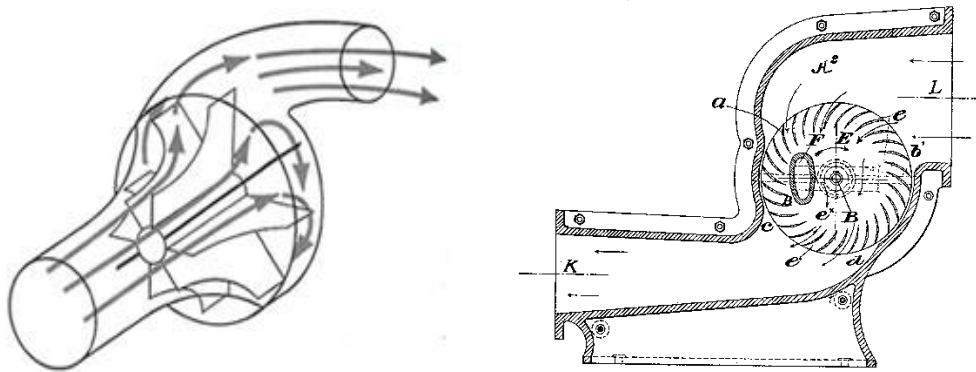
Εικόνα 1.3: Τύποι αξονικών ανεμιστήρων: Vaneaxial, Tubeaxial και Propeller.

Υπάρχουν επιπλέον ειδικές κατηγορίες ανεμιστήρων όπως οι:

- Σωληνοειδής
- Ανεμιστήρες οροφής
- Εγκάρσιας ροής

## - Φυσητήρες

Οι σωληνοειδείς ή φυγοκεντρικοί-αξονικοί (επειδή διαθέτουν και τις δύο μορφές πτερωτής) είναι βασικά φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες που εφαρμόζονται σε σωληνοειδές και όχι στο χαρακτηριστικό σπειροειδές κέλυφος, ενώ οι ανεμιστήρες οροφής μπορεί να είναι αξονικοί ή φυγοκεντρικοί. Η ιδιαιτερότητα των ανεμιστήρων εγκάρσιας ροής είναι ότι ο αέρας εισέρχεται σε αυτόν από κάποιο σημείο της περιφέρειας του στροφέα και εξέρχεται από διαφορετικό σημείο αυτής. Οι φυσητήρες είναι παρόμοιοι με τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες απλώς διαφέρουν στην γεωμετρία του περιβλήματος τους. Οι πρώτοι διαθέτουν κυκλική και πιο μικρή σε σχέση με το υπόλοιπο περίβλημα διατομή, στην έξοδο τους, για να έχουν την δυνατότητα να «φυσούν» τον αέρα με μεγαλύτερη ταχύτητα. Παρακάτω (Εικόνα 1.4) φαίνονται τα σχέδια και η ροή αέρα ενός φυσητήρα και ενός ανεμιστήρα εγκάρσιας ροής.



Εικόνα 1.4: Φυσητήρας (Αριστερά) και Εγκάρσιας ροής (δεξιά).

### 1.1.3 Χρήσεις

Η χρησιμότητα των ανεμιστήρων είναι ευρεία και έγκειται στον κλιματισμό και εξαερισμό χώρων κατοικίας ή εργασίας, στον εξαερισμό μεγάλων κτιρίων (βιομηχανία, εμπορικά καταστήματα κλπ), σε συστήματα ψύξης οχημάτων, σε εφαρμογές αφαίρεσης σκόνης και λοιπών μικρών σωματιδίων, ακόμη και διαβρωτικά αέρια, σε ξήρανση αέρα κλπ. Ανεμιστήρες εφαρμόζονται επίσης σε χυτήρια, κλίβανους, και λοιπά εργαστήρια. Σήμερα, ο συνολικός βαθμός απόδοσης αυτών έχει ξεπεράσει το 90% σε ιδανικές όμως συνθήκες ροής, γιατί στην πραγματικότητα προκύπτουν προβλήματα, ιδίως στην διασυνεργασία αυτών με δίκτυα τα οποία μπορούν να μειώσουν αρκετά τον βαθμό απόδοσης.

#### Ειδικότερα:

Οι αξονικοί ανεμιστήρες είναι ευρέως διαδεδομένοι και διαθέτουν μια σχετικά ευκολότερη κατασκευή από τους φυγοκεντρικούς. Εφαρμόζονται στην απλή

καθημερινότητα του ανθρώπου για άνεση κατοικίας, για εξαερισμό και άλλες κατασκευές για ειδικές εφαρμογές στην βιομηχανία, στο εμπόριο, στην ναυτιλία. Το πιο απλό παράδειγμα αξονικού ανεμιστήρα είναι ο ανεμιστήρας κλιματισμού που χρησιμοποιούμε στο σπίτι μας, καθώς επίσης και αυτό ο οποίος τοποθετείται (παλαιότερα κυρίως) σε κάποιον τοίχο του σπιτιού μας (πχ κουζίνα). Εφαρμόζονται επίσης στα πλοία (προπέλες πλοίων) και στα σκάφη. Ακόμη μια χαρακτηριστική λειτουργία ενός αξονικού ανεμιστήρα είναι εκείνη στο ελικόπτερο (έλικας). Σε πιο σύνθετες λειτουργίες μπορούν να διαχειριστούν καυτό ή και μολυσμένο αέρα, διαβρωτικά αέρια από εργοστάσια, εφαρμόζονται σε χυτήρια, κλίβανους, χρησιμοποιούνται σε εργαστήρια, ακόμη και σε μικροκατασκευές όπως πλυντήρια, τοίχους καταστημάτων και σοφίτων.

Οι σωληνοειδείς ή φυγοκεντρικής-αξονικής ροής είναι ανεμιστήρες, η δομή των οποίων είναι γενικά ως εξής: Ένας φυγοκεντρικός ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος σε ένα τετραγωνικό ή βαρελοειδές ή κυλινδρικό κάλυμμα, στο οποίο υπάρχει, στην ίδια αξονική θέση ένας τύπος αξονικού ανεμιστήρα (τύπος Vaneaxial). Ο αξονικός ανεμιστήρας αποτελείται από τα οδηγητικά πτερύγια και την κεντρική βάση του (πλήμνη). Ο αέρας εισέρχεται στον φυγόκεντρο ανεμιστήρα κανονικά (αξονικά) και εξέρχεται εκτινικά σε εξωτερικές κατευθύνσεις. Αμέσως μετά με την βοήθεια λαμαρίνων που είναι τοποθετημένες κωνικά στην έξοδο του αέρα από τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα, οδηγούν τον αέρα να επιστρέψει πάλι σε γωνία 90° ώστε να εισχωρήσει στον αξονικό ανεμιστήρα και να εξέλθει αξονικά ή με ελικοειδή μορφή από αυτόν. Οι λεπίδες του φυγόκεντρου ανεμιστήρα είναι συνήθως κάθετες με προς τα πίσω κλίση για καλύτερη οικονομία και πιο σπάνια χρησιμοποιούνται οι λεπίδες αεροτομής ή οι λεπίδες με καμπύλη προς τα πίσω. Οι λεπίδες με καμπύλη προς τα εμπρός αποφεύγονται. Ο ανεμιστήρας αυτός είναι ένας συνδυασμός φυγοκεντρικού και αξονικού ανεμιστήρα με σκοπό την εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις ροής στις οποίες χρειάζεται μια πιο αξιόλογη παραγωγή στατικής πίεσης (πολλές φορές και μεγαλύτερη ροή αέρα) και μια πιο εύκολη εγκατάσταση. Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένοι ανεμιστήρες διαθέτουν χαμηλότερες αποδόσεις από έναν αξονικό ανεμιστήρα τύπου Vaneaxial σε πιο μικρές κατασκευές, και αρκετές απώλειες ενέργειας μιας και ο αέρας εξαναγκάζεται να αλλάξει πορεία δύο φορές μέσα στο σύστημα.



Εικόνα 1.5: Εφαρμογές αξονικών ανεμιστήρων για εξαερισμό κτιρίων (αριστερά) και ψύξη (δεξιά).

Οι ανεμιστήρες οροφής τοποθετούνται σε κάποια οροφή (όπως δείχνει η ονομασία τους) κτιρίου. Χρησιμοποιούνται για εξαερισμό αέρα (Εικόνα 1.5) ή αντίθετα για παροχή αέρα από το εξωτερικό στο εσωτερικό του χώρου σε κτίρια στα οποία απαιτείται μια εναλλαγή στην ποιότητα του αέρα (κουζίνες εστιατορίων, φούρνοι, μηχανουργία κα), στον οποίο υπάρχουν σωματίδια σκόνης, λαδιού κλπ. Η ροή των ανεμιστήρων οροφής είναι συνήθως αξονική για την περίπτωση παροχής αέρα προς τον εξωτερικό χώρο, διότι ο φυγοκεντρικός τύπος ανεμιστήρα διαθέτει μια πιο περίπλοκη εφαρμογή. Αντίθετα στην περίπτωση απομάκρυνσης του αέρα από κάποιο συγκεκριμένο χώρο προτιμούνται οι φυγοκεντρικοί τύποι ανεμιστήρων οροφής διότι παράγουν περισσότερη αρνητική στατική πίεση για να συνδέονται εύκολα με αεραγωγούς.

Οι ανεμιστήρες εγκάρσιας ροής είναι στην ουσία ανεμιστήρες με φυγοκεντρικό τύπο στροφείου αλλά διαφορετικό περίβλημα. Εδώ, ο αέρας εισέρχεται από μια μεριά του στροφέα και εξέρχεται από κάποια άλλη όπως φαίνεται στην εικόνα. Οι ανεμιστήρες αυτοί δημιουργούν μια στενή και μακρυνή ροή αέρα στην έξοδο τους, χαρακτηριστικό το οποίο βοηθά σε εφαρμογές όπως αεροκουρτίνες, στεγνωτήρες χεριών, συσκευές προμήθειας ξηρού αέρα σε εφαρμογές καθαρισμού αυτοκινήτων, ηλεκτρικές συσκευές καλοριφέρ και κλιματιστικής θέρμανσης δωματίων, σε αυτοματισμούς και εκτυπωτές. Τα αρνητικά των παραπάνω ανεμιστήρων είναι ότι διαθέτουν χαμηλές αποδόσεις (35% έως 45%), χαμηλή κατασκευαστική αντοχή και για πιά σύνθετες εφαρμογές διαθέτουν υψηλό κόστος κατασκευής.

## **2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

Ρευστοδυναμική είναι ο κλάδος της Φυσικής που μελετά την δυναμική των ρευστών. Δηλαδή μελετά την συμπεριφορά των ρευστών όταν τους ασκούνται δυνάμεις αλλά και όταν προσφέρεται ενέργεια σε αυτά. Αποτελεί ειδική κατηγορία γενικότερα της μηχανικής των ρευστών (Ρευστομηχανική), όπως επίσης και η Υδροστατική, η Αεροδυναμική κ.α. Αποτελείται από μερικές θεμελιώδεις εξισώσεις και θεωρήματα όπως η αρχή του Αρχιμήδη, η αρχή του Πασκάλ, η εξίσωση συνέχειας, η εξίσωση Bernoulli, οι εξισώσεις Navier-Stokes κα. Βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ρευστοδυναμική είναι η ροή, η άνωση, η πίεση, η παροχή και το ιξώδες.

Οι ανεμιστήρες αποτελούν κατ'εξοχήν ρευστοδυναμικές μηχανές, καθώς ελέγχουν και τροποποιούν την ροή του αέρα. Ο αέρας εξ'ορισμού είναι ρευστό. Γι' αυτό κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή ενός κεφαλαίου που να ασχολείται με ρευστά. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη εισαγωγή μόνο των απαραίτητων στοιχείων ρευστοδυναμικής για την κατανόηση λειτουργίας των ανεμιστήρων.

## 2.1 ΡΕΥΣΤΑ

Ο ορισμός του ρευστού έχει να κάνει άμεσα με την εμπειρία μας. *Ρευστό* ονομάζεται οποιοδήποτε υλικό σώμα το οποίο βρίσκεται στην υγρή ή την αέρια κατάσταση του. Ρευστά χαρακτηρίζονται επίσης τα υλικά τα οποία μπορούμε να θεωρήσουμε ότι βρίσκονται σε μια ενδιάμεση κατάσταση αέρα – στερεού ή υγρού – στερεού. Τέτοια ρευστά είναι για παράδειγμα η σκόνη.

Η χαρακτηριστική ιδιότητα των ρευστών είναι ότι «ρέουν», δηλαδή δεν έχουν συγκεκριμένο σχήμα αλλά καταλαμβάνουν το σχήμα του χώρου που τα περικλείει. Τα εσωτερικά τους σωματίδια ολισθαίνουν το ένα επάνω στο άλλο στην περίπτωση των υγρών, και κινούνται ακατάπαυστα στον χώρο, χωρίς συγκεκριμένο προσανατολισμό, στην περίπτωση των αερίων. Εκείνο που καθιστά τα ρευστά να διαφέρουν από τα στερεά, είναι η αντίδραση τους στις εξωτερικές δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτά. Για να γίνει πιο κατανοητή η τελευταία πρόταση δίνεται η εξήγηση ότι: Εάν σε ένα ρευστό εφαρμοστεί διατμητική τάση (σχετικά μικρή), τότε το ρευστό αυτό θα παραμορφωθεί. Όμως, σε αντίθεση με κάποιο στερεό σώμα, εάν η φόρτιση αυτή σταματήσει τότε το ρευστό δεν θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, αλλά αντιθέτως, θα συνεχίσει να παραμορφώνεται όσο χρονικό διάστημα η τάση εφαρμόζεται. Αυτή είναι μια εύστοχη εξήγηση της διαφοράς ρευστού και στερεού σώματος. Στην ίδια περίπτωση φόρτισης με διατμητική τάση, όταν αυτή σταματούσε να ενεργεί, τότε το στερεό σώμα θα ερχόταν στην αρχική του κατάσταση (υπό ορισμένη τιμή ελαστικότητας για το κάθε στερεό ξεχωριστά).

Τα ρευστά παρουσιάζουν μόνο μία δύναμη και την ασκούν προς τα έξω. Η δύναμη αυτή ονομάζεται, αντίστοιχα για τα υγρά και τα αέρια, *υδροστατική* και *στατική πίεση*. Επομένως η δύναμη αυτή είναι δύναμη πίεσης προς την επιφάνεια που περικλείουν τα ρευστά.

Βασική έννοια που σχετίζεται με τα ρευστά είναι το *ιξώδες*. Το ιξώδες είναι βασικά μια θερμοδυναμική ιδιότητα των ρευστών η οποία μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας τους, και λιγότερο με την αλλαγή της πίεσης τους. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνουν και οι μέσες αποστάσεις μεταξύ των μορίων του ρευστού, με αποτέλεσμα να μικραίνουν τα μέτρα των διαμοριακών δυνάμεων μεταξύ τους. Έτσι, καθώς αυξάνει η θερμοκρασία το ιξώδες ελαττώνεται. Αυτό βέβαια ισχύει στην περίπτωση των υγρών. Στα αέρια οι διαμοριακές δυνάμεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των υγρών. Το ιξώδες των αερίων οφείλεται σε συγκρούσεις μεταξύ των μορίων κατά την κίνησή τους. Επομένως η πιθανότητα να συμβεί μια σύγκρουση μεταξύ των μορίων του αέρα αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, με αποτέλεσμα το ιξώδες των αερίων να



αυξάνει καθώς αυξάνει η θερμοκρασία. Οι μονάδες του ιξώδους στο SI είναι:  $(Pa \cdot sec) = \left(\frac{N \cdot s}{m^2}\right) = \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$

Μια διατύπωση που διασαφηνίζει καλύτερα τον ορισμό του ιξώδους είναι αυτή του Maxwell, σύμφωνα με τον οποίο:

«Αν δυο επιφάνειες είναι παράλληλες και απέχουν απόσταση μεταξύ τους ίση με την μονάδα, ο δε χώρος μεταξύ τους είναι γεμάτος με ρευστό, και αν η μια επιφάνεια κινείται παράλληλα προς την άλλη με ταχύτητα ίση με την μονάδα ταχύτητας, τότε η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, που ασκείται στην κάθε επίπεδη επιφάνεια σαν αντίσταση στην κίνησή τους, είναι αριθμητικά ίση με το ιξώδες του ρευστού».

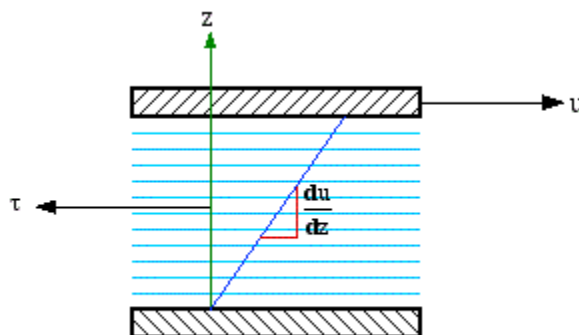
### 2.1.1 Νευτωνικά και μη – νευτωνικά ρευστά

Τα ρευστά διακρίνονται σε *νευτωνικά (ιδανικά)* και *μη – νευτωνικά ρευστά*. Τα πρώτα είναι υποθετικά ρευστά και θεωρούνται ως ιδεατά, είναι δηλαδή ασυμπίεστα και καθώς ρέουν παρουσιάζουν μηδενική εσωτερική τριβή (ιξώδες), καθώς και καμία δύναμη συνάφειας μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων που τα περικλείουν. Η υποθετική σύσταση των ιδανικών ρευστών υπάρχει για να διευκολύνει την κατανόηση των νόμων των ρευστών, γενικότερα, αλλά και για την απλούστευση υπολογισμού των παραμέτρων τους για ανάλογα θεωρητικά συμπεράσματα.

Πιο συγκεκριμένα τα νευτωνικά υπακούουν στον νόμο του Νεύτωνα (Εικόνα 2.1) και είναι τα λεγόμενα φυσικά ρευστά, όπως το νερό, ορισμένα υδατικά διαλύματα και διαλύτες καθώς και όλα τα αέρια. Κινούνται περίπλοκα και μη προβλέψιμα στον χώρο για αυτό τον λόγο είναι δύσκολο να κατανοηθούν. Ο νόμος του Νεύτωνα αναλύει και αποδεικνύει την σχέση αναλογίας μεταξύ διατμητικής τάσης, ιξώδους (η λεγόμενη εσωτερική τριβή των ρευστών) και παραμόρφωσης στο ρευστό. Ειδικότερα όταν σε ένα ρευστό εφαρμοστεί μια διατμητική τάση  $\tau_{yx}$ , τότε αυτή θα είναι αντιθέτως ανάλογη του ιξώδους  $\mu$  και ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της γωνιακής παραμόρφωσης του ρευστού στοιχείου. Για μονοδιάστατη στρωτή ροή:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy}$$

$\frac{du_x}{dy}$  μεταβολή ταχύτητας του ρευστού προς την μεταβολή του σχήματος του



Τα ρευστά που δεν υπακούουν στον νόμο του Νεύτωνα είναι τα μη – νευτωνικά ρευστά. Κάποια από αυτά είναι πολυμερή, γαλακτώματα, αιωρήματα κα.

### 2.1.2 Πυκνότητα και Ροή ρευστών

Η περιοχή στην οποία ρέει το ρευστό λέγεται πεδίο ροής. Κατά την κίνηση ενός στοιχειώδους όγκου ρευστού διαγράφεται μια τροχιά, γνωστή ως γραμμή ροής. Το χαρακτηριστικό της γραμμής ροής είναι ότι σε κάθε σημείο της, η ταχύτητα του στοιχειώδους όγκου είναι εφαπτόμενη σε αυτήν. Οι γραμμές ροής δεν τέμνονται ποτέ.

*Στρωτή ροή* καλείται εκείνη η ροή στην οποία ο κάθε στοιχειώδης όγκος ελέγχου του ρευστού διαπερνά συνεχώς την ίδια γραμμή ροής χωρίς να ακουμπά κάποιον άλλον όγκο, και όλα τα στρώματα ροής είναι παράλληλα μεταξύ τους. Για σταθερή ταχύτητα ροής κάθε στοιχειώδης όγκος σε κάθε γραμμή ροής είναι σε σταθερή ταχύτητα, και τότε λέγεται πως η ροή είναι *μόνιμη*, δηλαδή η ταχύτητα του στοιχειώδους όγκου δεν εξαρτάται από τον χρόνο. Όταν ένας στοιχειώδης όγκος ρευστού δεν διαγράφει συνεχώς μια γραμμή ροής αλλά ακολουθεί ακανόνιστη πορεία σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και να δημιουργεί στροβίλους τότε λέμε πως έχουμε *τυρβώδη* ή *στροβιλοειδή* ροή. Στην τυρβώδη ροή αυξάνεται το ιξώδες και ακολούθως οι απώλειες της μηχανικής ενέργειας του συστήματος.

Η πυκνότητα ενός ρευστού ορίζεται ως η μάζα του ρευστού στην μονάδα του όγκου. Έτσι, για ένα ρευστό μάζας  $m$  που καταλαμβάνει όγκο  $V$  ορίζεται ως (μέση) πυκνότητα :

$$\rho = \frac{m}{V} \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad (2.1)$$

*Ασυμπίεστο* καλείται το ρευστό στο οποίο ο όγκος του δεν μεταβάλλεται με την μεταβολή της πίεσης. Η παραδοχή αυτή ταιριάζει περισσότερο στα υγρά ρευστά. Όμως για σταθερή πίεση ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί εξίσου ασυμπίεστος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει μεταβολή στην πυκνότητα ενός ρευστού εάν μεταβληθεί η πίεση και η θερμοκρασία του. Η συνθήκη αυτή ισχύει διαφορετικά στα υγρά και αέρια σώματα. Ένα υγρό θεωρείται προσεγγιστικά ασυμπίεστο διότι ο όγκος που καταλαμβάνει μια ορισμένη μάζα υγρού θεωρείται σχεδόν αμετάβλητος. Αντιθέτως, η πυκνότητα του αέρα θα μεταβάλλεται επειδή ο όγκος που καταλαμβάνει μια ορισμένη ποσότητα αέρα μεταβάλλεται. Έτσι τα υγρά θεωρούνται ως ασυμπίεστα ρευστά ( $\rho = \text{σταθ}$ ), ενώ τα αέρια θεωρούνται συμπιεστά ρευστά ( $\rho \neq \text{σταθ}$ ).

## 2.2 ΠΙΕΣΗ

Ο πλανήτης μας διαθέτει διάμετρο 7,914mi ή ακτίνα 3,957mi, όμως, μόνο ένα πολύ λεπτό στρώμα αέρα τον υπερκαλύπτει. Η πίεση του αέρα είναι υψηλότερη κοντά στο έδαφος και μειώνεται όσο ανεβαίνουμε υψόμετρο. Στο επίπεδο της θάλασσας η ατμοσφαιρική ή βαρομετρική πίεση είναι 29,92 inHg. Σε υψόμετρο 15 μιλίων ή αλλιώς 24.140,16 μέτρων καλύπτεται μόνο το 0,4% της διαμέτρου της γης, και η ατμοσφαιρική πίεση εκεί είναι 1,00inHg.

Ο αέρας αποτελείται κυρίως από οξυγόνο και άζωτο σε ποσοστά 21 και 78% αντίστοιχα, συν ένα ποσό 1% άλλα αέρια. Ο αέρας δεν είναι χημική ένωση των παραπάνω αερίων αλλά ένα μίγμα, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει επίσης νερό σε μορφή ατμού. Ο ατμός αυτός αυξάνει την πυκνότητα του αέρα.

Πίεση γενικά, σε ένα σημείο ορίζεται :

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (2.2)$$

Όπου:  $\delta F$  η κάθετη δύναμη που ασκείται στην στοιχειώδη επιφάνεια  $\delta A$  που περιέχει το αναφερόμενο σημείο. Όταν η πίεση είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια  $A$ , τότε η (μέση) πίεση δίνεται από την σχέση :

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

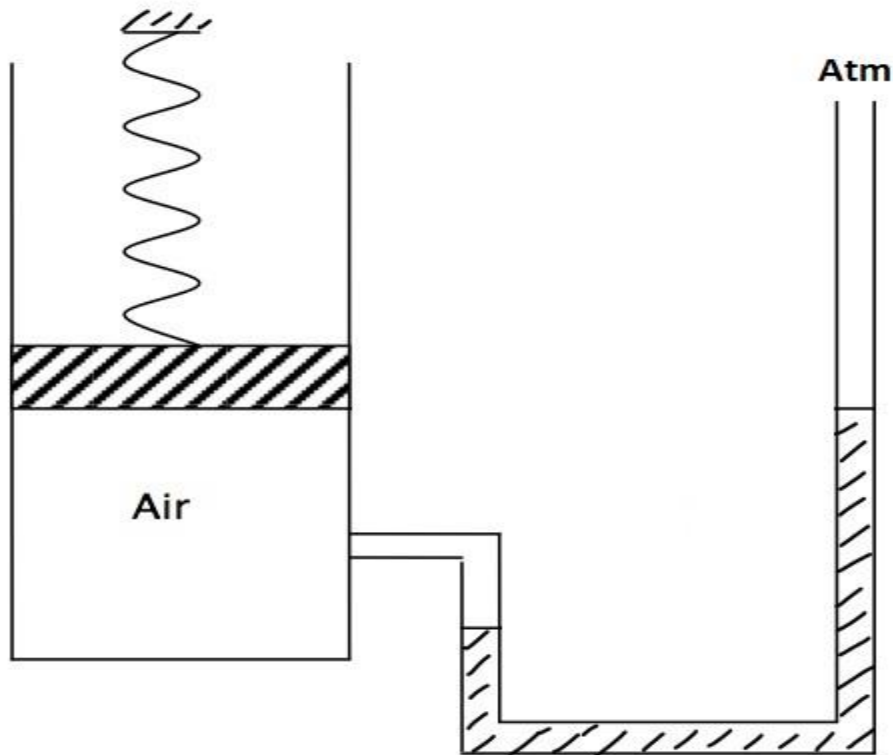
Μονάδες πίεσεως στο SI: 1Pa (Pascal) = 1N/m<sup>2</sup>

Στην πράξη: 1 Bar = 100 kPa = 10<sup>5</sup>N/m<sup>2</sup> , 1 μBar = 1 dyn/cm<sup>2</sup>

Όταν η πίεση αναφέρεται σε επιφάνειες οι οποίες περιορίζουν ένα ρευστό ή βρίσκονται εντός ενός ρευστού, και το ρευστό βρίσκεται σε στατική ισορροπία (= το ρευστό ηρεμεί, όλο το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό βρίσκονται σε ισορροπία), τότε η πίεση αυτή ονομάζεται στατική πίεση (για τα αέρια) ή υδροστατική πίεση (για τα υγρά). Στην περίπτωση της στατικής ισορροπίας η μόνη φυσική δύναμη που επηρεάζει το ρευστό είναι η δύναμη της βαρύτητας. Για αυτό το λόγο η στατική πίεση μεταβάλλεται με το βάθος από την επιφάνεια του ρευστού. Δυναμική είναι πίεση που οφείλεται στην κινητική ενέργεια ενός ρευστού.

### → Στατική πίεση

Για να γίνει πιο κατανοητή η στατική πίεση θα αναλυθεί η επίδραση της σε ένα κύλινδρο που διαθέτει ένα πιστόνι συνδεδεμένο με ένα μανόμετρο όπως δείχνει η Εικόνα 2.2:



Εικόνα 2.2: Κύλινδρος με πιστόνι και μανόμετρο

Το πιστόνι μπορεί να μετακινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω με την δύναμη της πίεσης. Το μανόμετρο αυτή την στιγμή δείχνει πίεση μηδέν. Αυτό σημαίνει πως η πίεση κάτω από το πιστόνι είναι ίση με την βαρομετρική πίεση της ατμόσφαιρας. Καθώς το πιστόνι κινείται προς τα κάτω, ο αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό του συμπιέζεται και αποκτά μια πίεση που τείνει να επαναφέρει το πιστόνι στην αρχική του θέση. Το μανόμετρο έχει ένδειξη θετικής πίεσης η οποία είναι η πίεση του αέρα που είναι ανάλογη της ατμοσφαιρικής. Εάν αντίθετα, το πιστόνι μετακινηθεί προς τα επάνω, τότε ο αέρας στο εσωτερικό του θα διασταλθεί και θα αποκτήσει εξίσου με πριν μια κινητική ενέργεια η οποία τείνει να επαναφέρει τον αέρα στον αρχικό του όγκο και το πιστόνι στην αρχική του θέση. Το μανόμετρο τώρα αναγράφει μια αρνητική πίεση αέρα ανάλογη της ατμοσφαιρικής.

Η παραπάνω εξήγηση δείχνει την επίδραση της θετικής και της αρνητικής πίεσης στον ακίνητο αέρα. Όμως, αυτή δεν ισχύει μόνο στον στάσιμο αλλά ισχύει και στον κινούμενο αέρα. Ένας ανεμιστήρας ο οποίος παράγει μεγάλες ποσότητες αέρα σε ένα σύστημα αγωγών, παράγει θετική στατική πίεση για να υπερνικήσει τις αντιστάσεις τριβής που θα συναντήσει ο αέρας μέσα στον αγωγό. Από την άλλη ένας ανεμιστήρας ο οποίος απορρίπτει αέρα προς τα έξω παράγει αρνητική στατική πίεση στο σύστημα αναρρόφησης για να υπερνικήσει εξίσου τις αντιστάσεις του συστήματος που συναντά ο αέρας καθώς ρέει σε αυτόν.

## → Δυναμική πίεση

Όταν ο αέρας διέρχεται από έναν αγωγό κυκλικής διατομής χωρίς μεταβολές στην διάμετρο του, αποκτά μια ταχύτητα της οποίας η μέγιστη τιμή της βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού. Η κατανομή της ταχύτητας είναι συγκεκριμένη με μεγαλύτερη τιμή αυτής στο μέσο του αγωγού και ελάχιστη τιμή αυτής στις άκρες του αγωγού. Ο λόγος αυτής της κατανομής είναι οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβής στις άκρες του αγωγού μεταξύ του ρευστού και των τοιχωμάτων του. Για αρκετά μικρές διαμέτρους αγωγών τα διανύσματα της ταχύτητας πλησιάζουν την κάθετη κατανομή στον αγωγό δηλαδή ο μέσος όρος της ταχύτητας των σωματιδίων ρευστού είναι ίσος με το 90% περίπου της υψηλότερης ταχύτητας στο μέσο του αγωγού. Η δυναμική πίεση εξαρτάται άμεσα από την μέση ταχύτητα των μορίων του αέρα.

