

## Υδραυλικές Μηχανές και Ενέργεια

Διάλεξη 4. - Ροή ρευστών εντός υδραυλικών στροβιλομηχανών

Σκουληκάρης Χαράλαμπος  
*Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχ. Η/Υ, MSc,  
PhD*

[hskoulik@civil.auth.gr](mailto:hskoulik@civil.auth.gr)

Ξάνθη, 4 Νοεμβρίου 2016

# Ανασκόπηση 3<sup>ου</sup> μαθήματος

## - ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΕ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ

*(Πιθανές επιπτώσεις ΚΑ σε ΥΗΣ, Σενάρια και μοντέλα κλιματικής αλλαγής, προβλέψεις κλιματικών μοντέλων για την περιοχή της Μεσογείου)*

## - ΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ HEC-RESSIM

*(περιγραφή του μοντέλου, modules του μοντέλου, manual, και παράδειγμα εφαρμογής)*

# Περιεχόμενα 4<sup>ου</sup> μαθήματος

A/A	Τρόπος διδασκαλίας	Μάθημα	Περιγραφή	Ώρες
3	Διάλεξη	Κλιματική αλλαγή και υδροηλεκτρική ενέργεια	Εισαγωγή στην κλιματική αλλαγή. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπτώσεις στην υδροηλεκτρική ενέργεια. Παράδειγμα προσομοίωσης υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής	3
4	Διάλεξη	<b>Ροή ρευστών εντός υδραυλικών στροβιλομηχανών</b>	<b>Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών, βασικές έννοιες υδραυλικών στροβιλομηχανών,</b>	3

# **ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

*Ροή ρευστών εντός υδραυλικών στροβιλομηχανών*

# Συγγράμματα/Εκπαιδευτικό υλικό

## ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΠΡΩΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Υπό  
Ιωάννου Βασιλείου Σούλη  
Αναπληρωτού Καθηγητού  
Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης



ΞΑΝΘΗ

εκδόσεις - ΑΙΒΑΖΗΣ - Θεσσαλονίκη

## ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΤΡΙΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΛΥΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Υπό  
Ιωάννου Βασιλείου Σούλη  
Αναπληρωτού Καθηγητού  
Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης



ΞΑΝΘΗ 2007

εκδόσεις: ΑΙΒΑΖΗΣ Θεσσαλονίκη

# Συγγράμματα/Εκπαιδευτικό υλικό

## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

## ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΠΡΩΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

### ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ

### Μονάδες

A	επιφάνεια	(m <sup>2</sup> )
α	συντελεστής διορθώσεως κινητικού ύψους	
α	γωνία ρευστού	(°)
α, β, γ	συντελεστές επί της γεωμετρίας των σκαφιδίων	
B	βάρος	(N)
β	γωνία πτερυγίων	(°)
β	διορθωτικός συντελεστής ορμής	
Γ	κυκλοφορία	(m <sup>2</sup> /s)
γ	ειδικόν βάρος	(N/m <sup>3</sup> )
γ	λόγος ειδικών θερμοχωρητικότητων	
E	εισοδή	(m <sup>3</sup> )
E	ενέργεια συστήματος	(J, kWh)
E <sub>n</sub>	ωφέλιμος ενέργεια	(J)
Z	ζήτησις όγκου	(m <sup>3</sup> )
H <sub>d</sub>	ύψος πτώσεως μελέτης	(m) ύδατος
H <sub>m</sub>	μέσον ύψος πτώσεως	(m) ύδατος
H <sub>n</sub>	καθαρόν ύψος πτώσεως	(m) ύδατος
H <sub>στ</sub>	στατικών ύψος πτώσεως	(m) ύδατος
H <sub>ο</sub>	ολικών ύψος πίεσεως	(m) ύδατος
H <sub>R</sub>	ύψος δρομέως	(m) ύδατος
θ	γωνία	(°)
I	ισχύς	(W)
I <sub>E</sub>	εγκατεστημένη ισχύς	(W)
I <sub>m</sub>	μέσον φορτίον	(W)

ακρ	ακροφύσιον
αντλ	αντλία
ατμ	ατμόσφαιρα
αφ	αγωγός φυγής
εισ	είσοδος
εξ	έξοδος
γεν	γεννήτρια
δρ	δρομέυς
μ	μονάδος
μετ	μετασχηματιστής
μο	μέσος όρος
ο	ολική τιμή
ο	έξοδος εκ των οδηγών πτερυγίων
ορ	ολική σχετική τιμή
στρ	στρόβιλος
στρ	στροφή

### Διεθνείς

d	discharge (κατάθλιψις)
in	internal (εσωτερική)
m	model (ομοίωμα)
max	maximum (μεγίστη τιμή)
p	prototype (πρωτοτύπων)
R	rotor (δρομέυς)
r	relative (σχετική τιμή)
s	suction (αναρρόφησης)
s	similiar (όμοιος)
u	unit (μονάδος)
wv	water-vapour (ύδατος-ατμών)

### Αριθμοί - σύμβολα

1	ανάντη (συνήθως)
1-2	εκ της θέσεως 1 προς θέσιν 2

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

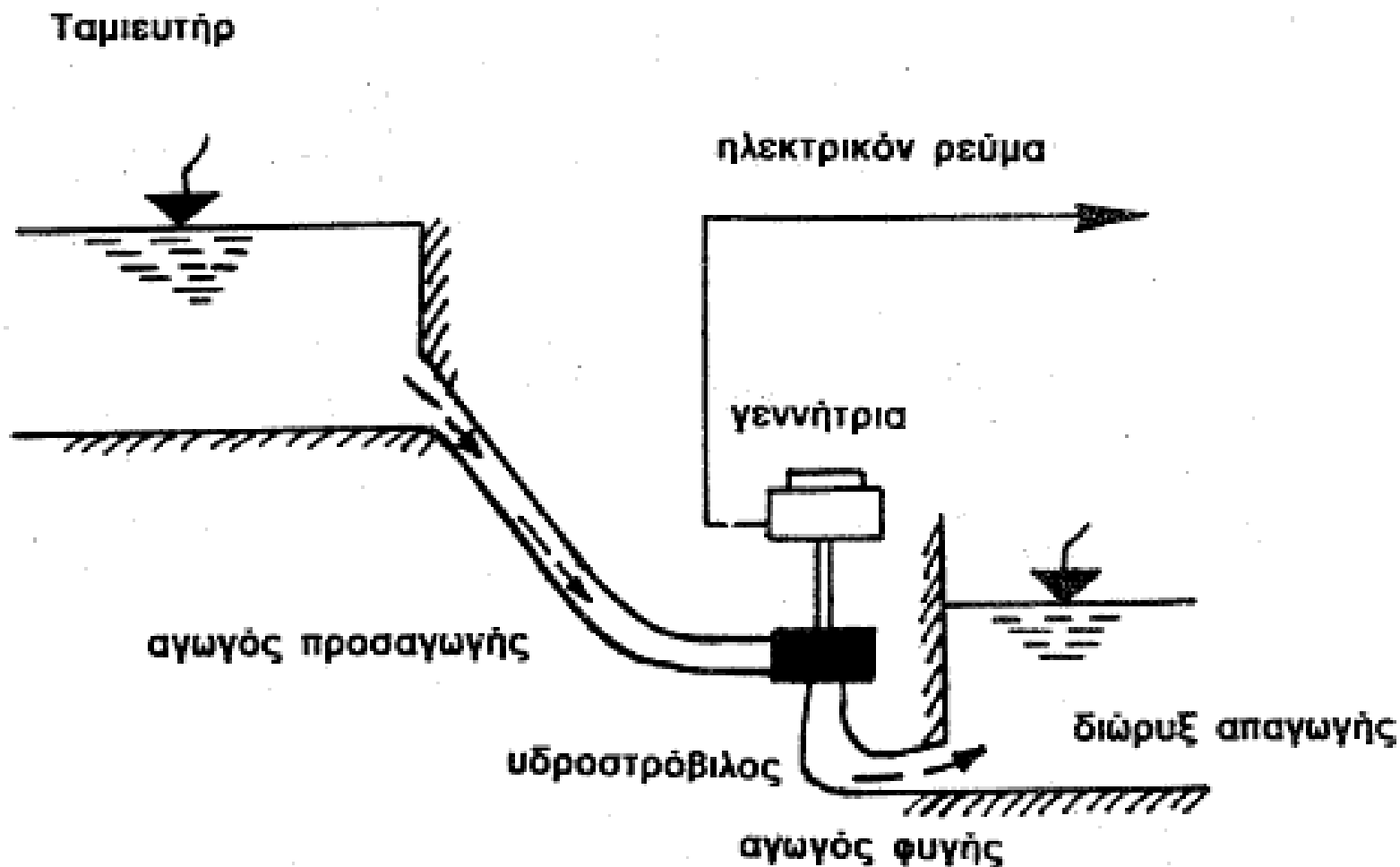
## 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών

Η πλέον ουσιώδης λειτουργία μιας υδραυλικής μηχανής είναι η πραγματοποίηση της εναλλαγής ενέργειας μεταξύ ενός μηχανικού συστήματος και ενός υδραυλικού συστήματος.

### Υδροστροβίλοι

- Όταν η ενέργεια λαμβάνεται από το ρέον ρευστό (νερό) προς το κινούμενο τμήμα της μηχανής και η ολική ενέργεια του ρευστού στην είσοδο είναι μεγαλύτερη της ενέργειας του ρευστού στην έξοδο τότε η υδραυλική αυτή μηχανή χαρακτηρίζεται ως **υδροστροβίλος**.
- Η βασικότερη λειτουργία ενός υδροστροβίλου είναι η παραγωγή ενέργειας δια της ροής ύδατος σε χαμηλότερο ύψος.

# 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών



Σχηματικό διάγραμμα υδροστρόβιλου-υδροηλεκτρικού έργου

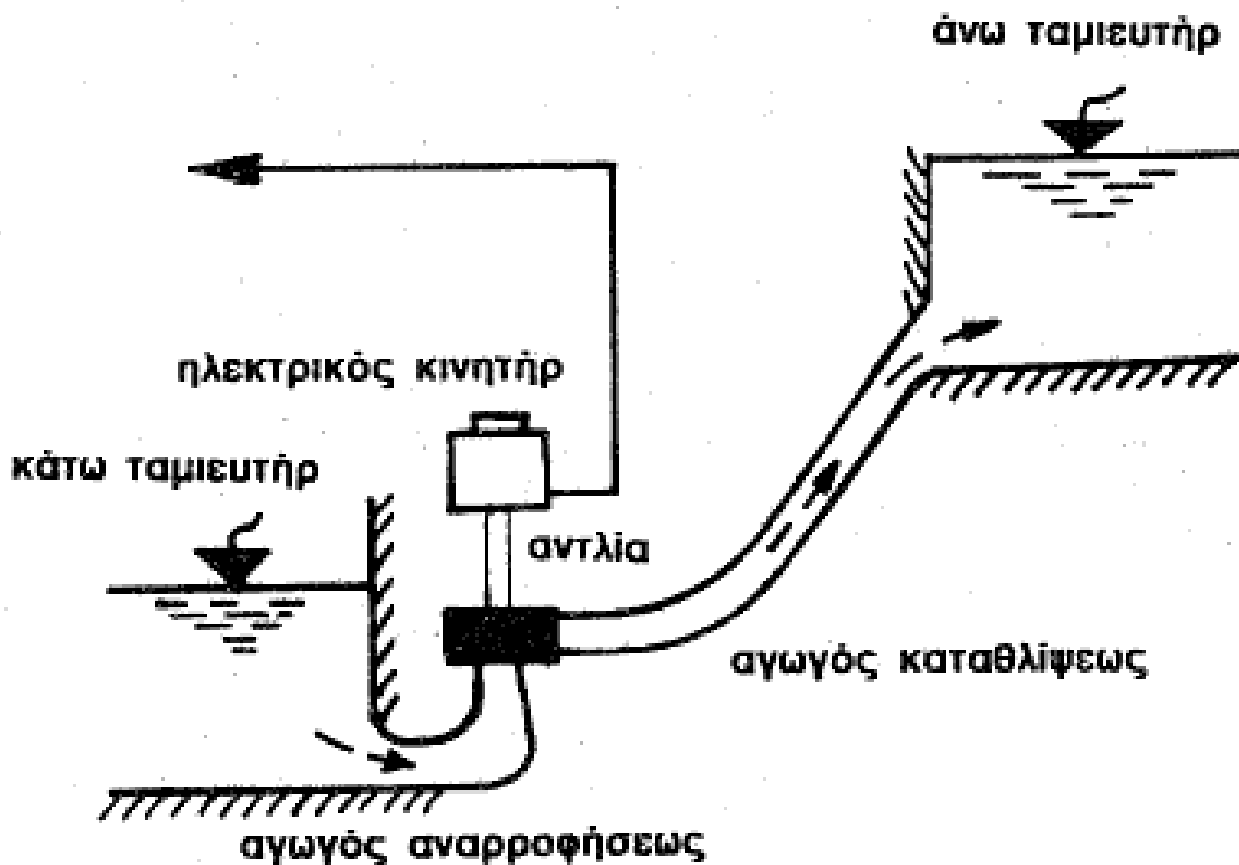


# 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών

## Αντλίες

- Όταν η ενέργεια μεταδίδεται από το κινούμενο τμήμα της μηχανής προς το ρέον ρευστό (νερό) και η ολική ενέργεια του στην είσοδο είναι μικρότερη της ολικής ενέργειας στην έξοδο τότε η υδραυλική αυτή μηχανή χαρακτηρίζεται ως **αντλία**.
- Η βασικότερη λειτουργία μιας αντλίας είναι αύξηση του ύψους ενός ρευστού μέσω καταναλώσεως ενέργειας.

