

## Υδραυλικές Μηχανές και Ενέργεια

- Διάλεξη 11 - Σπηλαίωση
- Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως
  - Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Σκουληκάρης Χαράλαμπος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχ. Η/Υ, MSc,

PhD

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

# Ανασκόπηση 10<sup>ου</sup> μαθήματος

- *Υδροστροβίλοι μικτής ροής, Κύρια μέρη υδροστροβίλου Francis, Βασικές εξισώσεις βαθμίδος μικτής ροής, Σπειροειδές κέλυφος, Αγωγοί φυγής, Ασκήσεις*

# Περιεχόμενα 11<sup>ου</sup> μαθήματος

A/A	Τρόπος διδασκαλίας	Μάθημα	Περιγραφή	Ώρες
10	Διάλεξη	Υδροστροβίλοι αντιδράσεως	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ασκήσεις υδροστροβίλων αξονικής ροής</li><li>- Υδροστροβίλοι μικτής ροής, Κύρια μέρη υδροστροβίλου Francis, Βασικές εξισώσεις βαθμίδος μικτής ροής, Σπειροειδές κέλυφος, Αγωγοί φυγής</li></ul> Ασκήσεις	3
11	Διάλεξη	Υδροστροβίλοι αντιδράσεως	<ul style="list-style-type: none"><li>- Σηλαιώση, Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως, Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως</li><li>- Ασκήσεις</li></ul>	3

# Συγγράμματα/Εκπαιδευτικό υλικό

## ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΠΡΩΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Υπό  
Ιωάννου Βασιλείου Σούλη  
Αναπληρωτού Καθηγητού  
Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης



ΞΑΝΘΗ

εκδόσεις - ΑΪΒΑΖΗΣ - Θεσσαλονίκη

## ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΤΡΙΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΛΥΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Υπό  
Ιωάννου Βασιλείου Σούλη  
Αναπληρωτού Καθηγητού  
Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης



ΞΑΝΘΗ 2007

εκδόσεις: ΑΪΒΑΖΗΣ Θεσσαλονίκη

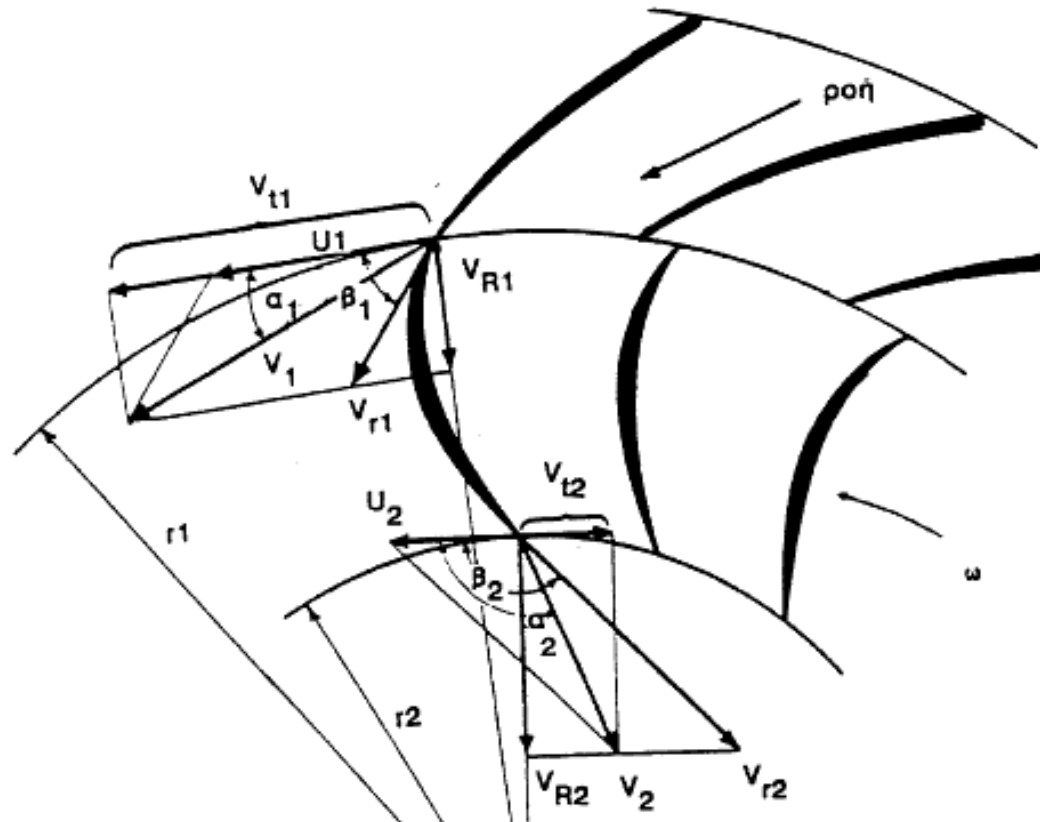
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως**