Γνωρίζοντας την μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα διαμέσω ενός αγωγού σταθερής διατομής, υπολογίζεται η δυναμική πίεση του αέρα ως εξής:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho \cdot u^2$$

$P_d$	δυναμική πίεση σε Pa (N/m <sup>2</sup> )
$\rho$	πυκνότητα αέρα σε kg/m <sup>3</sup>
$u$	ταχύτητα αέρα σε m/s

Γενικά, η δυναμική πίεση αναπαριστά την κινητική ενέργεια του αέρα. Πιο απλά, είναι η αίσθηση που έχουμε όταν κρατήσουμε το χέρι μας κόντρα σε μια ροή αέρα.

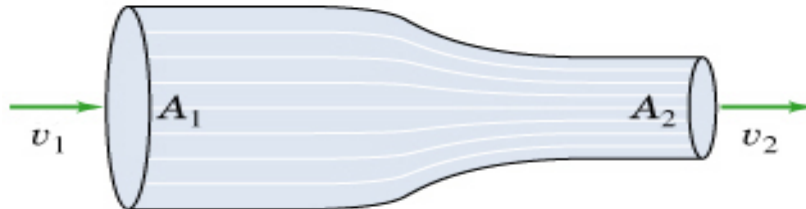
## 2.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΗ BERNOULLI

Η μελέτη της συνέχειας μάζας ενός ρευστού στηρίζεται στο γεγονός ότι η ροή είναι στρωτή, μόνιμη και ασυμπύεστη. Στην ουσία είναι η αρχή διατήρησης της μάζας ρευστού σε έναν σωλήνα ή αγωγό. Η θεωρία αυτή εξηγεί πως η μάζα που διαπερνά τον σωλήνα σε διάφορες διατομές δεν χάνεται, παρά μόνο μεταβάλλεται η ταχύτητα της. Η απόδειξή της έχει ως εξής:

Υποθέτεται ότι ένα *ασυμπύεστο* ρευστό ρέει *μόνιμα* διαμέσου ενός σωλήνα και η ροή του είναι στρωτή (Εικόνα 2.3). Ένας απειροελάχιστος όγκος ελέγχου διέρχεται από την διατομή  $A_1$  του σωλήνα έχοντας ταχύτητα  $u_1$  και διανύοντας απόσταση  $s_1 = u_1 dt$ . Αντίστοιχα, το ρευστό στην διατομή  $A_2$  του σωλήνα θα έχει αποκτήσει ταχύτητα  $u_2$  και θα έχει διανύσει απόσταση  $s_2 = u_2 dt$ . Τότε, επειδή το ρευστό είναι ασυμπύεστο, ο ίδιος όγκος θα διαπεράσει από την διατομή  $B$ , οπότε ισχύει :

$$dV = u_1 \cdot dt \cdot A_1 = u_2 \cdot dt \cdot A_2 \quad (2.4)$$

Όπου  $dV$  η μεταβολή του όγκου ρευστού που διαπερνά τον αγωγό. Η σχέση (2.4) είναι γνωστή ως *εξίσωση συνέχειας*.



Εικόνα 2.3: Ρευματικές γραμμές ρευστού διαμέσου αγωγού διαφορετικής διατομής. Η ταχύτητα αυξάνει στη μικρή διατομή.

Από την σχέση συνέχειας μπορούν να οριστούν δύο σημαντικά μεγέθη. Αυτά είναι η *ογκομετρική* και η *μαζική παροχή*. Ο παραπάνω όγκος στη μονάδα του χρόνου λέγεται παροχή όγκου και συμβολίζεται με  $Q$  :

$$Q := \frac{dV}{dt} = u \cdot A = \text{σταθερό} \quad (2.5)$$

Με άλλα λόγια, η παροχή όγκου είναι το ποσό του ρευστού που διαπερνά μια διατομή ενός αγωγού ως προς τον χρόνο, και διατηρείται σταθερή ποσότητα σε όλο το μήκος του αγωγού. Η μαζική παροχή δεν είναι άλλο από την ποσότητα της μάζας ενός ρευστού που διέρχεται μέσα σε έναν αγωγό ως προς τον χρόνο. Η σχέση μαζικής παροχής εισάγεται ως εξής: αφού η πυκνότητα ορίζεται ως ο λόγος της μάζας προς τον όγκο, τότε ισχύει:

$$Q_m := \frac{dm}{dt} = \frac{d(V \cdot \rho)}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \Rightarrow Q_m = \rho \cdot u \cdot A \quad (2.6)$$

Όπου,  $\rho$  η σταθερή πυκνότητα του ασυμπίεστου ρευστού. Η μαζική παροχή συμβολίζεται συνήθως με  $\dot{m}$ . Επομένως η ταχύτητα ροής θα είναι μεγαλύτερη στα στενότερα τμήματα του σωλήνα για να διατηρείται σταθερή η μάζα.

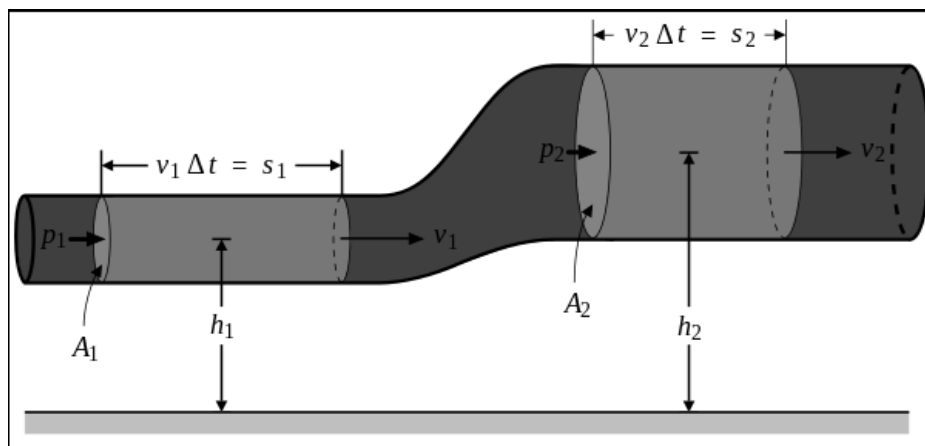
Η εξίσωση Bernoulli είναι μια χρήσιμη σχέση μεταξύ της πίεσης, της ταχύτητας και του υψομέτρου ενός κινούμενου ρευστού, και διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Daniel Bernoulli το έτος 1738. Η εξίσωση Bernoulli εκφράζει την αρχή *διατήρησης της μηχανικής ενέργειας* στα ρευστά. Απαιτεί μηδενικές απώλειες της

μηχανικής ενέργειας κατά την ροή του ρευστού, δηλαδή μηδενική εσωτερική τριβή. Άρα αναφέρεται σε ανιξώδη, στρωτή, ασυμπίεστη και μόνιμη ροή. Η σχέση αυτή είναι η:

$$p + \frac{1}{2}\rho \cdot u^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{σταθερό} \quad (2.7)$$

→Απόδειξη:

Θεωρείται ένας απειροελάχιστα μικρός σωλήνας όπου η διατομή του αλλάζει, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4:



Εικόνα 2.4

Είναι από την φυσική γνωστό πως το έργο που παράγεται από την συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σύστημα ισούται με την μεταβολή της κινητικής του ενέργειας, δηλαδή (για ασυμπίεστο ρευστό):

$$\Delta K = \frac{1}{2} dm \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} dm \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot dV \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (2.8)$$

$\Delta K$ : η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του συστήματος

$dm$ : η μεταβολή της μάζας του συστήματος (kg)

$v$ : η ταχύτητα του σώματος του συστήματος (m/s)

$\rho$ : η πυκνότητα του συστήματος (kg/m<sup>3</sup>)

$V$ : ο όγκος του συστήματος (m<sup>3</sup>)

Η οποία μεταβολή της κινητικής ενέργειας στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι αρνητική διότι από την εξίσωση συνέχειας, εφόσον  $A_1 < A_2$  συνεπάγεται  $v_1^2 > v_2^2$

Οι δυνάμεις που παράγουν έργο επάνω στο σύστημα, είναι οι δυνάμεις πίεσης  $p_1 A_1$  και  $p_2 A_2$  που δρουν στο αριστερό και δεξί μέρος του σωλήνα αντίστοιχα (Εικόνα 2.4). Προφανώς στο σύστημα ασκείται και η δύναμη του βάρους προς τα κάτω.

Καθώς το ρευστό ρέει μέσα στον σωλήνα, ένα ποσό αυτού ανυψώνεται από το ύψος  $h_1$  στο ύψος  $h_2$  όπως φαίνεται και από την ανοιχτόχρωμη περιοχή του παραπάνω

σχήματος. Το ποσό του ρευστού που παριστάνεται με το σκούρο χρώμα δεν έχει μεταβληθεί κατά την ροή.

Το ολικό έργο  $W$  που παράγει επάνω στο σύστημα η συνισταμένη των δυνάμεων, είναι:

- ο το έργο  $W_g$  που παράγεται στο σύστημα από την βαρύτητα, συνδέεται με την ανύψωσή του ρευστού μάζας  $m$  (σε kg) , από το ύψος  $h_1$ , από το επίπεδο εισαγωγής του ρευστού  $h_1$ , στο επίπεδο εξαγωγής του ρευστού  $h_2$ .

$$W_g = dm \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \rho \cdot g \cdot dV \cdot (h_1 - h_2) \quad (2.9)$$

( $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $m/s^2$ )

Το έργο είναι αρνητικό διότι η μετατόπιση του ρευστού είναι από κάτω προς τα πάνω αφού η δύναμη της βαρύτητας κατευθύνεται προς τα κάτω. Δηλαδή παράγεται έργο από το σύστημα ενάντια στην δύναμη βαρύτητας.

- ο Το έργο  $W_p$ , που είναι το έργο που παράγει πάνω στο σύστημα η δύναμη πίεσης  $p_1 A_1$  (είσοδος) για να μετακινήσει το υγρό στο σωλήνα και το έργο που παράγει επάνω στο σύστημα η δύναμη πίεσεως  $p_2 A_2$  (έξοδος). Για το έργο που παράγει μια δύναμη  $F$  (σε Newton) για να κινήσει ένα ρευστό σε απόσταση  $dx$  διαμέσου ενός σωλήνα διατομής  $A$ , ισχύει:

$$F \cdot dx = (p \cdot A) \cdot dx = p \cdot (A \cdot dx) = p \cdot dV \quad (2.10)$$

$p$  πίεση σε Pa ( $N/m^2$ )

$A$  σε  $m^2$

$V$  όγκος του ρευστού σε  $m^3$

Για το σχήμα υποθέτεται ότι :  $p_1 > p_2$  (για ροή από αριστερά προς τα δεξιά)  
Επομένως :

$$W_p = p_1 \cdot dV - p_2 \cdot dV = (p_1 - p_2) \cdot dV \quad (2.11)$$

επίσης αρνητικό.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.9) και (2.11), το ολικό έργο είναι:

$$W = W_g + W_p \quad (2.12)$$

Από το θεώρημα μεταβολής της κινητικής ενέργειας λοιπόν θα είναι:

$$W = W_g + W_p = \Delta K \Rightarrow$$



$$\rho \cdot g \cdot dV \cdot (h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) \cdot dV = \frac{1}{2} \rho \cdot dV \cdot (u_2^2 - u_1^2)$$

Το ρευστό όμως είναι ασυμπίεστο έτσι ισχύει πως  $dV = \text{σταθερό}$ . Άρα:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot u_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot u_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \Rightarrow$$

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{σταθερό}$$

Ο όρος  $p$  ονομάζεται *στατική πίεση*, και είναι εκείνη που θα μετρηθεί με μανόμετρο τοποθετημένο στον σωλήνα. Συνδέεται με τις δυνάμεις που προκαλούν τη ροή του ρευστού. Μπορεί να ειπωθεί ότι η στατική πίεση είναι, στην περίπτωση αυτή, το έργο που παράγεται από τις δυνάμεις αυτές σε κάθε μονάδα όγκου του ρευστού.

Ο όρος  $\frac{1}{2} \rho u^2$  ονομάζεται *δυναμική πίεση*, και συνδέεται με την κινητική ενέργεια του ρευστού, είναι δηλαδή η κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου.

Ο όρος  $\rho g h$  είναι η *υδροστατική πίεση*, και συνδέεται με τη δυναμική ενέργεια, δηλαδή υποδηλώνει την επίδραση του πεδίου βαρύτητας στην κίνηση του ρευστού.

*Επομένως ο νόμος του Bernoulli εκφράζει ότι κατά τη ροή ιδανικού ρευστού το άθροισμα της στατικής πίεσης  $p$ , της υδροστατικής  $\rho g h$  και της δυναμικής  $1/2 \rho u^2$ , κατά μήκος ενός αγωγού παραμένει σταθερό.*

- Αν το ρευστό είναι ακίνητο τότε η ταχύτητα του  $u$  είναι μηδέν, οπότε η δυναμική πίεση είναι επίσης μηδέν. Τότε ο νόμος του Bernoulli εξασθενεί και μετατρέπεται στη θεμελιώδη εξίσωση της στατικής των ρευστών.
- Αντίθετα, εάν η κίνηση του ρευστού εκτελείται σε οριζόντιο αγωγό, τότε το ύψος  $h$  είναι μηδέν και η υδροστατική πίεση μηδενίζεται, οπότε ο νόμος Bernoulli γράφεται:

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 = \text{σταθερό} \quad (2.12)$$

*Συμπερασματικά, εάν η διατομή ενός αγωγού δεν είναι σταθερή, στα σημεία στα οποία η ταχύτητα είναι μικρότερη, η πίεση είναι μεγαλύτερη, και αντίστροφα.*

## 2.4 Αριθμός Reynolds

Εάν η ροή ενός ρευστού διαμέσω ενός αγωγού ήταν γραμμική, στρωτή, χωρίς δίνες, τότε οι απώλειες λόγω τριβής στο σύστημα θα ήταν πολύ μικρές έως μηδαμινές. Σε σπάνιες εφαρμογές η ροή είναι στρωτή, και μάλιστα στους ανεμιστήρες δεν είναι ποτέ στρωτή αλλά τυρβώδης. Για αυτό τον λόγο εισήχθει ένας αδιάστατος

αριθμός, ο υπολογισμός του οποίου δίνει αποτέλεσμα στο είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης). Ο αριθμός αυτός λέγεται αριθμός Reynolds από τον ομόνυμο Άγγλο φυσικό ερευνητή Osborne Reynolds ο οποίος ερεύνησε πειραματικά την ροή των ρευστών :

$$Re = (\rho \cdot u \cdot D) / \mu \quad (2.13)$$

Όπου,  $\rho$  = πυκνότητα του ρευστού,  $u$  = ταχύτητα του ρευστού,  $D$  = διάμετρος αγωγού που διέρχεται το ρευστό,  $\mu$  = ιξώδες.

Αποδείχθηκε ότι για τιμές μικρότερες του  $Re = 1000$  ή  $2000$  η ροή θα είναι στρωτή. Για μεγαλύτερες τιμές του  $Re = 2000$  η ροή ξεκινά να είναι τυρβώδης. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή είναι βαθμωτή. Υπάρχουν διάφορες περιγραφές ροής όπως ολίγον τυρβώδης, πολύ τυρβώδης, ή πάρα πολύ τυρβώδης. Στις περισσότερες εφαρμογές ανεμιστήρων η ροή είναι πολύ τυρβώδης.

Στην επιλογή και στον σχεδιασμό ενός ανεμιστήρα θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η απόδοση που μπορεί να παράγει ο ανεμιστήρας. Ο λόγος είναι για να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν καλύτερα την ιπποδύναμη του ηλεκτροκινήτρα με σκοπό την καλύτερη οικονομία αλλά και για εξοικονόμηση ενέργειας. Προφανώς οι ανεμιστήρες με την καλύτερη απόδοση είναι και οι πιο ακριβοί. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνεται προσπάθεια για όσο το δυνατόν καλύτερη ισορροπία μεταξύ αυτών των παραμέτρων οικονομία - απόδοση.

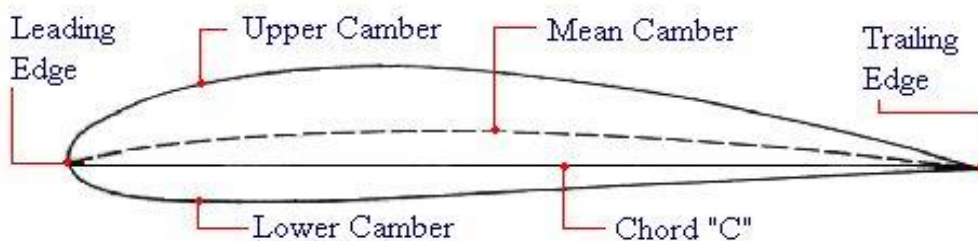
### 3. AIRFOIL

Γενικά airfoil (αεροτομή)ονομάζεται οποιαδήποτε επιφάνεια σχεδιασμένη έτσι ώστε όταν εκτεθεί σε οποιοδήποτε ρεύμα αέρα να παράγει μια χρήσιμη δυναμική αντίδραση. Η αεροτομή η οποία έχει εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές, έχει το σχήμα της εγκάρσιας τομής του φτερού του αεροπλάνου. Το γνωστό της σχήμα φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.1 :

Το σχήμα της αεροτομής εφαρμόζεται στοπτερύγιο του ελικόπτερου, στο ιστίο, αλλά και σαν λεπίδα σε μηχανές όπως τουρμπίνες, συμπιεστές, προπέλες και γενικότερα σε *ανεμιστήρες*. Η έμπνευση του σχεδιασμού, προήλθε από τους οργανισμούς της φύσης όπως τα πουλιά και τα ψάρια που είναι εκτεθειμένα και ανεπτυγμένα ώστε να επιβιώνουν σε ρευστά όπως ο αέρας και το νερό. Κάπως έτσι,

παρατηρήθηκε ο μηχανισμός που πετούν τα πουλιά και κολυμπούν τα ψάρια, τα σώματα των οποίων έγιναν αντιγραφή για τον σχεδιασμό της αεροτομής.

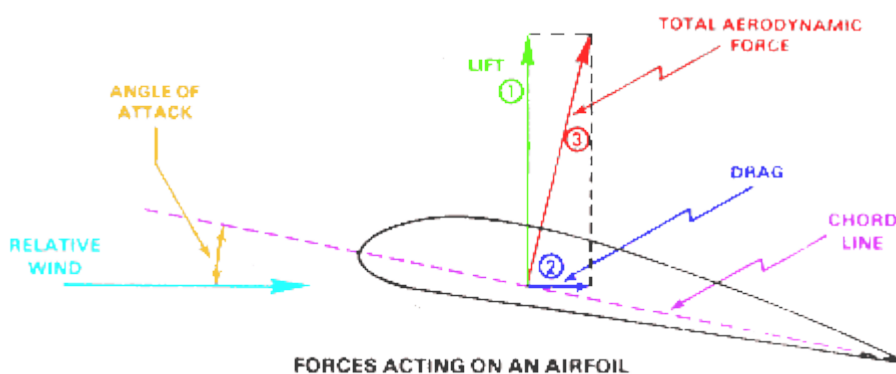
Το σχήμα αεροτομής είναι διαφόρων ειδών. Μπορεί να είναι συμμετρικό και μη – συμμετρικό. Η γενική ιδέα του σχήματος (Εικόνα 3.1) είναι κυρτή η επάνω επιφάνεια και κοίλη η κάτω, με μια αμβλεία μπροστινή μεριά που ονομάζεται *ακμή προσβολής* (leading edge), και μια αρκετά αιχμηρή οπίσσω πλευρά η οποία λέγεται *ακμή φυγής* (trailing edge). Η απόσταση  $c$  ακμών προσβολής και φυγής ονομάζεται χορδή (airfoil chord). Η αεροτομή έχει επίσης μια βασική γραμμή (base line) με βάση την οποία τοποθετείται σε μια γωνία  $\alpha$  *angle of attack* (γωνία προσβολής) από το οριζόντιο επίπεδο (Εικόνα 3.1). Στους ανεμιστήρες το σχήμα είναι μη – συμμετρικό και συνήθως η κάτω επιφάνεια δεν είναι κοίλη αλλά επίπεδη.



Εικόνα 3.1

Η καμπυλότητα του εκτιμάται ως εξής: Η κυρτή επιφάνεια του σχήματος είναι σε ύψος 13,3% του  $c$  και βρίσκεται σε οριζόντια απόσταση 38%  $c$  από την ακμή προσβολής, ενώ αντίστοιχα η κοίλη επιφάνεια του είναι σε ύψος 2,4% του  $c$  και σε οριζόντια απόσταση 64%  $c$ .

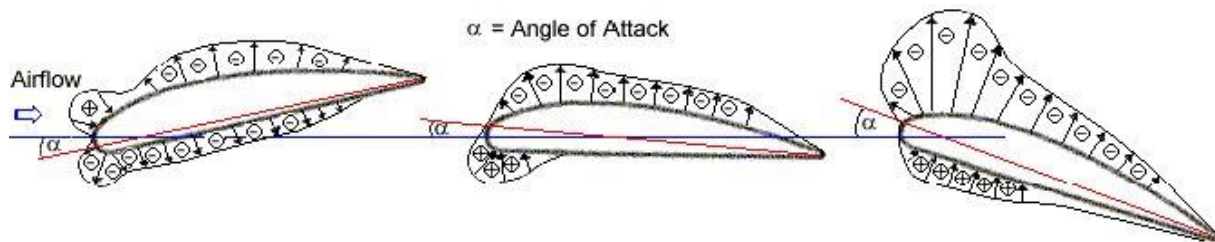
Καθώς η αεροτομή διέρχεται από τον αέρα, αναπτύσσεται μια δύναμη στο εσωτερικό της λόγω διαφοράς πίεσης, γνωστή και ως *αεροδυναμική δύναμη* (Εικόνα 3.2). Η δύναμη αυτή μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες: δύναμη ανύψωσης  $L$  (lift) και οπισθέλκουσα δύναμη  $D$  (drag). Η συνιστώσα της δύναμης  $L$  είναι ανάλογη της γωνίας προσβολής αλλά και επακόλουθο του ίδιου του σχήματος αεροτομής. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι, όσο μεγαλώνει η γωνία προσβολής αυξάνεται η δύναμη ανύψωσης  $L$  και μειώνεται η οπισθέλκουσα  $D$ , αυτό όμως συμβαίνει έως ένα σημείο.



Υπάρχει μια τιμή της γωνίας προσβολής που λέγεται κρίσιμη τιμή της γωνίας (ίση με  $17^\circ$  περίπου) επάνω από την οποία η τιμή του  $L$  παύει να αυξάνεται αλλά ξεκινά να μειώνεται, σε αποτέλεσμα αυτής της μείωσης να υπάρχει απότομη ανύψωση της τιμής του  $D$ , και να συνεχίζει να ανυψώνεται έως και τις  $90^\circ$ . Αυτό προφανώς είναι κάτι ανεπιθύμητο αφού θα προκληθεί απώλεια στήριξης της αεροτομής. Εκτός αυτών, υπάρχουν αεροτομές που για μηδενική γωνία προσβολής, αλλά μεγάλη καμπυλότητα σχήματος, να αναπτύσσουν μια ικανοποιητική δύναμη ανύψωσης. Η οπισθέλκουσα δύναμη είναι αποτέλεσμα της αντίστασης της ίδιας αεροτομής στην προς τα εμπρός κίνηση της. Είναι η αντίσταση στον αέρα που προσπίπτει επάνω της και, ακόμη και αν είναι ανεπιθύμητη λόγω απωλειών πολύτιμης ενέργειας, είναι εξίσου σημαντική στην κατασκευαστική αντοχή της αεροτομής. Κάποιος θα αναρωτηθεί εάν η μπροστινή κορυφή του airfoil γίνει πιο αιχμηρή, θα υπάρξει μείωση στην συνιστώσα  $D$ ; Αυτό θα ήταν εφικτό στην περίπτωση κατά την οποία η σχετική ταχύτητα του αέρα στην επιφάνεια ακμής προσβολής, ήταν ακριβώς εφαπτόμενη. Αυτή η συνθήκη θα ίσχυε σε περίπτωση κατά την οποία υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή στατικής πίεσης και μια συγκεκριμένη μορφή ροής. Στις περισσότερων περιπτώσεων εφαρμογές, η σχετική ταχύτητα ροής δεν είναι εφαπτόμενη στην επιφάνεια της αεροτομής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία στροβιλοειδής ροής, κάτι μη επιθυμητό στην εφαρμογή, που συνεπάγεται αύξηση της τιμής της συνιστώσας  $D$ .

→Τι συμβαίνει με την ταχύτητα του αέρα;

Λόγω διαφοράς πίεσης επάνω και κάτω επιφάνειας, με βάση το θεώρημα Bernoulli θα υπάρχει εξίσου διαφορά ταχύτητας επάνω και κάτω επιφάνειας (Εικόνα 3.3). Η αεροδυναμική δύναμη είναι παράγωγο της διαφοράς πίεσης. Κατά την διαδρομή της αεροτομής στον αέρα, οι αεροδυναμικές γραμμές το “αγκαλιάζουν”, όμως, λόγω της διαφοράς του μήκους των επιφανειών, στην επάνω επιφάνεια, μιας και είναι μεγαλύτερη, παρατηρείται μικρότερη πίεση (υπό – πίεση) άρα μεγαλύτερη ταχύτητα. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται επιφάνεια αναρρόφησης (suction side). Στην κάτω επιφάνεια, λόγω μικρότερου μήκους, παρατηρείται αύξηση της πίεσης (και μείωση της ταχύτητας), και ονομάζεται πλευρά πίεσης (pressure side). Η διαφορά των πιέσεων αυτών παράγει την ανύψωση της αεροτομής. Πιο συγκεκριμένα η πλευρά αναρρόφησης έχει σημαντικότερο ρόλο στην ανύψωση καθώς διαθέτει περίπου την διπλάσια πίεση σε σχέση με την κάτω πλευρά. Για διπλάσια ταχύτητα αέρα έχουμε τέσσερις φορές μεγαλύτερη τιμή της συνιστώσας  $D$ , αλλά σε αύξηση της πυκνότητας του αέρα παρατηρείται διπλάσια τιμή και των δυο συνιστωσών  $L$  και  $D$ .



Εικόνα 3.3: Μεταβολή της κατανομής πίεσης στην άνω και κάτω καμπύλη της αεροτομής ανάλογα με την γωνία  $\alpha$ .

Η ανακάλυψη του αεροδυναμικού σχήματος airfoil έγινε από την εταιρία NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) η οποία προσπάθησε να σχεδιάσει κατάλληλα την αεροτομή για να μπορεί να παράγει μεγαλύτερη συνιστώσα  $L$  και την ίδια στιγμή καλύτερο λόγο  $L/D$ . Πειραματιζόμενοι οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι τα δυο χαρακτηριστικά στοιχεία που ζητούσαν ήταν αντικρουόμενα. Γιατί συμβαίνει αυτό; Καθώς οι καμπύλες της αεροτομής μεγαλώνουν τότε μεγαλώνει και η συνιστώσα  $L$  αλλά ταυτόχρονα μικραίνει ο λόγος  $L/D$  κάτι που διχάζει διότι χρειάζονται ανεμιστήρες με εξίσου καλό λόγο  $L/D$ . Μεγαλώνοντας λοιπόν η συνιστώσα  $L$  αυξάνεται και η στατική πίεση. Οπότε, εάν αυτό που ζητάμε σε έναν ανεμιστήρα είναι υψηλή στατική πίεση τότε αυξάνουμε την συνιστώσα  $L$ . Αντίθετα, εάν η απόδοση είναι σημαντική για την εφαρμογή, τότε επιλέγουμε μια μορφή αεροτομής με μικρότερη καμπυλότητα.

Υπάρχει καταγεγραμμένη από πειράματα η ανάπτυξη και εξάπλωση της θετικής και αρνητικής πίεσης σε μια αεροτομή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3

Για δεδομένες τιμές των συνιστωσών  $L$  και  $D$ , από Πειράματα σε αεροσήραγγες λήφθηκαν δύο τύποι για τον υπολογισμό των συντελεστών:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{ Συντελεστής } L, \quad C_L = \frac{844L}{AV^2} \\ - \text{ Συντελεστής } D, \quad C_D = \frac{844D}{AV^2} \end{array} \right\} \text{ Για κανονική πυκνότητα αέρα}$$

Όπου:  $A$  είναι η επιφάνεια του αγωγού της αεροσήραγγας,

$V$  είναι η σχετική ταχύτητα αέρα,

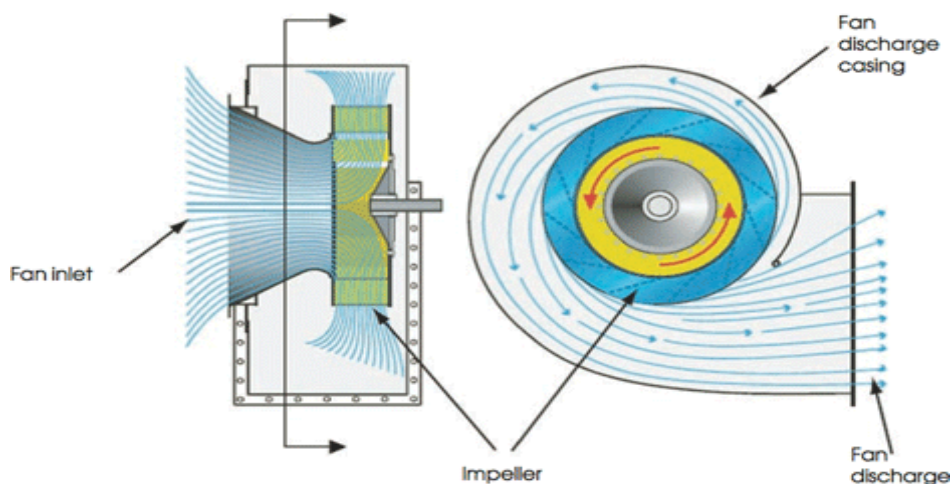
$C_L, C_D$  είναι οι συντελεστές.

Από τις παραπάνω σχέσεις συμπεραίνουμε ότι ο λόγος των συντελεστών  $L, D$  είναι ίσος με τον λόγο των αντίστοιχων συνιστωσών, ισχύει :  $C_L/C_D = L/D$ .