# 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών



Σχηματικό διάγραμμα αντλιοστασίου

# 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών

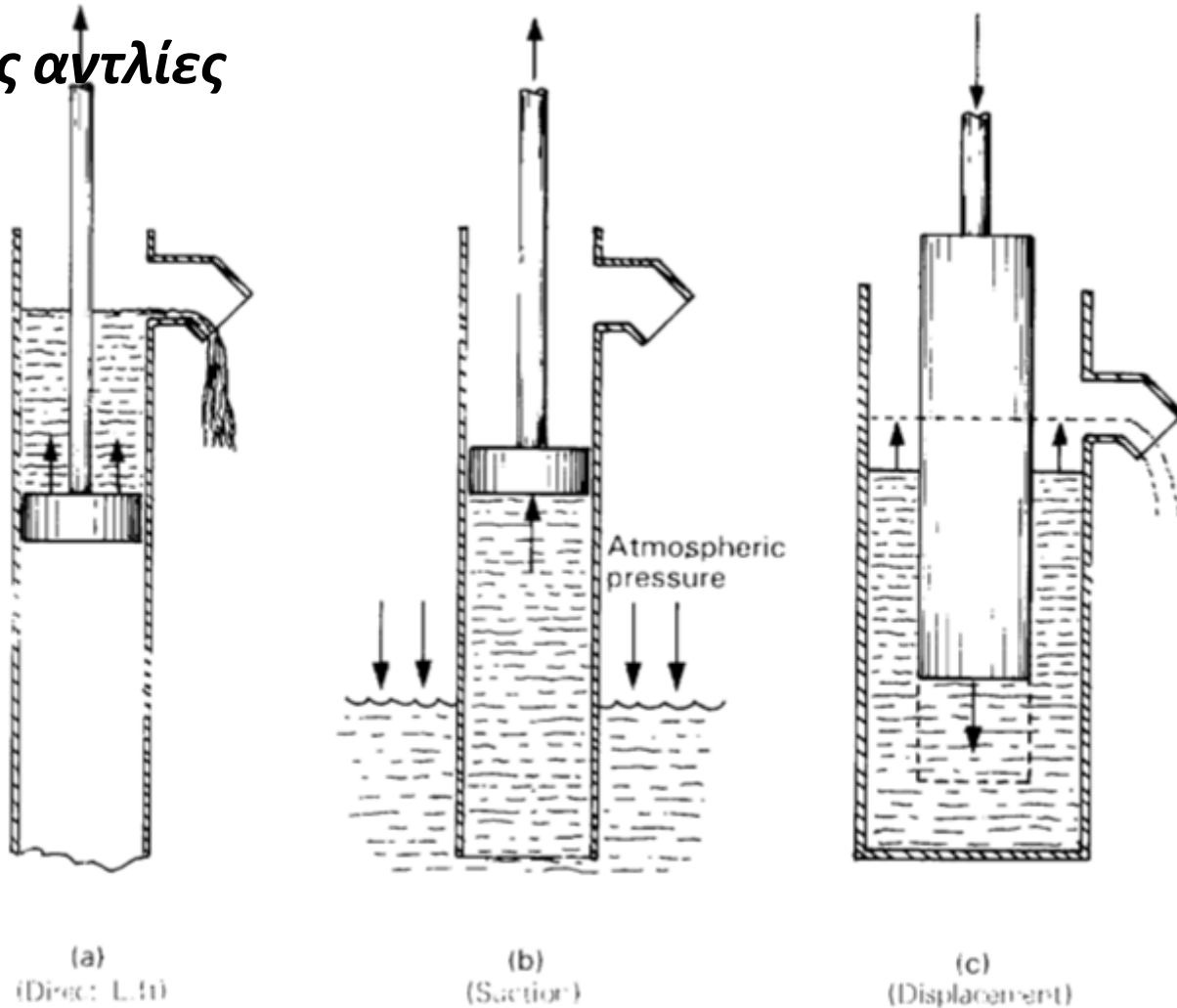
Αν και υπάρχει μεγάλη ποικιλία υδραυλικών μηχανών, οι μηχανές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες κύριες ομάδες:

- A. Την ομάδα μηχανών θετικής μετατόπισης (positive displacement machines)**
- B. Την ομάδα μηχανών περιστρεφόμενου τύπου (rotodynamic machines)**

Η ομάδα μηχανών θετικής μετατόπισης χαρακτηρίζεται από μεταβολή του χώρου ο οποίος καταλαμβάνεται από το ρέον ρευστό εντός της μηχανής. (π.χ. εμβολοφόρες αντλίες και μηχανές εσωτερικής καύσης όπου το έμβολο παλινδρομεί εντός κυλίνδρου)

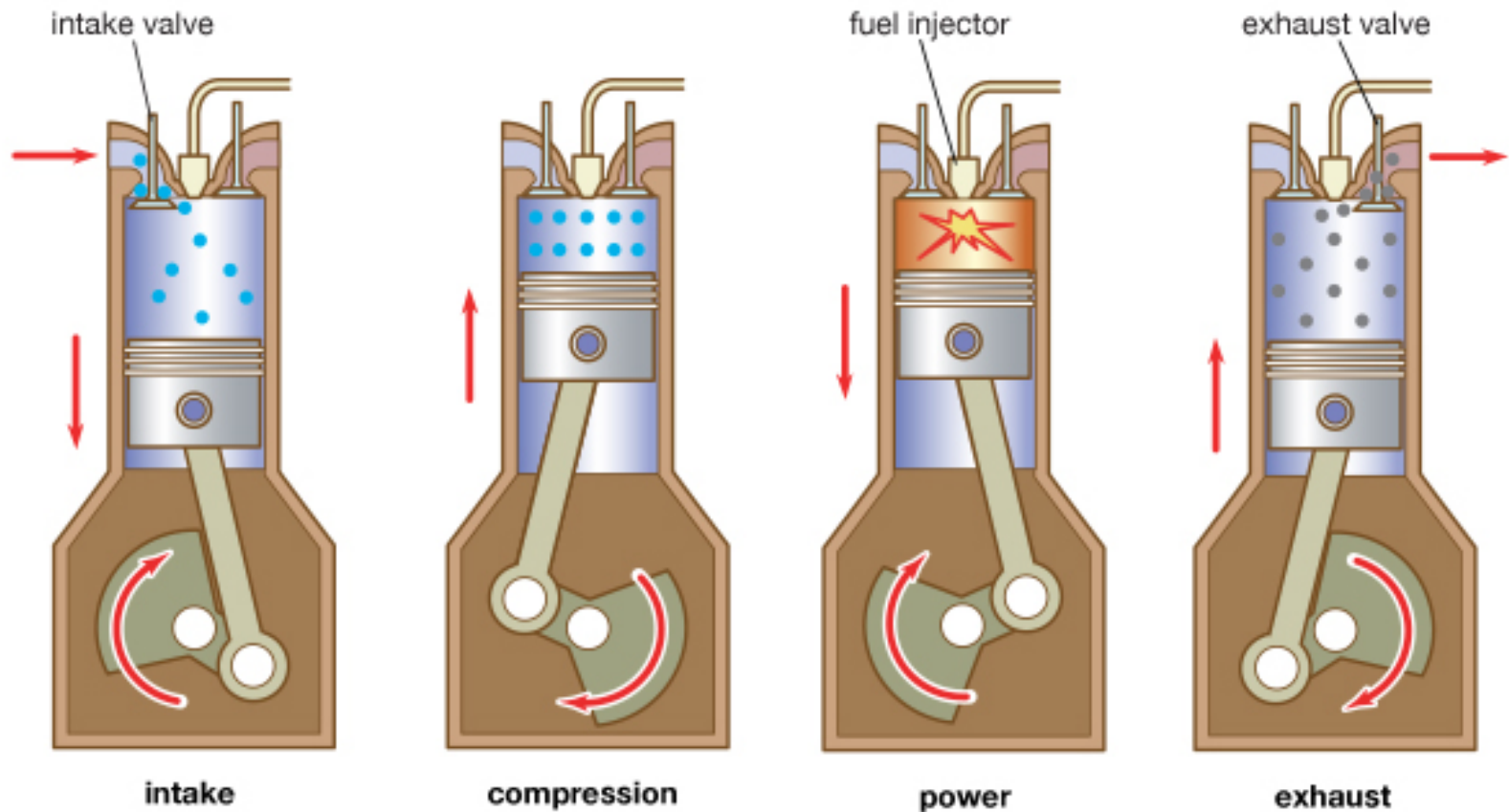
# 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών

## Εμβολοφόρες αντλίες



# 1.1 Καθορισμός και είδη υδραυλικών μηχανών

## Μηχανές εσωτερικής καύσης



# Ομάδα μηχανών περιστρεφόμενου τύπου

Οι μηχανές της ομάδας περιστρεφόμενου τύπου έχουν ένα δρομέα, δηλαδή ένα κινούμενο μηχανικό στοιχείο. Ο δρομέας είναι εφοδιασμένος με πτερύγια τοποθετημένα καθ' όλο το μήκος της περιφέρειας αυτού. Διαμέσου του χώρου μεταξύ των πτερυγίων διέρχεται το ρευστό. Το ρευστό, επειδή έχει μια συνιστώσα της ταχύτητας εφαπτόμενης επί του δρομέα, φέρει ορμή επί αυτού. Η μεταβολή της εφαπτομενικής ορμής επί του δρομέα, μεταξύ της εισόδου και εξόδου του ρευστού, αντιστοιχεί στην εφαπτομενική δύναμη επί του δρομέα.

**Στρόβιλος:** Η εφαπτομενική ορμή του ρευστού επί του δρομέα μειώνεται κατά τη διεύθυνση της κίνησης αυτού → Η ενέργεια μεταφέρεται από το ρευστό προς το δρομέα και κατά συνέπεια επί του άξονα περιστροφής (γνωστός και ως άτρακτος)

**Αντλία:** Η εφαπτομενική ορμή του ρευστού επί του δρομέα αυξάνεται κατά τη διεύθυνση της κίνησης αυτού → Η ενέργεια μεταφέρεται από τον άξονα περιστροφής προς το ρευστό.

# Υδραυλικές μηχανές περιστρεφόμενου τύπου

- Στο παρών μάθημα, θα γίνει ανάλυση και μελέτη σχετικά με υδραυλικές μηχανές περιστρεφόμενου τύπου, γνωστές και ως υδροδυναμικές μηχανές ή στροβιλομηχανές. Ειδικότερα θα γίνει ανάλυση σχετικά με υδροστρόβιλους και όχι για τις αντλίες.
- Κατά κύριο λόγο το χρησιμοποιούμενο ρευστό είναι το νερό ή ρευστά αντίστοιχης πυκνότητας με αυτή του νερού (π.χ ορυκτέλαιο, θαλασσινό νερό, υγρά αποχετεύσεως κλπ).
- Η ανάλυση επί της ροής συμπιεστών ρευστών (αερίων) είναι εκτός των αντικειμενικών σκοπών του μαθήματος.

# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

Ο τύπος της υδραυλικής μηχανής μπορεί να χαρακτηριστεί σύμφωνα με τη διεύθυνση της κύριας ροής δια του δρομέα.

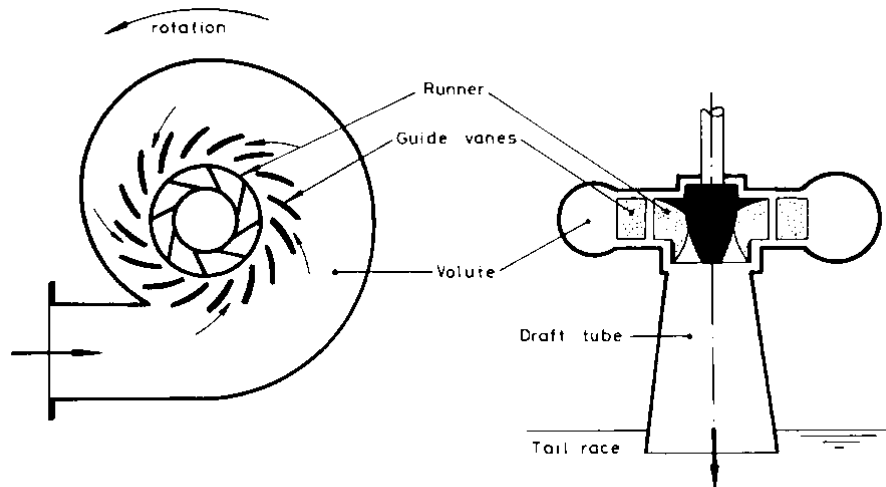


FIGURE B. 6 :  
Sectional Views of a Francis Turbine

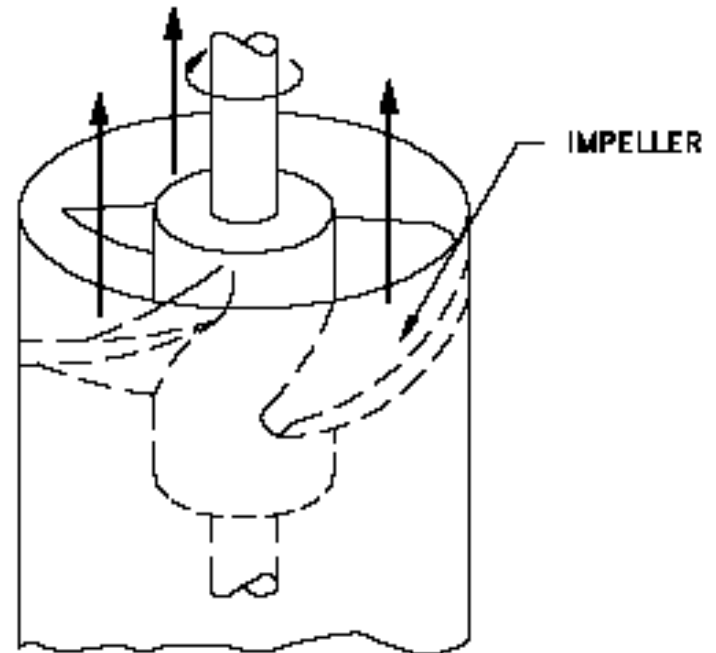
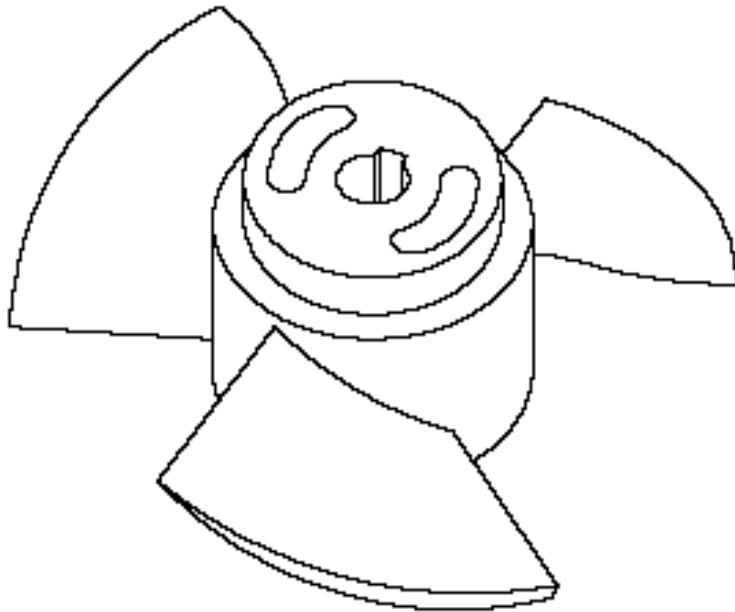
Στην ακτινικής ροής ή φυγόκεντρη υδραυλική μηχανή (*radial or centrifugal flow turbines*) η κύρια ροή λαμβάνει χώρα επί του επιπέδου περιστροφής το οποίο είναι κάθετο προς τον άξονα περιστροφής του δρομέα.