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### Πρόβλημα 3.1

Το καθαρόν ύψος πτώσεως ενός υδροστροβίλου τύπου Francis είναι 75.5 m, η προσερχομένη εις τον δρομέα παροχή είναι  $18.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , ο δε συντελεστής ογκομετρικής αποδόσεως είναι 97.0 %. Η στροφαί του δρομέως είναι 450.0 ανά λεπτόν, η εξωτερική διάμετρος του δρομέως είναι 1.9 m και η εσωτερική 1.3 m, ενώ το εμβαδόν της επιφανείας του χώρου εισόδου ροής καθέτου προς την ταχύτητα  $V_1$  είναι  $1.2 \text{ m}^2$ . Η γωνία  $\alpha_1$  η σχηματιζομένη μεταξύ της απολύτου ταχύτητος εις την είσοδον και της εφαπτομενικής διευθύνσεως είναι  $65.0^\circ$ , ενώ η αντίστοιχος γωνία της εξόδου εκ των πτερυγίων του δρομέως  $\alpha_2$  είναι  $110.0^\circ$ . Να γίνει η παραδοχή ότι η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητος εις την είσοδον του δρομέως ισούται προς την αντίστοιχον εξωτερικήν. Ζητείται να υπολογισθούν: α) η αναπτυσσομένη υπό του δρομέως ισχύς, β) η στροφορμή του υδροστροβίλου και γ) η απόδοσις λειτουργίας του υδροστροβίλου.

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως



Σχήμα 9 Τρίγωνα λειτουργίας υδροστροβίλου αντιδράσεως ακτινικής ροής

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### Λύσις

α) Εις το Σχήμα 9 δεικνύονται τα τρίγωνα λειτουργίας διά τον υδροστροβίλον τύπου Francis. Η αναπτυσσομένη υπό του δρομέως ισχύς, ιδέ εξίσωσιν 3.80, είναι,

$$I_R = \rho Q (V_1 \sigma \nu \alpha_1 r_1 - V_2 \sigma \nu \alpha_2 r_2) \omega$$

Η πραγματική παροχή η χρησιμοποιούμενη υπό του δρομέως είναι το 97.0% της διαθεσίμου προς παραγωγήν ενεργείας παροχής, είναι,

$$Q = 0.97 \times 18.9 = 18.333 \text{ m}^3/\text{s}$$

Η απόλυτος ταχύτης εισόδου είναι,

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{18.333}{1.2} = 15.28 \text{ m/s}$$

ενώ η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητος εισόδου είναι,

$$V_{R1} = V_1 \eta \mu \alpha_1 = 15.28 \times \eta \mu 65.0 = 13.848 \text{ m/s}$$

Εκ της εκφωνήσεως θα είναι,

$$V_{R2} = V_{R1} = 13.848 \text{ m/s}$$



## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

Εκ του τριγώνου των ταχυτήτων εξόδου θα είναι,

$$V_2 = \frac{V_{R2}}{\eta\mu(180.0 - 110.0)} = \frac{13.848}{\eta\mu70.0} = 14.736 \text{ m/s}$$

Η γωνιακή ταχύτης είναι,

$$\omega = \frac{2.0 \pi \text{ N}}{60.0} = \frac{2.0 \times 3.14 \times 450.0}{60.0} = 47.1 \text{ ακτίνια ανά δευτερόλεπτον}$$

Επομένως, η αναπτυσσομένη υπό του δρομέως ισχύς θα είναι,

$$\begin{aligned} I_R &= 1000.0 \times 18.333 \times (15.28 \times \sigma\upsilon\nu65.0 - 14.736 \times \sigma\upsilon\nu110.0) \times 47.1 \\ &= 9928011.2 \text{ W} = 9928.0 \text{ KW} \end{aligned}$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