## 4. ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ

### 4.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας είναι στην ουσία μια αντλία αερίων. Σε αντίθεση με τους αξονικούς ανεμιστήρες, εδώ ο αέρας εισέρχεται αξονικά στο στροφείο με κάποια ταχύτητα που αποκτά από την περιστροφή, και εξέρχεται ακτινικά με την βοήθεια μιας δύναμης που αναπτύσσεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, την φυγοκεντρική δύναμη. Ο αέρας συνεχίζει σε κατεύθυνση ενός σπειροειδούς περιβλήματος εκεί όπου τελικά θα αποκτήσει αυξημένη πίεση από την μετατροπή της κινητικής ενέργειας που είχε αποκτήσει πιο πριν στο στροφείο. Η επιπλέον αυτή φυγοκεντρική δύναμη (εκτός από την δύναμη εκτροπής που αναπτύσσουν τα πτερύγια στον αέρα) είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων διότι είναι η κύρια αιτία εκτροπής του αέρα και επιφέρει την παραγωγή μεγάλης πίεσης. Μια εξαίρεση υπάρχει στους ανεμιστήρες με τα κοίλα προς τα εμπρός όπου εκεί η δύναμη εκτροπής προς τον αέρα που προκαλείται από τα πτερύγια έχει σπουδαίο ρόλο στην λειτουργία.



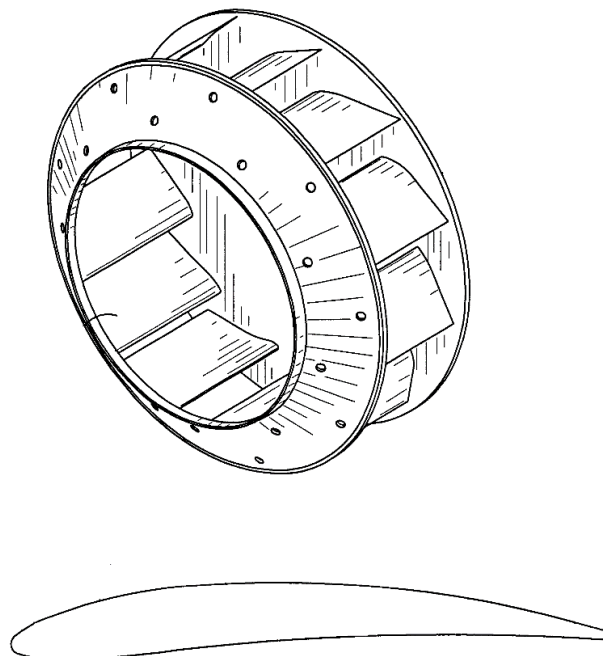
Εικόνα 4.1: Στο σχήμα φαίνεται η πλάγια όψη (αριστερά) και η κάτοψη (δεξιά) ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα που διαρρέεται από αέρα. Διακρίνονται η πτερωτή (impeller) γύρω απ' την οποία γίνεται εκροή του αέρα (Fan discharge).

Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες παράγουν υψηλότερη πίεση σε σχέση με τους αξονικούς ανεμιστήρες και αυτό χάρη στην φυγοκεντρική δύναμη. Οι φυγοκεντρικοί συνήθως εφαρμόζονται σε εγκαταστάσεις όπου το υψηλό μανομετρικό και η σχετικά χαμηλή παροχή αέρα είναι αναγκαία. Αντίθετα οι αξονικοί ανεμιστήρες εφαρμόζονται όπου χρειάζεται μεγάλη παροχή αέρα και χαμηλό μανομετρικό.

## 4.2 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ

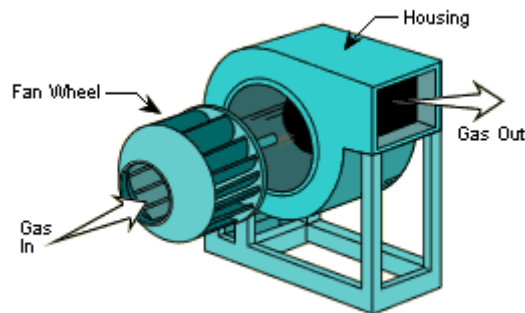
Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών στοιχείων του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα. Ο ανεμιστήρας μπορεί να χωρισθεί σε δύο μεγάλα μέρη: στο σύστημα μετάδοσης κίνησης και στο σύστημα ροής αέρα. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης μελετάται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο. Το σύστημα ροής αέρα αποτελείται από την πτερωτή με τα πτερύγια και το σπειροειδές κέλυφος.

Η πτερωτή (στροφέας) του ανεμιστήρα αποτελείται από πτερύγια (λεπίδες), τα οποία είναι κυκλικά τοποθετημένα ανάμεσα από δύο κυκλικές μεταλλικές βάσεις. Το σχήμα της πρώτης μεταλλικής βάσης είναι δακτυλοειδές με εσωτερική και εξωτερική διάμετρο  $d_1$ ,  $d_2$  αντίστοιχα, στην επιφάνεια του οποίου είναι στερεωμένα (συγκολλημένα) τα πτερύγια, όλα με κάποια συγκεκριμένη κλίση. Το σχήμα της δεύτερης μεταλλικής βάσης είναι ένας κυκλικός δίσκος με διάμετρο  $d_2$ , συγκολλημένη στην πίσω μεριά των πτερυγίων, και έχει ένα μικρό άνοιγμα στο κέντρο του, στο οποίο τοποθετείται ο άξονας της μηχανής (κινητήρας).



Εικόνα 4.2: Πτερωτή και λεπίδα airfoil.

Γύρω από την πτερωτή βρίσκεται στερεωμένο ένα *περίβλημα (κέλυφος)*. Το περίβλημα χαρακτηρίζεται ως σπειροειδές και έχει συγκεκριμένες διαστάσεις που είναι ανάλογες των διαμέτρων του στροφέα. Μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις έτσι ώστε ο αέρας να εξέρχεται από αυτόν είτε προς τα πάνω είτε προς τα δεξιά ή αριστερά είτε προς κάποια συγκεκριμένη γωνία που επιθυμεί ο κατασκευαστής (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Το σπειροειδές κέλυφος (Housing) το οποίο περικλείει την πτερωτή.

Η αναρρόφηση μπορεί να είναι μονή ή διπλή. Στη διπλή αναρρόφηση ο αέρας εισέρχεται στον στροφέα και από μπροστά και από πίσω. Ο άξονας του στροφέου συνδέεται με ένα σύστημα τροχαλιών οι οποίες περιστρέφονται με ισχύ που δίνεται από τον κινητήρα. Το όλο σύστημα στηρίζεται επάνω σε μια μεταλλική στήριξη στο πλάι της οποίας στηρίζεται επίσης και ο ηλεκτρο-κινητήρας.

Εξωτερικά της πτερωτής, από την μεριά που εισέρχεται ο αέρας υπάρχει ένας καμπυλωτός κώνος εισροής με σκοπό την ομαλή εισαγωγή του αέρα και την αποφυγή δημιουργίας τυρβώδους ροής. Ο κώνος εισροής φαίνεται στην εικόνα 4.4. Γενικά η κώνος εισροής έχει ελάχιστα μικρότερη ακτίνα από την μικρή ακτίνα της πτερωτής.



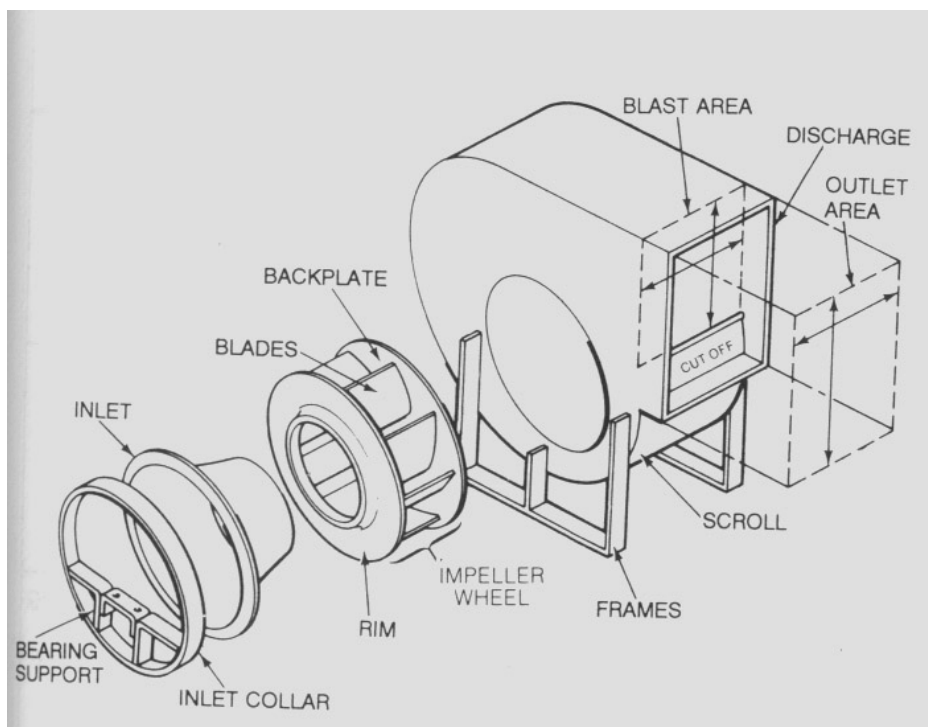
Εικόνα 4.4: Κώνος εισροής και σπειροειδές περίβλημα.



Όπως προειπώθηκε, ο αέρας εισέρχεται αξονικά στο εσωτερικό του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα και εξέρχεται ακτινικά προς εξωτερικές κατευθύνσεις. Πιο αναλυτικά, ο αέρας στο εξωτερικό του στροφέα είναι ακίνητος, έχει μηδενική ταχύτητα. Η περιστροφή του στροφέου εξαναγκάζει τον αέρα να αποκτήσει μια ταχύτητα εισόδου με την οποία εισέρχεται στην πτερωτή. Ο αέρας κινείται επάνω στο πτερύγιο και επιταχύνεται. Η πίεση στον ανεμιστήρα παράγεται με δυο τρόπους :

- Με την φυγόκεντρη δύναμη κατά την περιστροφή του αέρα μέσα στα πτερύγια
- Με την κινητική ενέργεια που αποκτά ο αέρας από την ταχύτητα εξόδου στον ανεμιστήρα, η οποία είναι συνδυασμός της περιστροφικής κίνησης της πτερωτής, και της σχετικής ταχύτητας του αέρα μέσα στην πτερωτή από τα πτερύγια.

Όταν τα πτερύγια έχουν κλίση προς τα εμπρός τα δυο παραπάνω αποτελέσματα προσθέτονται ενώ για κλίση πτερυγίων προς τα πίσω τα δυο αποτελέσματα είναι αντίθετα. Για αυτό και στην δεύτερη περίπτωση κλίσης πτερυγίων η απόδοση είναι υψηλότερη. Στον σχεδιασμό της παρούσας εργασίας θα γίνει χρήση των πτερυγίων τύπου airfoil.



Εικόνα 4.5: Τα βασικά μέρη ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα. Πτερωτή (impeller), λεπίδες (blades), περίβλημα (scroll), στηρίξεις (frames), κώνος εισροής (Inlet, Inlet collar).

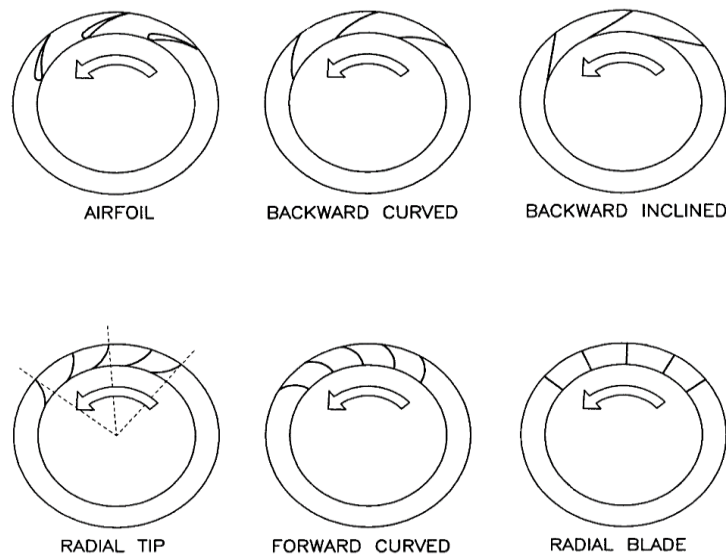
Παρόλο που οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες έχουν πολλά κοινά με τις φυγοκεντρικές υδραντλίες, είναι αναγκαίο να εξετάζονται με προσοχή λόγω των μικρών διαφορών που έχουν, όπως τα κατασκευαστικά στοιχεία τους (διαφορετικό ρευστό) και διαφορετική είναι η ισχύς (στους ανεμιστήρες παρουσιάζεται χαμηλότερη ισχύς).

### 4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες διακρίνονται ανάλογα με το σχήμα των πτερυγίων τους. Για διαφορετικές γωνίες, πάχη, μήκοι και πλήθος πτερυγίων εισάγονται εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα στην πίεση την παροχή και τελικά την απόδοση του ανεμιστήρα.

Τα είδη των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων είναι (Εικόνα 4.5) :

- Ανεμιστήρες με πτερύγιο καμπύλης προς τα πίσω και σχήμα αεροτομής (Airfoil Centrifugal Fan)
- Ανεμιστήρες με πτερύγιο καμπύλης προς τα πίσω σχήματος λεπτής λαμαρίνας (Centrifugal Fan with backward curved blades)
- Ανεμιστήρες με πτερύγιο ακτινικό με κλίση προς τα πίσω (Centrifugal Fan with backward inclined blades)
- Ανεμιστήρες με καμπύλη προς τα εμπρός ακτινικής θέσης (Centrifugal Fan radial tip blades)
- Ανεμιστήρες με πτερύγιο ακτινικό (Centrifugal Fan with radial blade)
- Ανεμιστήρες με καμπύλη προς τα εμπρός (Centrifugal Fan with forward curved blades)



Εικόνα 4.6: Είδη φυγοκεντρικών ανεμιστήρων.

Η πίεση και η παροχή διαμορφώνονται ανάλογα με το σχήμα των πτερυγίων. Έτσι, στην πτερωτή με πτερύγιο καμπύλης προς τα εμπρός η πίεση αυξάνει με την αύξηση της παροχής. Αντίθετα, στην πτερωτή με καμπύλη προς τα πίσω η πίεση

μειώνεται με την αύξηση της παροχής, ενώ στην πτερωτή με ακτινικά πτερύγια η πίεση παραμένει σταθερή με την μεταβολή της παροχής.

*(i) Πτερύγιο με σχήμα αεροτομής*

Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας με πτερύγιο αεροτομής είναι αυτός με την μεγαλύτερη απόδοση η οποία φτάνει το 92%. Το πτερύγιο έχει σχήμα αεροτομής και κλίση προς τα πίσω, όπως φαίνεται στο σχήμα. Τα πλεονεκτήματα τους είναι πολλά. Αρχικά, δουλεύουν πιο αθόρυβα από όλους τους άλλους ανεμιστήρες, και διαθέτουν καλύτερη κατασκευαστική αντοχή. Μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και παράγουν υψηλή στατική πίεση (πάνω από 30 inch WC). Έχουν σημαντική επίδοση. Εφαρμόζονται κυρίως για εξαερισμό κτιρίων, για καθαρισμό του αέρα και διάφορων αερίων. Γενικά οι ανεμιστήρες αυτοί μπορούν να συνδεθούν και να λειτουργήσουν παράλληλα με όμοιους τους. Οι λεπίδες τους κατασκευάζονται από ατσάλι ή χάλυβα, και συγγολούνται στις δύο κυκλικές επιφάνειες. Σε μικρότερα μεγέθη μπορούν να κατασκευαστούν από αλουμίνιο.

*(ii) Ανεμιστήρες με πτερύγιο καμπύλης προς τα πίσω σχήματος λεπτής λαμαρίνας*

Οι ανεμιστήρες με πτερύγιο τύπου καμπύλης προς τα πίσω είναι οι πιο διαδεδομένοι μετά από αυτούς με το σχήμα αεροτομής και διαθέτουν πολλά κοινά μεταξύ τους. Διαθέτουν την δεύτερη μεγαλύτερη απόδοση από όλους τους άλλους, και πριν εμφανιστεί ο τύπος airfoil κατήχαν τα ηνία. Έχουν παρόμοια λειτουργία με τους ανεμιστήρες τύπου airfoil αλλά λειτουργούν σε χαμηλότερες αποδόσεις. Η κατασκευαστική τους αντοχή είναι μικρότερη από αυτή του τύπου airfoil. Τα πλεονεκτήματα τους είναι ότι είναι πιο φθηνοί στην κατασκευή και μπορούν να δεχθούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες ρευστού ακόμη και με σωματίδια σκόνης. Το πτερύγιο τους έχει μορφή τόξου, αλλά κάποιες φορές μπορεί να κατασκευαστεί με μεγαλύτερη καμπυλότητα κοντά στην ακμή προσβολής του, έτσι ώστε να μοιάζει στο πτερύγιο τύπου Airfoil. Ο υπολογισμός και η διαδικασία επίλυσης τους είναι παρόμοια με αυτής του τύπου αεροτομής.

*(iii) Ανεμιστήρες με ακτινικό πτερύγιο*

Οι ανεμιστήρες ακτινικού πτερυγίου διαθέτουν πτερύγια τα οποία είναι ακτινικά. Εφαρμόζονται κυρίως σε μεγάλες κατασκευές όπου απαιτείται εξαναγκασμένη και επαγόμενη αναρρόφηση ρευστού, για διαδικασίες εξάτμισης ρευστού, σε βιομηχανικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν καυτά αέρια. Διαθέτουν ειδική κατασκευή στην οποία καθαρίζονται αυτόματα τα πτερύγια τους από τα αέρια με σωματίδια σκόνης και άλλων στοιχείων. Η απόδοση τους κυμαίνεται στο 70% ενώ μπορούν να παράξουν μεγαλύτερα ποσά στατικής πίεσης από τα τρία προηγούμενα είδη.

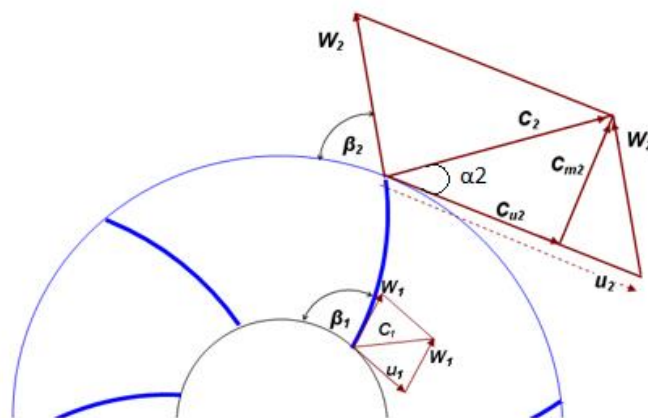
*(iv) Ανεμιστήρες με τα κοίλα προς τα εμπρός*

Οι ανεμιστήρες με τα κοίλα προς τα εμπρός παράγουν τις μεγαλύτερες πιέσεις και τα μεγαλύτερα ποσά αέρα σε σχέση με τους υπόλοιπους ανεμιστήρες. Όμως, λειτουργούν σε λιγότερες στροφές και έχουν τις χαμηλότερες αποδόσεις. Η διάταξη τους περιλαμβάνει έναν υψηλό αριθμό πτερυγίων σε σχέση με τους υπόλοιπους ανεμιστήρες, καθώς και υψηλό λόγο διαμέτρων πτερωτής  $d_1/d_2$  για να είναι σε θέση να διαχειρίζονται τα μεγάλα ποσά ρευστού. Σε γενικές γραμμές κατασκευάζονται μικροί (έως 36 ίντσες) αλλά μπορούν να φτάσουν και μεγαλύτερες τιμές διαμέτρων (73 ίντσες). Έχουν μεγάλο πλάτος πτερυγίου με ίδιο μέγεθος εξίσου στην είσοδο και την έξοδο του αέρα.

#### 4.4 ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Παρακάτω θα αναπτυχθεί η θεωρία και οι εξισώσεις που σχετίζονται με τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες. Δηλαδή θα γίνει συσχέτιση των βασικών ρευστοδυναμικών ποσοτήτων, όπως η πίεση, το μανομετρικό, η ισχύς και η μαζική παροχή, με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα και τις φυσικές ιδιότητες του αέρα μέσα σε αυτόν (ταχύτητα-επιτάχυνση).

Θεωρείται λοιπόν η πρόσοψη ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα, όπως στο παρακάτω σχήμα. Τα πτερύγια του στροφείου εκτελούν περιστροφική κίνηση με μια σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Ο αέρας εισέρχεται από την επιφάνεια  $A_1$  της πτερωτής και εκρέει σχεδόν ακτινικά περιφερειακά της πτερωτής στην επιφάνεια  $A_2$ , εφόσον απέκτησε ενέργεια πίεσης και κινητική ενέργεια, λόγω της μεταβίβασης σε αυτόν ροπής από το άξονα,  $M_a$ .



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ταχυτήτων κατά μήκος ενός πτερυγίου

Ο ολική ταχύτητα που αποκτά ο αέρας (απόλυτη ταχύτητα) είναι η  $c_1$  στην εισροή και η  $c_2$  στην εκροή. Η ταχύτητα αυτή είναι η συνισταμένη της περιφερειακής ταχύτητας των πτερυγίων  $u_1, u_2$  αντίστοιχα και της σχετικής ταχύτητας που ρέει ο

αέρας στο κανάλι  $w_1, w_2$  αντίστοιχα. Η *μεσημβρινή ταχύτητα* είναι η συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας του αέρα κάθετα στην περιφερειακή των πτερυγίων.

Η ροπή  $M_\alpha$  που πρέπει να ασκήσει ο άξονας στο σύστημα προφανώς εξαρτάται μόνο από τις προβολές των  $c_1, c_2$  πάνω στις  $u_1, u_2$  αντίστοιχα. Τις ονομάζουμε  $C_1^{u1}, C_2^{u2}$ .

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για την περιστροφική κίνηση, η μεταβολή της στροφορμής  $\vec{D}$  είναι ίση με το άθροισμα των ροπών που ασκούνται σε ένα σώμα, δηλαδή:

$$\frac{d\vec{D}}{dt} = \sum \vec{M} \quad (4.1)$$

Θεωρώντας την ροή του αέρα μόνιμη, χωρίς τριβή και με ομοιόμορφη επίδραση της βαρύτητας, η εφαρμογή του παραπάνω νόμου θα δώσει τον υπολογισμό της ροπής που παίρνει ο αέρας από τον ανεμιστήρα. Ο υπολογισμός αυτός ξεφεύγει από τα μαθηματικά όρια αυτής της εργασίας γι' αυτό θα χρησιμοποιηθεί αυτούσιο το αποτέλεσμα. Στο τέλος της εργασίας παρατείνεται η σχετική βιβλιογραφία για την απόδειξη αυτή.

Η ροπή αυτή λοιπόν προκύπτει:

$$\begin{aligned} M_\alpha &= \rho \cdot A_2 \cdot C_{m2} \cdot r_2 \cdot C_2^{u2} - \rho \cdot A_1 \cdot C_{m1} \cdot r_1 \cdot C_1^{u1} \Leftrightarrow \\ M_\alpha &= \dot{m}(r_2 \cdot C_2^{u2} - r_1 \cdot C_1^{u1}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Αφού λόγω της ασυμπίεστότητας  $\dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot C_{m1} = \rho \cdot A_2 \cdot C_{m2} \cdot r_2$ , όπου  $C_{m1}, C_{m2}$  οι μεσημβρινές απόλυτες ταχύτητες του αέρα (δηλαδή οι προβολές των  $C_1, C_2$  πάνω στον ακτινικό άξονα της πτερωτής).

Πολλαπλασιάζοντας την (4.2) με την γωνιακή ταχύτητα  $\omega = u/r$  τα δύο μέλη γίνονται:

$$\omega \cdot M_\alpha = \omega \cdot r_2 \cdot \dot{m} \cdot C_2^{u2} - \omega \cdot r_1 \cdot \dot{m} \cdot C_1^{u1} \quad (4.3)$$

Όμως,  $\omega \cdot r$  είναι η περιφερειακή ταχύτητα στον ανεμιστήρα και  $\omega \cdot M_\alpha$  η ισχύς του, δηλαδή:

$$\omega \cdot r = u \quad \text{και} \quad \omega \cdot M_\alpha = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (4.4\alpha), (4.4\beta)$$

Με Η το μανομετρικό. Επομένως η (4.3) συνεπάγεται, μέσω των (4.4α), (4.4β):

$$\begin{aligned} \gamma \cdot Q \cdot H &= \dot{m}(C_2^{u2} \cdot u_2 - C_1^{u1} \cdot u_1) \Rightarrow \\ \gamma \cdot Q \cdot H &= \left(\frac{\gamma}{g}\right) \cdot Q \cdot (C_2^{u2} \cdot u_2 - C_1^{u1} \cdot u_1) \\ H &= \frac{(C_2^{u2} \cdot u_2 - C_1^{u1} \cdot u_1)}{g} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Για κάθετη είσοδο του αέρα στον ανεμιστήρα  $C_1^{u1} = 0$ , άρα

$$H = \frac{(C_2^{u2} \cdot u_2)}{g} \quad (4.6)$$

Το  $H$  εκφράζει πίεση σε μέτρα στήλης ρευστού. Είναι το λεγόμενο μανομετρικό και εκφράζει την πίεση που προκαλεί το ρευστό (αέρας) στο σύστημα σε μέτρα στήλης αέρα. Είναι γνωστό ότι  $\Delta P = \rho \cdot g \cdot H$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού (αέρας).

$$\text{Επομένως: } \Delta P = \rho \cdot g \cdot H \quad \text{ή} \quad \Delta P = \gamma \frac{(C_2^{u2} \cdot u_2 - C_1^{u1} \cdot u_1)}{g} \quad (4.7)$$

$$\text{ή} \quad \Delta P = \gamma \frac{(C_2^{u2} \cdot u_2)}{g} \quad (\text{για κάθετη είσοδο}) \quad (4.8)$$

Εάν  $Q$  η παροχή όγκου αέρα διαμέσου του ανεμιστήρα και το μανομετρικό ύψος  $H = \Delta P / \gamma$ , τότε η ισχύς  $P_w$  που αναπτύσσεται δίνεται από την σχέση:

$$P_w = \gamma \cdot H \cdot Q = \Delta P \cdot Q \quad (4.9)$$

Καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται, ο στάσιμος αέρας που βρίσκεται έξω από το στροφέιο εξαναγκάζεται να εισέλθει σε αυτό, και αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας αυτής ένα μέρος της στατικής πίεσης μετατρέπεται σε δυναμική πίεση (κινητική ενέργεια) στην είσοδο των διόδων που σχηματίζουν τα πτερύγια, που σε τελική ανάλυση δεν είναι παρά η ενέργεια που προσφέρεται στον αέρα από τα πτερύγια.

Ο αέρας εισέρχεται στις διόδους με μια ταχύτητα  $C_1$  και εξέρχεται με μια ταχύτητα  $C_2$ , όπως συμβαίνει και σε μια υδραντλία. Η στατική πίεση στον ανεμιστήρα αντιστοιχεί στο μανομετρικό ύψος αναρρόφησης, και η ολική πίεση εξόδου του ανεμιστήρα στο ύψος κατάθλιψης μιας αντλίας. Σημειώνεται πως εξαιτίας του κώνου εισροής η ταχύτητα εισόδου του αέρα είναι περίπου κάθετη ( $C_1^{u1} \approx 0$ ). Παρόλο που στην πραγματικότητα η υπόθεση αυτή δεν είναι 100% σωστή, είναι μια καλή προσέγγιση που χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές. Αυτή η προσέγγιση θα χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την εργασία στο κεφάλαιο σχεδιασμός.

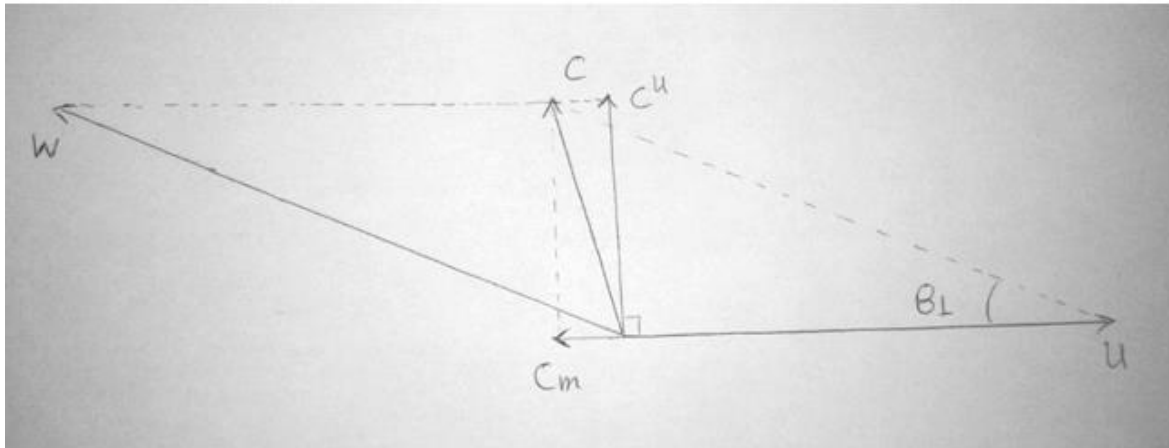
Γενικά η ροή του αέρα στους ανεμιστήρες είναι κατά μεγάλη προσέγγιση ασυμπίεστη. Εάν όμως ληφθεί υπόψη η συμπιεστότητα του αέρα τότε η ολική πίεση θα είναι :

$$H = \left(\frac{1}{g}\right) \int v dp \quad (4.10)$$

όπου  $v$  ο ειδικός όγκος.

Η ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης εξαρτάται από το είδος της ροής. Οι μεταβολές στους ανεμιστήρες γενικά θεωρούνται ισεντροπικές (δηλ. αδιαβατικές). Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν θα γίνει ανάλυση ρευστών που είναι συμπιεστά.

Για ασυμπίεστη ροή αποδείχθηκε ότι για την ολική πίεση ισχύει:  $\Delta P = \gamma \frac{(c_2^{u_2} \cdot u_2 - c_1^{u_1} \cdot u_1)}{g}$



Εικόνα 4.8: Τρίγωνα ταχυτήτων.