Το ρευστό εισέρχεται εντός του δρομέα κάθετα προς τον άξονα περιστροφής και διαφεύγει από το δρομέα παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής.



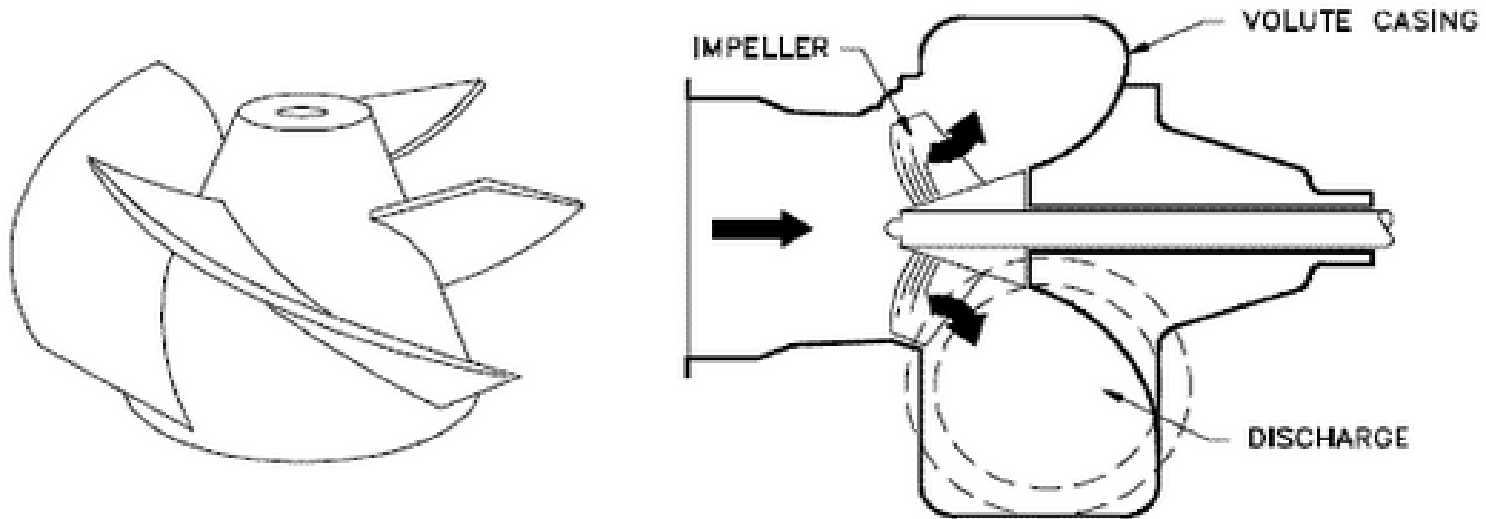
# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

Εάν η διεύθυνση της ροής εξακολουθεί να είναι παράλληλη προς τον άξονα περιστροφής, τότε η υδραυλική μηχανή χαρακτηρίζεται ως **αξονικής ροής (axial flow turbine)**.



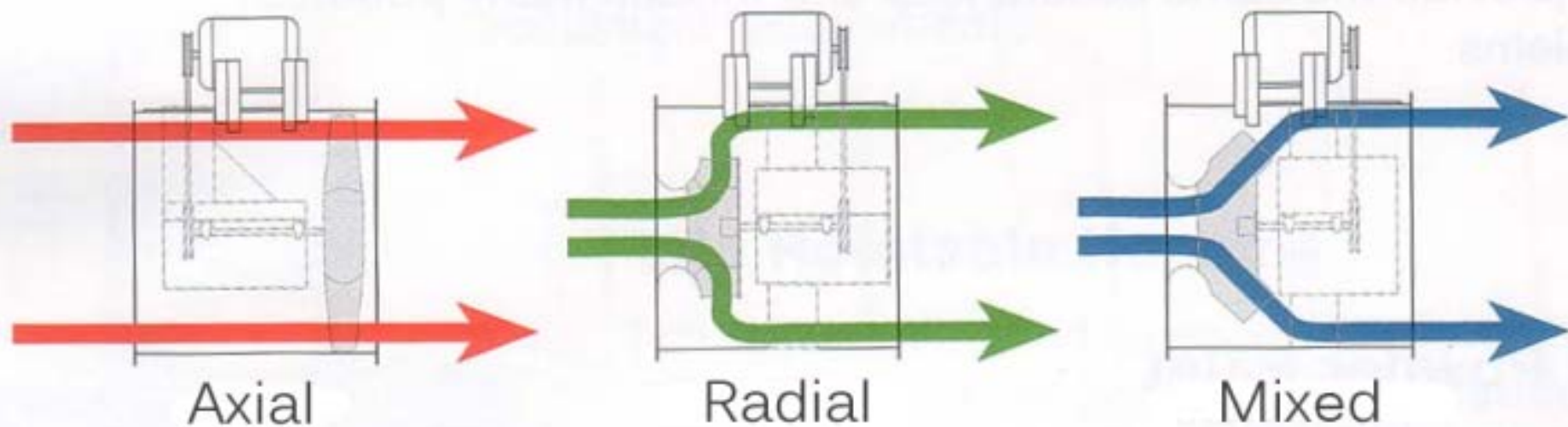
# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

Εάν η διεύθυνση της ροής είναι μερικώς ακτινική και μερικώς αξονική, τότε η υδραυλική μηχανή χαρακτηρίζεται ως **μικτής ροής** (*mixed flow turbine*).



Mixed flow impeller. Image Credit: Engineer's Edge

# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως



# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε 2 κύριες κατηγορίες:

A) τους υδροστρόβιλους δράσεως (impulse turbines)

B) τους υδροστρόβιλους αντιδράσεως (reaction turbines)

## Υδροστρόβιλοι δράσεως:

- Ο υδροστρόβιλος δράσεως μετατρέπει όλη τη διαθέσιμη ενέργεια σε κινητική πριν το νερό προσπέσει επί των περιστρεφόμενων σκαφιδίων του δρομέα.
- Το νερό προσκρούει επί τμήματος της περιφέρειας του δρομέα και μόνο επί αυτού, με αποτέλεσμα να μην υφίσταται ουδεμία μεταβολή της στατικής πίεσης επί του δρομέα.
- Σχεδόν όλοι οι υδροστρόβιλοι δράσεως **είναι τύπου Pelton** και χρησιμοποιούνται για μεγάλα ύψη πτώσεως.

# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Υδροστρόβιλοι δράσεως τύπου Pelton:

- Οι υδροστρόβιλοι δράσεως (βαθμός αντίδρασης ίσος με μηδέν), είναι μερικής προσβολής και, σε κάθε χρονική στιγμή, τμήμα μόνο της πτερωτής συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή.



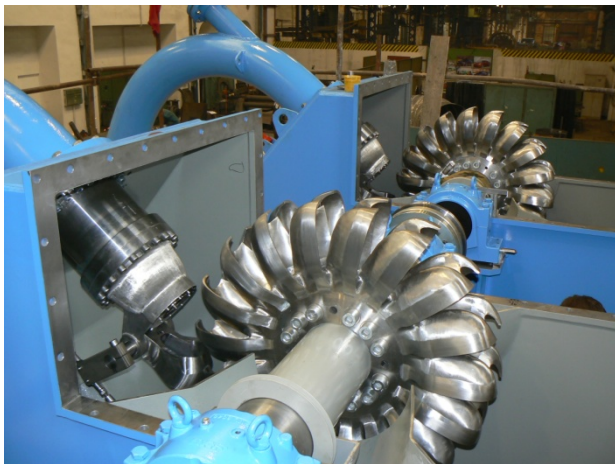
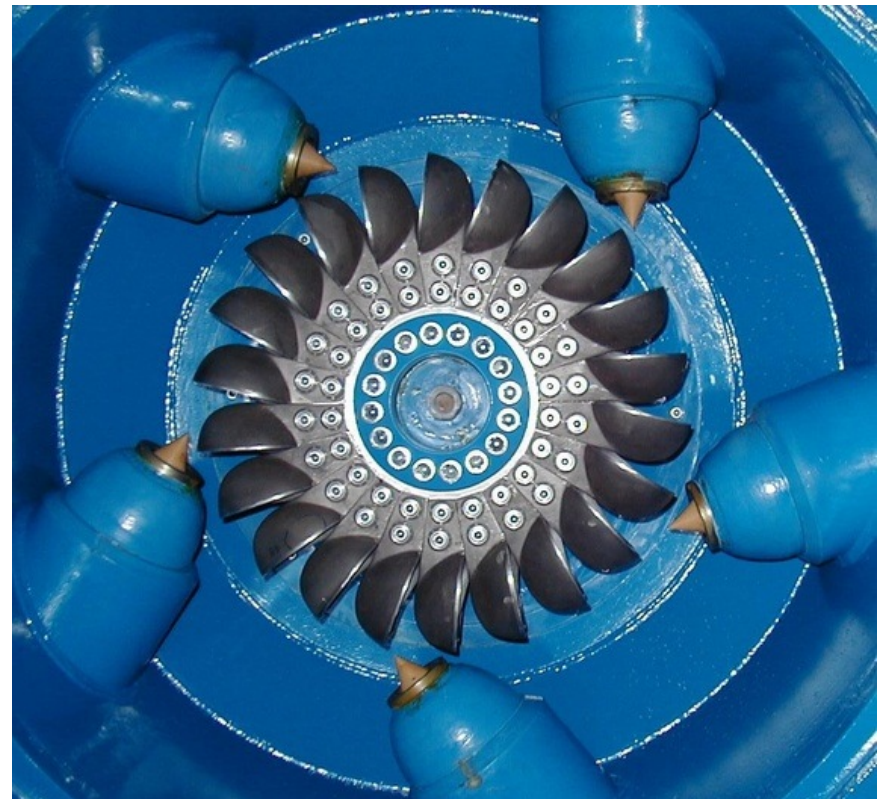
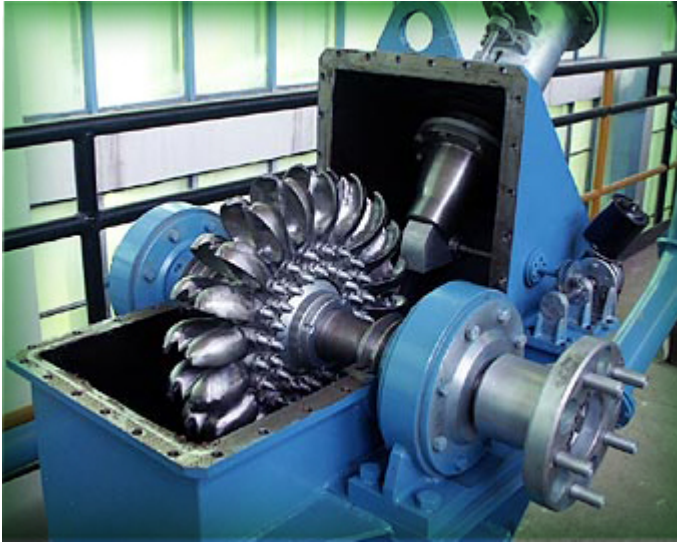
Εικόνα 4. Τύπου Pelton



Εικόνα 5. Τύπου Pelton με 2 ακροφύσια

# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Υδροστρόβιλοι δράσεως τύπου Pelton:



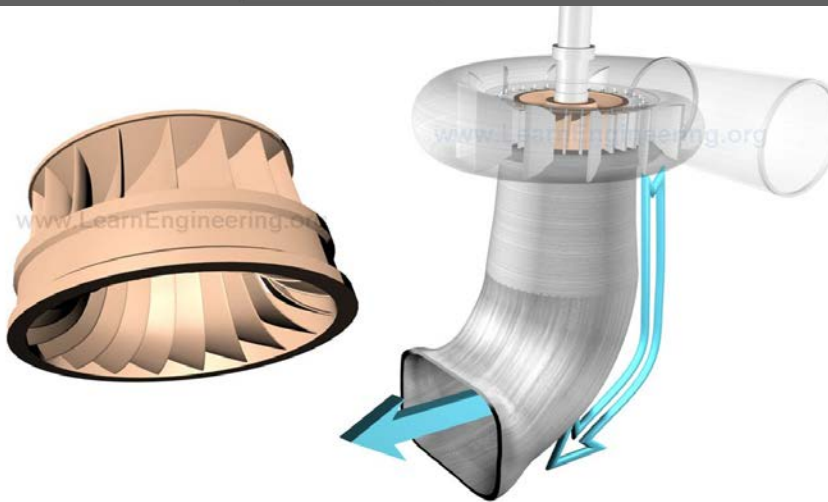
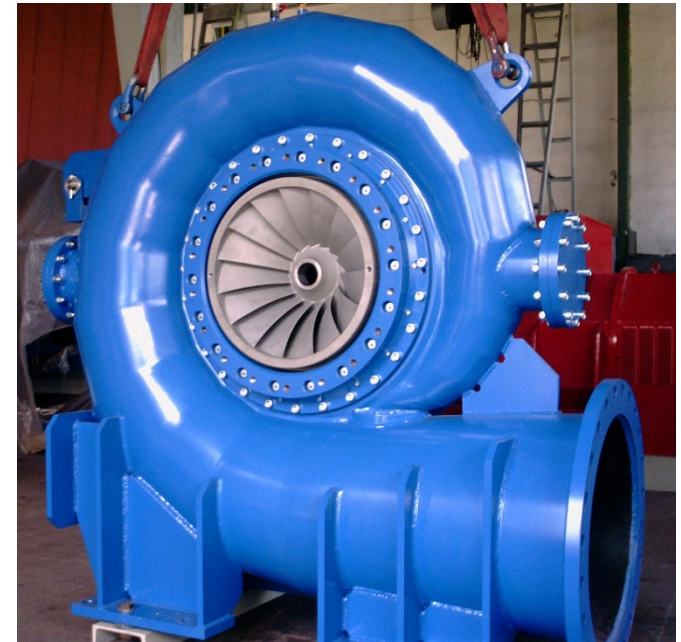
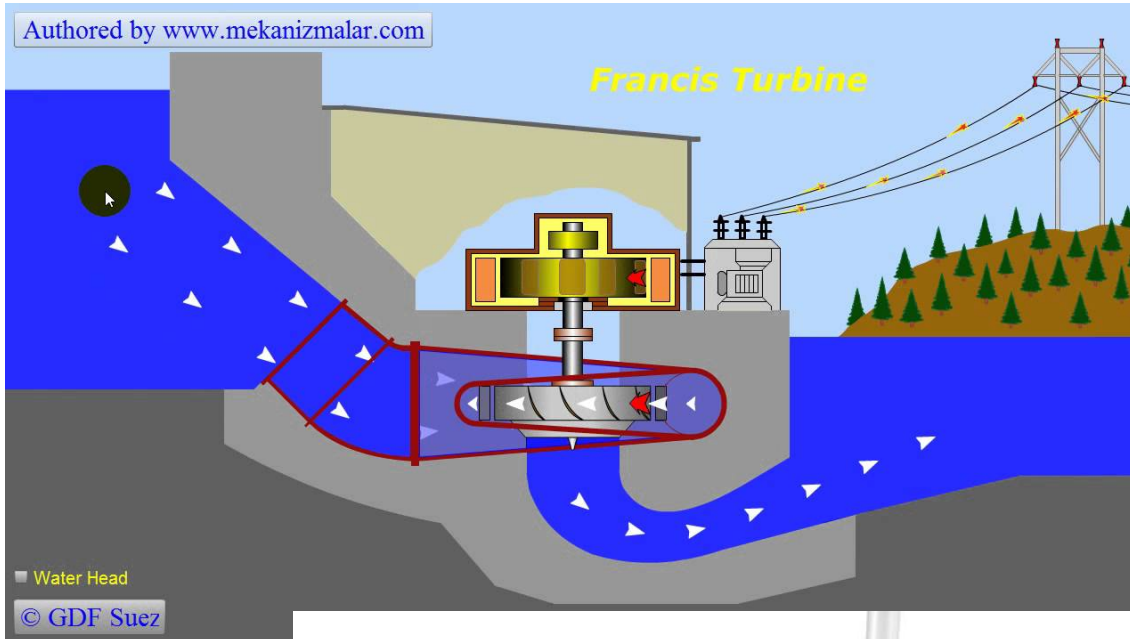
# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως:

- Στους υδροστρόβιλους αντιδράσεως η στατική πίεση μειώνεται κατά τη διέλευση του νερού από τα πτερύγια του δρομέα.
- Το νερό εισέρχεται εντός του δρομέα καθ' όлон το μήκος της περιφέρειάς του και όλες οι διελεύσεις επί του δρομέα είναι γεμάτοι με νερό.
- Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρη η πτερωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά.
- Οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι είτε **τύπου Francis** (για υδατοπτώσεις μέσου ή χαμηλού ύψους πτώσης) είτε **τύπου Kaplan** (για υδατοπτώσεις χαμηλού ύψους πτώσης) .
- Οι υδροστρόβιλοι τύπου Francis είναι ακτινικής ή/και μικτής ροής, ενώ οι Kaplan αξονικής ροής.

# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

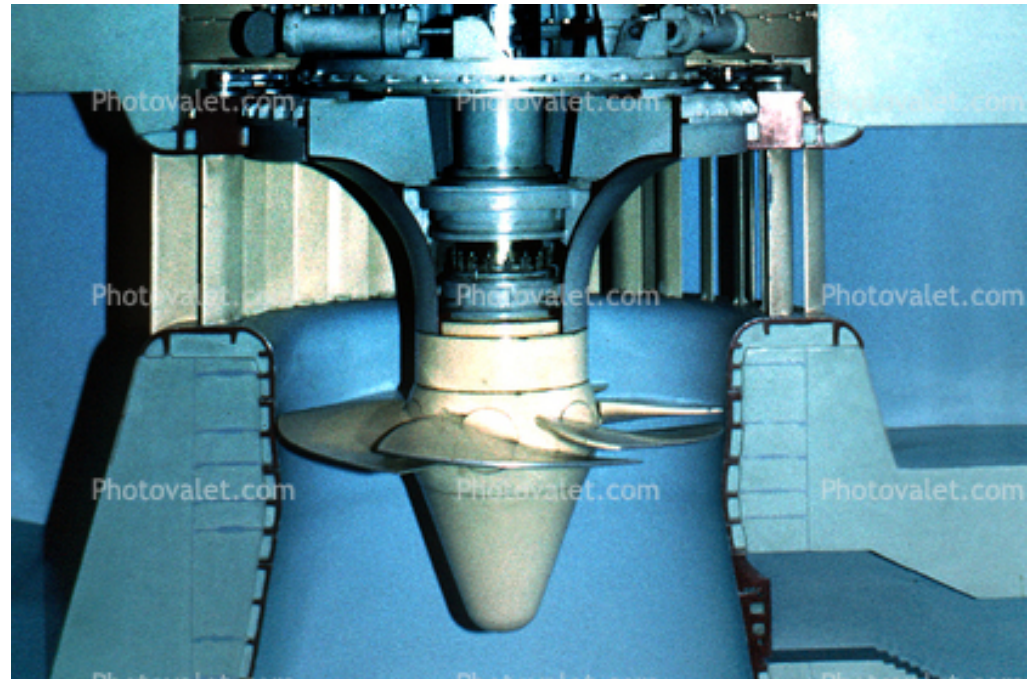
## Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως τύπου Francis:





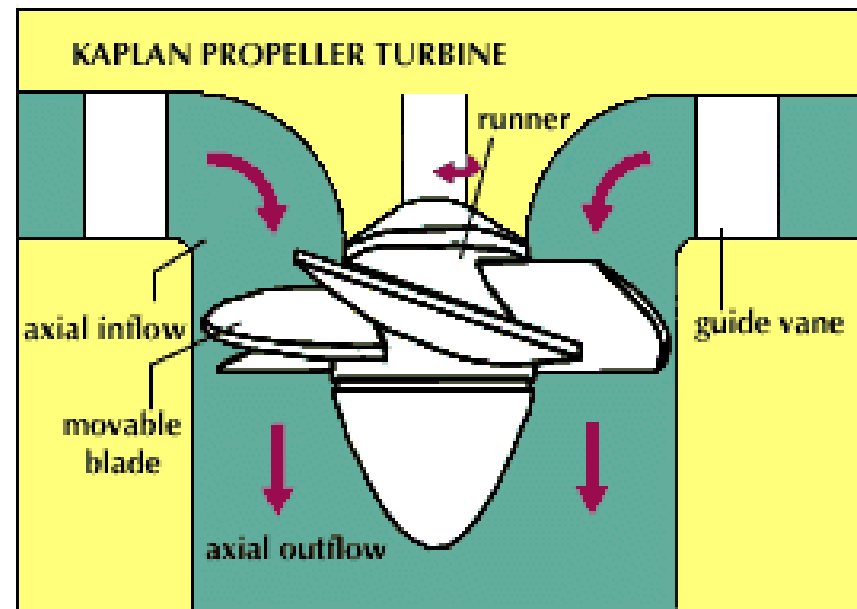
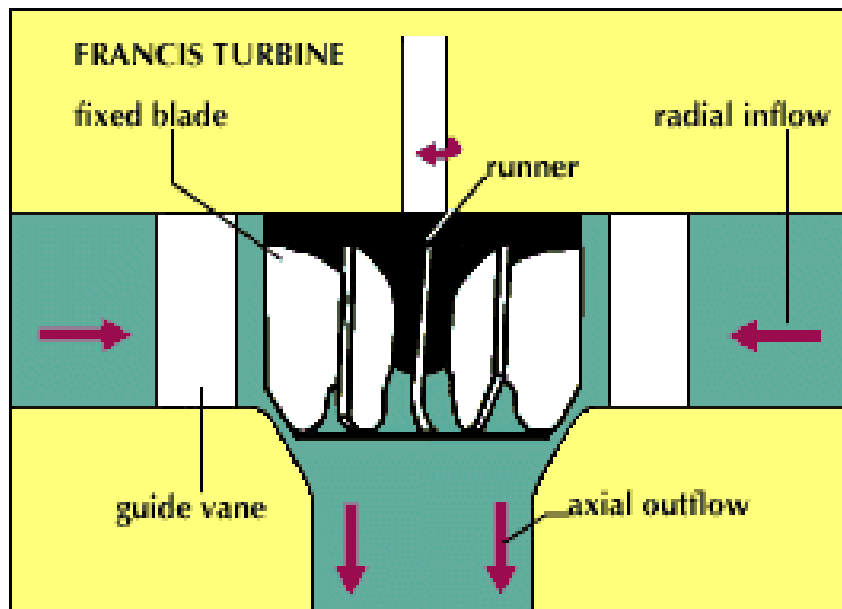
# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως τύπου Kaplan:



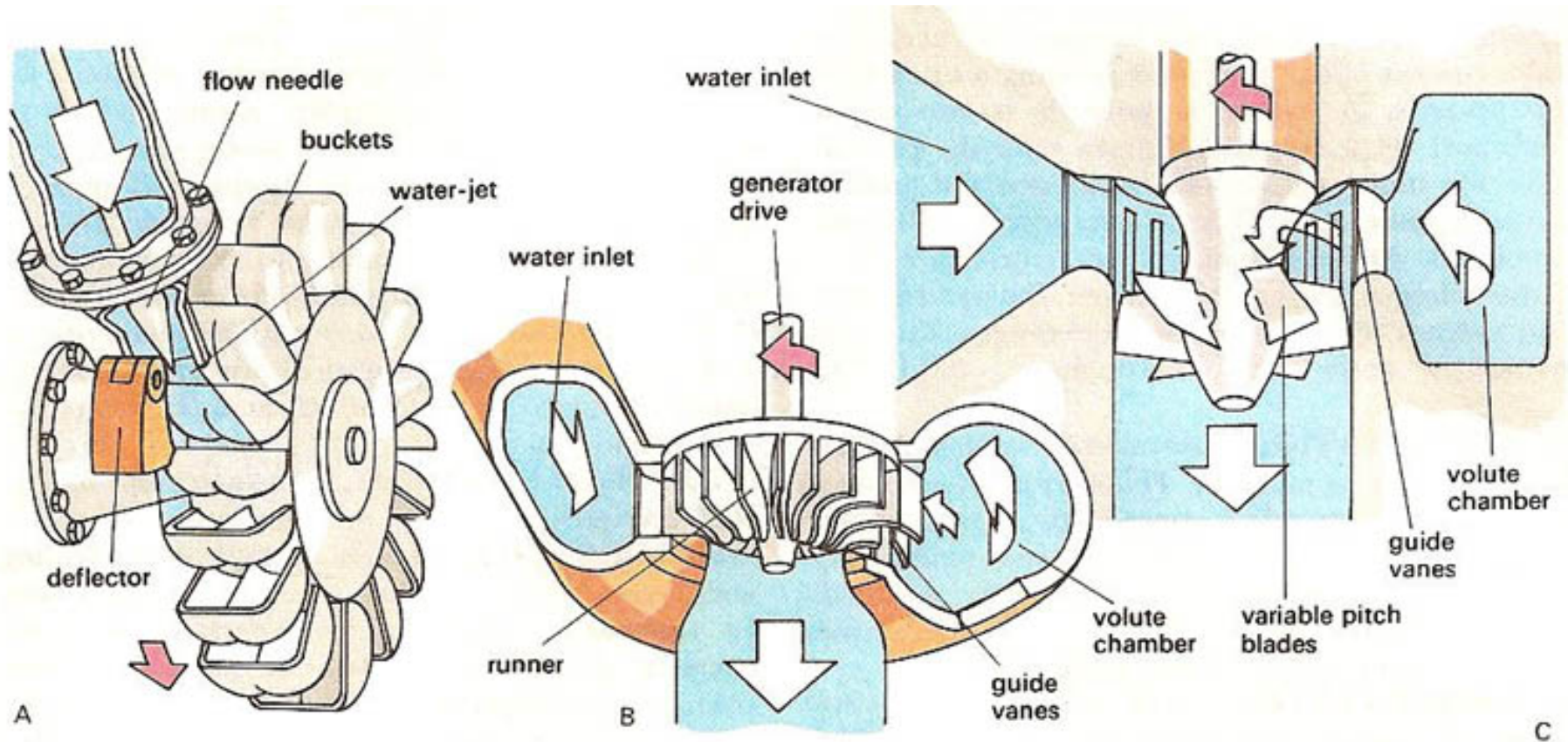
# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως τύπου Francis vs Kaplan:



# Υδροστρόβιλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Pelton vs Francis vs Kaplan:



# Υδροστροβίλοι δράσεως και αντιδράσεως

## Pelton

- [https://www.youtube.com/watch?v=qbyL--6q7\\_4](https://www.youtube.com/watch?v=qbyL--6q7_4)



## Francis

- <https://www.youtube.com/watch?v=JD4VkzHk6rk>
- <https://www.youtube.com/watch?v=IZdiWBEzISM>
- <https://www.youtube.com/watch?v=S3MQJSDoTuw>



## Kaplan

- [https://www.youtube.com/watch?v=\\_eLufvzh5HU](https://www.youtube.com/watch?v=_eLufvzh5HU)
- <https://www.youtube.com/watch?v=qx8yMmltrjE>



## Comparison of Pelton, Francis & Kaplan Turbine

- <https://www.youtube.com/watch?v=k0BLOKEZ3KU>



Αγγελίδης Π., Αναπλ. Καθηγητής

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΕΡΓΑ, ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6, ΕΡΓΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

# 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Τα ρευστά χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους προς ροήν, και διαιρούνται στα υγρά και αέρια.