β) Η στροφορμή του υδροστροβίλου, ιδέ εξίσωσιν 3.76, θα είναι,

$$T = \rho Q (V_{t1} r_1 - V_{t2} r_2)$$

ένθα,

$$V_{t1} = V_1 \sigma \nu \alpha_1 = 15.28 \times \sigma \nu \nu 65.0 = 6.457 \text{ m/s} \quad \text{και}$$

$$V_{t2} = V_2 \sigma \nu \alpha_2 = 14.736 \times \sigma \nu \nu 110.0 = -5.04 \text{ m/s} \quad \text{άρα,}$$

$$\begin{aligned} T &= 1000.0 \times 18.333 \times [6.457 \times 1.9 - (-5.04) \times 1.3] = 345032.8 \text{ N m} \\ &= 345.0 \text{ KN m} \end{aligned}$$

γ) Η απόδοσις λειτουργίας του υδροστροβίλου είναι ο λόγος της αποδιδομένης ισχύος προς την διαθέσιμον ισχύν. Είναι,

$$\eta = \frac{I_R}{\rho g Q H_n} = \frac{9928011.2}{1000.0 \times 9.81 \times 18.333 \times 75.5} = 0.731$$

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### Πρόβλημα 3.2

Ως σχεδιασμός δρομέως υδροστροβίλου Francis εννοείται ο καθορισμός των διαστάσεων του μεγέθους του δρομέως και των γωνιών των πτερυγίων αυτού. Ο σχεδιασμός γίνεται δι' υπολογισμού των κάτωθι φυσικών ποσοτήτων με την προϋπόθεσιν ότι το ύψος πτώσεως  $H_{\eta}$ , η ισχύς  $I$  η αποδιδόμενη εις την άτρακτον και η περιστροφική ταχύτης  $N$  είναι γνωσταί:

Πρόκειται, λοιπόν, να σχεδιασθή εις δρομεύς υδροστροβίλου Francis χρησιμοποιώντας τα κάτωθι δεδομένα: α) καθαρόν ύψος πτώσεως  $H_{\eta} = 48.0$  m, ισχύς επί του άξονος περιστροφής  $I = 350.0$  KW, περιστροφική ταχύτης  $N = 550.0$  στροφαί ανά λεπτόν, υδραυλική απόδοσις 0.88 και ολική απόδοσις 0.845, λόγος  $\Psi = 0.28$  και  $\nu = 0.18$ , η ταχύτης ροής σταθερά εις όλον τον χώρο ροής (είσοδος - έξοδος), διάμετρος εξόδου ίση προς το ήμισυ της διαμέτρου εισόδου, το πάχος των πτερυγίων αμελητέον, μηδενική εφαπτομενική ταχύτης εξόδου (διά μεγίστην απόδοσιν) και ροή ακτινική.

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

Λύσις

Εκ της εξισώσεως,

$$Q = \frac{I}{n \rho g H_n} \quad \text{είναι,}$$

$$Q = \frac{350000.0}{0.845 \times 1000.0 \times 9.81 \times 48.0} = 0.8796 \text{ m}^3/\text{s}$$

Εκ της εξισώσεως,

$$D_1 = \left[ \frac{Q}{\Psi (2.0 g H_n)^{1/2} C_1 \pi v} \right]^{1/2} \quad \text{είναι,}$$

$$D_1 = \left[ \frac{0.8796}{0.28 \times (2.0 \times 9.81 \times 48.0)^{1/2} \times 1.0 \times 3.14 \times 0.18} \right]^{1/2} = 0.4256 \text{ m}$$

και επομένως  $D_2 = 0.4256/2.0 = 0.2128 \text{ m}$ .

Εκ της εξισώσεως,

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

$B_1 = v D_1$  είναι,

$$B_1 = 0.18 \times 0.4256 = 0.0766 \text{ m}$$

ενώ εκ της εξισώσεως,

$$\frac{V_{a1}}{V_{a2}} = \frac{C_2 D_2 B_2}{C_1 D_1 B_1}$$

θα είναι, ( $V_{a1} = V_{a2}$  και  $C_1 = C_2$  εκ της εκφωνήσεως του προβλήματος),

$$B_2 = \frac{D_1 B_1}{D_2} = \frac{0.4256 \times 0.0766}{0.2128} = 0.1532 \text{ m}$$