Από τα τρίγωνα ταχυτήτων στην Εικόνα 4.8 (υπάρχει παρόμοια γεωμετρία είτε μιλάμε για την ακμή προσβολής είτε για την ακμή φυγής), εφαρμόζοντας τον νόμο συνημιτόνων προκύπτει:

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \right) \quad (4.11)$$

Έτσι η αναπτυσσόμενη πίεση στον ανεμιστήρα οφείλεται :

- ✓ Στην αύξηση της κινητικής ενέργειας  $\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}$
- ✓ Στην αύξηση της στατικής πίεσης  $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$
- ✓ Στην μετατροπή της στατικής ενέργειας από την πτερωτή σε στατική πίεση:  $\frac{1}{2} \rho (w_1^2 - w_2^2)$

Η εξίσωση του Bernoulli για μια ροϊκή γραμμή εισόδου και εξόδου της πτερωτής δίνει, με απόλυτη ταχύτητα ροής c:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot c_1^2 + \Delta P = p_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot c_2^2 \Rightarrow \Delta P = (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \rho (C_2^2 - C_1^2) \quad (4.12)$$

Προκύπτει έτσι η στατική πίεση:

$$\Delta P_{stat} = p_2 - p_1 = \rho \left( \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \right) \quad (4.13)$$

Και η δυναμική πίεση:

$$\Delta P_d = \Delta P - \Delta P_{stat} = \rho \left( \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right) \quad (4.14)$$

Σημειώνεται ότι σε πτερωτή χωρίς παροχή ( $w=0$ ), η διαφορά πίεσης οφείλεται μόνο στην φυγοκεντρική επιτάχυνση  $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2}$ . Δηλαδή ο όρος αυτός οφείλεται εξ'ολοκλήρου στην φυγοκεντρική δύναμη που ασκείται στον αέρα ακριβώς λόγω την δομής των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων.

Σε έναν ανεμιστήρα η ισχύς είναι:

$$P_w = \gamma \cdot H \cdot Q = \Delta P_{ολ} \cdot Q = \rho \cdot u_2^2 \cdot Q - Q^2 \rho \cdot u_2 / (\pi \cdot d_2 \cdot b_2 \cdot \tan \beta_2) \quad (4.15)$$

$$\text{Όπου } \Delta P_{ολ} = \rho \cdot u_2^2 - Q \cdot \rho \cdot u_2 / (\pi \cdot d_2 \cdot b_2 \cdot \tan \beta_2) \quad (4.16)$$

Η ισχύς στον άξονα της πτερωτής είναι :  $P_{αξ} = \Delta P \cdot Q / \eta$ , όπου  $\eta$  ο ολικός βαθμός απόδοσης του ανεμιστήρα.

#### 4.5 ΝΟΜΟΙ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Οι απαραίτητες παράμετροι που χρειάζονται για τον σχεδιασμό ενός ανεμιστήρα και που διέπουν τους νόμους του είναι :

- Παροχή όγκου ή μάζας
- Μεταβολή πίεσης ανεμιστήρα
- Ισχύς ανεμιστήρα, και ισχύς άξονα που συνδέεται με τον ανεμιστήρα
- Οι στροφές τις πτερωτής

Η παραπάνω ανάλυση (4.4 Θεωρία Ανεμιστήρων) έγινε με την εφαρμογή των νόμων της κλασσικής μηχανικής πάνω στην ροή του αέρα με σκοπό την εξαγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων συσχετίσεων μεταξύ ρευστοδυναμικών μεγεθών και χαρακτηριστικών του ανεμιστήρα. Όπως είναι φυσικό όμως η θεωρία χρησιμοποιεί εξιδανικεύσεις, γι' αυτό δεν είναι αρκετή πολλές φορές για να λύσει πρακτικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα η ακριβής παροχή του ανεμιστήρα. Παρόλο που τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, οι μηχανικοί καταφεύγουν σε εμπειρικούς νόμους συσχέτισης των μεγεθών – οι οποίοι προφανώς προκύπτουν από πειραματικές διαδικασίες. Δηλαδή χρησιμοποιούν συγκεκριμένα μοντέλα ανεμιστήρων, εφαρμόζουν κάθε φορά διαφορετικές αρχικές συνθήκες (για παράδειγμα διαφορετικό αριθμό στροφών ή διαφορετική ισχύ) και μετράνε τις ποσότητες που τους ενδιαφέρουν (για παράδειγμα παροχή).

Μέσω αυτής της διαδικασίας έχουν προκύψει αρκετοί εμπειρικοί νόμοι αλλά και διαγράμματα που διέπουν τους ανεμιστήρες. Οι κατασκευαστές καταφεύγουν, τις περισσότερες των περιπτώσεων, στους νόμους αυτούς για την εκλογή των κατάλληλων παραμέτρων του ανεμιστήρα – ανάλογα πάντα με τις δεδομένες απαιτήσεις τους. Οι νόμοι αυτοί συνήθως έχουν την μορφή χαρακτηριστικών



αδιάστατων ποσοτήτων που ονομάζονται *χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί*, και συγκρίνουν τις θεωρητικές με τις «πραγματικές» παράμετρους των ανεμιστήρων.

Οι χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί χρησιμοποιούνται για την σύγκριση, τον υπολογισμό και την αξιολόγηση των ανεμιστήρων, όπως ακριβώς και στις υδραντλίες. Οι αριθμοί αυτοί δεν εξαρτώνται από την παροχή του αέρα, την πίεση ή άλλα παρόμοια μεγέθη. Είναι εκφράσεις που συγκρίνουν το ιδανικό αποτέλεσμα που θα μπορούσε να παράγει ο ανεμιστήρας με το τι τελικά παράγει στο στροφέιο του. Οι αριθμοί αυτοί είναι οι:  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $n_q$ ,  $D_q$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  και  $\lambda$ . Παρακάτω ορίζονται οι αριθμοί αυτοί.

■ Ο *συντελεστής παροχής*  $\varphi$  συγκρίνει την παροχή όγκου στην έξοδο του ανεμιστήρα με την ιδεατή παροχή που αντιστοιχεί στην περιφερειακή ταχύτητα μέσα στο στροφέιο του. Άρα ισχύει:

$$\varphi := \frac{Q_A}{Q_{PT}} = \frac{Q_A}{u_2 \cdot A_2} = \frac{Q_A}{u_2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{4 \cdot Q_A}{u_2 \cdot \pi \cdot D^2}, \text{ όμως } u_2 = \omega \cdot r = \pi D \cdot N \quad (4.17a)$$

$$\text{Άρα: } \varphi = \frac{4 \cdot Q_A}{\pi^2 \cdot D^3 \cdot N} \quad (4.17b)$$

■ Ο *συντελεστής πίεσης*  $\psi$  συγκρίνει την πίεση που παράγει ο ανεμιστήρας με δυναμική πίεση που παράγεται από την περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής στην κατάθλιψη:

$$\psi := \frac{\Delta P_A}{P_{\Delta uv}} = \frac{\Delta P_A}{\frac{1}{2} \rho \cdot u_2^2}, \text{ όμως } u_2 = \omega \cdot r = \pi D \cdot N \quad (4.18a)$$

$$\text{Άρα: } \psi = \frac{2 \Delta P_A}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2} \quad (4.18b)$$

■ Ο *ειδικός αριθμός στροφών* είναι ένας χαρακτηριστικός αριθμός και όχι μια πραγματική ταχύτητα. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_q := \frac{N \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (4.19)$$

Όπου: Q η παροχή όγκου του αέρα, N οι στροφές της πτερωτής, H το μανομετρικό ύψος. Ο αριθμός αυτός έχει οριστεί με βάση τον μοναδιαίο ανεμιστήρα, αυτόν δηλαδή που σε ορισμένη ταχύτητα και διάσταση θα παράγει 1 κυβικό μέτρο την ώρα σε πίεση 1 μέτρου στήλης νερού. Ο ανεμιστήρας αυτός πρακτικά δεν είναι χρήσιμος, αλλά γίνεται μια σύγκριση αυτού με κάποιον άλλο ανεμιστήρα που παράγει κάποια πίεση και παροχή αέρα σύμφωνα με την γεωμετρική ομοιότητα τους. Με το ίδιο σκεπτικό η διάστασή του μοναδιαίου ανεμιστήρα δίνεται από την σχέση της *ειδικής διαμέτρου* που περιέχει την εξωτερική διάμετρο του στροφέιου:

$$D_q = \frac{D_2 \cdot H^{1/4}}{Q^{1/2}} \quad (4.20)$$

■ Από τους αριθμούς  $\varphi$ ,  $\psi$  εισάγονται δυο νέοι αριθμοί, οι οποίοι έχουν αποδειχθεί εξίσου χρήσιμοι στην σύγκριση και τον υπολογισμό των ανεμιστήρων μεταξύ τους.

Ο πρώτος είναι ο *αριθμός ταχυστροφίας* που εισάγεται από τον χαρακτηριστικό αριθμό στροφών, ήτοι:

$$\sigma = \frac{\varphi^{1/2}}{\psi^{3/4}} = \frac{n_q}{157,8} \quad (n_q \text{ σε } \text{min}^{-1}) \quad (4.21)$$

Ο δεύτερος είναι ο *αριθμός διαμέτρου* που προκύπτει από την *ειδική διάμετρο*:

$$\delta = \frac{\psi^{1/4}}{\varphi^{1/2}} = 1,865 \cdot D_q \quad (4.22)$$

■ Αριθμός ισχύος  $\lambda$ . Η ισχύς του ανεμιστήρα συγκρίνεται με την ιδανική ισχύ που παράγει στο στροφέιο του από την κινητική ενέργεια (δυναμική πίεση) που αντιστοιχεί στην περιφερειακή ταχύτητα εξόδου  $u_2$  :

$$\lambda = \frac{P_W}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot u_2^3 \cdot \frac{\rho}{2}} \quad (4.23)$$

Οι αριθμοί αυτοί συνοδεύονται και από σχετικά διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά υπάρχουν στο Κεφάλαιο 6. Περισσότεροι αριθμοί αναφέρονται επίσης στο Κεφάλαιο 6. Παρακάτω ακολουθεί η έννοια της ομοιότητας ανεμιστήρων και του θόρυβου που προκαλείται από αυτούς.

### → Νόμοι ομοιότητας μεταξύ των ανεμιστήρων

Για να σχεδιαστεί ένας νέος ανεμιστήρας δεν απαιτούνται μόνο θεωρητικοί υπολογισμοί αλλά πειράματα σε ομοιώματα για την επιτυχή λειτουργία του. Για αυτόν τον λόγο, για να αποφεύγονται τα λάθη στην λειτουργία των ανεμιστήρων, καθώς και το κόστος των πειραμάτων, εισάγονται κάποιες γενικές σχέσεις ομοιότητας μεταξύ των ανεμιστήρων, και λέγονται γενικές γιατί αναφέρονται σε όλα τα είδη των ανεμιστήρων (αξονικοί, φυγοκεντρικοί, εγκάρσιας ροής, σωληνοειδείς κλπ).

Υποθέτουμε έναν ανεμιστήρα συγκεκριμένων διαστάσεων και ταχύτητας ο οποίος έχει δοκιμαστεί και σχεδιαστεί η καμπύλη λειτουργίας του για κανονική πυκνότητα αέρα. Εάν θέλουμε να σχεδιάσουμε έναν παρόμοιο ανεμιστήρα διαφορετικής πίεσης και παροχής αλλά γεωμετρικά όμοιο με τον προηγούμενο, τότε

απλά εφαρμόζουμε τους νόμους ομοιότητας των ανεμιστήρων χωρίς περαιτέρω πειραματικές εφαρμογές.

Τι σημαίνει «όμοιοι ανεμιστήρες» ;

Υπάρχουν τρία είδη νόμων ομοιότητας οι οποίοι εφαρμόζονται για την κατασκευή ενός νέου ανεμιστήρα ή για την σύγκριση μεταξύ δύο όμοιων ανεμιστήρων. Ο πρώτος νόμος ομοιότητας αναφέρεται στην *γεωμετρική ομοιότητα* δύο ανεμιστήρων. Δυο ανεμιστήρες, ένας πρότυπος (1) και ένας ανεμιστήρας που θα κατασκευαστεί (2), είναι γεωμετρικά όμοιοι όταν ο λόγος των βασικών διαστάσεων τους (χορδή περύγωσης C, πλάτος περύγωσης b, εξωτερική διάμετρος στροφείου d) είναι ίσος, δηλαδή:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (4.24)$$

Ο δεύτερος νόμος ομοιότητας αναφέρεται στην *κινηματική ομοιότητα* δυο ανεμιστήρων. Δυο ανεμιστήρες, ένας πρότυπος (1) και ένας που πρόκειται να κατασκευαστεί (2), είναι κινηματικά όμοιοι όταν ο λόγος των ταχυτήτων του αέρα στην είσοδο και στην έξοδό τους είναι ίσος και για τους δύο ανεμιστήρες.

Ο τρίτος νόμος ομοιότητας αναφέρεται στην *δυναμική ομοιότητα* δύο ανεμιστήρων. Δυο ανεμιστήρες, ένας πρότυπος (1) και ένας που πρόκειται να κατασκευαστεί (2), είναι δυναμικά όμοιοι όταν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην είσοδο και την έξοδο τους είναι ίσες και για τους δυο.

Όταν δυο ανεμιστήρες είναι γεωμετρικά, κινηματικά ή δυναμικά όμοιοι τότε και οι χαρακτηριστικοί αριθμοί τους θα είναι ίσοι και θα προκύπτουν οι εξής αναλογίες:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \leftrightarrow \frac{4 \cdot Q_1}{\pi^2 \cdot D_1^3 \cdot N_1} = \frac{4 \cdot Q_2}{\pi^2 \cdot D_2^3 \cdot N_2} \leftrightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (4.25a)$$

$$\psi_1 = \psi_2 \leftrightarrow \frac{2 \Delta P_1}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D_1^2 \cdot N_1^2} = \frac{2 \Delta P_2}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D_2^2 \cdot N_2^2} \leftrightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4.25b)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 \leftrightarrow \frac{P_{w1}}{\frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot (\pi \cdot D_1 \cdot N_1)^3 \cdot \frac{\rho}{2}} = \frac{P_{w2}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot (\pi \cdot D_2 \cdot N_2)^3 \cdot \frac{\rho}{2}} \leftrightarrow \frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (4.25c)$$

Για γεωμετρική ομοιότητα ανεμιστήρων, από τις παραπάνω αναλογίες προκύπτει:

$$(D_1 = D_2) \Rightarrow (1) \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.26a)$$

$$\Rightarrow (2) \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4.26b)$$

$$\Rightarrow (3) \frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (4.26c)$$

Για κινηματική ομοιότητα ανεμιστήρων, ισχύει:

$$(N_1 = N_2) \Rightarrow (1) \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (4.27a)$$

$$\Rightarrow (2) \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (4.27b)$$

$$\Rightarrow (3) \frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad (4.27c)$$

### → Θόρυβος

Ο θόρυβος είναι σημαντικός για τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση ενός ανεμιστήρα. Η ένταση και η συχνότητα του ήχου ίσως είναι μεγάλη και ενοχλητική για τους ανθρώπους για αυτό θα πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα στις απαραίτητες συνθήκες περιβάλλοντος. Μονάδα μέτρησης του ήχου είναι το αδιάστατο decibel. Το decibel εκφράζει τον λόγο του μετρούμενου ήχου ως προς το μέγεθος κάποιου ήχου αναφοράς.

Στον υπολογισμό ενός ανεμιστήρα, οι τυρβώδεις διαταραχές αλλά και οι μηχανικές ταλαντώσεις, που έχουν ως συνέπεια απώλειες ενέργειας στην λειτουργία, μετατρέπονται σε θόρυβο με ηχητική ισχύ  $P_s$  του αεροδυναμικού θορύβου. Η ηχητική ισχύς συνδέεται με την στάθμη ηχητικής ισχύος  $L_p$  από τον τύπο:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{P_s}{P_{s0}} \right) \text{ σε dB (decibel)} \quad (4.28)$$

Όπου  $P_{s0}$  η ισχύς αναφοράς που είναι ίση με  $P_{s0} = 10^{-12} \text{ W}$

Και έτσι ορίζεται ο αριθμός ηχητικής ισχύος  $K_s$  προς την ολική ισχύ ροής:

$$K_s = \frac{P_s}{Q \cdot \Delta P_t} \cdot M_u^{3-p} \quad (4.29)$$

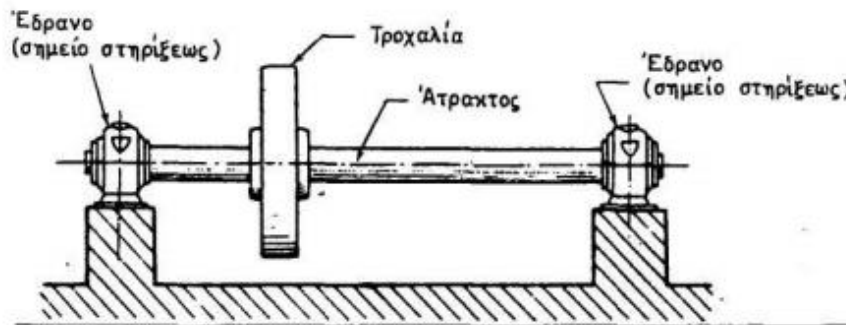
Όπου  $M_u$  ο αριθμός Mach, που είναι ο λόγος της περιφερειακής ταχύτητας του αέρα  $u_2$ , και της ταχύτητας του ήχου  $a$  η οποία είναι σταθερή για ανεμιστήρες λόγω των μικρών θερμοκρασιακών μεταβολών του αέρα.

$$M_u = \frac{u_2}{a} \text{ με } a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (4.30)$$

Ο εκθέτης  $p$  είναι εμπειρικός αριθμός και εξαρτάται από την ηχητική στάθμη στο φάσμα θορύβου. Οι τιμές του  $p$  κυμαίνονται μεταξύ 5 και 10. Για  $p = 5$  είναι για ηχητική στάθμη με μέγιστες τιμές στην περιοχή των υψηλών πιέσεων.

## 5. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η πτερωτή του ανεμιστήρα. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται λόγος για το δεύτερο μεγάλο μέρος του ανεμιστήρα που είναι το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Παρακάτω εισάγονται τα βασικά στοιχεία μηχανών (άτρακτοι, έδρανα, σφήνες, τροχαλίες, ιμάντες), οι χρήσεις και η λειτουργία τους. Στο τέλος γίνεται ακόμα μια σύντομη αναφορά στους ηλεκτροκινητήρες. Το κεφάλαιο αυτό είναι απαραίτητο για την κατανόηση του σχεδιασμού του ανεμιστήρα ως σύνολο στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 5.1: Στοιχεία μηχανών για την μετάδοση κίνησης.

### 5.1 ΑΤΡΑΚΤΟΙ

Οι άξονες είναι τα στοιχεία μηχανών επάνω στα οποία τοποθετούνται σταθερά ή περιστρεφόμενα τεμάχια, όπως τροχαλίες, οδοντωτοί τροχοί, έδρανα, στροφείς κλπ. Το σχήμα των αξόνων είναι κυλινδρικό στις άκρες στήριξης του και ενδιάμεσα από αυτές μπορεί να πάρει τετραγωνικό ή πολυγωνικό σχήμα. Μπορούν να περιστρέφονται μόνοι τους ή να περιστρέφονται μαζί με τα τεμάχιά τους, ή ακόμη και να παραμένουν ακίνητοι όσο περιστρέφονται τα τεμάχια τους. Οι άξονες καταπονούνται κατά κύριο λόγο σε κάμψη και όχι σε στρέψη. Τέτοιους άξονες έχουν τα κάρρα, τα βαγόνια των τραίνων κλπ.

Αντιθέτα οι άτρακτοι είναι αυτά τα στοιχεία μηχανών τα οποία καταπονούνται σε στρέψη ή ταυτόχρονα σε κάμψη και στρέψη. Οι άτρακτοι μεταφέρουν τροχαλίες,

οδοντωτούς τροχούς κλπ, και χρησιμοποιούνται κυρίως για μεταφορά ροπής στρέψης σε υδραντλίες, στροβίλους, ανεμιστήρες, και γενικά στροβιλομηχανές. Οι άτρακτοι πρέπει να στηρίζονται τουλάχιστον σε δύο στηρίγματα και αυτά είναι τα έδρανα κύλισης ή ολίσθησης. Χαρακτηριστικό μέγεθος υπολογισμού σε ατράκτους είναι η απόσταση μεταξύ των εδράνων. Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο της ατράκτου τόσο μικρότερη θα πρέπει να είναι και η απόσταση μεταξύ των εδράνων για την επίτευξη καλύτερης αντοχής του άξονα. Τα υλικά κατασκευής αξόνων και ατράκτων μπορεί να είναι μαλακοί (St40, St50, St60), σκληροί και σε μεγαλύτερες καταπονήσεις πολύ σκληροί χάλυβες (CK35, 28Mn6, 41Cr4, 16MnCr5, 15CrNi6). Για την επίτευξη καλύτερης ροπής αντίστασης άξονες και άτρακτοι κατασκευάζονται και διάτρυτοι για να έχουν μικρότερο βάρος.

Άξονες και άτρακτοι διαβαθμίζονται σε διαφορετικές διαμέτρους κατά το μήκος τους έτσι ώστε να τοποθετούνται σε σωστή βάση τα έδρανα, οι τροχαλίες, οι σφήνες κλπ. Στις συγκεκριμένες διαβαθμίσεις απαιτείται προσοχή και ιδιαίτερη μελέτη στην αντοχή του υλικού διότι υπάρχει ο κίνδυνος θραύσης του.

Όπως ειπώθηκε πιο πάνω, άξονες και άτρακτοι καταπονούνται σε κάμψη, ή σύνθετη καταπόνηση (κάμψη και στρέψη) αντίστοιχα. Για αυτό το λόγο γίνεται μελέτη αντοχής του υλικού τους. Οι δυνάμεις που καταπονούν μια άτρακτο (ή έναν άξονα. στην συνέχεια της εργασίας θα αναφέρεται κυρίως ο όρος άτρακτος διότι στηρίζει τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα) μπορεί να είναι κάθετες προς αυτόν ή οριζόντιες. Κάθετες είναι οι δυνάμεις αντιδράσεων στις στηρίξεις των ατράκτων (όταν η άτρακτος είναι στερεωμένη οριζόντια), δηλαδή τα έδρανα κύλισης ή ολίσθησης, οι δυνάμεις που ασκούνται στην άτρακτο από τις τροχαλίες, τους οδοντωτούς τροχούς κλπ. Υπάρχει πιθανότητα να υπάρξουν και αξονικές αντιδράσεις στις στηρίξεις ή στις δυνάμεις που ασκούνται στην άτρακτο από κεκλιμένους οδοντωτούς τροχούς. Οι αντιδράσεις στις στηρίξεις της ατράκτου είναι αυτές που προκαλούν τις ροπές κάμψης, ενώ οι κατά μήκος αξονικές δυνάμεις μπορούν να προκαλέσουν επιπρόσθετα εφελκυστικές ή θλιπτικές τάσεις. Οι άτρακτοι καταπονούνται πάντοτε σε ροπή στρέψης η οποία μελετάται σε κάθε μήκος της ατράκτου στο οποίο εφαρμόζεται και όχι σε όλο της το μήκος.

Όλες οι παραπάνω καταπονήσεις σε κάμψη, στρέψη, (εφελκυσμό και θλίψη λιγότερο), προκαλούν εσωτερικές εντατικές καταστάσεις και παραμορφώσεις στο υλικό του άξονα. Οι εσωτερικές αυτές εντατικές καταστάσεις λέγονται τάσεις και χωρίζονται στις τάσεις κάμψης  $\sigma_b$  και τάσεις στρέψης  $\tau_b$  (οι ορθές τάσεις εφελκυσμού και θλίψης είναι αμελητέες στην παρούσα εργασία για αυτό και δεν μελετώνται).

Η τάση κάμψης  $\sigma_b$  είναι ο λόγος της ροπής κάμψης στην επικίνδυνη διατομή  $M_b$  προς την ροπή αντίστασης στην επικίνδυνη διατομή  $W_b$ , ήτοι:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \leq \sigma_{b\epsilon\pi} \quad \text{σε N/mm}^2 \quad (5.1)$$

Όπου:  $M_b$  σε Nmm

$W_b$  σε  $\text{mm}^3$ , για πλήρεις ατράκτους είναι  $W_b \sim 0,1 \cdot d^3$

$\sigma_{b\epsilon\pi}$  επιτρεπόμενη τάση κάμψης σε  $\text{N/mm}^2$

Έτσι υπολογίζεται κατά προσέγγιση η διάμετρος της ατράκτου με βάση τον παραπάνω τύπο:

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{M_b}{0,1 \cdot \sigma_{b\epsilon\pi}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_b}{\sigma_{b\epsilon\pi}}}, \text{ σε mm} \quad (5.2)$$

Η καθαρή στρέψη σε μια άτρακτο εμφανίζεται όταν για παράδειγμα αυτή είναι συνδεδεμένη σε έναν κινητήρα, μειωτήρα, αντλία, ή ανεμιστήρα, και υπολογίζεται προσεγγιστικά ως εξής:

$$\tau_t = \frac{T}{W_t} \leq \tau_{t\epsilon\pi} \quad (5.3)$$

Όπου:  $T$  η μεταφερόμενη ροπή στρέψης σε Nmm

$W_t$  πολική ροπή αντίστασης της διατομής της ατράκτου σε  $\text{mm}^3$ ,

Για πλήρεις ατράκτους ισχύει  $W_t \approx 0,2 \cdot d^3$

$\tau_{t\epsilon\pi}$  επιτρεπόμενη ροπή στρέψης σε  $\text{N/mm}^2$

Έτσι προκύπτει προσεγγιστικά η διάμετρος της ατράκτου :

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{T}{0,2 \cdot \tau_{t\epsilon\pi}}} = 1,72 \cdot \sqrt[3]{\frac{T}{\tau_{t\epsilon\pi}}}, \text{ σε mm} \quad (5.4)$$

Για σύνθετη καταπόνηση σε μια άτρακτο και γνωρίζοντας τις ροπές κάμψης και στρέψης υπολογίζεται η ισοδύναμη ροπή με τον παρακάτω τύπο:

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 \cdot (a_o \cdot T)^2}, \text{ σε N}\cdot\text{m} \quad (5.5)$$

Όπου:  $M_b$  ροπή κάμψης στην επικίνδυνη διατομή σε Nmm. Εισάγεται από τις συνθήκες ισορροπίας στην άτρακτο όπως θα δειχθεί παρακάτω.

$T$  ροπή στρέψης που μεταφέρεται στην άτρακτο σε Nmm

$a_o$  λόγος καταπόνησης.

$$\alpha_o = \frac{\sigma_{bw}}{1,73 \cdot \tau_{tSch}}$$

όπου,  $\sigma_{bw}$  αντιστρεφόμενη καμπτική καταπόνηση σε N/mm<sup>2</sup>

$\tau_{tSch}$  επαναλαμβανόμενη στρεπτική καταπόνηση σε N/mm<sup>2</sup>

Λαμβάνεται:

$\alpha_o = 1$  όταν η στρεπτική και καμπτική καταπόνηση ανήκουν στο ίδιο περίπου είδος φόρτισης.

$\alpha_o = 0,7$  για αντιστρεφόμενη κάμψη και επαναλαμβανόμενη στρέψη.

$\alpha_o = 0,4$  για αντιστρεφόμενη κάμψη και στατική στρέψη.

Έτσι εισάγεται ο τύπος για τον υπολογισμό της διαμέτρου ατράκτου που καταπονείται σε σύνθετη καταπόνηση:

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{M_v}{0,1 \cdot \sigma_{b\epsilon\pi}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_v}{\sigma_{b\epsilon\pi}}}, \text{ σε mm} \quad (5.6)$$

## 5.2 ΕΔΡΑΝΑ

Έδρανα είναι τα στοιχεία επάνω στα οποία στηρίζονται και περιστρέφονται οι άτρακτοι (και οι άξονες). Το σχήμα τους περιλαμβάνει δύο κυλινδρικούς δακτύλιους ενδιάμεσα από τους οποίους εφαρμόζονται σώματα κύλισης (τριβείς), ή υλικό ολίσθησης. Για αυτό τον λόγο χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι τα έδρανα κύλισεως και ολισθήσεως.

Δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας που να διαχωρίζει τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης εδράνων κύλιση ή ολίσθησης. Σε γενικές γραμμές, για χαμηλές στροφές με κανονική λειτουργία μηχανής και μικρή συντήρηση χρησιμοποιούνται τα έδρανα κύλισης, ενώ για υψηλότερες στροφές και μεγάλα φορτία χρησιμοποιούνται τα έδρανα ολίσθησης. Βέβαια οι εφαρμογές ποικίλουν για αυτό ο κατασκευαστής θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να εστιάζει στα χαρακτηριστικά στοιχεία έδρασης που τον ενδιαφέρουν έτσι ώστε να επιλέξει τελικά το καταλληλότερο έδρανο για την εφαρμογή του.

### → Έδρανα ολίσθησης

Τα στοιχεία ενός εδράνου ολισθήσεων είναι ο εσωτερικός και ο εξωτερικός δακτύλιος του ανάμεσα από τους οποίους περιβάλλεται ένα λεπτό στρώμα λιπαντικού (λάδι, λύπος, ορυκτέλαια και συνθετικά έλαια κλπ). Ο δακτύλιος που περιστρέφεται συνεχώς λέγεται στροφέας και το λεπτό στρώμα λιπαντικού



ονομάζεται υδροδυναμικός σφήνας. Γενικά, τα έδρανα ολίσθησης υπολογίζονται με βάση την υδροδυναμική θεωρία λίπανσης. Η διαφορά των δυο διαμέτρων των δακτυλίων πρέπει να είναι πολύ μικρή της τάξης των mm. Οι εσωτερικές επιφάνειες των εδράνων θα πρέπει να είναι πολύ καλά λειασμένες και να περιβάλλονται σίγουρα από ένα στρώμα λιπαντικού για την αποφυγή της φθοράς τους.



Εικόνα 5.2: Έδρανο ολίσθησης.

Τα υλικά κατασκευής των εδράνων ποικίλουν. Βασικό χαρακτηριστικό τους πρέπει να είναι η ιδιότητα ολίσθησης και η ιδιότητα απορρόφησης λιπαντικών για καλύτερη ολίσθηση. Τέτοια υλικά είναι ο χυτοσίδηρος, τα υλικά κονιομεταλλουργίας, τα κράμματα χαλκού – σίδηρου - μόλυβδου και σε ειδικές περιπτώσεις υλικό εδράνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ξύλο, το ελαστικό, ο άνθρακας ο γραφίτης κα. Η ιδιότητα της μηχανικής αντοχής και της διάρκειας ζωής διαφέρει από υλικό σε υλικό.

Πριν ξεκινήσει να περιστρέφεται το έδρανο, ένα μεγάλο μέρος του λιπαντικού βρίσκεται στο κάτω μέρος του εδράνου (εάν αυτό είναι στερεωμένο σε οριζόντια άτρακτο). Ο στροφέας ασκεί μια μέση πίεση στον εξωτερικό δακτύλιο  $P_m$  που είναι ίση με το κλάσμα της δύναμης  $F$  που εφαρμόζεται στο έδρανο προς το γινόμενο του πάχους  $d$  και της ονομαστικής διαμέτρου  $b$  του εδράνου :

$$P_m = \frac{F}{d \cdot b} \text{ σε N/mm}^2 \quad (5.7)$$

Όπου  $d$  σε mm και  $b$  σε mm.