- Τα υγρά είναι μερικώς συμπιεστά και εμφανίζουν ελεύθερη επιφάνεια όταν τοποθετηθούν σε δοχείο (μερική πλήρωση).
- Τα αέρια είναι συμπιεστά και τείνουν να καταλάβουν όλο το διαθέσιμο χώρο, και η συμπιεστότητα τους για την περιοχή ταχυτήτων μεγαλύτερη των  $60.0\text{m/s}$  δεν είναι αμελητέα.
- Το νερό δύναται να περιέχει διαλυμένο αέρα σε ποσοστό έως 3%.
- Ο αέρας τείνει να απελευθερωθεί όταν η πίεση του ύδατος αρχίζει να λαμβάνει τιμές αισθητώς μικρότερες της ατμοσφαιρικής πίεσης

# 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

## Πυκνότητα:

Πυκνότητα ενός ρευστού ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του ρευστού προς τη μονάδα του όγκου. Εάν  $m$  (Kg) είναι η μάζα και  $V(m^3)$  είναι ο όγκος που καταλαμβάνει η δοθείσα μάζα, τότε η πυκνότητα  $\rho(Kg/m^3)$  ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

Για το καθαρό νερό, η πυκνότητα ισούται με  $1000.0$  ( $Kg/m^3$ ) στους  $4.0$  C, και η πυκνότητα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Το **ειδικό βάρος**  $\gamma$  ( $N/m^3$ ) ενός ρευστού είναι το βάρος του ρευστού  $B$  (N) ανά μονάδα όγκου,

$$\gamma = \frac{B}{V} \quad (1.2)$$

## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Επειδή η μάζα και το βάρος συνδέονται με την επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$  ( $=9.81 \text{ m/s}^2$ ) σύμφωνα με τη μαθηματική σχέση

$$B = m g \quad (1.3)$$

Τότε:

$$\gamma = \rho g \quad (1.4)$$

*Υπό κανονική θερμοκρασία, το ειδικό βάρος του ύδατος είναι  $9810.0 \text{ N/m}^3$ .*

Η πίεση  $p$  ( $\text{N/m}^2$ ) η οποία εξασκείται από το νερό επί των διαφόρων τμημάτων μιας στροβιλομηχανής είναι μεγάλης σημασίας προκειμένου να εκτιμηθεί η ενέργεια καθώς και τα άλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας των στροβιλομηχανών.

## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Η πίεση καθορίζεται ως ο λόγος της ασκούμενης δύναμης προς τη μονάδα επιφάνειας,

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.5)$$

Όπου,  $F(N)$  η ασκούμενη δύναμη και  $A (m^2)$  το εμβαδό της επιφάνειας επί της οποίας ασκείται η δύναμη. Η απόλυτος πίεση  $p_\alpha (N/m^2)$  και η πίεση  $p$  συνδέονται ως:

$$p_\alpha = p_{\alpha\tau\mu} + p \quad (1.5)$$

Η πίεση  $p$  συνδέεται με το ύψος  $h (m)$  στήλης ύδατος με τη σχέση:

$$p = \rho g h \quad (1.6)$$



## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Το πιεζομετρικό ύψος  $h$  ή φορτίο μετριέται σε  $m$  στήλης ύδατος. Εάν η απόλυτος πίεση σε κάποιο σημείο της στροβιλομηχανής είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης (υποπίεση), το πιεζομετρικό ύψος  $h$  φορτίο είναι  $h$  είναι αρνητικό ( $h = p/\rho g < 0.0$ )

Ο όγκος του ύδατος  $\Delta V$  ( $m^3$ ) που ρέει ανά μονάδα χρόνου  $\Delta t$  (sec) δια μέσου μιας διατομής ονομάζεται παροχή  $Q$  ( $m^3/s$ ), με την παροχή να ορίζεται ως

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.7)$$

Εάν  $u$  ( $m/s$ ) είναι η μέση ταχύτητα του ύδατος σε θέση με εμβαδό διατομής  $A$ , τότε ο ρέων όγκος ανά μονάδα χρόνου είναι

$$Q = A u \quad (1.8)$$

## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Το εν κινήσει νερό είναι ικανό να παράγει έργο και ως εκ τούτου φέρει ενέργεια. Το εν κινήσει νερό δύναται να κατέχει μια ή περισσότερες μορφές ενέργειας:

- α) ενέργεια λόγω θέσης,  $z$  (m)
- β) ενέργεια λόγω κίνησης,  $u^2/2g$  (m)
- γ) ενέργεια λόγω πίεσης,  $p/\rho g$  (m)

Η ολική ενέργεια ή ολικό φορτίο  $H_o$  (m) θεωρείται το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών, δηλαδή

$$H_o = z + \frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} \quad (1.9)$$

Κάθε όρος της παραπάνω εξίσωσης παριστά τη διαθέσιμη ενέργεια ανά μονάδα βάρους του ύδατος ( $\rho = 1000.0 \text{ Kg/m}^3$ )

## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Η ισχύς  $I$  (W), ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, δύναται να υπολογισθεί από την προηγούμενη εξίσωση με τον πολλαπλασιασμό κάθε μέρους της εξίσωσης με το γινόμενο  $\rho * g * Q$ .

Ως καθαρό ύψος ή φορτίο  $H_n$  (m) ενός υδροστροβίλου ορίζεται το διαθέσιμο ύψος προς παραγωγή έργου.

Η ολική απόδοση ή απλώς απόδοση  $\eta$  ενός στροβίλου είναι ο λόγος της χρήσιμου ισχύος από τη μηχανή προς την προσφερθείσαν ισχύ και δίνεται ως:

$$\eta = \frac{I}{\rho g Q H_n} \quad (1.10)$$

Η μελέτη της απόδοσης λειτουργίας επιτυγχάνεται μέσω εργαστηριακών μελετών επί ομοιωμάτων υδροστροβίλων μεταβάλλοντας την περιστροφική ταχύτητα και τη γωνία ανοίγματος των θυροφραγμάτων των υδροστροβίλων

## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Η απόδοση και η παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις γνωστές και ως χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

Επειδή υπάρχουν διαφοροποιήσεις των καμπύλων λειτουργίας των υδροστροβίλων δράσεως και αντιδράσεως, αλλά παράλληλα είναι αρκετά χρήσιμο να συγκριθούν διαφορετικά είδη υδροστροβίλων, έχει ορισθεί η παράμετρος «ειδική ταχύτητα» προκειμένου να γίνει αυτή η σύγκριση.

Ορίζεται επομένως ως ειδική ταχύτητα υδροστροβίλου  $n_s$  η ταχύτητα ενός γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου ο οποίος αναπτύσσει ισχύ ενός KW υπό φορτίο 1 m.

$$n_s = \frac{N I^{1/2}}{H_n^{5/4}} \quad (1.11)$$

Όπου  $N$  (στροφές ανά λεπτό) η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Σπηλαίωση (cavitation) είναι το φαινόμενο σχηματισμού και καταστροφής θηλάκων ή φυσαλίδων ατμού του υγρού επί των εσωτερικών επιφανειών των στροβιλομηχανών.

- Η σπηλαίωση είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο διότι διαβρώνει τις στερεές επιφάνειες των στροβιλομηχανών και έχει ως ι) αποτέλεσμα την καταστροφή των επιφανειών αυτών μέσω μηχανικών ταλαντώσεων και ιι) απώλεια ενέργειας.
- Έχει παρατηρηθεί ότι σε περιοχές μεγάλης ταχύτητας του νερού, όπως π.χ. στις κυρτές επιφάνειες των πτερυγίων των στροβιλομηχανών, η πίεση του νερού πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο.



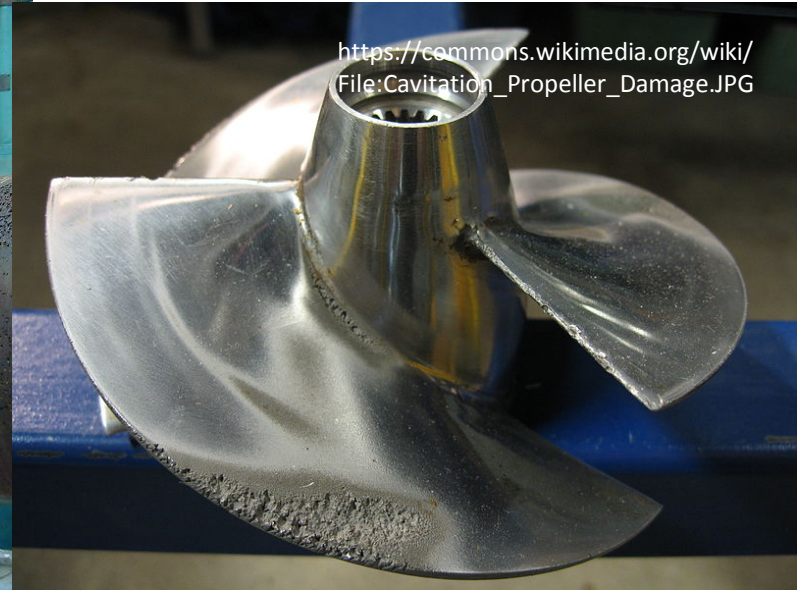
Αυτή η κατάσταση ευνοεί το σχηματισμό ατμών του υγρού ακόμα και σε κανονικές θερμοκρασίες (π.χ 15.0 C)

# 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

## Σπηλαίωση (cavitation).

- Η στατική πίεση εντός των στροβιλομηχανών δεν είναι σταθερή, με αποτέλεσμα καθώς οι φυσαλίδες κινούνται σε γειτονικές περιοχές με στατική πίεση μεγαλύτερη της πίεσης ατμών του υγρού να πραγματοποιείται συμπύκνωση τους σε υγρό.
- Επειδή ο όγκος της φυσαλίδας μειώνεται κατά τη συμπύκνωση, οι γειτονικές μάζες του υγρού που περιβάλλανε τη φυσαλίδα τείνουν να καλύψουν τον χώρο, άρα κινούνται προς το κέντρο της φυσαλίδας και προκαλούν απότομη σημειακή κρούση τη στιγμή που η φυσαλίδα εξαφανίζεται.
- Συνέπεια του φαινομένου αυτού είναι η δημιουργία υψηλών δυνάμεων (πιέσεις) και δημιουργία συνεχών ταλαντώσεων του υγρού. Αν η “εξαφάνιση” των φυσαλίδων γίνεται πάνω στα στερεά μεταλλικά μέρη του υδροστρόβιλου (πτερύγια, κέλυφος) τότε αργά ή σταθερά τα καταστρέφει.

# 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών



## 1.2 Βασικές έννοιες υδραυλικών μηχανών

Για την αποφυγή του φαινομένου της σπηλαίωσης, εκτός από την επιλογή κατάλληλου υλικού:

- Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως: Κατά την εγκατάσταση πρέπει να διασφαλιστεί η κάθετος απόσταση μεταξύ του κέντρου του δρομέα και της ελεύθερης επιφάνειας του νερού της διώρυγας φυγής.
- Αντλίες: Η πίεση στην είσοδο του δρομέα δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη ενός ορισμένου ορίου. Ειδικότερα, ορίζεται το καθαρό θετικό ύψος αναρροφήσεως ή NPSH (Net Positive Suction Head) το οποίο αναπαριστά το απαιτούμενο ύψος για την κίνηση του υγρού από τη δεξαμενή προς το δρομέα.
- Για τη μελέτη της σπηλαίωσης ορίζεται η παράμετρος σπηλαίωσης γνωστή και ως κρίσιμος αριθμός  $\sigma_c$
- Οι ασφαλείς και η μη ασφαλείς περιοχές λειτουργίας σχετικά με το φαινόμενο της σπηλαίωσης ορίζονται από πίνακες που δίνονται από τους κατασκευαστές.



# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.3.1 Ιδεατό και πραγματικό ρευστό

Η δυναμική συνεκτικότητα είναι μια ιδιότητα του ρευστού, η οποία εκφράζει την «αντίστασή» του στην επιβολή διατμητικής τάσης. δρομέα.

- Όταν η συνεκτικότητα του ρευστού είναι μηδέν (μη συνεκτικότητα), τότε έχουμε ένα ιδεατό ρευστό, δηλαδή ο συντελεστής του κινηματικού ιξώδους λαμβάνεται ίσος με μηδέν.
- Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η συνεκτικότητα του ρευστού δεν μπορεί να αγνοηθεί, τότε έχουμε πραγματικό ρευστό.

Η πραγματική ροή εντός στροβιλομηχανών είναι αρκετά σύνθετη, διότι εντός πολύ συγκεκριμένου και περιορισμένου χώρου πρέπει να επιτευχθεί ο λειτουργικός σκοπός της μηχανής.

Στη μελέτη λειτουργίας των στροβιλομηχανών, θα γίνει ανάλυση της ροής πραγματικού ρευστού επί των πτερυγίων.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.3.2 Ροή εντός αγωγών

Η πραγματική ροή εντός αγωγών ή πέριξ υδραυλικών κατασκευών μπορεί να χαρακτηριστεί ως στρωτή ή τυρβώδης.

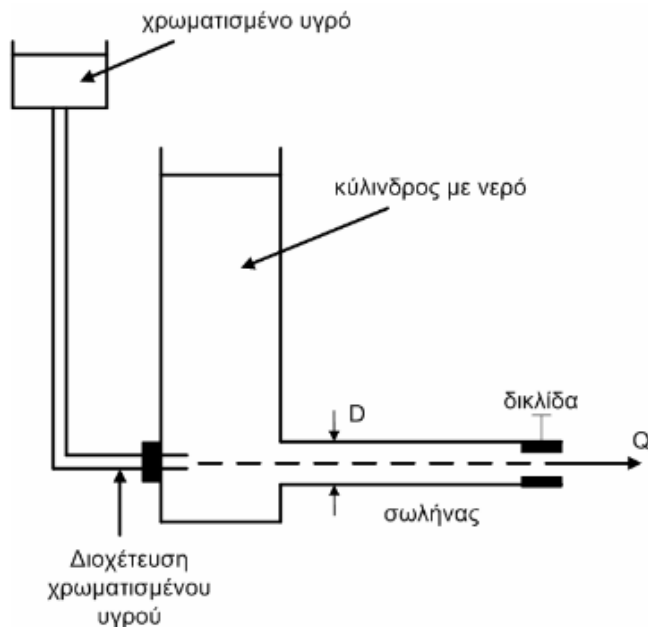
Αν ο στοιχειώδης όγκος  $dV$  του ρευστού, που περνά από το τυχαίο σημείο του πεδίου ροής, διαγράφει πάντοτε την ίδια γραμμή ροής ενώ η ταχύτητά του στο δεδομένο σημείο είναι ανεξάρτητη του χρόνου, η ροή ονομάζεται **μόνιμη (steady)**. Στην ειδική περίπτωση που η μόνιμη ροή γίνεται κατά παράλληλα στρώματα, καθένα από τα οποία έχει καθορισμένη ταχύτητα, η ροή ονομάζεται **στρωτή (laminar)**.