Επίσης,

$$U_1 = \frac{\pi D_1 N}{60.0} = \frac{3.14 \times 0.4256 \times 550.0}{60.0} = 12.25 \text{ m/s}$$

$$U_2 = 12.25/2.0 = 6.125 \text{ m.}$$

Εκ της εξισώσεως,

$$V_{t1} = \frac{n_h g H_n}{U_1} \quad \text{είναι,}$$

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

$$V_{t1} = \frac{0.88 \times 9.81 \times 48.0}{12.25} = 33.826 \text{ m/s}$$

Επειδή  $V_{a1} = \Psi (2.0 g H_n)^{1/2}$  τότε θα είναι,

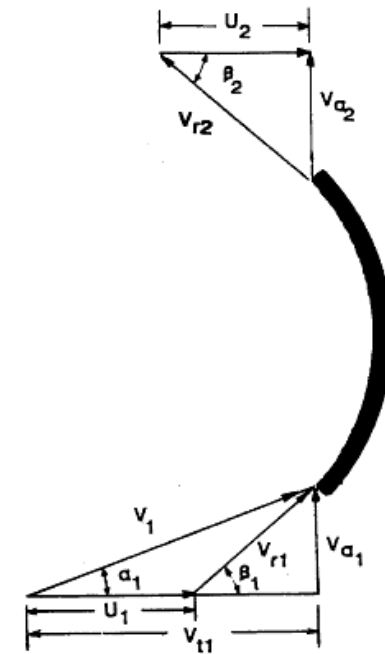
$$\epsilon\phi\beta_1 = \frac{V_{a1}}{V_{t1} - U_1} = \frac{0.28 \times (2.0 \times 9.81 \times 48.0)^{1/2}}{33.826 - 12.25} = 0.3982 \text{ ή } \beta_1 = 21.71^\circ$$

και

$$\epsilon\phi\alpha_1 = \frac{V_{a1}}{V_{t1}} = \frac{0.28 \times (2.0 \times 9.81 \times 48.0)^{1/2}}{33.826} = 0.254 \text{ ή } \alpha_1 = 14.253^\circ$$

διό δε την έξοδο θα είναι,

$$\epsilon\phi\beta_2 = \frac{V_{a2}}{U_2} = \frac{0.28 \times (2.0 \times 9.81 \times 48.0)^{1/2}}{6.125} = 1.403 \text{ ή } \beta_2 = 54.52^\circ.$$



Σχήμα 10 Τρίγωνα ταχυτήτων δρομέως μικτής ροής

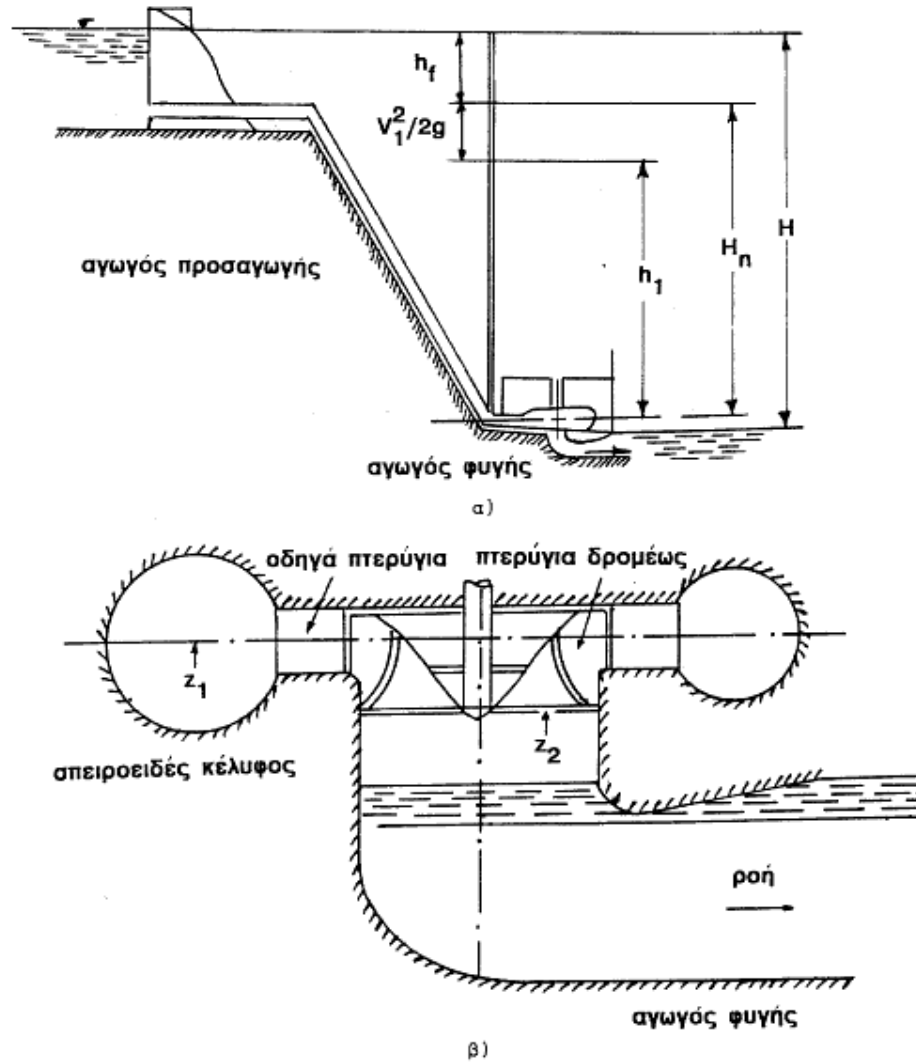
## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### Πρόβλημα 3.3