Επίσης το λιπαντικό ασκεί μια συνισταμένη πίεση στον δρομέα η οποία εξισορροπεί τις εξωτερικές δυνάμεις του.

Καθώς το έδρανο ξεκινά να περιστρέφεται, το λιπαντικό δεν έχει ακόμη φτάσει στα υπόλοιπα σημεία του δακτυλίου με αποτέλεσμα ένα κομμάτι του εδράνου να εφαρμόζει την λεγόμενη ξηρά τριβή ανάμεσα στις δύο επιφάνειες των δακτυλίων. Αυξάνοντας τις στροφές του εδράνου όλο και περισσότερο υλικό τριβής διαχέεται ισομερώς σε όλη την επιφάνεια των δακτυλίων. Όταν το λιπαντικό διαχέεται σε όλη την επιφάνεια των δακτυλίων επικρατεί η λεγόμενη υγρή τριβή και ο στροφέας του εδράνου ανασηκώνεται ελαφρώς λόγω της αύξησης της πίεσης του λιπαντικού. Για

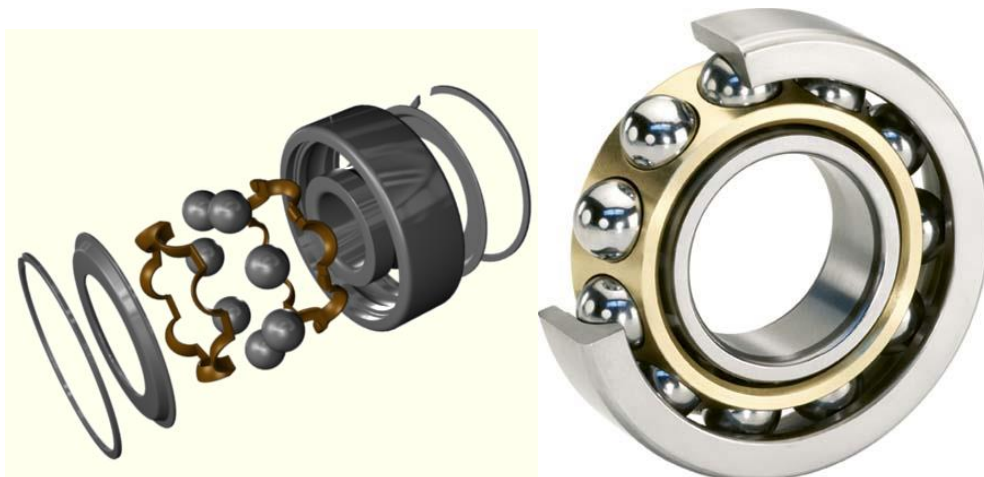
άπειρες στροφές θεωρείται πως το κέντρο του στροφέα και το κέντρο του εξωτερικού δακτυλίου συμπίπτουν. Οι διαστάσεις των εδράνων θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να εργάζονται στην υγρή τριβή, και να λαμβάνονται υπόψη θερμοκρασιακές διαφορές στο περιβάλλον που εφαρμόζονται για την αποφυγή αλλοίωσης του λιπαντικού ή του υλικού του ίδιου του εδράνου.

### → Έδρανα κύλισης

Τα έδρανα κύλισης έχουν διαφορετική μορφή. Στο εσωτερικό των δύο δακτυλίων τους υπάρχουν σφαιρικά, κυκλικά, βελονοειδή, κωνικά ή βαρελοειδή σώματα τα οποία κυλίνουν καθώς ο στροφέας περιστρέφεται. Τα σώματα αυτά συγκρατούνται μέσω ενός κλωβού σε οριμένη απόσταση το ένα από το άλλο και κυλίνουν επάνω σε λειασμένες και σκληρημένες επιφάνειες. Όπως και στα έδρανα ολίσθησης υπάρχει ο δακτύλιος ο οποίος περιστρέφεται (στροφέας) και ο δακτύλιος που ακινητεί. Τα υλικά των εδράνων κύλισης είναι ειδικοί χάλυβες ενώ οι κλωβοί κατασκευάζονται από χαλύβδινο ή ορειχάλκινο έλασμα ή αλουμίνιο (για μεγαλύτερους τριβείς). Οι τριβείς θα πρέπει να γυαλίζονται, να σκληραίνονται, να γυαλίζονται και να δοκιμάζονται σε ακρίβεια διαστάσεων και έλεγχο ρωγμών πριν χρησιμοποιηθούν.

Οι διαστάσεις των εδράνων έχουν τυποποιηθεί κατά DIN 616 και DIN ISO 355. Είναι ταξινομημένες με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε εσωτερική διάμετρο εδράνου να αντιστοιχούν πολλές εξωτερικές διαμέτροι και πολλά διαφορετικά πλάτη, με σκοπό την κάλυψη μιας ευρείας περιοχής φόρτισης.

Στις βασικές μορφές των εδράνων κύλισης υπάρχουν και παραλλαγές αυτών με διαφορετικά χαρακτηριστικά για διαφορετικά αποτελέσματα στις εφαρμογές. Ο πιο απλός τύπος εδράνου είναι ο τύπος με μονόσφαιρο και βαθύ αύλακα. Τα υπόλοιπα έδρανα μπορεί να είναι γωνιώδους επαφής ενός ή δύο σφαιρών.



Εικόνα 5.3: Έδρανο κύλισης

### Υπολογισμός εδράνων κύλισης:

Τα βασικά χαρακτηριστικά για τον υπολογισμό των εδράνων κύλισης είναι η διάρκεια ζωής του και το ισοδύναμο φορτίο που ασκείται επάνω του από την άτρακτο και τα στοιχεία που στηρίζονται επάνω στην άτρακτο.

Πριν από τον υπολογισμό ενός εδράνου κύλισης θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το ισοδύναμο φορτίο  $P$  το οποίο ισχύει για όλα τα έδρανα εκτός από τα αξονικά έδρανα με βαρελίσκους.

Το ισοδύναμο φορτίο  $P$  για δυναμικό ή στατικό φορτίο είναι :

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad \text{σε N} \quad (5.8)$$

$F_r$  ακτινικό φορτίο σε N

$F_a$  αξονικό φορτίο σε N

$X$  ακτινικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του λόγου του ακτινικού προς το αξονικό φορτίο. Λαμβάνει τιμές από πίνακες για έδρανα κύλισης.

$Y$  αξονικός συντελεστής για την μετατροπή της αξονικής δύναμης σε μια ισοδύναμη ακτινική δύναμη. Λαμβάνει τιμές από πίνακες για έδρανα κύλισης.

Για έδρανα που φορτίζονται μόνο ακτινικά  $F_a = 0$  και για έδρανα που φορτίζονται μόνο αξονικά  $F_r = 0$ . Για σφαιρικά έδρανα με βαθύ αύλακα οι συντελεστές  $X$  και  $Y$  εξαρτώνται από τον λόγο  $f_0 = F_a/C_0$ , και ο συντελεστής  $f_0$  δίνεται από πίνακες. Η μεταβλητή  $C_0$  είναι το στατικό φορτίο (ακτινικό για ακτινικά έδρανα και αξονικό για αξονικά έδρανα) το οποίο προκαλεί σε ακίνητα έδρανα μια παραμένουσα παραμόρφωση ίση με το 0,01% της διαμέτρου του σώματος κύλισης στην θέση όπου εφάπτεται το σώμα κύλισης με τον δακτύλιο. Το φορτίο αυτό δίνεται σε καταλόγους.

Σε έδρανα με δυο τριβής σφαιρικούς γωνιώδους επαφής ή κωνικούς που φορτίζονται ακτινικά, εμφανίζονται πρόσθετες αξονικές συνηστώσεις των δυνάμεων οι οποίες πρέπει να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό του ισοδύναμου φορτίου.

Αν θεωρηθεί πως το ισοδύναμο δυναμικό φορτίο  $P$  είναι περίπου σταθερό και δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις, και για σταθερές στροφές ατράκτου, υπολογίζεται η διάρκεια ζωής του εδράνου ως εξής:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \frac{L_{10h} \cdot n \cdot 60}{10^6} \quad (5.9)$$

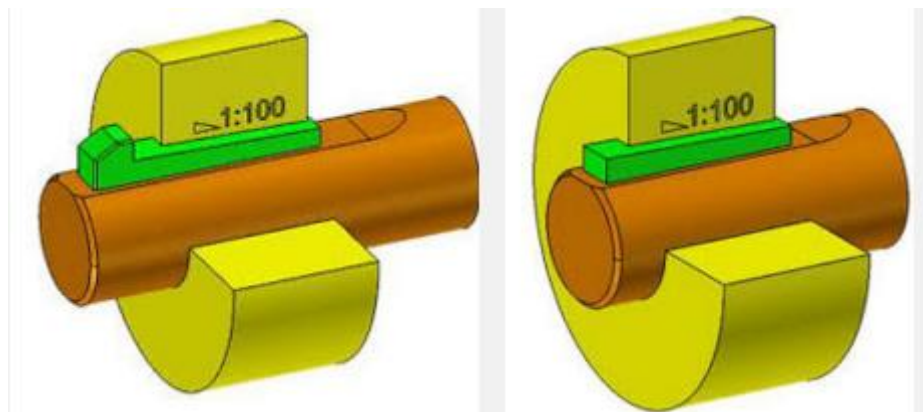
$C$  δυναμικό φορτίο του εδράνου σε N ή kN (βρίσκεται από καταλόγους εδράνων κύλισης)

$P$  πραγματικό φορτίο που εφαρμόζεται στο έδρανο (κατά την παραπάνω σχέση) σε N ή kN

### 5.3 ΣΦΗΝΕΣ

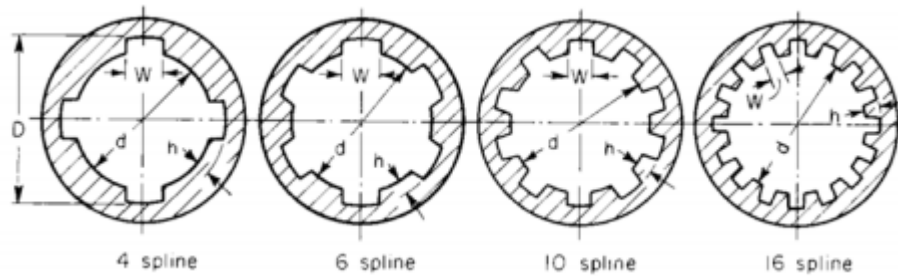
Οι σφήνες αποτελούν στοιχεία μηχανών για την στήριξη τροχαλιών, οδοντωτών τροχών, συμπλεκτών κλπ, επάνω σε ατράκτους με σκοπό την μεταφορά ροπής στρέψης σε αυτούς. Η σύνδεση τους είναι απλή και φθηνή. Το μέγεθος των σφηνών εξαρτάται κυρίως από την διάμετρο της ατράκτου και η αντοχή του εξαρτάται από τις κατασκευαστικές απαιτήσεις που χρειάζονται κάθε φορά. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες σφηνών όπως οι οδηγίοι σφήνες, οι σφήνες με όνηχα, οι επίπεδοι, οι κοίλοι, οι κωνικοί και τέλος τα πολύσφηνα. Οι οδηγίοι σφήνες είναι απλοί στην κατασκευή τους. Σχηματικά είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Τοποθετούνται στον λεγόμενο σφηνόδρομο της τροχαλίας σε θέση η οποία δέχεται κυρίως μόνο πλευρικές δυνάμεις, και διαθέτει ένα μικρό κενό στο ύψος του. Για αξονικές καταπονήσεις η οδηγίοι σφήνες κατασκευάζονται με μεγαλύτερες ανοχές. Οι σφήνες με όνηχα, οι επίπεδοι, και οι κοίλοι σφήνες είναι κατηγορίες παρόμοιες με τους οδηγούς σφήνες. Διαφέρουν ελάχιστα στην γεωμετρία τους και αυτό για να καλύπτονται οι απαιτήσεις της κάθε κατασκευής.

Οι κωνικοί σφήνες χρησιμοποιούνται για μια πολύ σταθερή σύνδεση ατράκτου και πλήμνης για βαρέους δίσκους, τροχών, συνδέσμων και παρόμοιων στοιχείων μεγάλων μηχανημάτων όπως εκσκαφείς, γεραμούς, βαρεία μηχανήματα σφυρηλάτησης γεώτρησης κλπ. Σε αντίθεση με τους οδηγούς σφήνες, οι κωνικοί, δέχονται τις καταπονήσεις των στοιχείων μηχανών στις επάνω και κάτω πλευρές τους, και οι πλευρικές επιφάνειες τους διαθέτουν χάρη. Τοποθετούνται στον σφηνόδρομο της ατράκτου σφικτά για να υπάρχει σταθερότητα και ασφάλεια στην κατασκευή.



Εικόνα 5.4: Σφήνας με όνηχα (αριστερά) και επίπεδος σφήνας (δεξιά).

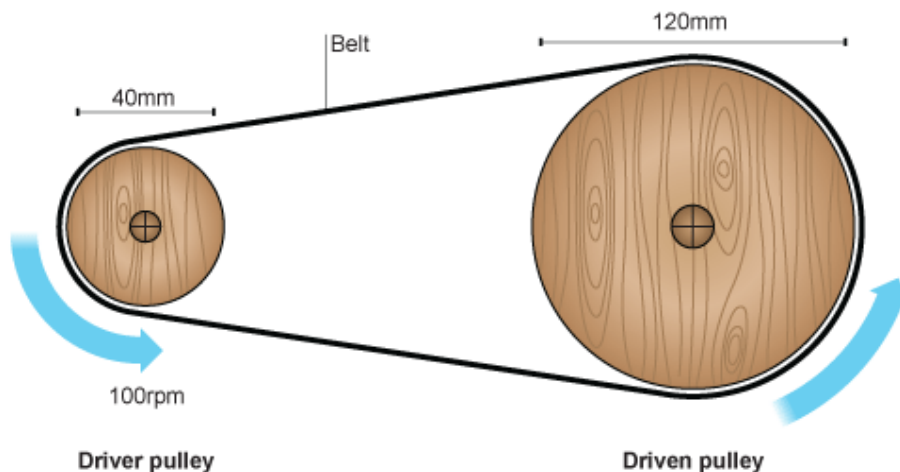
Τα πολύσφηνα είναι πολλοί σφήνες (άρτιος αριθμός) οι οποίοι τοποθετούνται περιφερειακά της ατράκτου και χρησιμοποιούνται τόσο σε συνδέσεις μεταξύ ατράκτων και πλημνών, όσο και για αξονικές συνδέσεις. Μπορούν να χαρακτηριστούν ως οδηγί σφήνες έχοντας όμως κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα. Τα πολύσφηνα ισομοιράζουν τις καταπονήσεις που δέχονται με αποτέλεσμα να υπάρχει πιο σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ τεμαχίων, καθώς και μικρότερη φθορά αυτών. Όμως διαθέτουν το μειονέκτημα του μεγαλύτερου κόστους κατασκευής και του κινδύνου γρήγορης εξασθένησης της ατράκτου λόγω συγκέντρωσης τάσεων.



Εικόνα 5.5: Είδη πολύσφηνων.

## 5.4 ΤΡΟΧΑΛΙΕΣ

Η τροχαλία είναι ένα στοιχείο μηχανής το οποίο εφαρμόζεται για την μετάδοση κίνησης μεταξύ δύο αξόνων. Η τροχαλία αποτελείται από τη στεφάνη, τους βραχίονες και τον ομφαλό (Εικόνα 5.6). Οι βραχίονες έχουν διατομή ελλειπτική ή διπλου Ι. Υλικό κατασκευής των τροχαλιών είναι ο χυτοσίδηρος και σπανιότερα κράματα αλουμινίου ή χάλυβα.



Εικόνα 5.6: Τροχαλίες συνδεδεμένες με ιμάντα.

Η μετάδοση κίνησης πραγματοποιείται με την περιέλιξη δυο τροχαλιών διαφορετικών διαμέτρων από έναν ιμάντα. Το αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης είναι η μετάδοση στροφών (μειωμένων ή αυξημένων) από έναν άξονα σε έναν άλλον. Συνήθως ο πρώτος άξονας είναι συδεδεμένος με κάποιον κινητήρα ο οποίος του δίνει στροφές και στον οποίο είναι στερεωμένη η πρώτη τροχαλία. Λόγω της διαφοράς μεγέθους των δυο τροχαλιών οι στροφές στον δεύτερο άξονα θα είναι λιγότερες ή περισσότερες ανάλογα με την απαιτούμενη σχέση μετάδοσης.

Οι τροχαλίες διακρίνονται σε σταθερές και ελεύθερες. Σταθερή είναι όταν σφηνώνεται στην άτρακτο και ελεύθερη όταν μπορεί να κινηθεί ανεξάρτητα από αυτή. Όταν υπάρχει ανάγκη να μετατοπίζεται ο ιμάντας όπως στα συστήματα 2 τροχαλιών (σταθερή - ελεύθερη) επί της στεφάνης τότε το εξωτερικό τμήμα της στεφάνης της τροχαλίας είναι κυλινδρικό. Στην αντίθετη περίπτωση η στεφάνη γίνεται ελαφρά καμπυλωτή.

## 5.5 ΙΜΑΝΤΕΣ



Εικόνα 5.7: Οδοντωτός ιμάντας με ενισχυμένα νήματα.

Οι ιμάντες χρησιμοποιούνται για την σύνδεση διαφορετικών στοιχείων μηχανής με σκοπό την μετάδοσή κίνησης και ισχύος. Η σύνδεση γίνεται μεταξύ δυο τροχαλιών που φέρουν η κάθε μία άτρακτους. Η μεταφορά κίνησης και ισχύος εξαρτάται ουσιαστικά από την τριβή που δημιουργείται ανάμεσα στον ιμάντα και την επιφάνεια της τροχαλίας. Τα δυο βασικά είδη ιμάντων είναι οι επίπεδοι και οι τραπεζοειδείς. Δεν υπάρχει κανόνας για το που χρησιμοποιείται το κάθε είδος αλλά, ένας γενικός κανόνας λέει ότι οι επίπεδοι ιμάντες χρησιμοποιούνται σε μεγάλες αποστάσεις αξόνων και μικρές σχέσεις μετάδοσης και οι τραπεζοειδείς σε μικρότερες αποστάσεις με μεγάλες σχέσης μετάδοσης. Εκτός αυτών υπάρχουν οι οδοντωτοί και οι κυλινδρικοί ιμάντες.

Σε σχέση με τις μεταδόσεις κίνησης με οδοντωτούς τροχούς και αλυσίδες οι ιμάντες παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Σχεδόν αθόρυβη λειτουργία, όταν μπορεί να αποφευχθεί ο θόρυβος στα σημεία σύνδεσης.
- Καλύτερη παραλαβή και απόσβεση κρούσεων.
- Υπάρχει δυνατότητα εύκολης αλλαγής της σχέσης μετάδοσης κίνησης με απλή αποσύμπλεξη.
- Κάλυψη μεγάλων αποστάσεων όπου είναι αναγκαίο.
- Έχουν πιο απλή και πιο φθηνή διάταξη.
- Χωρίς συντήρηση.

Τα μειονεκτήματα τους όμως είναι ότι :

- Αποκτούν μεγάλη αξονική δύναμη που ανάλογα με την διάταξη μπορεί να φτάσει το 1,5 έως 6 της περιφερειακής δύναμης.
- Υπάρχει το φαινόμενο της διολίσθησης κατά την μεταφορά της δύναμης.
- Η παραμένουσα επιμήκυνση του ιμάντα που συνήθως αυξάνεται με τον χρόνο και οδηγεί πολλές φορές σε ολίσθηση και εκτίναξη του ιμάντα.
- Οι μεταβολές στην τριβή του ιμάντα με την σκόνη, την ακαθαρσία, το λάδι και την υγρασία.

### → Είδη μετάδοσης κίνησης

Η μετάδοση κίνησης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διατάξεις ιμάντων ανοιχτές, διασταυρούμενες, ημιδιασταυρούμενες και γωνιακές. Οι διατάξεις αυτές μπορεί να έχουν την δυνατότητα σύμπλεξης και αποσύμπλεξης των ιμάντων για την πραγματοποίηση μεταβολής της σχέσης μετάδοσης.

Υπάρχουν διατάξεις που είναι ανάλογες της επιβολής της τάσης του ιμάντα, και αυτές είναι οι διατάξεις α) στις οποίες η τάση του ιμάντα προέρχεται από το ίδιο το βάρος του, β) στις οποίες η τάση επιβάλλεται κατά την τοποθέτηση του ιμάντα, γ) με μετακίνηση του ιμάντα επάνω σε ολισθητήρες, δ) με τροχό τάσης, ε) με φορεία τάσης, ζ) με αυτοτάνυση. Γενικά είναι επιθυμητό οι ιμάντες να διαθέτουν αντοχή σε εφελκυσμό, μεγάλο συντελεστή τριβής, μεγάλη ελαστικότητα με μικρή παραμένουσα επιμήκυνση, μεγάλη ευκαμψία, μικρό ειδικό βάρος και αντοχή σε ατμοσφαιρικές επιρροές, υγρασία, θερμοκρασία, λάδια και χημικές ουσίες. Όλες αυτές οι απαιτήσεις όμως δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από ένα μόνο υλικό.

Οι ιμάντες είναι διαφόρων υλικών όπως δερμάτινοι, υφαντοί, πολυμερείς και συνθετικοί. Μπορεί να είναι ενωμένοι με συνδετήρες, συγκόληση, με ραφή ή να είναι

ατέρμονες. Οι δερμάτινοι ιμάντες έχουν πολύ μεγάλο συντελεστή τριβής (τον μεγαλύτερο από όλα τα υλικά) και μικρή παραμένουσα επιμήκυνση. Για μεγαλύτερες όμως ισχείς μετάδοσης θα πρέπει να κατασκευάζονται ιμάντες με πολλές στρώσεις δέρματος. Η ευκαμψία τους κυμαίνεται από μικρές έως μεγάλες τιμές από υλικό σε υλικό.

Οι υφαντοί ιμάντες κατασκευάζονται από οργανικά υλικά (μαλλί, βαμβάκι, φυσικό μετάξι) ή συνθετικά υλικά (νάυλον, περλόν, τεχνητό μετάξι). Έναντι των δερμάτινων ιμάντων έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορεί να κατασκευάζονται ατέρμονες και έτσι εμφανίζουν πιο ήρεμη λειτουργία. Μειονέκτημα είναι ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις πλευρές τους για αυτό μπορεί να οδηγηθούν σε θραύση. Εάν για συνθετικό υλικό χρησιμοποιηθεί το καουτσούκ τότε λαμβάνονται οι ελαστικοί ιμάντες. Μπορούν να εργάζονται σε θερμοκρασίες μέχρι 80 °C αλλά μόνο με λεπτή στρώση συνθετικού καουτσούκ μπορούν να γίνουν ανθεκτικοί σε επιδράσεις λαδιού, βενζίνης υγρασίας και σκόνης.

Οι συνθετικοί ιμάντες (από πολυαμίδη, νάυλον και περλόν) διαθέτουν υψηλή αντοχή και σχεδόν καθόλου επιμήκυνση. Όμως λόγω του κακού συντελεστή τριβής τους χρησιμοποιούνται σπάνια και μόνο στην περίπτωση που συνδυαστούν με μια ταινία από νάυλος με λεπτή στρώση συνθετικού καουτσούκ για την αύξηση του συντελεστή τριβής.

Ο ιμάντας (λουρί) χωρίζεται σε δυο κλάδους: στον κλάδο που έλκει και στον ελκόμενο κλάδο που συνήθως είναι ο από πάνω. Το τόξο επικάλυψης του ιμάντα επί της τροχαλίας λέγεται γωνία επαφής. Κύριος σκοπός του ιμάντα είναι να μεταδώσει στην κινούμενη τροχαλία την περιφερειακή δύναμη  $P$  που αναπτύσσεται στην κινητήρια. Όταν η ιμαντοκίνηση δεν λειτουργεί η αρχική τάση στους δυο ιμάντες είναι ίδια ενώ κατά την κίνηση μεγαλώνει η τάση στον έλκοντα κλάδο (κάτω τμήμα) και ελαττώνεται στον ελκόμενο (πάνω τμήμα). Η διαφορά τάσεων στους 2 κλάδους είναι ίση με την περιφερειακή δύναμη  $P$  που μεταφέρεται. Αν συμβολιστούν με  $T_0$  η αρχική τάση του ιμάντα σε στάση και με  $T_1$  και  $T_2$  αντίστοιχα οι τάσεις του έλκοντος και του ελκόμενου εν λειτουργία τότε ισχύουν οι δύο σχέσεις:

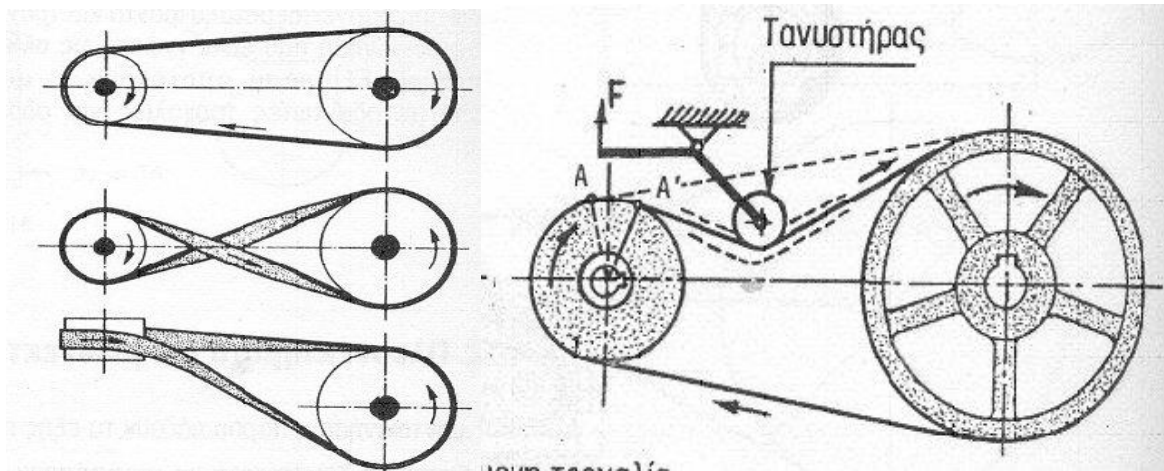
$$P = T_1 - T_2$$

$$T_1 > T_0$$

$$T_2 < T_0$$

Η τάση του έλκοντος είναι τόσο μεγαλύτερη για την ίδια περιφερειακή δύναμη  $P$  όσο η γωνία επαφής του ιμάντα είναι μικρότερη. Ανάλογα της σχετικής θέσεως που λαμβάνουν οι άτρακτοι, οι τροχαλίες και ο ιμάντας στον χώρο, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις Εικόνα 5.8, αλλά και άλλες περιπτώσεις ανάλογα με την επιθυμία του κατασκευαστή.





Εικόνα 5.8 : Θέσεις ιμάντα.

Οι τροχαλίες τοποθετούνται συνήθως σε παράλληλες ατράκτους. Αν οι άτρακτοι είναι οριζόντιοι η διάταξη των τροχαλιών θα είναι οριζόντια. Αν το επίπεδο των ατράκτων είναι κατακόρυφο η διάταξη θα είναι κατακόρυφος. Αν έχει πλάγια κλίση, η διάταξη θα είναι πλάγια.

Για τον υπολογισμό της τροχαλίας σε σχέση με τις διαστάσεις του ιμάντα ισχύουν οι σχέσεις :

$b_1 = 1,1b + 10\text{mm}$  (για παράλληλους άξονες) και

$b_1 = 1,1b + (30 - 40) \text{mm}$  (για σταυρωτούς άξονες)

όπου  $b_1$  το πλάτος της τροχαλίας και  $b$  του ιμάντα σε mm. Η διάμετρος της κινητήριας τροχαλίας δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 80πλάσιου μέχρι 100πλάσιου του πάχους του ιμάντα  $s$ , ήτοι  $80s$  έως  $100s$ . πχ εάν σε μια ιμαντοκίνηση πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ιμάντας πάχους  $s = 4 \text{ mm}$  και  $b = 50 \text{ mm}$ , η κινητήρια τροχαλία θα πρέπει να έχει διάμετρο ( $4 \times 80$  ή  $4 \times 100$ ) και πλάτος  $b_1 = 1,1 \cdot 50 + 10 = 65\text{mm}$ .

Οι ιμάντες που χρησιμοποιούνται στην ιμαντοκίνηση καταπονούνται σε εφελκυσμό και υπολογίζονται με βάση την περιφερειακή δύναμη  $P$  σε (Kp) που μεταφέρεται με την βοήθεια του ιμάντα από την μια τροχαλία στην άλλη. Αν η διατομή του ιμάντα είναι  $F$  ( $\text{cm}^2$ ) τότε σύμφωνα με την σχέση του εφελκυσμού έχουμε :  $P = \sigma \cdot F$  και επειδή  $F = b \cdot s$  θα είναι  $P = \sigma \cdot b \cdot s$  και  $b = P/(\sigma \cdot s)$ . Όπου  $\sigma$  είναι η επιτρεπόμενη τάση σε εφελκυσμό του ιμάντα σε  $\text{Kp}/\text{cm}^2$ . Οι τιμές του  $\sigma$  για δερμάτινους ιμάντες κυμαίνονται από 10 μέχρι  $12,5 \text{ kp}/\text{cm}^2$ . Στην πραγματικότητα η τιμή του  $\sigma$  πρέπει να είναι η μισή τιμή του  $\sigma(\epsilon)$  της αντοχής των υλικών για αυτό και η συμβατική τιμή του  $\sigma$  παρέχεται από Πίνακα. Χρησιμοποιούμε της μικρότερες τιμές σε μη ευνοϊκές περιπτώσεις όπως οι σταυρωτοί ιμάντες.

Εκτός από τους κοινούς ιμάντες χρησιμοποιούνται και οι τραπεζοειδείς. Οι ιμάντες αυτοί έχουν σφηνοειδή κατατομή και έτσι δημιουργούν επιφάνεια επαφής με την τροχαλία μεγαλύτερη σε σύγκριση με την επιφάνεια επαφής των επίπεδων

ιμάντων, έτσι και η τριβή είναι μεγαλύτερη. Οι τραπεζοειδείς ιμάντες είναι συνήθως περισσότεροι από έναν και τοποθετούνται ο ένας δίπλα στον άλλον και οι αντίστοιχες τροχαλίες φέρουν αύλακες για να τους δέχονται. Οι ιμάντες κατασκευάζονται ολόσωμοι (μονοκόμματοι) και σε διάφορα μήκη. Το εσωτερικό τους αποτελείται από ένα ελαστικό πυρήνα και πάνω σε αυτόν τυλίσσονται πολλές βαμβακερές χορδές μεγάλης αντοχής οι οποίες έχουν διαποτιστεί με ελαστικό και σχηματίζουν το εσωτερικό τμήμα του ιμάντα για να κλείσει η όλη κατασκευή με την εξωτερική ελαστική επικάλυψη. Οι χορδές μεταφέρουν κυρίως τις δυνάμεις που ασκούνται στον ιμάντα ο οποίος εφάπτεται στο αυλάκι της τροχαλίας μόνον κατά τις 2 μη παράλληλες πλευρές.