Αν ο στοιχειώδης όγκος  $dV$  του υγρού, που διέρχεται από δεδομένο σημείο του πεδίου ροής, διαγράφει διαφορετικές γραμμές ροής σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (εξάρτηση από το χρόνο) είτε σχηματίζει στροβίλους, τότε η ροή ονομάζεται **τυρβώδης ή στροβιλώδης** και το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση εσωτερικής τριβής.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.3.2 Ροή εντός αγωγών

Ο χαρακτηρισμός της ροής ως στρωτή ή τυρβώδη γίνεται μέσω του αριθμού **Reynolds, Re**.



Καθηγητής Αναστάσιος Ι. Στάμου  
Εφαρμοσμένη Υδραυλική

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή  
Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

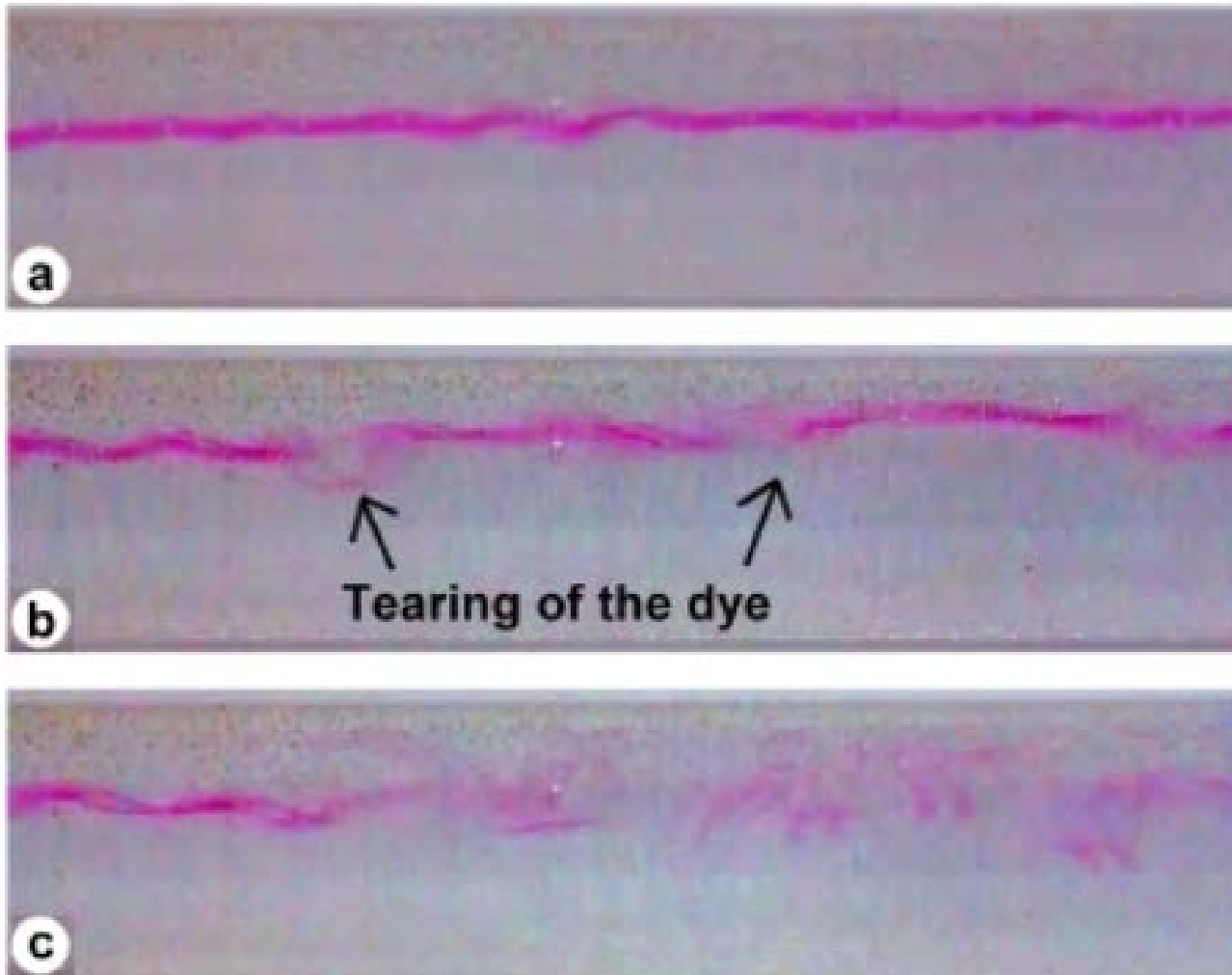
Σε ένα κύλινδρο με νερό προσαρμόζεται μικρό οριζόντιο σωλήνα με εσωτερική διάμετρο ίση με  $D$ , απ' όπου εκρέει νερό παροχής  $Q$ . Η παροχή ρυθμίζεται με δικλίδα που βρίσκεται στο κατάντη άκρο του σωλήνα. Από ένα σωλήνα πολύ μικρής διαμέτρου ( $< 1\text{mm}$ ) διοχετεύουμε χρωματισμένο υγρό.

Στην αρχή του πειράματος η δικλίδα είναι λίγο ανοικτή οπότε η παροχή και η ταχύτητα ροής είναι μικρή και η ροή είναι στρωτή, όπως φαίνεται από τη λείες γραμμές ροής στο Σχήμα α).

Ανοίγουμε λίγο παραπάνω τη δικλίδα, η παροχή αυξάνεται και παρατηρούμε τις πρώτες ασυνέχειες στις γραμμές ροής («σπάνε» οι λείες γραμμές ροής και δημιουργούνται οι πρώτοι στρόβιλοι (μεταβατική τυρβώδης ροή), Σχήμα β).

Στη συνέχεια ανοίγουμε αρκετά τη δικλίδα, Σχήμα γ), η παροχή αυξάνεται σημαντικά και οι στρόβιλοι είναι ασταθείς και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, οπότε η ροή είναι πλήρως τυρβώδης

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ



*Καθηγητής Αναστάσιος Ι. Στάμου*  
*Εφαρμοσμένη Υδραυλική*  
*Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό*  
*Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.3.2 Ροή εντός αγωγών

Ο χαρακτηρισμός της ροής ως στρωτή η τυρβώδη γίνεται μέσω του αριθμού **Reynolds, Re**.

Σε κυκλικούς αγωγούς ο αριθμός Reynolds δίνεται ως:

$$Re = \frac{u D \rho}{\mu} \quad (1.14)$$

Όπου  $u$  η μέση ταχύτητα του ρευστού στην υπο μελέτη διατομή,  $D$  (m) η διαμετρος του κύκλου της διατομής και  $\mu$  (Ns/m<sup>2</sup>) ο ο συντελεστής του ιξώδους του ρευστού.

Επειδή ο συντελεστής του κινηματικού ιξώδους του ρευστού  $\nu$  (m<sup>2</sup>/sec) συνδέεται με το συντελεστή ιξώδους με την εξίσωση

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.15)$$

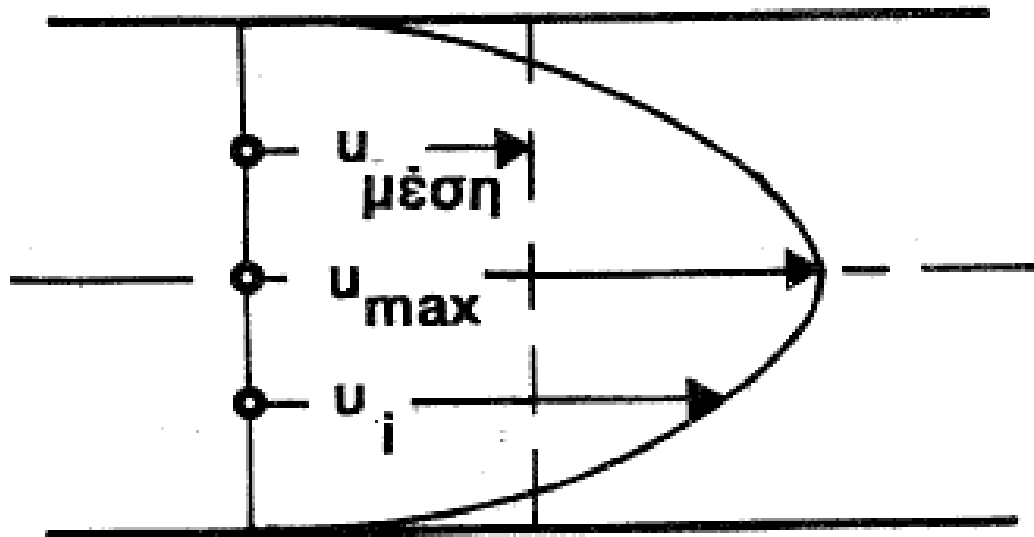
Τότε ο αριθμός Re δίνεται ως:

$$Re = \frac{u D}{\nu} \quad (1.16)$$

## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

- Σε χαμηλούς αριθμούς  $Re$ , έχουμε στρωτή ροή, επομένως οι δυνάμεις αδράνειας να είναι μικρότερες των δυνάμεων λόγω ιξώδους δράσεως του ρευστού.

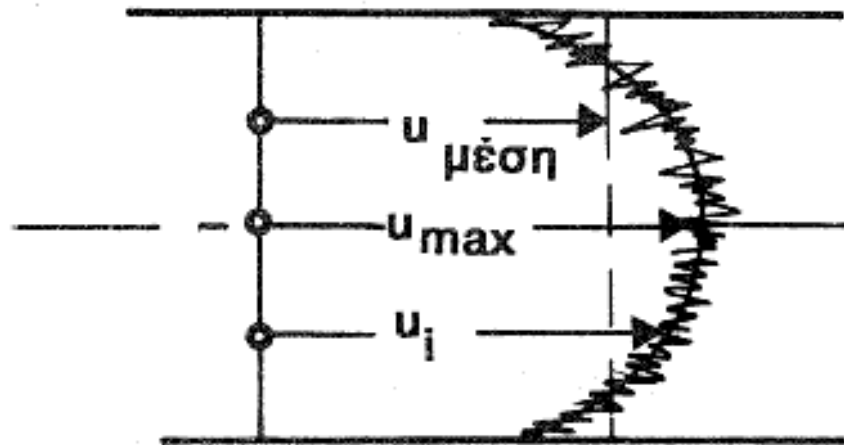
Στην περίπτωση αυτή τα σωματίδια του ρευστού ακολουθούν παραλλήλως την κύρια ροή του ρευστού και κατά συνέπεια δεν μετακινούνται κάθετα προς την κύρια ροή.



## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

- Σε περιπτώσεις υψηλού αριθμού  $Re$  οι δυνάμεις αδράνειας (ή ταχύτητας) κυριαρχούν επί των συνεκτικών δυνάμεων.

Τα σωμάτια του ρέοντος ρευστού έχουν κιμαινόμενες συνιστώσες της ταχύτητας κάθετους προς την κύρια κατεύθυνση της ροής, με αποτέλεσμα σωμάτια του ρευστού να διασχίζουν κάθετα την κύρια ροή του ρευστού. Αυτές οι μικρές διαταραχές της ταχύτητας ονομάζονται τυρβώδεις ταχύτητες.



## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

- Στρωτή ροή εμφανίζεται σπάνια εντός της κυκλικής διατομής τμημάτων των υδραυλικών στροβιλομηχανών, εκτός από τις περιπτώσεις όπου υπάρχει ρευστά με υψηλό συντελεστή ιξώδους (π.χ λιπαντικά).
- Ο κρίσιμος αριθμός **Re** για τη μετατροπή της στρωτής ροής σε τυρβώδη ροή, σε κυκλική διατομή, είναι 2100.  
Ο συντελεστής τριβής  $f$ , ο οποίος είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση της στρωτής ροής σε σχέση με την τυρβώδη ροή, δίνεται από τη ακόλουθη εξίσωση:

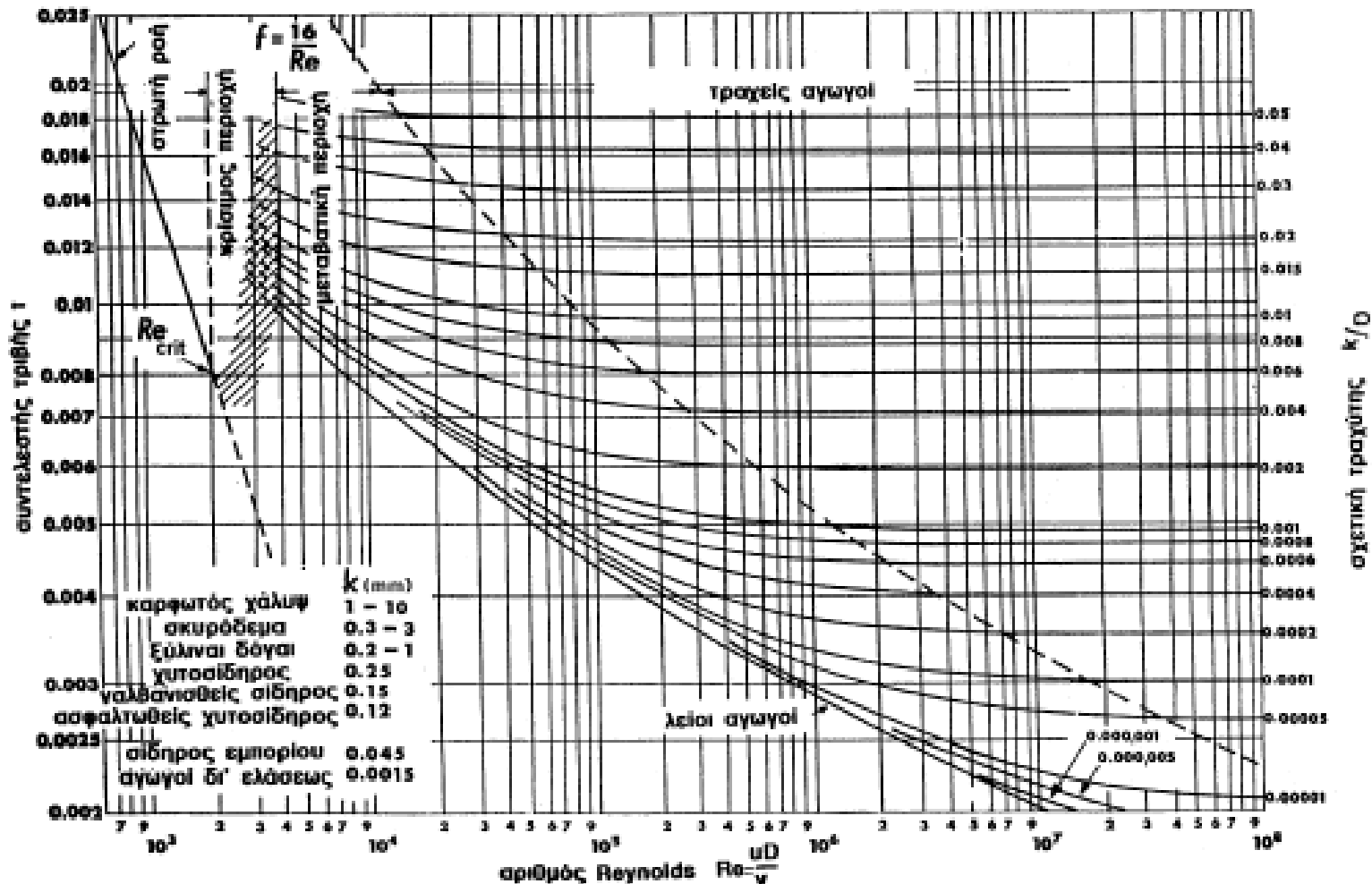
$$f = \frac{64.0}{Re} \quad (1.17)$$

Στην περίπτωση της τυρβώδους ροής δεν είναι δυνατόν να υπάρξει απλή σχέση μεταξύ των  $f$  και  $Re$ . Οι σχέση μεταξύ των 2 μεγεθών εξαρτάται κατά περίπτωση και κυρίως από την τραχύτητα των τοιχωμάτων των αγωγών.



# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

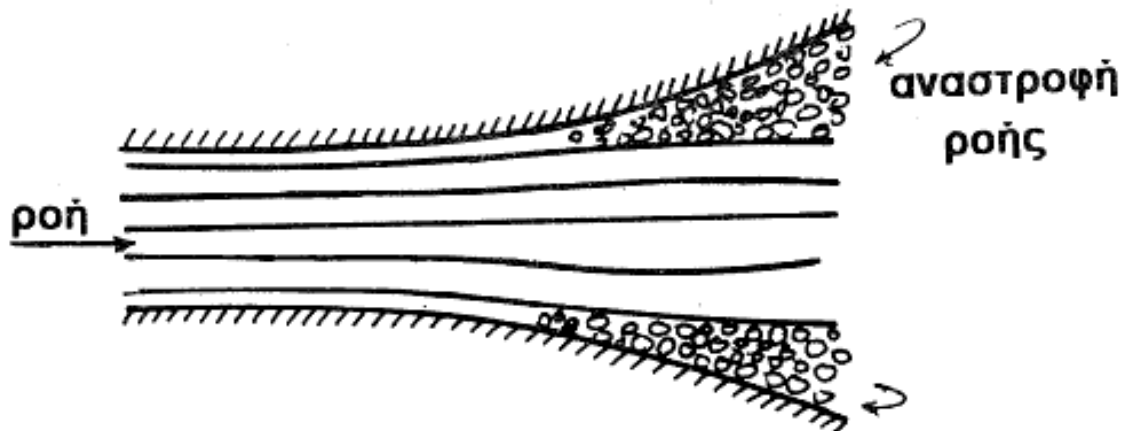
Για τη τυρβώδη ροή, η συστηματοποιημένη σχέση μεταξύ των  $f$ ,  $Re$  και  $k/D$  είναι γνωστή ως διάγραμμα του Moody.



## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Η περιοχή που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του στερεού και μέχρι τη θέση όπου η ταχύτητα του ρευστού λαμβάνει το 99.0% της μέσης ταχύτητας του ρευστού στην υπό μελέτη διατομή ονομάζεται οριακή στοιβάδα.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των οριακών στοιβάδων είναι ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου το κινούμενο ρευστό είναι δυνατόν να αναστρέψει την κατεύθυνση ροής του και ως εκ τούτου να προκαλέσει δίνες και μεγάλης κλίμακας τύρβη η οποία συντελεί σε μεγάλες απώλειες ενέργειας του ρέοντος ρευστού.



## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Το αποτέλεσμα της ανάστροφής ροής προκαλείται λόγω ανάστροφης κλίσης της πίεσης, η οποία είναι αποτέλεσμα των διαφοροποιήσεων των κατανομών των πιέσεων λόγω έντονης μεταβολής της γεωμετρίας.

Ενώ κατά την κίνηση του ρευστού σε συγκεκριμένη κατεύθυνση απαιτείται να είναι πάντα  $dp/ds > 0.0$  , με  $p$  η πίεση του ρευστού και  $s$  (m) η απόσταση, στην περίπτωση αναστροφής της ροής  $dp/ds < 0.0$

Εάν η κλίση της πίεση είναι αρκετά έντονη, τότε είναι δυνατό το ρευστό που βρίσκεται στην οριακή στοιβάδα να αποχωρίσει πλήρως από την στερεά επιφάνεια και να δημιουργήσει απειράριθμες δίνες. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως αποκόλληση της οριακής στοιβάδας.

## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Η αύξηση της στατικής πίεσης  $p$  ή του φορτίου  $h=p/\rho g$ , είναι μια ουσιώδης λειτουργία ορισμένων τμημάτων των στροβιλομηχανών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάχυση και τα τμήματα που συντελούν σε αυτό διαχυτές.

Τέτοια τμήματα είναι ο αγωγός φυγής, οι χώροι ροής που σχηματίζονται μεταξύ των ακίνητων πτερυγίων και των πτερυγίων του δρομέα.

Η απόδοση της διάχυσης κατά τη ροή του ρευστού από θέση 1 με μέση τιμή φορτίου  $h_1$ , προ θέση 2 με μέσο ιδεατό φορτίο  $h_2$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta_d = \frac{h_2' - h_1}{h_2 - h_1} \quad (1.18)$$

Όπου  $h_2'$  η πραγματική μέση τιμή του φορτίου στη θέση 2.

Η απόδοση λειτουργίας των διαχυτών δίνεται από διάφορους πίνακες

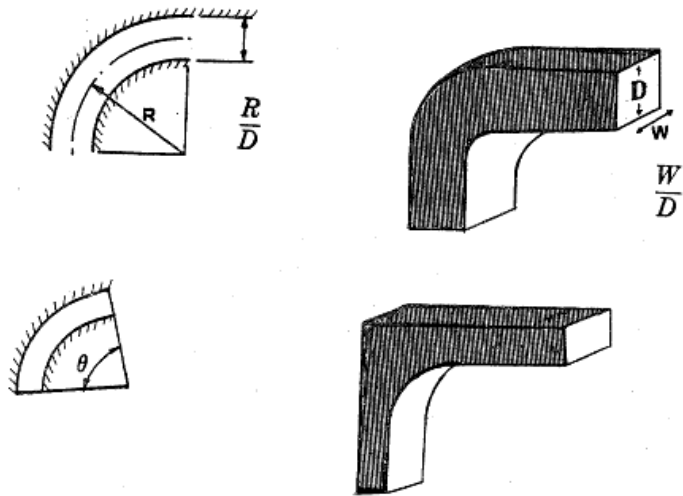
# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## Ακροφύσια

Σε αντίθεση με τους διαχυτές, τα ακροφύσια είναι διατάξεις που επιταχύνουν την ταχύτητα του ρευστού μέσω ελάττωσης της πίεσης.

Λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει πτώση της πίεσης κατά μήκος του ακροφυσίου είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί αποκόληση της οριακής στοιβάδας.

Κατά συνέπεια τα ακροφύσια είναι αποτελεσματικότερα των διαχυτών για την επίτευξη του σκοπού λειτουργίας τους.



Σχήμα 1.13 Γεωμετρία αγωγών (στροφών)

Η ροή των ρευστών εντός αγωγών, όπως π.χ. σπειροειδής κέλυφος, αγωγός εξόδου στροβίλου κτλ είναι επίσης κρίσιμο θέμα διερεύνησης.

Οι αναπτυσσόμενες απώλειες εκφράζονται σε όρους κινητικού ύψους  $u^2/2g$  και εξαρτώνται από τον συντελεστή απωλειών  $K$ .

Ο συντελεστής  $K$  εξαρτάται από τους λόγους  $R/D$ ,  $W/D$ , της γωνίας  $\theta$  και τη μορφή της στροφής. Η εύρεση του  $K$  δίνεται από πίνακες.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.3.3 Ροή πέριξ υδραυλικών κατασκευών

Σε εξωτερικούς σχηματισμούς η απώλεια του φορτίου γίνεται μέσω της έννοιας της δυναμικής αντίστασης  $D$  (N) και του συντελεστή αντίστασης  $C_d$  και δίδεται από την εξίσωση:

$$C_d = \frac{D}{A \gamma (u^2/2g)} \quad (1.19)$$

Όπου  $A$  το εμβαδό της ενεργής διατομής της υδραυλικής κατασκευής και  $u$  η μέση τιμή της προσπίπτουσας ταχύτητας. Ως ενεργός διατομή  $A$  ορίζεται η προβληθείσα επιφάνεια της κατασκευής σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση ροής.

Η δυναμική αντίσταση  $D$  συνίσταται από τις δυνάμεις τριβών, που οφείλονται κυρίως στην αλληλεπίδραση στερεών επιφανειών και ροής, και τις δυνάμεις αντίστασης που οφείλονται στη μη συμμετρική κατανομή της πίεσης γύρω από την κατασκευή.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## 1.3.3 Ροή πέριξ υδραυλικών κατασκευών

Σε εξωτερικούς σχηματισμούς η απώλεια του φορτίου γίνεται μέσω της έννοιας της δυναμικής αντίστασης  $D$  (N) και του συντελεστή αντίστασης  $C_d$  και δίδεται από την εξίσωση:

$$C_d = \frac{D}{A \gamma (u^2/2g)} \quad (1.19)$$

Όπου  $A$  το εμβαδό της ενεργής διατομής της υδραυλικής κατασκευής και  $u$  η μέση τιμή της προσπίπτουσας ταχύτητας. Ως ενεργός διατομή  $A$  ορίζεται η προβληθείσα επιφάνεια της κατασκευής σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση ροής.

Η δυναμική αντίσταση  $D$  συνίσταται από τις δυνάμεις τριβών, που οφείλονται κυρίως στην αλληλεπίδραση στερεών επιφανειών και ροής, και τις δυνάμεις αντίστασης που οφείλονται στη μη συμμετρική κατανομή της πίεσης γύρω από την κατασκευή.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ



Παράδειγμα 1.

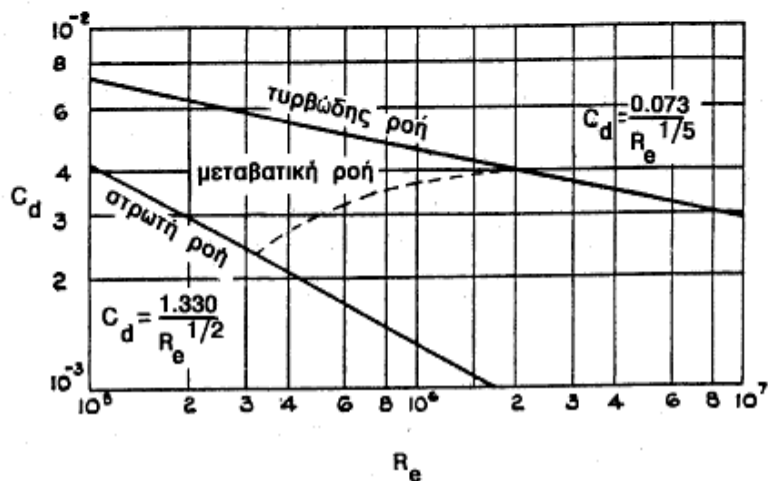
**Ροή παράλληλη επί επίπεδης επιφάνειας:**

Ο συντελεστής δυναμικής αντίστασης στην περίπτωση στρωτής ροής είναι:

$$C_d = \frac{1.33}{Re^{1/2}} \quad (1.20)$$

Ενώ στην περίπτωση τυρβώδους ροής είναι:

$$C_d = \frac{0.073}{Re^{1/5}} \quad (1.21)$$



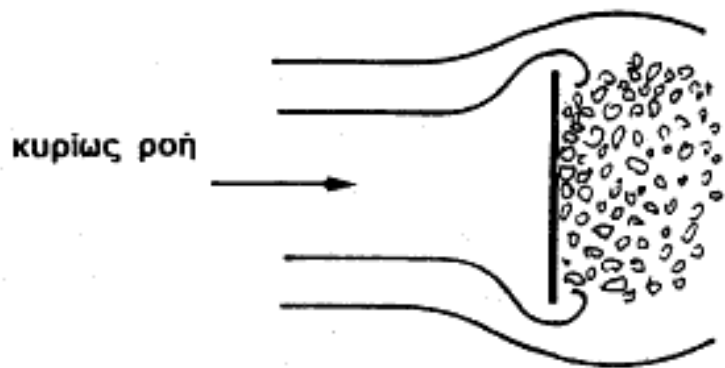
Σχήμα 1.14 Ανάπτυξης της οριακής στοιβάδος επί επιπέδου στερεάς επιφάνειας. Κατανομή του συντελεστού δυναμικής αντίστασης ως συνάρτησης του αριθμού Reynolds



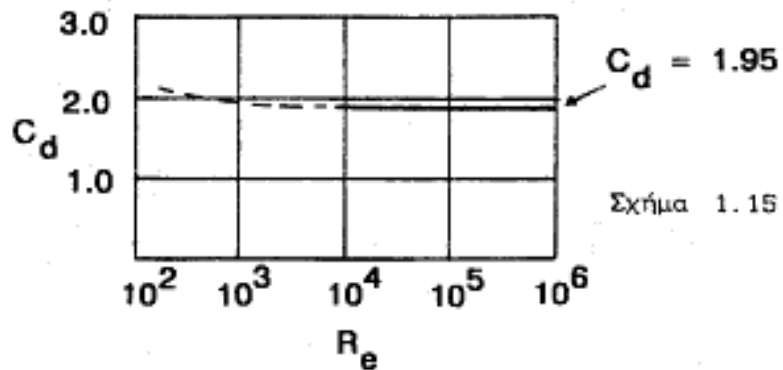
# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## Παράδειγμα 2.