## 5.6 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Ο ηλεκτροκινητήρας είναι μια ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Υπάρχουν δυο είδη ηλεκτρικών μηχανών, οι ηλεκτροκινητήρες και οι ηλεκτρογεννήτριες. Οι δεύτερες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια που δέχονται σε ηλεκτρική, και χρησιμοποιούνται για να διοχετεύσουν ηλεκτρισμό σε αναγκαία συστήματα.

Γενικά οι ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται σε πολλά συστήματα παραγωγής ισχύος όπως ανεμιστήρες, αντλίες, ηλεκτρικά αυτοκίνητα κλπ, αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως επεξεργασία κοπής υλικών, μεταλλουργία, χημική βιομηχανία κ.α. Στις περισσότερες περιπτώσεις ένας ηλεκτροκινητήρας μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρογεννήτρια, και το αντίστροφο.

Οι μηχανές αυτές δουλεύουν με περιστροφική κίνηση στο εσωτερικό τους και για αυτό αποδίδουν μεγάλες ισχύεις κινητικής ενέργειας. Συγκεκριμένα το εσωτερικό τους αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο τμήμα που λέγεται ρότορας, και από ένα σταθερό τμήμα εξωτερικά του ρότορα, που λέγεται στάτορας. Ενδιάμεσα από αυτά τα μέρη υπάρχει κενό αέρος, και στο μέσο του ρότορα υπάρχει ο άξονας της μηχανής. Για να λειτουργήσει η μηχανή ως κινητήρας δίνεται αρχικά ρεύμα στον ρότορα, ο οποίος σύμφωνα με την θεωρία του Laplace όταν εκτεθεί σε μαγνητικό πεδίο (στάτορας) δέχεται μια δύναμη  $F$  η οποία τείνει να τον περιστρέψει.

Ο άξονας της μηχανής μπορεί να συνδεθεί απευθείας με την πλήμνη μιας άλλης μηχανής (πχ ανεμιστήρας) ή να συνδεθεί μέσω τροχαλιών και ιμάντων, οδοντωτών τροχών, μειωτήρων κλπ, έτσι ώστε να μειωθούν οι στροφές του σε κάποιον επιθυμητό αριθμό που είναι ανάλογος της κάθε κατασκευής. Οι ηλεκτροκινητήρες μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Σήμερα, οι ηλεκτροκινητήρες είναι ευρέως διαδεδομένοι λόγω της μεγάλης απόδοσης τους.



Εικόνα 5.8: Ηλεκτροκινητήρας.

## 6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Κατά την επιλογή ενός ανεμιστήρα για μια ορισμένη εφαρμογή, με την βοήθεια των αδιάστατων χαρακτηριστικών αριθμών ( $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$ ), πρέπει να ελέγχονται οι εξής υποθέσεις:

- Ποιά είναι η ποσότητα αέρα (ή αερίου) που πρέπει να παροχετεύεται σε μια εγκατάσταση (παροχή όγκου).
- Πόση και ποιές είναι οι απώλειες πίεσης στην εγκατάσταση και πως θα υπερνικηθούν.
- Ποιός τύπος ανεμιστήρα πρέπει να επιλεγεί για συγκεκριμένη εφαρμογή (τύπος πτερυγίου, διάμετρος, αριθμός στροφών, είδος μετάδοσης κίνησης κλπ).
- Ποιά η στάθμη θορύβου.

Έτσι ένας κατασκευαστής έχει ως δεδομένα ένα ή μερικά από τα παραπάνω και επιχειρεί την εύρεση των υπολοίπων για τον υπολογισμό του ανεμιστήρα.

## 6.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα δοθέντα στοιχεία για τον σχεδιασμό του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα είναι τα εξής:

- Παροχή **Q** : 50.000 m<sup>3</sup>/h
- Στατική Πίεση **SP** : 100 mmH<sub>2</sub>O

Η τιμή της παροχής στην παρούσα εργασία, είναι σχετικά μεγάλη : 50,000 κυβικά μέτρα ανά ώρα, δηλαδή 13,89 κυβικά μέτρα το δευτερόλεπτο. Μια τυπική βιομηχανική εγκατάσταση απαιτεί παροχή όγκου περίπου στα 6000 κυβικά μέτρα την ώρα για εξαερισμό μέσω αεραγωγών, ενώ για μεγαλύτερες στατικές πιέσεις οι τιμές της παροχής μπορούν να φτάσουν έως 1.000.000 κυβικά μέτρα την ώρα.

Γενικά, οι ανεμιστήρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την παραγωγή πίεσης τους. Έτσι υπάρχουν οι ανεμιστήρες χαμηλών, μεσαίων και υψηλών πιέσεων. Οι ανεμιστήρες υψηλών πιέσεων παράγουν παροχές από 50 έως 1.500 κυβικά μέτρα την ώρα και στατική πίεση από 4.000 έως 10.000 Pascal. Οι ανεμιστήρες μεσαίων πιέσεων παράγουν παροχή από 600 έως 1.000.000 κυβικά μέτρα την ώρα σε στατικές πιέσεις από 1.600 έως 4.000 Pascal. Για μικρότερες πιέσεις (μέχρι 1.600 Pa) χρησιμοποιούνται κυρίως ανεμιστήρες αξονικού τύπου οι οποίοι είναι καταλληλότεροι σε μεγάλες παροχές. Από τα παραπάνω φαίνεται πως όσο μικραίνει η στατική πίεση τόσο αυξάνει η δυνατότητα παραγωγής παροχής αέρα. Ο ανεμιστήρας της συγκεκριμένης εργασίας κατατάσσεται στην κατηγορία των χαμηλών πιέσεων αφού η στατική πίεση που απαιτείται εδώ είναι της τάξεως των 981 Pascal.

Για την μετάδοση κίνησης υπάρχουν δύο ειδών κατασκευαστικές μέθοδοι στον ανεμιστήρα:

- α) Άμεση μετάδοση, απευθείας επαφή άξονα κινητήρα με ανεμιστήρα,
- β) Έμμεση μετάδοση, μετάδοση κίνησης μέσω τροχαλιών και ιμάντων.

Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός αποτελείται από έμμεσο σύστημα μετάδοσης κίνησης και περιλαμβάνει δυο τροχαλίες συνδεδεμένες με ιμάντα, δυο έδρανα και δυο άξονες, τον άξονα του κινητήρα και τον άξονα τοποθέτησης των τροχαλιών.

Η έμμεση μετάδοση κίνησης παρόλο που απαιτεί συνεχή συντήρηση των στοιχείων της, κόστος κατασκευής, και κόστος απωλειών είναι αρκετά διαδεδομένη διότι διαθέτει πλεονεκτήματα όπως απορρόφηση κραδασμών, δυνατότητα αύξησης ή μείωσης της ταχύτητας περιστροφής του ανεμιστήρα, ακριβέστερη τιμή παροχής και στατικής πίεσης. Για έμμεση μετάδοση κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν κινητήρες με υψηλό επίπεδο στροφών.

Δεδομένη θεωρούμε επίσης και την πυκνότητα του αέρα. Παρόλο που στα αέρια σώματα η πυκνότητά τους μεταβάλλεται εύκολα με την αλλαγή της πίεσης ή της θερμοκρασίας, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή σε όλη την διάρκεια λειτουργίας ενός ανεμιστήρα. Σε κανονική πίεση μιας ατμόσφαιρας (1 atm) και στους 20° κελσίου η πυκνότητα είναι 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Στην παρούσα εργασία λήφθηκε τιμή πυκνότητας στους 15° βαθμούς κελσίου  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ .

## 6.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

Οι μεταβλητές για τον σχεδιασμό του ανεμιστήρα είναι πολλές κάτι το οποίο καθιστά τον υπολογισμό περίπλοκο. Ο προβληματισμός και η δυσανασκέτηση στον σχεδιασμό των ανεμιστήρων υπάρχει λόγω της μεγάλης ποικιλίας στα σχέδια των πτερυγίων και των στροφών, κάτι που κάνει μεγάλο το εύρος λύσεων καθώς με δυο δεδομένα όπως παροχή και στατική πίεση μπορούμε να σχεδιάσουμε πάνω από ένα είδος ανεμιστήρα. Η προσπάθεια εδώ γίνεται ώστε να προσεγγιστεί η καλύτερη και ακριβής λύση στον σχεδιασμό, και η υψηλότερη απόδοση με όσο το δυνατόν λιγότερο κόστος κατασκευής.

Έτσι λοιπόν έχουμε τις εξής μεταβλητές για την λύση του προβλήματος:

- Διάμετρος Στροφέα : Εσωτερική  $D_1$  και Εξωτερική  $D_2$

Είναι ίσως η πιο σημαντική μεταβλητή καθώς όλες οι σχέσεις που διαθέτουμε για τον σχεδιασμό εμπεριέχουν την συγκεκριμένη μεταβλητή. Η διάμετρος στροφέα είναι εκείνη που θα καθορίσει τον αριθμό των πτερυγίων, την κλίση και την μορφή αυτών, τις στρόφες του κινητήρα, την παροχή όγκου και την στατική πίεση. Πιο συγκεκριμένα, η εξωτερική διάμετρος του στροφέα επηρεάζει την στατική πίεση ενώ η εσωτερική διάμετρος του επηρεάζει την παροχή όγκου αέρα. Θα αναλυθεί παρακάτω ο υπολογισμός και ο σχεδιασμός της διαμέτρου.

➤ Αριθμός Πτερυγίων Z

Γενικά, ο αριθμός πτερυγίων είναι ανάλογος της διαμέτρου του στροφέα. Σε αντίθεση με τους αξονικούς ανεμιστήρες όπου ο αριθμός των πτερυγίων βρίσκεται από συγκεκριμένο τύπο, στους φυγόκεντρους ανεμιστήρες χρησιμοποιείται ένας ημι-εμπειρικός τύπος στον οποίο κρίσιμο ρόλο παίζει μια παράμετρος  $k$  η οποία λαμβάνεται εμπειρικά. Τα πτερύγια θα πρέπει να είναι διαμορφωμένα έτσι ώστε το κενό ανάμεσα τους να πρέπει να είναι τόσο στενό ώστε να οδηγείται σωστά η ροή αέρα, και τόσο φαρδύ ώστε η αντίσταση στην ροή αέρα να μην είναι μεγάλη.

➤ Αριθμός Στροφών Πτερωτής RPM (rounds per minute)

Εισάγεται και υπολογίζεται με βάση τα ειδικά διαγράμματα και τις απαραίτητες εφαρμογές των κατάλληλων σχέσεων. Συμβολίζεται με RPM ή N.

➤ Γεωμετρία Πτερυγίου

Το πτερύγιο επιλέχθηκε να είναι σχήματος airfoil, και η γεωμετρία του περιλαμβάνει διαστάσεις όπως το πάχος του, το μήκος του και οι γωνίες κλίσης του που θα τοποθετηθεί στον δρομέα.

○ Μήκος πτερυγίου

Το μήκος του πτερυγίου προκύπτει από τις διαστάσεις των διαμέτρων του στροφέα και κυριότερα της γωνίας κλίσης  $\beta_1$  στην ακμή προσβολής του πτερυγίου.

○ Πάχος πτερυγίου

○ Γωνίες πτερυγίου

○ Πλάτος πτερυγίου

Το πλάτος του πτερυγίου στην αναρρόφηση είναι το ίδιο με το πλάτος γενικότερα της πτερωτής. Συμβολίζεται με  $b$ . Για να διατηρείται η εξίσωση συνέχειας θα δούμε πως το πτερύγιο πρέπει να έχει διαφορετικό πλάτος στο σημείο αναρρόφησης σε σχέση με αυτό στο σημείο κατάθλιψης. Η τιμή του  $b$  θα επηρεάσει την παροχή στον ανεμιστήρα. Όσο αυξάνεται το  $b$  αυξάνεται και η παροχή.

### 6.3 ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΤΕΡΩΤΗΣ

Για έναν μελετητή, υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να ξεκινήσει τον υπολογισμό της πτερωτής του ανεμιστήρα. Η βάση για να ξεκινήσει κανείς να μελετά την πτερωτή ενός ανεμιστήρα σχετίζεται με τα δεδομένα που διαθέτει κάθε φορά σε κάθε διαφορετικό πρόβλημα. Τα συνήθη δεδομένα που δίνονται είναι η παροχή αέρα και η διαφορά πίεσης που παράγει ο ανεμιστήρας, και

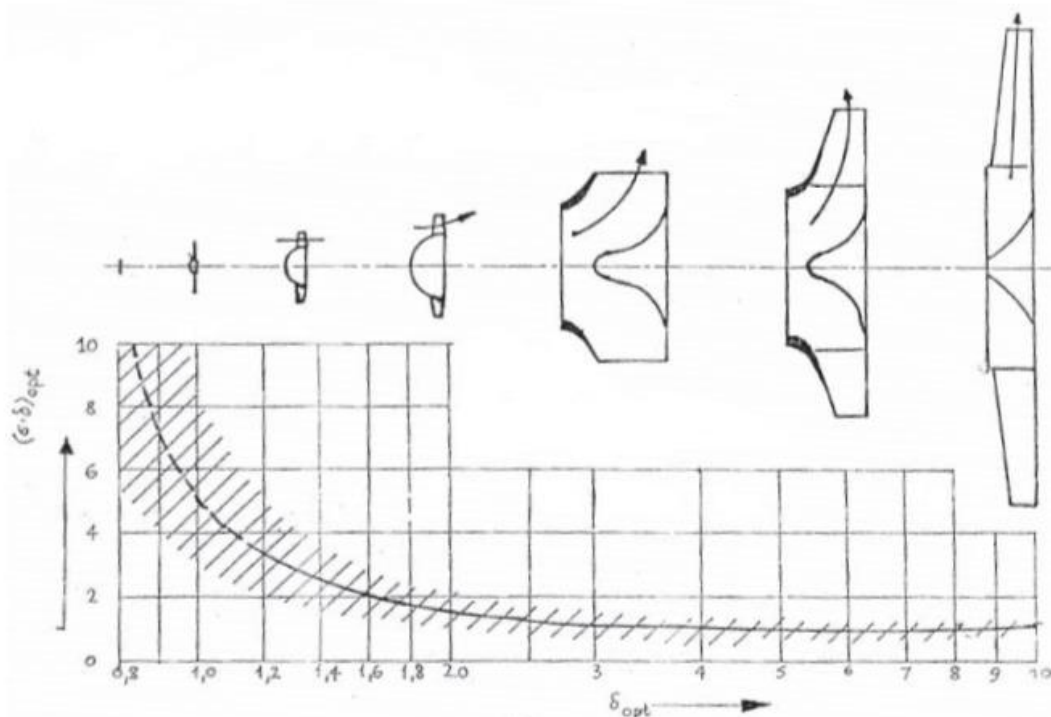
αυτές είναι οι τιμές με βάση της οποίες θα κατασκευαστεί. Σε γενικές γραμμές οι παράμετροι που απαιτείται να υπολογιστούν είναι οι στροφές του στροφείου, οι διαμέτροι, οι γωνίες τα πλάτη και οι ταχύτητες των πτερυγίων καθώς επίσης αναγκαία είναι η ισχύς του ανεμιστήρα όπως και η απόδοση.

### → Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Αριθμών

Με την βοήθεια των συναρτήσεων των χαρακτηριστικών αριθμών ( $\phi, \psi, \delta, \sigma$ ) γίνεται γρήγορη και ασφαλής επιλογή διαφόρων τύπων των ανεμιστήρων, είτε από διαγράμματα είτε από πίνακες και συσχετισμούς, οι οποίοι έχουν συλλεγεί από εμπειρικά και υπολογιστικά στοιχεία δοκιμασμένων μηχανών.

Ο αριθμός διαμέτρου ίσως είναι το πρώτο και το πιο «σίγουρο» βήμα στον υπολογισμό, εφόσον δίνεται ένα σχετικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται διάφοροι τύποι πτερωτών με βάση τον αριθμό διαμέτρου και το γινόμενο  $\sigma \cdot \delta$ . Από την Εικόνα 6.1 εισάγεται ο αριθμό διαμέτρου, λαμβάνοντας ως παραδοχή πως η πτερωτή έχει το σχήμα που αντιστοιχεί στον αριθμό  $\delta=2,5$ . Η παραδοχή αυτή έγινε εκτιμώντας πρόχειρα τη διάσταση της διαμέτρου της πτερωτής, είτε από την σύγκριση μεταξύ διαφόρων τυποποιημένων πτερωτών, είτε με μαθηματικούς τύπους, σύμφωνα πάντα με τα απαιτούμενα δεδομένα.

Δηλαδή  $\delta_{opt}$  είναι ο αριθμός διαμέτρου ο οποίος εκτιμάται από το διάγραμμα, ανάλογα με την μορφή της πτερωτής που εμείς επιλέξαμε:

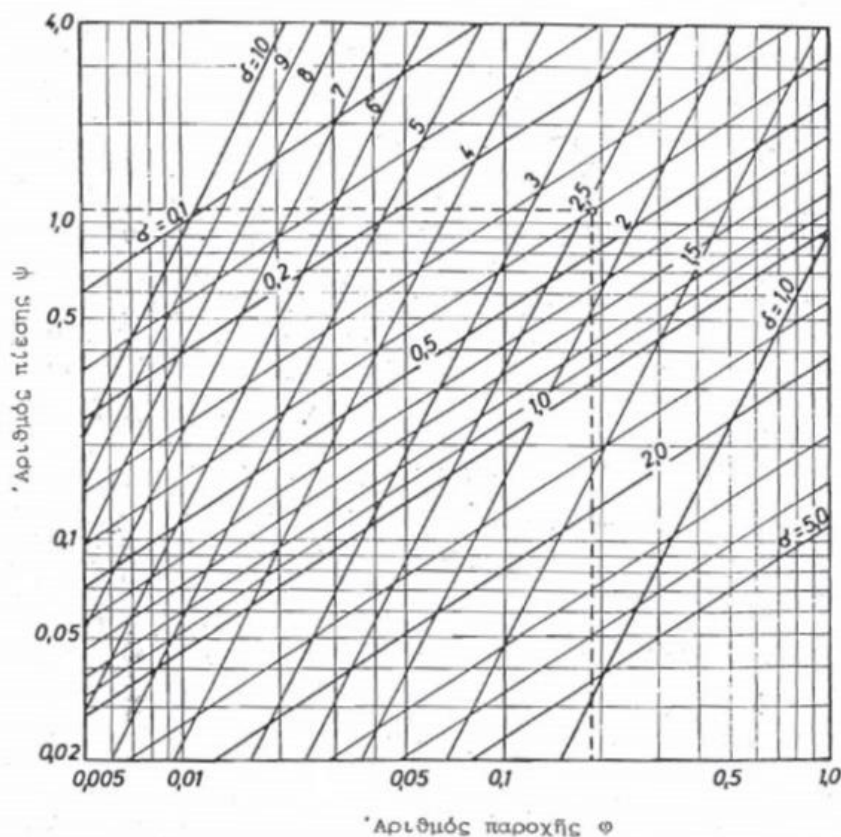


Εικόνα 6.1: Χαρακτηριστικός αριθμός ( $\sigma \cdot \delta$ ) για την περιφερειακή ταχύτητα του στροφείου  $u$ . Η αύξηση της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας οδηγεί σε συνεχή μεταβολή του σχήματος των πτερυγίων από τον αξονικό στον καθαρά ακτινικό τύπο και αντιστοίχως τον χαρακτηριστικών αριθμών  $\sigma$  και  $\delta$ . (Το διάγραμμα λήφθηκε από το βιβλίο Παπανίκας Δ., ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ που αναφέρεται στην βιβλιογραφία).

Επιλέχθηκε  $\delta_{opt} = 2,5$ . Ο κάθετος όμως άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στο γινόμενο  $\sigma \cdot \delta$ . Για την τιμή  $\delta \equiv \delta_{opt} = 2,5$  προκύπτει:

$$\begin{aligned} \sigma \cdot \delta &\approx 1,2 \Rightarrow \\ \sigma &\approx \frac{1,2}{2,5} \Rightarrow \\ \sigma &\approx 0,48 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Εν συνεχεία, ακόμη ένα διάγραμμα δίνεται και βοηθά στην εύρεση των υπόλοιπων χαρακτηριστικών αριθμών που θα αποτελέσουν την βάση στις μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό της πτερωτής. Το διάγραμμα αυτό φαίνεται στη εικόνα 6.2, όπου περιλαμβάνει και τους τέσσερις χαρακτηριστικούς αριθμούς ( $\delta, \sigma, \varphi, \psi$ ). Γνωρίζοντας τους δυο πρώτους αριθμούς ( $\delta$  και  $\sigma$ ) εύκολα εκτιμούνται οι άλλοι δυο ( $\varphi, \psi$ ):



Εικόνα 6.2: Νομογράφημα  $\psi(\varphi)$  επιλογής ανεμιστήρων με παραμέτρους τους  $\sigma$  και  $\delta$ . (Το διάγραμμα λήφθηκε από το βιβλίο Παπανίκας Δ., ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ που αναφέρεται στην βιβλιογραφία).

Από το διάγραμμα για  $\delta = 2,5$  και  $\sigma = 0,48$  βρίσκουμε  $\varphi = 0,13$  και  $\psi = 0,7$ . Τις τιμές των  $\varphi$  και  $\psi$  μπορούμε να τις υπολογίσουμε και από την σχέση αναλογίας μεταξύ των αριθμών  $\varphi, \psi, \delta$  και  $\sigma$ , επιλύοντας το σύστημα:

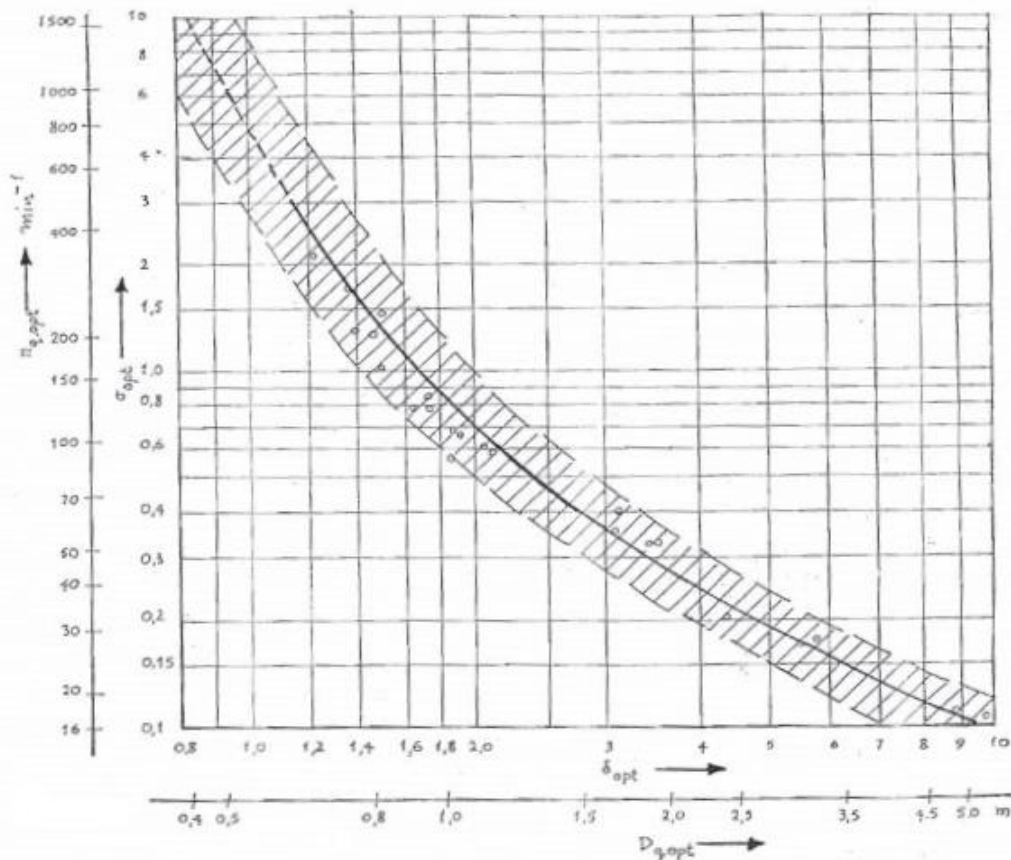


$$\sigma = \frac{\varphi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \quad \text{και} \quad \delta = \frac{\psi^{1/4}}{\varphi^{1/2}} \quad (6.2)$$

Η σχέση αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό των σχέσεων μεταξύ όμοιων ανεμιστήρων όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.

Εξίσου εύκολα, από το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 6.3), γνωρίζοντας την τιμή του αριθμού διαμέτρου  $\delta_{opt} = 2,5$ , λαμβάνεται η τιμή  $\eta_q = 75$  για τον ειδικό αριθμό στροφών.

Οι παραπάνω αριθμοί θα χρησιμοποιηθούν σε αρκετούς από τους παρακάτω υπολογισμούς.



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα Cordier: Συνάρτηση του βέλτιστου αριθμού ταχυτροφίας από τον αριθμό διαμέτρου  $\sigma=f(\delta)$ , ή συνάρτηση του ειδικού αριθμού στροφών από την ειδική διάμετρο  $\eta_q = f(D_q)$ . Τα σημεία χαρακτηρίζουν ανεμιστήρες και συμπιεστές διαφόρων κατασκευών. Οι αξονικές μηχανές μετρήθηκαν με οδηγό πτερύγωσης και διαχύτη, και οι ακτινικές με σπειροειδές κέλυφος. (Το διάγραμμα λήφθηκε από το βιβλίο Παπανίκας Δ., ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ που αναφέρεται στην βιβλιογραφία).

### → Πίεση, Μανομετρικό και Παροχή

Ποιά είναι η ολική πίεση που ζητείται να παράγει ο ανεμιστήρας; Η ολική πίεση που παράγει ο ανεμιστήρας καθώς λειτουργεί, είναι το άθροισμα της δυναμικής και της στατικής πίεσης που λαμβάνει θέση στο εσωτερικό του (στροφέας, σπειροειδές κάλυμα). Τελικά ο ανεμιστήρας θα πρέπει να παράγει μια στατική πίεση σε mm στήλης νερού για να υπερνικήσει το οποιοδήποτε σύστημα – αγωγό στον οποίο θα εφαρμοστεί.

Η στατική πίεση δίνεται ως δεδομένο και είναι :  $P_s = 100\text{mmH}_2\text{O}$  ή  $981\text{Pascal}$ . Η ολική πίεση επιλέγεται ανάλογα με τα δεδομένα της εγκατάστασης που τοποθετείται ο ανεμιστήρας, δηλαδή προσδιορίζεται η ολική πτώση πίεσης που χρειάζεται να υπερνικηθεί. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται ολική πίεση  $120\text{mmH}_2\text{O}$ . Επομένως, αφού η στατική πίεση είναι  $100\text{mmH}_2\text{O}$ , τότε η δυναμική πίεση θα είναι  $20\text{ mmH}_2\text{O}$ . Για διαφορετική επιλογή ολικής πίεσης, θα υπάρχει ανάλογη αλλαγή στα αποτελέσματα του υπολογισμού του ανεμιστήρα.

Επομένως η ολική πίεση είναι μέσω της μετατροπής μονάδων:  
 $\Delta P_{tot} = 120 \cdot 9,81 = 1.177\text{ Pa}$  .

Για τους παρακάτω υπολογισμούς είναι αναγκαίο να βρεθεί η ολική πίεση σε μέτρα στήλης αέρα, δηλαδή το μανομετρικό  $H$ , μια σημαντική παράμετρος για τον ανεμιστήρα. Από την εξίσωση (4.7) της Θεωρίας Ανεμιστήρων, είναι:

$$H_{tot} = \frac{\Delta P_{tot}}{\rho \cdot g}, \text{ σε m} \quad (6.3)$$

Όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας, και  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα.

$$\text{Επομένως : } H_t = \frac{1177\text{ Pa}}{1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{96\text{m στήλης αέρα}} \quad (6.4)$$

μια τιμή σχετικά μικρή για την λειτουργία ενός ανεμιστήρα αφού το ανώτατο όριο μανομετρικού για ανεμιστήρες, γενικότερα, αγγίζει την τιμή  $861\text{ m}$ .

Η παροχή αέρα που ζητείται να παρέχει ο ανεμιστήρας είναι  $Q = 13,89\text{m}^3/\text{s}$  στην κατάθλιψη. Ωστόσο η παροχή είναι διαφορετική στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα λόγω απωλειών ενέργειας. Η παροχή στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα πριν την εισχώρηση του αέρα στην πτερωτή δίνεται από την εμπειρική σχέση :

$$Q_{\text{αναρροφ}} = 1,1 \cdot Q = 1,1 \cdot 13,89 = 15,28\text{ m}^3/\text{s} \quad (6.5)$$

### → Αριθμός Στροφών

Για τον υπολογισμό των στροφών  $N$  που χρειάζεται ο στροφέας χρησιμοποιείται ο τύπος του ειδικού αριθμού στροφών από τον οποίο μπορεί να εξαχθεί ο απαραίτητος αριθμός στροφών :

$$N = n_q \cdot \frac{H_t^{\frac{3}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}} \quad (6.6)$$

Όπου Q είναι η παροχή στην έξοδο του ανεμιστήρα. Επομένως ο στροφέας του ανεμιστήρα περιστρέφεται με στροφές (από την 6.6) :

$$N = 75 \cdot \frac{(96)^{\frac{3}{4}}}{(13,89)^{\frac{1}{2}}} = 617RPM ,$$

Λαμβάνεται η τιμή **N = 620 RPM** (6.7)

### → Εξωτερική Διάμετρος

Υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η εξωτερική διάμετρος του ανεμιστήρα  $D_2$ , γνωρίζοντας την ειδική διάμετρο  $D_q$  :

$$D_q = \frac{\delta_{opt}}{1,865} = \frac{2,5}{1,865} = 1.34 \quad (6.8)$$

Από τον ορισμό της ειδικής διαμέτρου:

$$D_q = D_2 \frac{H^{1/4}}{Q^{1/2}} \quad (6.9)$$

Τότε:

$$D_2 = D_q \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{1}{4}}} = 1.34 \frac{(13,89 \frac{m^3}{s})^{\frac{1}{2}}}{(96 \text{ m})^{\frac{1}{4}}} = \mathbf{1,60m = 1600 \text{ mm}}$$

### → Ταχύτητα αναρρόφησης

Η ταχύτητα αναρρόφησης είναι η ταχύτητα που έχει ο αέρας πριν εισέλθει στην πτερωτή. Η ταχύτητα αέρα στην αναρρόφηση  $c_\alpha$  υπολογίζεται από τον θωρητικό τύπο:

$$c_\alpha = \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_t} \quad (6.10)$$

Όπου  $\varepsilon$  ο συντελεστής αναρρόφησης και δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon = 0,55 \cdot \left(\frac{n_q}{100}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,55 \cdot \left(\frac{75}{100}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,5 \quad (6.11)$$

Τότε :

$$c_\alpha = \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_t} = 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 96^m} = 21,7 \text{ m/s}$$

### → Εσωτερική διάμετρος

Ο αέρας, πριν εισχωρήσει στην πτερύγωση, βρίσκεται στον κώνο εισροής. Ο κώνος αυτός έχει μια διάμετρο  $D_a$ , η οποία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τον ορισμό της παροχής όγκου σε αυτή την αναρρόφηση :

$$Q_{\text{αναρροφη}} = c_a \cdot A, \leftrightarrow Q_{\text{αναρροφη}} = c_a \cdot \pi \cdot \frac{D_a^2}{4} \leftrightarrow D_a = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{αναρροφη}}}{\pi \cdot c_a}} \quad (6.12)$$

Οπότε η διάμετρος αναρρόφησης  $D_a$  είναι:

$$D_a = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{ολ}}}{\pi \cdot c_a}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15,28 \text{ m}^3/\text{s}}{3,14 \cdot 21,7 \text{ m/s}}} = \mathbf{0,95m = 9500 \text{ mm}} \quad (6.13)$$

Στους ανεμιστήρες λαμβάνεται η διάμετρος αναρρόφησης ίση με την εσωτερική διάμετρο της πτερωτής. Επομένως  $D_1 = D_a$ .

Σε άλλες περιπτώσεις κατασκευής, η διάμετρος του κώνου εισροής  $D_s$  σχεδιάζεται ελαφρώς μικρότερη από την εσωτερική διάμετρο  $D_1$  και αυτό για λόγους ομαλότητας και αποφυγής τύρβης κατά την εισροή του ρευστού. Μιας και το ρευστό θα αλλάξει ήδη μια φορά την κατεύθυνση του σε  $90^\circ$  και θα δημιουργηθεί τύρβη, μια πιο «ομαλή» είσοδος του ρευστού στην πτερωτή θα ήταν σωστή. Οι δυο διαμέτροι ενώνονται με ένα τόξο. Πρακτικά  $D_s = 0,94 D_1$ .

### → Περιφερειακές ταχύτητες πτερυγίων

Θα υπολογιστεί η περιφερειακή ταχύτητα του στροφείου, στη μεγάλη διάμετρο  $D_2$  με βάση τον αριθμό πίεσης  $\psi$ :

$$\psi = \frac{\Delta P_{\text{tot}}}{\frac{1}{2} \rho u_2^2} \Rightarrow \quad (6.14)$$

$$u_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P_{\text{tot}}}{\rho \cdot \psi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1177 \text{ Pa}}{1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,7}} \Rightarrow \quad (6.15)$$

$$u_2 = 51,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.16)$$

Μπορεί να επαληθευτεί, η τιμή αυτή, και μέσω του αριθμού των στροφών και της διαμέτρου  $D_2$  που βρέθηκε πιο πάνω:

$$u_2 = \frac{2\pi \cdot N \cdot D_2}{2} = \pi \cdot N \cdot D_2 = 3,14 \cdot 620 \text{ RPM} \cdot 1,6\text{m} = 3,14 \cdot \frac{620}{60} \text{ s}^{-1} \cdot 1,6\text{m} \Rightarrow$$

$$u_2 = 51,9 \frac{m}{s}$$

Παρόμοια, μέσω της  $D_1$ , υπολογίζεται η περιφερειακή ταχύτητα του στροφείου στην αναρρόφηση:

$$u_1 = \pi N D_1 = 3,14 \cdot \frac{620}{60} \cdot 0,95 \frac{m}{s} \Rightarrow \quad (6.17)$$

$$u_1 = 30,8 \frac{m}{s} \quad (6.18)$$

### → Ταχύτητες αέρα και γωνίες

Η ταχύτητα του αέρα έξω από τον ανεμιστήρα είναι μηδέν. Από την περιστροφική κίνηση του στροφείου ο αέρας εξαναγκάζεται να εισχωρήσει στο στροφείο και να περιστραφεί μαζί με αυτό. Έτσι, αναπτύσσονται δυο ταχύτητες, η μία στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα  $c_1$  και η άλλη στην κατάθλιψη του ανεμιστήρα  $c_2$ . Οι δυο αυτές ταχύτητες λαμβάνουν θέση στην ακμή προσβολής και ακμή φυγής αντίστοιχα. Η κάθε μια από αυτές εκφράζει την ολική ταχύτητα που αποκτά ο αέρας από την φυγόκεντρη δύναμη που αναπτύσσεται καθώς και από εκτροπή των πτερυγίων σε αυτόν. Οι ταχύτητες αυτές είναι το άθροισμα δύο ταχυτήτων, των  $u$  και  $w$ . Η συνιστώσα  $u$  εκφράζει την ταχύτητα του πτερυγίου στην αντίστοιχη θέση (ακμή προσβολής  $u_1$  και ακμή φυγής  $u_2$ ) και είναι η λεγόμενη περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας από τον γνωστό τύπο:  $u = \omega \cdot r$ , όπου  $r$  η ακτίνα της αντίστοιχης διαμέτρου του στροφείου. Η συνιστώσα  $w$  είναι το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητα του αέρα στο σημείο αυτό (ακμή προσβολής ή ακμή φυγής) και είναι προσεγγιστικά εφαπτόμενη στην βασική γραμμή του πτερυγίου. Οι  $u_1$  και  $u_2$  υπολογίστηκαν προηγουμένως.

Ο αέρας την στιγμή που θα εισέλθει στην πτερωτή θα έχει ταχύτητα  $c_1$ . Επειδή θεωρούμε κάθετη ταχύτητα του αέρα, δηλαδή  $c_1 \equiv c_{m1}$  όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, τότε η ολική ταχύτητα του αέρα θα είναι περίπου ίση με την μεσημβρινή ταχύτητα του. Η απόλυτη μεσημβρινή (μέση) ταχύτητα  $c_{m1}$  του αέρα δίνεται από την σχέση:

$$c_{m1} = m \cdot c_a = 0,525 \cdot 21,7 \text{ m/s} = 11,4 \frac{m}{s} \quad (6.19)$$

Όπου ο συντελεστής  $m$  (κατά Bommes) για στρογγυλεμένους πλευρικούς δίσκους πτερωτής στην αναρρόφηση με λόγο καμπυλότητας  $r_D/D_1 \sim 0,14$  ( $r_D$  είναι η ακτίνα του «κώνου εισροής» έξω από την πτερωτή) δίνεται από την σχέση :

$$m = 0,5 \frac{100^{\frac{1}{6}}}{n_q} = 0,5 \frac{100^{\frac{1}{6}}}{75} = 0,525 \quad (6.20)$$

Επομένως η ολική ταχύτητα του αέρα ισούται με:

$$c_1 \equiv c_{m1} = 11,4 \frac{m}{s} \quad (6.21)$$

Για την γωνία εισόδου  $\beta_1$  που σχηματίζει η ταχύτητα του αέρα με την περιφερειακή ταχύτητα του πτερυγίου στην αναρρόφηση έχουμε :

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{c_{m1}}{u_1} \cdot \frac{1}{\xi_1} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{11,4}{30,8} \cdot \frac{1}{0,98} \right) = 20,7^\circ \quad (6.22)$$

Ο συντελεστής  $\xi_1$  στην πλευρά αναρρόφησης τίθεται προσωρινά 0,98, λόγω της μικρής απόκλισης της καθετότητας της  $c_{m1}$  και θα ελεγχθεί παρακάτω. Ουσιαστικά η γωνία αυτή είναι η γωνία που σχηματίζει η ταχύτητα  $u_1$  με την  $w_1$ . Η  $w_1$  είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα ως προς το πτερύγιο και προφανώς είναι εφαπτομενική στην ακμή προσβολής. Με λίγα λόγια είναι η γωνία του πτερυγίου.

Η γωνία εξόδου πάλι από εμπειρικά αποτελέσματα θα είναι  $10^\circ$  μεγαλύτερη από την γωνία εισόδου, δηλαδή:

$$\beta_2 = 10^\circ + \beta_1 = 10^\circ + 20,7^\circ = 30,7^\circ \quad (6.23)$$

Η ταχύτητα στην κατάθλιψη  $C_{m2}$  είναι γνωστή ως περίπου τα τρία τέταρτα της αρχικής. Γι'αυτό λαμβάνεται:  $C_{m2} = 0,75 \cdot C_{m1} = 0,75 \cdot 11,4 \text{ m/s} = 8,6 \text{ m/s}$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων το οποίο φαίνεται στην εικόνα 4.7 είναι :

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{C_{m2}}{u_2 - \frac{C_{m2}}{\tan \beta_2}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{8,6}{51,9 - \frac{8,6}{\tan(30,7^\circ)}} \right) \Rightarrow \quad (6.24)$$

$$\alpha_2 = 12,94^\circ \approx 13^\circ \quad (6.25)$$

Έτσι η ολική ταχύτητα εξόδου του αέρα είναι:

$$C_2 = \frac{C_{2m}}{\sin(\alpha_2)} = \frac{8,6}{\sin(13^\circ)} = 38,0 \frac{m}{s} \quad (6.26)$$

### → Αριθμός πτερυγίων

Ο αριθμός των πτερυγίων συνήθως καθορίζεται από τον ημιεμπειρικό τύπο του Pfeleiderer (βασισμένο σε δημοσίευση των Reddy και Kar, ASME, 1971), σύμφωνα

με τον οποίο ο αριθμός των πτερυγίων ισούται με:

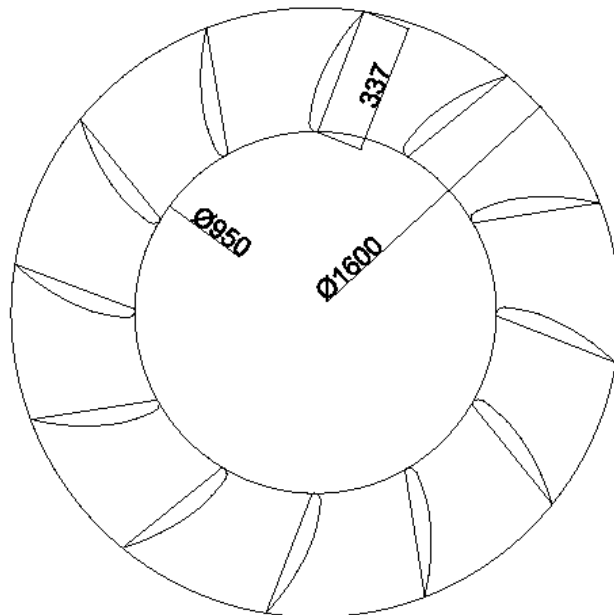
$$Z = \kappa_Z \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \cdot \sin\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right) \quad (6.27)$$

Όπου  $D_1$  και  $D_2$  οι διάμετροι του στροφείου,  $\beta_1, \beta_2$  οι γωνίες εισροής από το πτερύγιο. Επίσης υπάρχει και μια εμπειρική παράμετρος  $\kappa_Z$  που λαμβάνει τιμές 5 - 8. Επιλέχθηκε η τιμή 7 για τον συγκεκριμένο τύπο ανεμιστήρα.

Έτσι από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$Z = \kappa_Z \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \cdot \sin\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right) = 7 \frac{1,6 + 0,95}{1,6 - 0,95} \cdot \sin\left(\frac{20,7^\circ + 30,7^\circ}{2}\right) = 11,91, \quad (6.28)$$

λαμβάνεται  $Z = 12$  πτερύγια.



Σχέδιο 1: Ο σχεδιασμός της πτερωτής με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς. Εξωτερική διάμετρος: 1600mm , Εσωτερική διάμετρος: 900mm, Μήκος πτερυγίου: 337mm (προέκυψε από το σχέδιο).

### →Γεωμετρία πτερυγίων

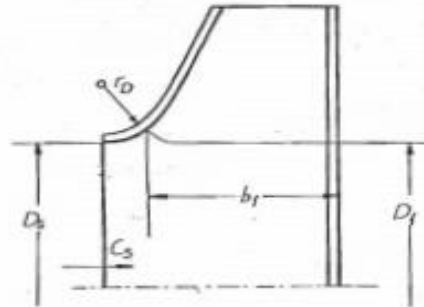
Ο αριθμός των πτερυγίων υπολογίστηκε ίσος με 12. Οι γωνίες τοποθέτησής τους είναι οι  $\beta_1$  και  $\beta_2$ . Το πλάτος των πτερυγίων  $b_1$  στην διατομή αναρρόφησης θα είναι (Εικόνα 6.4), σύμφωνα με τον ορισμό της παροχής:

$$b_1 = \frac{Q_{ολ}}{\pi \cdot D_1 \cdot C_{om}} = \frac{15,28 \frac{m^3}{s}}{3,14 \cdot 0,95 \text{ m} \cdot 11,4 \text{ m/s}} = 0,45 \text{ m} \quad (6.29)$$

Ενώ το πλάτος στροφείου  $b_2$  στην κατάθλιψη :

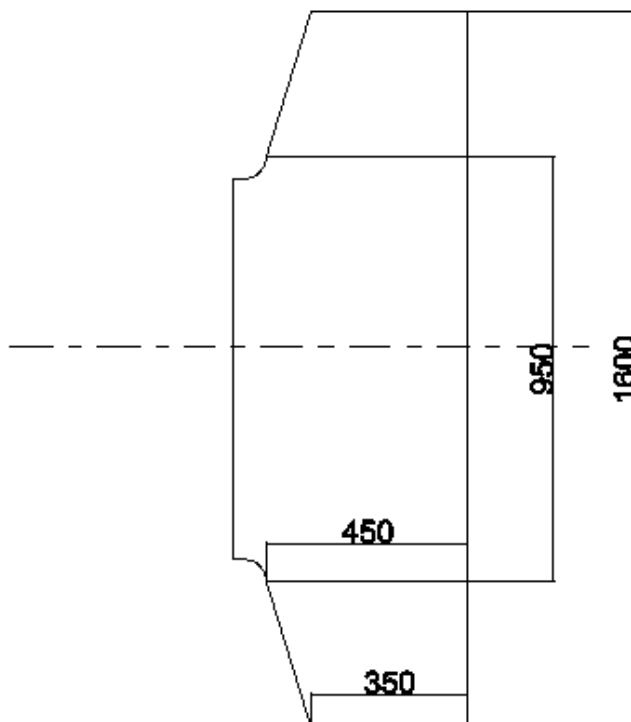
$$b_2 = \frac{Q_{o\lambda}}{\pi \cdot D_2 \cdot C_2 m \cdot \xi_2} = \frac{15,28 \frac{m^3}{s}}{3,14 \cdot 1,60m \cdot 8,8 \frac{m}{s} \cdot 0,99} = \mathbf{0,35m} \quad (6.30)$$

Όπου ο συντελεστής  $\xi_2$  λήφθηκε  $\xi_2 = 0,99$



Εικόνα 6.4: Υπόδειγμα πτερωτής.

Σημειώνεται πως το πλάτος των πτερυγίων δεν είναι το ίδιο στην αναρρόφηση και στην κατάθλιψη. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξίσωσης συνέχειας, καθώς θεωρούμε τον αέρα ασυμπύεστο και επομένως μέσα στο στροφείο θα έχει την ίδια παροχή (παρόλο που η ταχύτητα του αλλάζει).



Σχέδιο 2: Πλάγια όψη ανεμιστήρα. Εισχώρηση αέρα από αριστερά προς τα δεξιά. Πλάτος πτερυγίου μικρό και μεγάλο: 350 mm και 450mm αντίστοιχα.

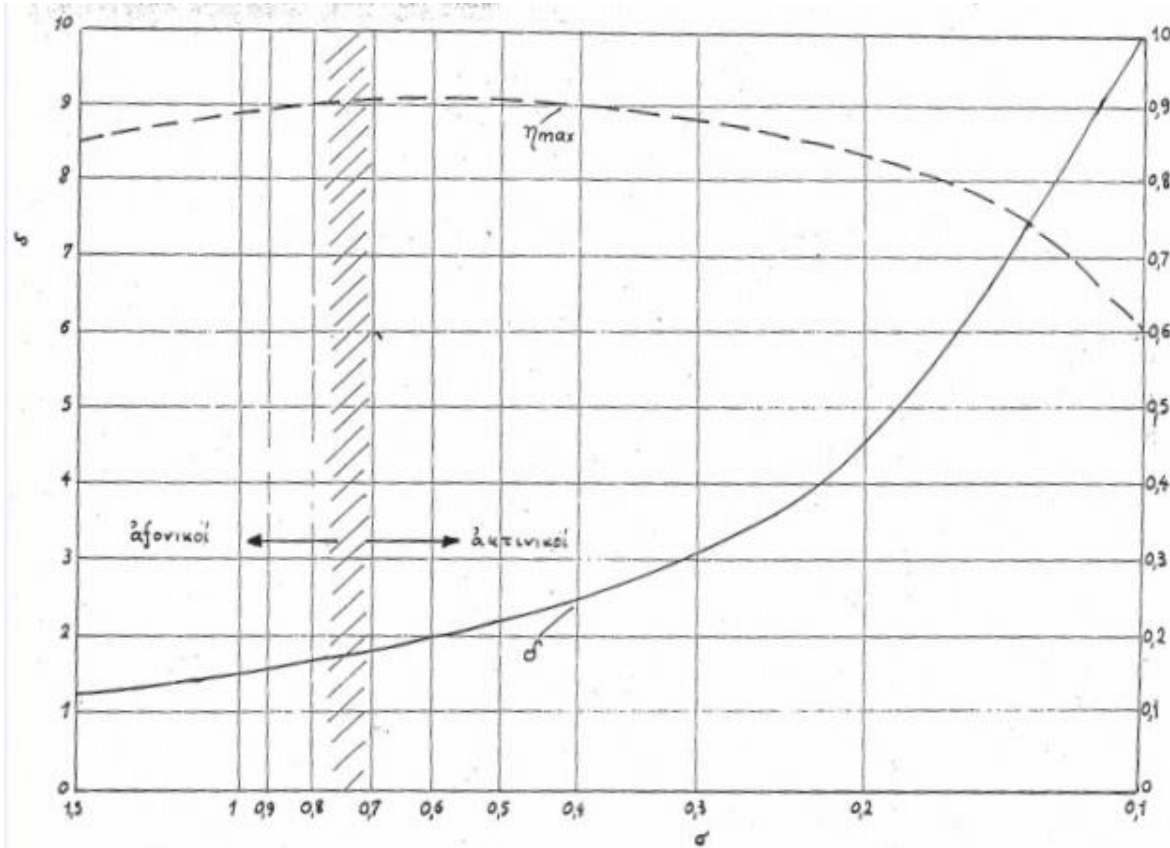
Το πάχος της λαμαρίνας του πτερυγίου δεν είναι σταθερό σε όλο το μήκος του, παρόλα αυτά σύμφωνα με την γεωμετρία του airfoil είναι υπολογίσιμο, εφόσον



είναι γνωστό το μήκος της χορδής του  $c = 337 \text{ mm}$ . Το μέγιστο πάχος φτάνει τα  $45 \text{ mm}$ .

→ Βαθμός απόδοσης

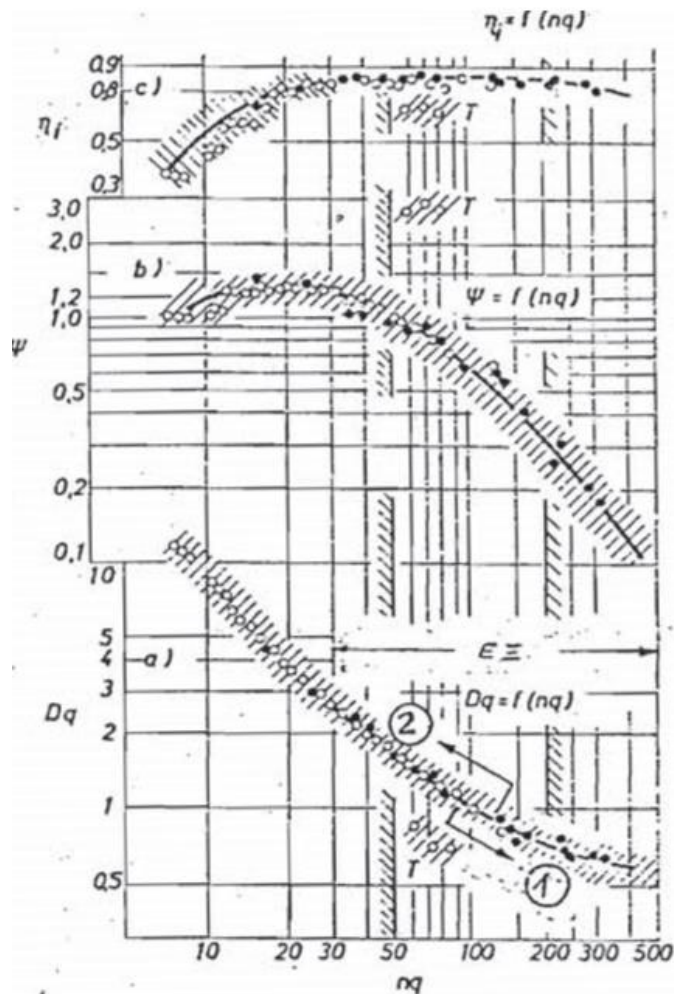
Οι βαθμοί απόδοσης υπολογίζονται προσεγγιστικά από τα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα αριθμού ταχυστροφίας  $\sigma$  και διαμέτρου  $\sigma=f(\delta)$  και αντίστοιχος μέγιστος βαθμός απόδοσης  $\eta_{max}$ . (Το διάγραμμα λήφθηκε από το βιβλίο Παπανίκας Δ., ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ που αναφέρεται στην βιβλιογραφία).

Μέγιστος βαθμός απόδοσης  $\eta_{max}$ , από την εικόνα 6.6, για  $\sigma = 0.48$ , προκύπτει:

$$\eta_{max} \sim 0,9 \tag{6.31}$$



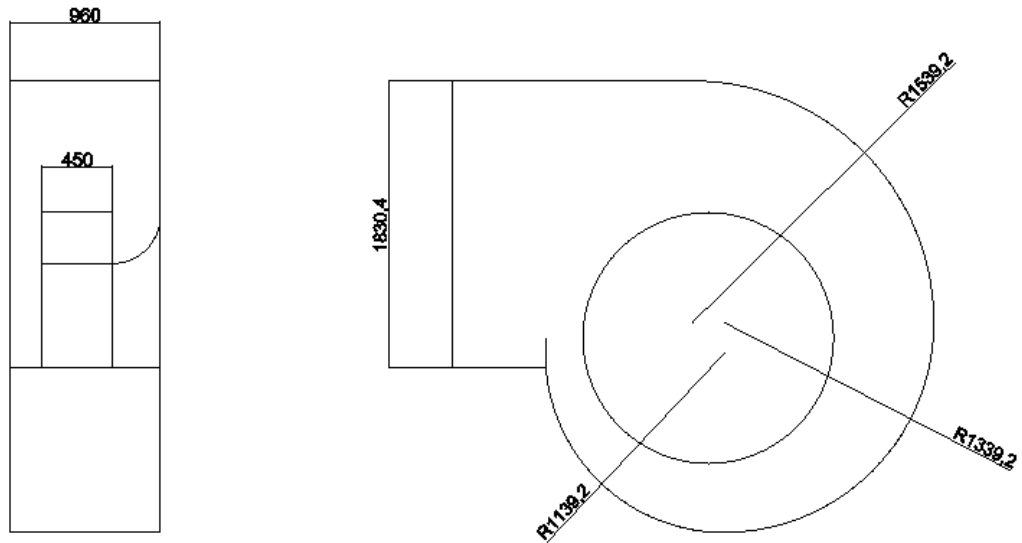
Εικόνα 6.6: Διάγραμμα περιοχών λειτουργίας ανεμιστήρων (μετρήσεις εταιρειών Kessler+Luch και Spelleken). ΕΞ: κατ'εξοχή ανεμιστήρες εξαερισμού, Τ: Ανεμιστήρες εγκάρσιας ροής, (1): περιοχή αξονικών ανεμιστήρων, (2): περιοχή ακτινικών ανεμιστήρων. (Το διάγραμμα λήφθηκε από το βιβλίο Παπανίκας Δ., ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ που αναφέρεται στην βιβλιογραφία).

Βέλτιστος εσωτερικός βαθμός απόδοσης  $\eta_i$  , από την εικόνα 6.6, για  $n_q = 75$  προκύπτει:  $\eta_i = 0,85$  (6.32)

→ Ισχύς ανεμιστήρα:

Απαιτούμενη ισχύς ανεμιστήρα:

$$P_w = \frac{Q \cdot \Delta P_t}{\eta_i} = \frac{Q \cdot \Delta P_t}{367 \cdot \eta_i \cdot 10^3} = \frac{50.000 \frac{m^3}{h} \cdot 120 \text{ mmH}_2\text{O}}{367 \cdot 0,85 \cdot 10^3} = 19.2 \text{ KW} \sim 20 \text{ KW} \quad (6.33)$$



Σχέδιο 3: Τελικό σπειροειδές κέλυφος. Η μεγάλη ακτίνα είναι το 96,2% της εξωτερικής διαμέτρου  $D_2$  της πτερωτής. Η μεσαία ακτίνα είναι το 83,7% της εξωτερικής διαμέτρου  $D_2$  της πτερωτής. Η μικρή ακτίνα είναι το 71,2% της εξωτερικής διαμέτρου  $D_2$  της πτερωτής. Το πάχος του σπειροειδούς κελύφους είναι το 214% του πλάτους του πτερυγίου.

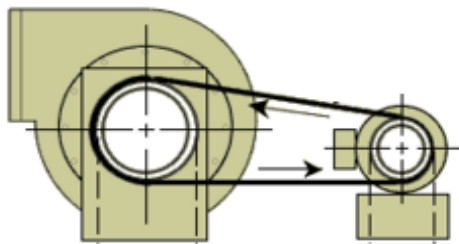
## 6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Υπολογισμός μετάδοσης κίνησης ανεμιστήρα:

Θεωρούμε για τις στροφές του κινητήρα μια τυπική τιμή  $n_1 = 1500 \text{ RPM}$ .

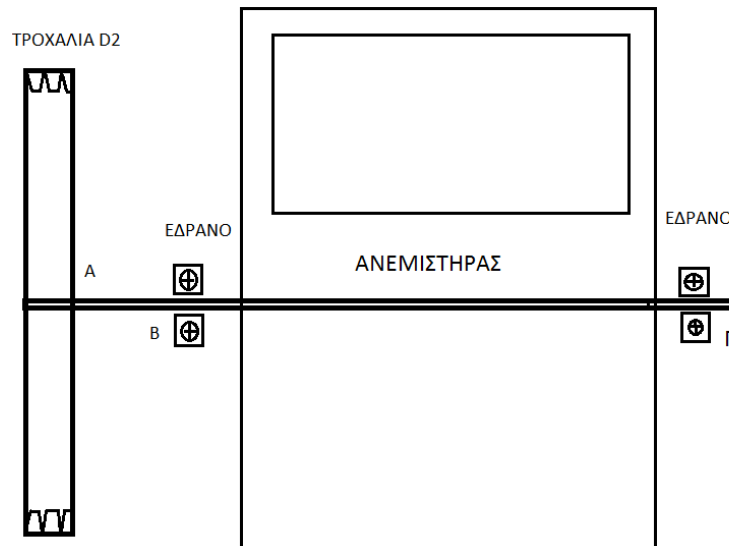
Οι απαιτούμενες υπολογισμένες στροφές του ανεμιστήρα είναι  $n_2 = 620 \text{ RPM}$ .

Άρα, θα πρέπει ο κινητήρας να έχει σύστημα μείωσης των στροφών του έτσι ώστε να επιφέρει τις απαιτούμενες στροφές στον ανεμιστήρα. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας και κατασκευάζοντας ένα σύστημα τροχαλιών που συνδέονται με έναν ιμάντα, στερεωμένα σε δυο ατράκτους.



Εικόνα 6.7: Φυγοκεντρικός Ανεμιστήρας στον οποίο μεταδίδεται κίνηση με τροχαλίες (μεγάλη, αριστερά, μικρή δεξιά) συνδεδεμένες με ιμάντα.

Οι ροπές που ασκούνται στην άτρακτο είναι η ροπή στρέψης  $M_t$  και η ροπή κάμψης  $M_b$  οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν για την ασφαλή λειτουργία της μηχανής και την αποφυγή σύντομης κόπωσης ή θραύσης των υλικών. Εκτός των παραπάνω καταπονήσεων, η άτρακτος καταπονείται σε δυνάμεις που οφείλονται στην στήριξή της. Αυτές είναι τρεις και φαίνονται αναλυτικά παρακάτω (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.8: Άτρακτος ΑΓ ο οποίος στηρίζει την τροχαλία D2 τα δύο έδρανα και τον ανεμιστήρα.

Οι δυνάμεις αυτές χρειάζεται να υπολογιστούν, αλλά πρώτα απαιτούνται προηγούμενοι υπολογισμοί του συστήματος, εξίσου απαραίτητοι.

Σημείωση:

Κάποιοι από τους παρακάτω τύπους δεν αναφέρονται στο κεφάλαιο 5 Μετάδοση Κίνησης, διότι η αναλυτική μελέτη αυτών ξεφεύγει από το θέμα της παρούσας εργασίας. Οι αναγνώστες μπορούν να βρουν αυτούς τους τύπους αναλυτικά στο Βιβλίο Στοιχεία Μηχανών Ι: Οδηγός επίλυσης ασκήσεων πράξης (Α. Γιαννόπουλος 2011) που αναφέρεται στην βιβλιογραφία.