Ροή κάθετη επί επίπεδης επιφάνειας:



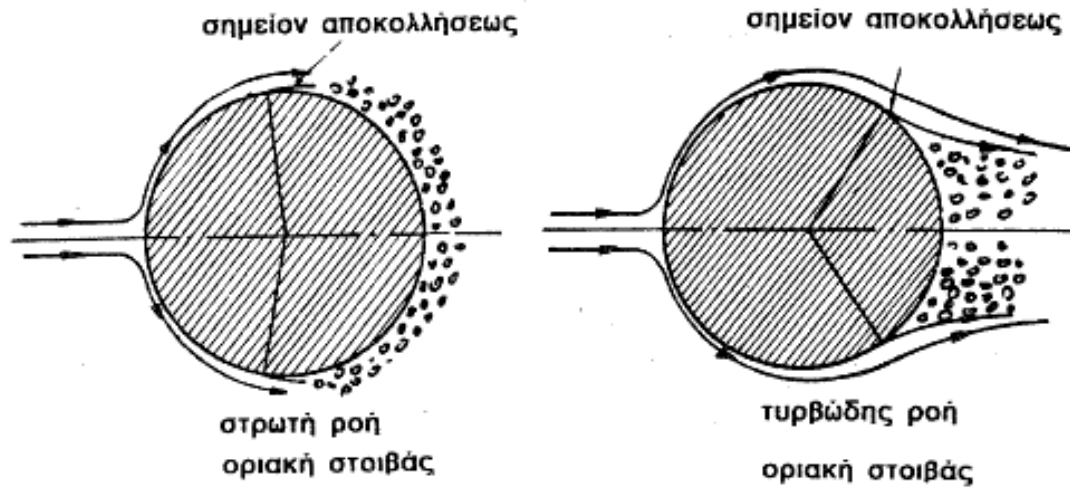
επίπεδη επιφάνεια απείρου μήκους



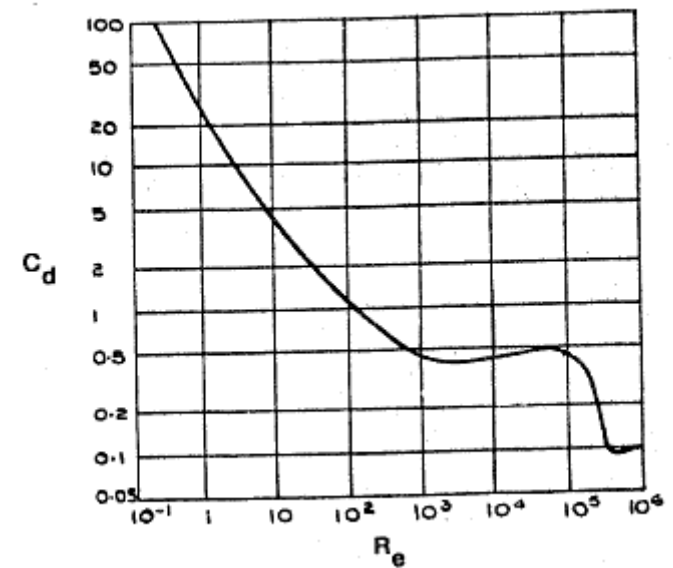
Σχήμα 1.15 Σχηματισμός ροής και κατανομή του συντελεστή δυναμικής αντίστασης εις την περίπτωση ροής καθέτου προς επίπεδον στερεάν επιφάνειαν.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## Παράδειγμα 3. Ροή γύρω από σφαίρα:



Σχήμα 1.16 Διάγραμμα ροής περίε σφαίρας διά τας περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής

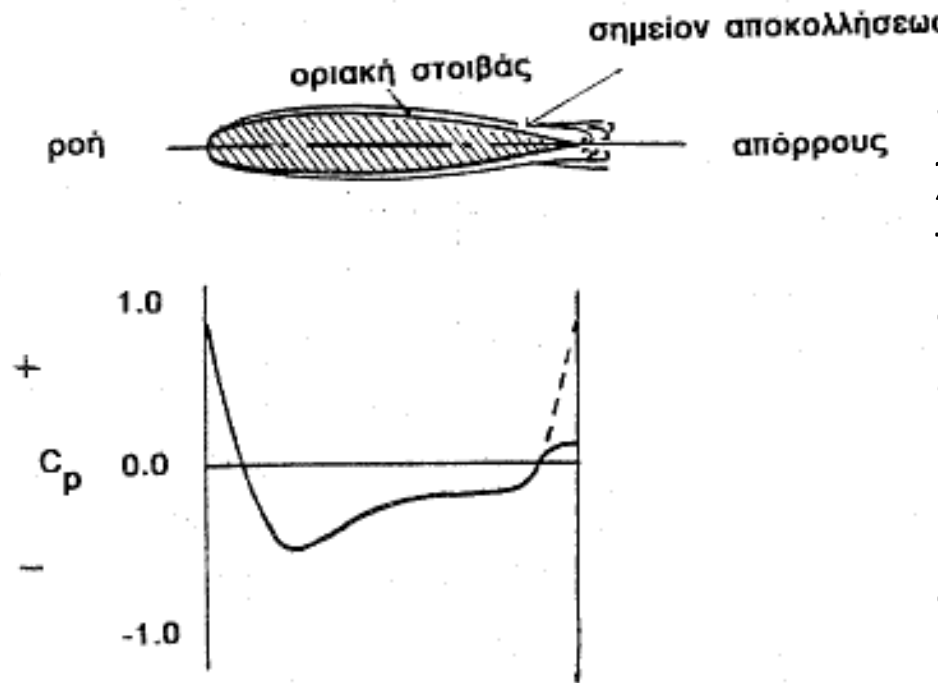


Σχήμα 1.17 Κατανομή του συντελεστού δυναμικής αντιστάσεως ως συνάρτησις του αριθμού Reynolds εις την περίπτωσιν ροής περίε σφαίρας

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## Παράδειγμα 4.

**Ροή γύρω από συμμετρική διατομή πτερυγίου με κύριο άξονα παράλληλα προς τη ροή:**



Καθώς η ροή προσεγγίζει το εμπρόσθιο άκρο υποχρεούται να χωριστεί σε 2 τμήματα. Σε κάθε τμήμα, η ροή επιταχύνεται μέχρι το σημείο μέγιστου πάχους της διατομής.

Επί του εμπρόσθιου άκρου υπάρχει σημείο, το σημείο στασιμότητας του ρευστού, όπου η ροική γραμμή είναι κάθετη του κορμού του πτερυγίου.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## Παράδειγμα 4.

**Ροή γύρω από συμμετρική διατομή πτερυγίου με κύριο άξονα παράλληλα προς τη ροή:**

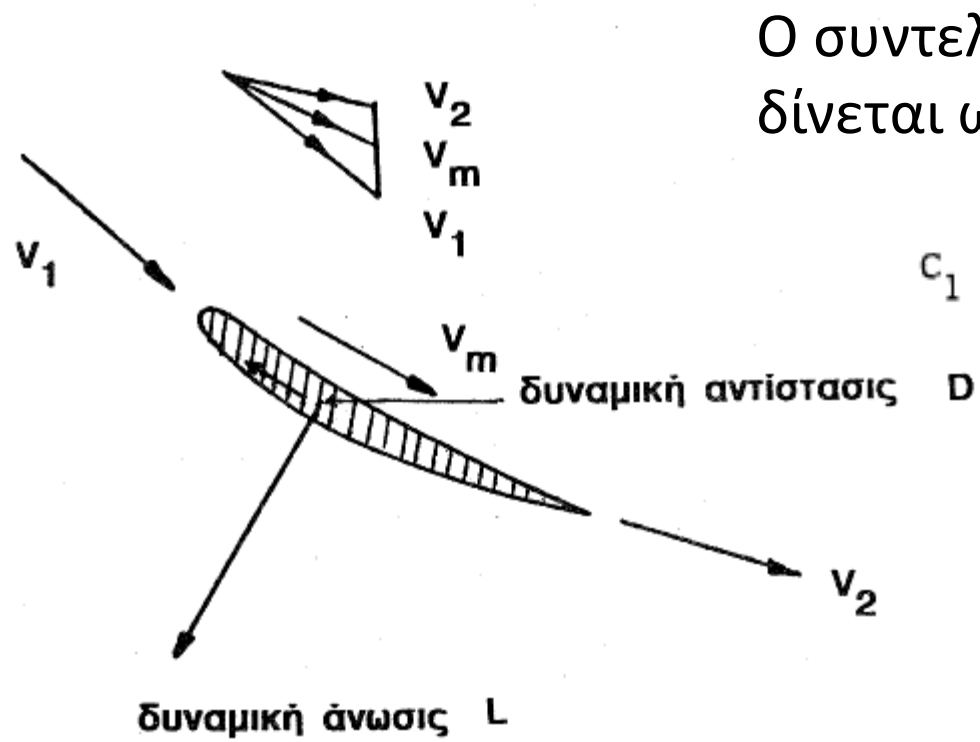
Η μεταβολή της ταχύτητας προκαλεί μεταβολή της στατικής πίεσης. Ο συντελεστής πίεσης  $C_p$  δίνεται ως

$$C_p = \frac{\frac{p}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g}}{(u_1^2/2g)} \quad (1.22)$$

Όπου  $p$  η πίεση επί του πτερυγίου και ο δείκτης 1 να δηλώνει τις αδιατάρακτες τιμές των φυσικών ποσοτήτων ροής.

Στην περίπτωση που μεταβληθεί η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού επί του πτερυγίου, η διαφορά των πιέσεων μεταξύ των 2 πλευρών της διατομής δημιουργεί μια δύναμη  $L$  (N), η οποία ονομάζεται δυναμική άνωση και δρα προς τα πάνω.

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ



Ο συντελεστής δυναμικής άνωσις  $C_1$  δίνεται ως:

$$C_1 = \frac{L}{A \gamma (u^2/2g)} \quad (1.23)$$

Σχήμα 1.20 Δυναμική άνωσις και αντίστασις ροής επί πτερυγίου

## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Παράδειγμα : Εν επίπεδον σώμα διαστάσεων  $0.4 \times 0.15$  (m x m) κινείται με ταχύτητα  $5.6$  m/s και υπό γωνία  $8^\circ.0$ , ιδέ Σχήμα 1.21, εντός δεξαμενής ύδατος. Εάν ο συντελεστής αντιστάσεως  $C_d$  είναι  $0.21$  και ο συντελεστής δυναμικής ανώσεως  $C_l$  είναι  $0.92$  να καθορισθούν α) η συνισταμένη των ασκουμένων υπό του ύδατος δυνάμεων επί του επιπέδου σώματος β) η δύναμις τριβής της ροής και γ) η απαιτούμενη ισχύς προς διατήρησιν της κινήσεως του σώματος. (Η πυκνότης του ύδατος να ληφθή ίση με  $1000.0$  Kg/m<sup>3</sup> και η επιτάχυνσις της βαρύτητος ίση με  $9.81$  m/s<sup>2</sup>.)

# 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Λύσις : α) Η δύναμη  $D$  της αντιστάσεως εις την ροήν είναι,

$$D = C_d A \gamma (u^2/2g) = 0.21 \times (0.4 \times 0.15) \times 9810.0 \times (5.6)^2 / (2.0 \times 9.81)$$

$$= 197.568 \text{ N}$$

Η δυναμική άνωσις  $L$  είναι,

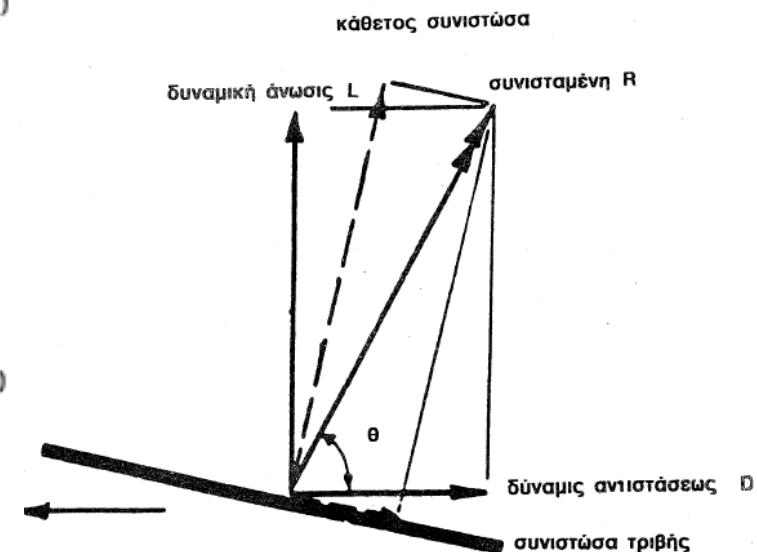
$$L = C_l A \gamma (u^2/2g) = 0.92 \times (0.4 \times 0.15) \times 9810.0 \times (5.6)^2 / (2.0 \times 9.81)$$

$$= 865.536 \text{ N}$$

Εκ του Σχήματος 1.21, η συνισταμένη δύναμη  $R$  είναι,

$$R = (D^2 + L^2)^{1/2} = (197.568^2 + 865.536^2)^{1/2} = 887.798 \text{ N και δρα επί του επιπέδου σώματος κατά γωνίαν,}$$

$$\epsilon\phi\theta = L/D = 865.536/197.568 \quad \text{άρα, } \theta = \epsilon\phi^{-1}(4.3809) = 77^\circ 9'$$



## 1.3 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

β) Η δύναμις της τριβής της ροής επί της επιπέδου επιφάνειας είναι ίση με  $R \sin(\theta + \theta^{\circ}.0) = 887.798 \times \sin(77^{\circ} 9' + \theta^{\circ}.0) = 75.188 \text{ N}$ .

γ) Η απαιτούμενη ισχύς προς διατήρησην της κινήσεως του σώματος δίδεται εκ της σχέσεως,  $\text{Ισχύς} = (\text{δύναμις εις την διεύθυνσιν κινήσεως} \times \text{ταχύτηταν}) = (197.568 \times 5.6) = 1106.38 \text{ W} = 1.1064 \text{ KW}$ .



***Ευχαριστώ για την προσοχή σας!***