■ Ισχύς κινητήρα.:

$$N_k = 1,1 \cdot \frac{Q \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{H}^{\text{mmH}_2\text{O}}}{367 \cdot \eta \cdot 10^3} = 1,1 \cdot \frac{50.000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 120 \text{ mmH}_2\text{O}}{367 \cdot 0,85 \cdot 10^3} = 22 \text{ kW} \text{ ή } N_k = \mathbf{30 \text{ Hp}} \quad (6.34)$$

Οπότε, επιλέγεται κινητήρας με ισχύ περίπου 30Hp (ίσως και παραπάνω ισχύ) έτσι ώστε να καλυφθούν οι απώλειες ενέργειας. Ο ηλεκτροκινητήρας θα πρέπει να επιταχύνει τον ανεμιστήρα σε αποδεκτό χρόνο διότι ένας μικρός χρόνος εκκίνησης μπορεί να επιφέρει υπερφόρτωση στον κινητήρα και σοβαρές ζημιές.

■ Ροπή στρέψης στον άξονα χωρίς απώλειες:

Η ροπή που μεταδίδεται στον άξονα του ανεμιστήρα αν υποθεθεί πως οι απώλειες του ιμάντα είναι μηδενικές τότε η ροπή στρέψης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$M_t = 71.620 \frac{N_{\kappa}}{n_1} = 71.620 \frac{30^{Hp}}{620^{RPM}} = 3466 \text{ Kp} \cdot \text{cm} \quad (6.35)$$

ή  $M_t = 340 \text{ N} \cdot \text{m}$

Η μετατροπή των μονάδων γίνεται ως εξής :

$$1 \text{ kilopond} \cdot \text{cm} = 0,0981 \text{ N} \cdot \text{m}$$

■ Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάμετρος των δυο τροχαλιών που συνδέονται με ιμάντα.

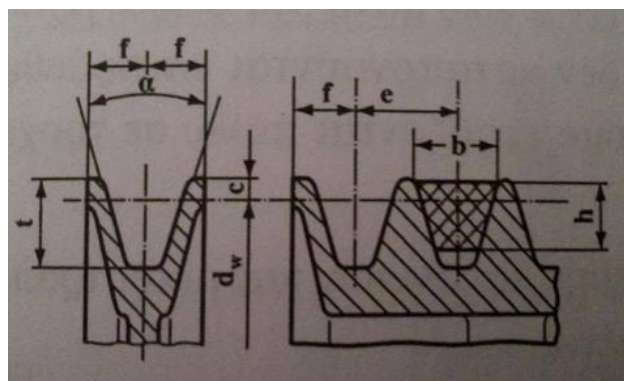
Οι διάμετροι των δυο τροχαλιών και οι στροφές της κάθε μίας από αυτές συνδέονται μεταξύ τους με την γνωστή σχέση μετάδοσης  $i$  :

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2} = i \quad (6.36)$$

Όπου  $D_2$  και  $D_1$  οι διάμετροι της μεγάλης και της μικρής τροχαλίας αντίστοιχα, και  $n_2$ ,  $n_1$  οι στροφές της μεγάλης και μικρής διαμέτρου αντίστοιχα.

Στην συγκεκριμένη εργασία δεν δίνεται κάποια σχέση αναλογίας μεταξύ των δυο τροχαλιών, για αυτό η αφετηρία του υπολογισμού τους θα είναι η μελέτη και η επιλογή ιμάντα ο οποίος επιλέγεται για ένα πεπερασμένο εύρος εσωτερικών διαμέτρων κάθε φορά.

Ο ιμάντας θα είναι τραπεζοειδής και συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο τύπος μικρο-τραπεζοειδούς ιμάντα SPB με χαρακτηριστικά τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:



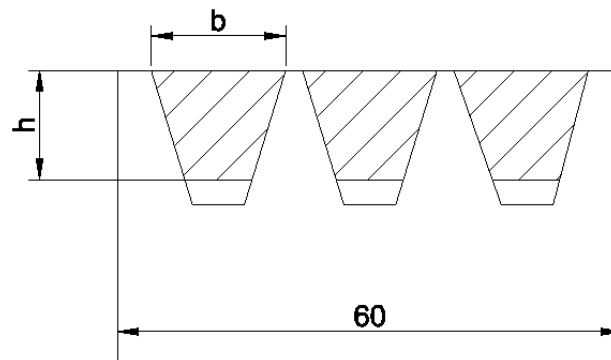
Εικόνα του Πίνακα 6.1

DIN 7753 Τύπος ιμάντα κατά ISO	SPZ	SPA	SPB	19	SPC
b	9,7	12,7	16,3	18,6	22
h	8	10	13	15	18
c	2	2,8	3,5	4	4,8
f	8	10	12,5	14,5	17
e	12	15	19	22	25,5
$t_{min}$	11	14	18	20	24
$d_{w(min)}$	63	90	140	180	224
Γωνία αύλακος $\alpha^{\circ}$ 34 <sup>ο</sup> για $d_w$ 38 <sup>ο</sup>	63...80 > 80	90...118 > 118	140...190 > 190	180...250 > 250	244...315 > 315
Μήκη ενέργειας των μικροτραπεζοειδών ιμάντων. από	630	800	1250	1600	2240
Βήμα συνήθως κατά τη σειρά R40 (λόγος 1,06) έως	3550	4500	8000	10000	12500

Πίνακας 6.1 : Μικροτραπεζοειδείς ιμάντες (DIN 7753) και τροχαλίες (DIN 2211). Διαστάσεις σε mm. (Ο πίνακας λήφθηκε από τα βιβλία Στοιχεία μηχανών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία)

Το πλάτος του ιμάντα είναι  $b=16,3$  αλλά για καλύτερη ακρίβεια και απλοποίηση στους υπολογισμούς λαμβάνεται η τιμή  $b=16$  η οποία δεν επιφέρει τεράστια αλλαγή στο σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Ο αριθμός των ιμάντων θα είναι τρεις ιμάντες στη σειρά, οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στο σχήμα:



Σχέδιο 4: Τραπεζοειδής ιμάντας τροχαλίας πάχους 60mm.

Ο πίνακας δίνει για τον τύπο SPB του ιμάντα ελάχιστη διάμετρο ενέργειας του ιμάντα  $d_w = 140\text{mm}$ . Διάμετρος ενέργειας του ιμάντα καλείται η διάμετρος εκείνη στην οποία 'ενεργεί' ο ιμάντας δηλαδή περιβάλλει 'αγκαλιάζει' την τροχαλία. Η θεωρία λέει πως η διάμετρος της μικρής τροχαλίας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση ή μεγαλύτερη από την ελάχιστη διάμετρο ενέργειας του ιμάντα. Επομένως, μπορεί να επιλεγθεί διάμετρος μικρής τροχαλίας ίση με  $D_w = D_1$ .

Επομένως,  $D_1 = 140\text{mm}$ .

Η εύρεση της μικρής διαμέτρου της τροχαλίας, μας δίνει τώρα την δυνατότητα να υπολογίσουμε την διάμετρο της μεγάλης τροχαλίας με βάση την σχέση μετάδοσης  $i$  ως εξής:

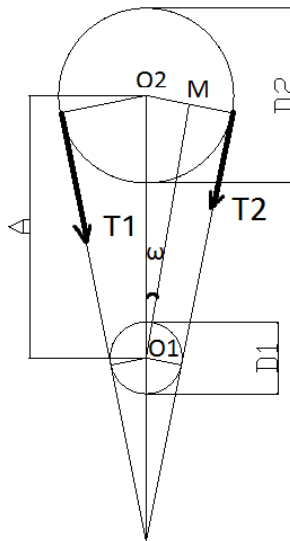
$$i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \frac{D_2}{D_1} = \frac{1500 \text{ RPM}}{620 \text{ RPM}} \Rightarrow \frac{D_2}{D_1} = 2,42$$

$$D_1 = 140\text{mm} \quad \text{άρα} \quad D_2 = 140 \text{ mm} \cdot 2,42 = 338,8 \sim 340\text{mm} \quad (6.37)$$

Η απόσταση μεταξύ των δύο τροχαλιών κυμαίνεται συνήθως στην τιμή  $(1...2) \cdot D_2$ . Επιλέγεται η τιμή 1,5 για περισσότερη σιγουριά.

Άρα η απόσταση μεταξύ των τροχαλιών θα είναι :

$$A = 1,5 \cdot 340 = 510\text{mm} \quad (6.38)$$



Σχέδιο 5: Τροχαλίες  $D_1$  (μικρή) και  $D_2$  (μεγάλη) με τις τάσεις του ιμάντα  $T_1$  και  $T_2$ .

Γνωρίζοντας τις διαμέτρους των τροχαλιών και την απόσταση μεταξύ τους μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις που προκαλεί ο ιμάντας στις τροχαλίες.

Για να βρούμε την γωνία  $\omega$  φέρουμε την ευθεία  $MO_1$  παράλληλη στην  $T_2$  :

Οπότε, από το τρίγωνο  $MO_2O_1$  το  $\sin\omega$  θα είναι :

$$\sin \omega = \frac{O_2M}{O_2O_1} = \frac{r_2 - r_1}{A} = \frac{100\text{mm}}{510\text{mm}} = 0,1961$$

$$\omega = 11,31^\circ \quad (6.39)$$

Λόγω των δυνάμεων σε κάθε κλάδο του ιμάντα αναπτύσσονται ροπές με αντίθετη φορά. Η ροπή στην άτρακτο στην θέση Α ασκείται μέσω της τροχαλίας  $D_2$  άρα εισάγεται η σχέση για την ροπή στρέψης :

$$M_\tau = T_1 \cdot r_2 - T_2 \cdot r_2 = (T_1 - T_2) \frac{D_2}{2} \Rightarrow$$

$$\text{Άρα } (T_1 - T_2) \frac{34,0\text{cm}}{2} = 3466 \text{ kP} \cdot \text{cm} \Rightarrow$$

$$(T_1 - T_2) = 203,9 \text{ kP} \quad (6.40)$$

Στην συνέχεια με την βοήθεια του παρακάτω τύπου που ισχύει για τους τραπεζοειδείς ιμάντες υπολογίζεται το κλάσμα των τάσεων για κάθε κλάδο του ιμάντα:

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\frac{\mu \cdot \varphi}{\sin(\frac{\alpha}{2})}} \quad (6.41)$$

Για  $\mu = 0,3$

$$\begin{aligned} \varphi &= \pi - 2\omega = 3,14 - 2 \cdot 11,31 \cdot \frac{3,14}{180} = 2,7 \text{ rad} \\ \alpha &= 36^\circ \end{aligned} \quad (6.42)$$

Είναι:

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\frac{0,3 \cdot 2,7}{\sin(18)}} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = e^{0,81} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = e^{2,6} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = 13,46 \quad (6.43)$$

$$\text{Άρα } T_1 = T_2 \cdot 13,46 \quad (6.44)$$

Με απλή αντικατάσταση των σχέσεων (6.40) και (6.44) υπολογίζονται οι δύο τάσεις στους κλάδους του ιμάντα:

$$T_2 \cdot 13,46 - T_2 = 203,9 \text{ kP} \Rightarrow T_2 = \frac{203,9 \text{ kP}}{12,46} = \mathbf{16,4 \text{ kP}} \quad (6.45)$$

Επομένως η τάση  $T_1$  θα είναι

$$\text{Από την σχέση (1) } T_1 = 164 \cdot 13,46 = \mathbf{220,7 \text{ kP}} \quad (6.46)$$

Στην θέση Β της ατράκτου ασκείται η δύναμη P η οποία προκαλείται από την έλξη των κλάδων του ιμάντα. Η τιμή της συνολικής δύναμης P ευρίσκεται από τον



συνδυασμό των τάσεων του ιμάντα  $T_1$  και  $T_2$  οι οποίες σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία  $2\omega$ , άρα:

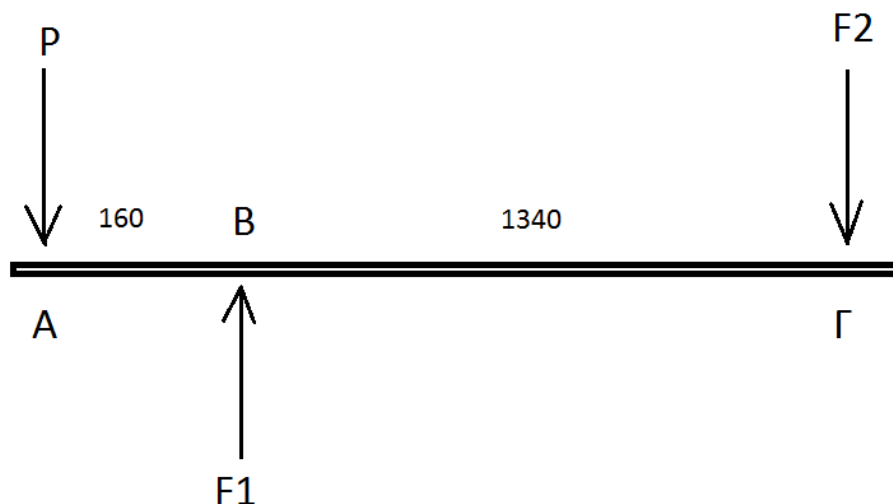
$$P = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + 2 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \cos 2\omega} \Rightarrow \quad (6.47)$$

$$P = \sqrt{(220,7 \text{ kP})^2 + (16,4 \text{ kP})^2 + 2 \cdot 220,7 \text{ kP} \cdot 16,4 \text{ kP} \cdot \cos(2 \cdot 11,31^\circ)} \Rightarrow$$

$$P = 235,9 \text{ kP}$$

Για τον άξονα:

Η άτρακτος ΑΓ δέχεται τις φορτίσεις της στο ίδιο επίπεδο με αυτές της ολικής δύναμης  $P$  από τον ιμάντα. Οι φορτίσεις αυτές είναι οι αντιδράσεις  $F_1$  και  $F_2$  (Εικόνα 6.4) :



Εικόνα 6.9: Άτρακτος ΑΓ. Οι αποστάσεις επιλέχθηκαν:  $l_1 = AB = 160 \text{ mm}$  και  $l_2 = BG = 1340 \text{ mm}$ . Στο τμήμα ΒΓ βρίσκεται ο ανεμιστήρας μαζί με το κέλυφος του.

Με ροπές ως προς το Β βρίσκουμε:

$$\Sigma M_B = 0 \Rightarrow P \cdot l_1 - F_2 \cdot l_2 = 0 \Rightarrow F_2 = \frac{235,9 \text{ kP} \cdot 16 \text{ cm}}{134 \text{ cm}} = \mathbf{28,2 \text{ Kp}} \quad (6.48)$$

Με ροπές ως προς Γ βρίσκουμε :

$$\Sigma M_\Gamma = 0 \Rightarrow P \cdot l - F_1 \cdot l_2 = 0 \Rightarrow F_1 = \frac{235,9 \text{ kP} \cdot 150 \text{ cm}}{134 \text{ cm}} = \mathbf{264,1 \text{ Kp}} \quad (6.49)$$

Η ροπή κάμψης στην θέση Β,  $M_b$  βρίσκεται από την εξής σχέση :

$$M_b = P \cdot l_1 = 235,9 \text{ kP} \cdot 16 \text{ cm} = 3.774,4 \text{ Kp} \cdot \text{cm} \quad (6.50)$$

Στο τμήμα ΑΓ της ατράκτου υπάρχει σύνθετη καταπόνηση, δηλαδή υπάρχει ένας συνδιασμός ροπής κάμψης και ροπής στρέψης με δυσμενέστερη την θέση Β. Η ισοδύναμη ροπή στην θέση Β είναι:

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 \cdot (a_o \cdot M_t)^2} \quad (6.51)$$

Όπου  $a_o$  :

$$\alpha_o = \frac{\sigma_{bw}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{sch}} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,75 \quad (6.52)$$

Όπου, για χάλυβα St60 είναι  $\sigma_{bw} = 300 \text{ N/mm}^2$  και  $\tau_{sch} = 230 \text{ N/mm}^2$ .

$$M_v = \sqrt{(3774,4 \text{ kP} \cdot \text{cm})^2 + 0,75 \cdot (0,75 \cdot 3466 \text{ Kp} \cdot \text{cm})^2} \Rightarrow$$

$$M_v = 4.395 \text{ Kp} \cdot \text{cm}$$

Η επιλογή του υλικού για τον άξονα θα είναι ο χάλυβας St60 για τον οποίο βρέθηκε αντοχή σε καταπόνηση :  $\sigma_{\beta\epsilon\pi\iota\tau\rho} = 63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 642 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}$  και  $\tau_{\epsilon\pi\iota\tau\rho} = 32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 326 \text{ kP} \cdot \text{cm}$ .

Οπότε τώρα βρίσκουμε την διάμετρο στην θέση Β :

Θα πρέπει:

$$d_3 \geq 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_v}{\sigma_{\beta\epsilon\pi\iota\tau\rho}}} \Rightarrow$$

$$d_2 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{4.395 \text{ Kp} \cdot \text{cm}}{642 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}^2}}} = 4,12 \text{ cm} \text{ ή } 45\text{mm} \quad (6.53)$$

Η διάμετρος της ατράκτου στη θέση Α, όπου έχουμε καταπόνηση μόνο σε στρέψη, είναι:

$$d'_1 \geq 1,72 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_t}{\tau_{\epsilon\pi}}} = 1,72 \cdot \sqrt[3]{\frac{3466 \text{ kP} \cdot \text{cm}}{326 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}}}} = 3,78 \text{ cm} \text{ ή περίπου } 40 \text{ mm} \quad (6.54)$$

Για διάμετρο ατράκτου  $d_1 = 40\text{cm}$  βρίσκουμε από πίνακα βιβλίου (Στεργίου) το βάθος του οδηγού σφήνα :  $h = 5 \text{ cm}$  , άρα η τελική διάμετρος  $d_1$  θα είναι αυξημένη κατά το βάθος του σφηνόδρομου :

$$d_1 = d_1' + h = 40 \text{ cm} + 5 \text{ mm} = 45 \text{ cm} \quad (6.55)$$

Όπου  $h$  το βάθος του σφηνόδρομου.

Στην συνέχεια διαμορφώνουμε τον άξονα με τις κατάλληλες διαβαθμίσεις, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σωστά τα διάφορα στοιχεία, όπως τροχαλία και έδρανα αυτού. Η τελική μορφή του άξονα φαίνεται στο Σχέδιο 6.

Η διάμετρος  $d_1$  τοποθετήθηκε ίση με αυτήν που υπολογίστηκε με την σχέση (6.55). Η διάμετρος  $d_2$  λήθηκε με διαβάθμιση κατά 2,5 mm μεγαλύτερη από την  $d_1$ , δηλαδή  $d_2 = d_1 + 2 \cdot 2,5 \text{ mm} = 45 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 50 \text{ mm}$ . Η διάμετρος αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα στην θέση B με την σχέση (6.53) ώστε να αντέχει την καταπόνηση στην θέση αυτή.

Η διάμετρος  $d_3$  λήθηκε  $d_3 = 55 \text{ mm}$ , ώστε να είναι μεγαλύτερη από την  $d_2$  και να ταιριάζει έδρανο κυλίσεως στην θέση B. Πρέπει επίσης η διάμετρος  $d_3$  να είναι μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα με την σχέση (6.53). Η διάμετρος  $d_4$  λήθηκε μεγαλύτερη από την  $d_3$ , δηλαδή  $d_4 = 60 \text{ mm}$  ώστε να τοποθετηθεί η πτερωτή, ενώ η διάμετρος  $d_5$  στην θέση Γ λήθηκε ίση με την διάμετρο  $d_3$  δηλαδή  $d_5 = 55 \text{ mm}$ , ώστε να τοποθετηθεί έδρανο κυλίσεως στην θέση αυτή ίσης διαμέτρου με το έδρανο στην θέση B.

#### Υπολογισμός εδράνου κυλίσεως:

Τα δυο ρουλεμάν που είναι τοποθετημένα στην άτρακτο ΑΓ είναι επιθυμητό να έχουν διάρκεια ζωής  $L_h = 10.000$  ώρες. Κατά αυτή την απαίτηση υπολογίζεται η αντοχή τους με βάση την παρακάτω διαδικασία.

Δυνάμεις που ασκούνται στο ρουλεμάν:

Η αντίδραση  $F_1$  στην άτρακτο λόγω της φόρτισης  $P$  υπολογίστηκε σε προηγούμενο βήμα ίση με :  $F_1 = 264,1 \text{ kP}$

Αντίστοιχα η δεύτερη αντίδραση  $F_2$  στην άτρακτο είναι :  $F_2 = 28,2 \text{ kP}$

Τα έδρανα κυλίσεως στις θέσεις B και Γ επιλέγεται να είναι ίδιου τύπου και διαστάσεων. Προφανώς είναι αναγκαίο να υπολογιστεί και να επιλεγθεί ο τύπος του εδράνου ο οποίος καταπονείται στο μεγαλύτερο φορτίο της ατράκτου. Το μεγαλύτερο φορτίο είναι η δύναμη στην θέση B η οποία είναι ίση με το ακτινικό φορτίο  $F_r$  της ατράκτου καθώς δεν υπάρχει κάποιο άλλο αξονικό φορτίο. Όμως, το έδρανο καταπονείται επιπλέον και από το ίδιο βάρος του άξονα και της πτερωτής. Εκτιμούμε ότι στην θέση B αναλογεί πρόσθετο βάρος ίσο περίπου με 140 kP, το οποίο πρέπει να προστεθεί στην δύναμη  $F_1$  που ασκείται στην θέση B. Άρα έχουμε:

$$\text{Ακτινικό φορτίο : } F_r = 264,1 \text{ Kp} + 140 \text{ kP} = 404,1 \text{ kP} \quad (6.56)$$

$$\text{Αξονικό φορτίο : } F_a = 0 \quad (6.57)$$

Ισοδύναμο δυναμικό φορτίο:

$$P_{\text{ισοδ}} = x \cdot F_r + y \cdot F_a = 1 \cdot 404,1 \text{ kP} = 404,1 \text{ kP} \cdot 9.81 = 3964 \text{ N} \quad (6.58)$$

Τίθεται  $x = 1$  όταν πρόκειται μόνο για ακτινικό φορτίο.

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής ταχύτητας  $f_n$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$f_n = x \sqrt{\frac{33+1/3}{n_{\text{άξονα}}}} = \sqrt[3]{\frac{33,333}{n_{\text{άξονα}}}} = \sqrt[3]{\frac{33,333 \text{ RPM}}{620 \text{ RPM}}} = 0,38 \quad (6.59)$$

Ακολούθως υπολογίζεται ο συντελεστής διάρκειας ζωής με βάση της εξής σχέση:

$$f_L = x \sqrt{\frac{L_h}{500}} = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}} = \sqrt[3]{\frac{10.000h}{500h}} = 2,7 \quad (6.60)$$

Στους παραπάνω τύπους τίθεται  $x = 3$  για σφαιρικά έδρανα κυλίσεως.

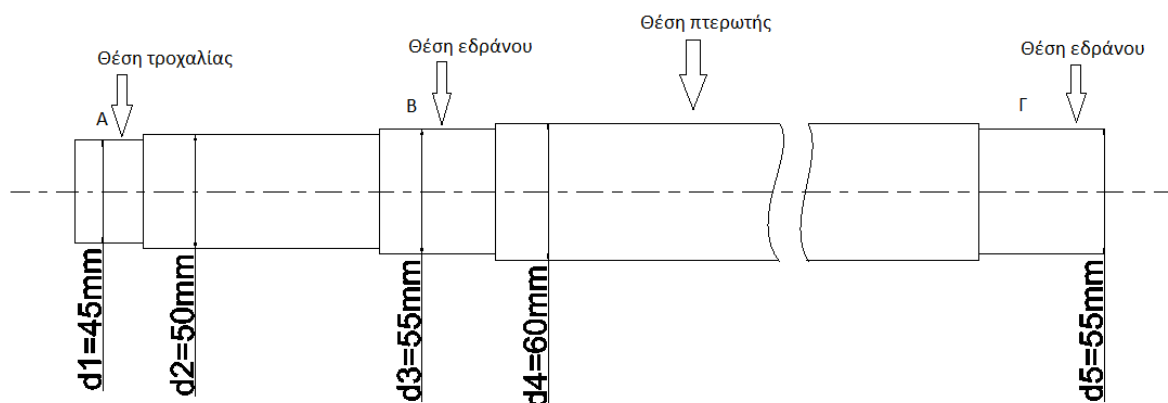
Το απαιτούμενο δυναμικό φορτίο  $C_{\text{απ}}$  του εδράνου είναι το μέγιστο φορτίο που πρέπει να ασκείται στην άτρακτο προκειμένου το έδρανο να έχει την επιθυμητή διάρκεια ζωής. Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$C_{\text{απ}} = \frac{P_{\text{ισοδ}} \cdot f_L}{f_n \cdot f_t} = \frac{4 \text{ KN} \cdot 2,7}{0,38 \cdot 1} = 28,4 \text{ KN} \quad (6.61)$$

Όπου  $f_t$  ο συντελεστής θερμοκρασίας και για συνθήκες θερμοκρασίας της λειτουργίας της μηχανής μικρότερες των  $150^\circ\text{C}$  λαμβάνεται η τιμή  $f_t = 1$ .

Από πίνακες βιβλιογραφίας βρέθηκε έδρανο σειράς 6211 με εσωτερική διάμετρο αυτού  $d = 55 \text{ mm}$  και  $C = 43 \text{ KN} > C_{\text{απ}} = 28,4 \text{ KN}$ .

Δεν επιλέξαμε το έδρανο μικρότερης σειράς 6011 διότι έχει  $C = 28,5 \text{ KN}$ , το οποίο είναι οριακά μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίσαμε με την σχέση (6.61). Όμως, στην θέση Γ μπορούμε να τοποθετήσουμε το έδρανο 6011 διότι εκεί οι καταπονήσεις είναι πολύ μικρότερες από την θέση Β.



Σχέδιο 6: Διαβαθμίσεις άξονα ΑΓ. Στις θέσεις Β και Γ τοποθετούνται τα έδρανα κύλισης.

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στους προηγούμενους υπολογισμούς έγινε πλήρης μελέτη και περιγραφή ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα παροχής 50.000 κυβικών μέτρων ανά ώρα σε στατική πίεση 100 χιλιοστά στήλης νερού. Η απόδοση του συγκεκριμένου ανεμιστήρα δείχνει θεωρητικά να είναι μεγάλη αφού αγγίζει το 90%. Η πτερύγωσή του είναι σε σχήμα αεροτομής η οποία δίνει μεγάλη κατασκευαστική αντοχή, μεγάλη απόδοση, χαμηλή στάθμη θορύβου και αξιόλογη ανάπτυξη της στατικής πίεσης. Ο ανεμιστήρας υπολογίστηκε για μια σχετικά μεγάλη παροχή όγκου και μικρής αλλά όχι αδύναμης στατικής πίεσης.

Η μετάδοση κίνησης γίνεται από σύστημα τροχαλιών συνδεδεμένων με μικρο - τραπεζοειδή ιμάντα μεγάλης αντοχής σε εφελκυσμό και κάμψη και μεγάλης ικανότητας μεταφοράς ισχύος, λόγω της ενίσχυσης στο εσωτερικό του με νήματα. Ο ηλεκτροκινητήρας επιλέχθηκε σύμφωνα με την υπολογισθείσα ισχύ για 30 Ηρ,ο οποίος θα είναι τριφασικός λόγω της μεγάλης αυτής ισχύος.

Το υλικό κατασκευής του ανεμιστήρα ανάλογα με την εφαρμογή του θα μπορούσε να ήταν χαλύβδινη γαλβανιζέ λαμαρίνα, σιδήρου St 37, ή (ανοξειδωτη)

ηλεκτροσυγγολητή με μικρό πάχος ελάσματος (3-5mm). Η στήριξη μπορεί να φέρει ενισχύσεις σιδήρου (ανάλογα από την αντοχή που χρειάζεται κάθε φορά) ενώ η πτερύγωση μπορεί να φέρει ενισχύσεις πολυαιθυλενίου, πολυαμίδιο ή χυτοπρεσσαριστό αλουμίνιο.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν τον υπολογισθέντα ανεμιστήρα πολύ αξιόλογο και κατάλληλα επιλεγμένο για: κλιματιστικές εφαρμογές και εξαερισμό κτιρίων, καθαρισμό του αέρα σε βιομηχανικούς και επαγγελματικούς χώρους (πχ κουζίνες εστιατορίων, εμπορικά κέντρα). Επίσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μεγάλες αποθήκες για εξαερισμό, σε χώρους πάρκινγκ και μεγάλες αίθουσες συνάθροισης ανθρώπων.

Το κόστος του μπορεί να κυμανθεί σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή κάθε φορά. Η υψηλή παροχή και το σχήμα πτερυγίου τον καθιστούν ακριβό ανεμιστήρα και για αυτό το λόγο ο ενδιαφερόμενος κατασκευαστής θα πρέπει να επιλέξει ανάλογα το υλικό κατασκευής του. Το σχήμα του πτερυγίου για περισσότερη οικονομία θα μπορούσε να ήταν πιο απλό, δηλαδή κοίλα πτερύγια ίσου πάχους.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Γιαννόπουλος Α., Στοιχεία Μηχανών Ι, ΕΚΔΟΤΙΚΟΣ ΟΜΙΛΟΣ ΙΩΝ, Πάτρα 2011
2. Γραικούση Ρ., Στοιχεία Μηχανών ΙΙ, Εκδόσεις ΓΙΑΧΟΥΔΗ
3. Κατσαπράκης Δ., Υδροδυναμικές Μηχανές, Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλιών. Εργαστήριο Αιολικής ενέργειας, ΤΕΙ Κρήτης
4. Λαϊνάς Γ.Π., Φοινίκης Α.Δ., Τεχνική Ατζέντα, 5<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις VIVIOTECHNICAHELLAS
5. Νανούσης Δ. Νανούσης, Ρευστομηχανική, Α' Τόμος, 2<sup>η</sup> Έκδοση, ΕΚΔΟΤΙΚΟΣ ΟΜΙΛΟΣ ΙΩΝ
6. Παπανίκας Δ., ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδότης Φ.ΠΑΠΑΝΙΚΑ & ΣΙΑ Ο.Ε., Αθήνα 2012

7. Στεργίου Ι., Στεργίου Κ., Στοιχεία Μηχανών Ι, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΗ ΕΠΕ, Αθήνα 2003
8. Στεργίου Ι., Στεργίου Κ., Στοιχεία Μηχανών ΙΙ, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΗ ΕΠΕ, Αθήνα 2002
9. Σημειώσεις από ΑΤΕΙ Πάτρας τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών e-Class.
10. Πτυχιακή Εργασία από: Βασιλάκης Νικόλαος, Τσιφούτη Αικατερίνη, "Centrifugal Fans" , ΤΕΙ Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Καβάλα 1994
11. Bleier, Frank, FAN HANDBOOK: selection, application and design
12. Terry Wright, FLUID MACHINERY, Performance, Analysis and Design, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C.
13. Διάφορα άρθρα της Wikipedia.org
14. <http://www.soldatos.gr/html/ventilation.html>