Υδροηλεκτρικού έργου ο υδροστρόβιλος είναι τύπου Francis. Ο αγωγός φυγής είναι τύπου κολούρου κώνου με ταχύτητας εισόδου μεν προς αυτόν ίσην προς  $7.6 \text{ m/s}$  και εξόδου δε απ' αυτόν ίσην προς  $2.1 \text{ m/s}$  ενώ η είσοδος είναι τοποθετημένη  $1.2 \text{ m}$  κάτωθεν της κεντρικής γραμμής του σπειροειδούς κελύφους και έχει  $-2.2 \text{ m}$  πιεζομετρικόν φορτίον ενώ ευρίσκεται εις απόστασιν  $3.5 \text{ m}$  άνωθεν της ελευθέρας επιφανείας της διάρρυγος απαγωγής των υδάτων εκ του υδροστροβίλου. Ούτε εις την είσοδον αλλά ούτε και εις την έξοδον του αγωγού φυγής υπάρχουν εφαπτομενικά συνιστώσαι της ταχύτητος ενώ αι διαρροαί θεωρούνται ότι είναι ασήμανται. Η παροχή υπό την οποίαν λειτουργεί η μονάς είναι  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  με υδραυλικήν απόδοσιν ίσην προς  $0.89$  και ολικήν απόδοσιν ίσην προς  $0.835$ . Το ολικόν φορτίον εις το κέντρον της εισόδου του σπειροειδούς κελύφους είναι  $45.5 \text{ m}$  και η ταχύτης ίση προς  $7.5 \text{ m/s}$ . Ζητείται να υπολογισθούν :

- το ολικόν φορτίον υπό το οποίον λειτουργεί ο υδροστρόβιλος,
- η αποδιδομένη ισχύς,
- αι απώλειαι φορτίου εντός του υδροστροβίλου,
- αι απώλειαι φορτίου εντός του αγωγού φυγής και
- αι μηχανικαί απώλειαι του υδροστροβίλου.

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως



Σχήμα 11 α) Υδροηλεκτρική εγκατάσταση και β) υδροστρόβιλος Francis



## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### Λύσις

α) Το ολικόν φορτίον υπό το οποίον λειτουργεί ο υδροστροβίλος υπολογίζεται με ύψος αναφοράς την ελευθέραν επιφάνειαν του ύδατος εις την διώρυγαν απαγωγής, ιδέ Σχήμα 11. Το ολικόν (καθαρόν) φορτίον του υδροστροβίλου είναι,

$$H_n = \frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

ένθα,  $\frac{p_1}{\rho g}$  το πιεζομετρικόν φορτίον εις την είσοδον του σπειροειδούς κελύφους του υδροστροβίλου, το οποίον συμπίπτει με το καθαρόν φορτίον του υδροστροβίλου εις την θέσιν ταύτην και ισούται εκ της εκφωνήσεως του προβλήματος με 45.5 m,  $z_1$  είναι η απόστασις του κέντρου της εισόδου του σπειροειδούς κελύφους εκ της ελευθέρας επιφανείας του ύδατος της διώρυγος απαγωγής και ισούται με  $1.2 + 3.5 = 4.7$  m, και  $V_1$  είναι η ταχύτης του ύδατος εις την είσοδον του σπειροειδούς κελύφους και ισούται προς 7.5 m/s. Επομένως,

$$H_n = 45.5 + 4.7 + \frac{7.5^2}{2.0 \times 9.81} = 53.067 \text{ m}$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

β) Η υπό του υδροστροβίλου αποδιδόμενη ισχύς είναι,

$$I_R = \eta \rho g Q H_n = 0.835 \times 1000.0 \times 9.81 \times 3.5 \times 53.067 = 1521416.3 \text{ W} \\ = 1521.4 \text{ KW} = 1.521 \text{ MW}$$

γ) Οι απώλειαι φορτίου εντός του υδροστροβίλου υπολογίζονται εκ της ενεργειακής εξισώσεως του Bernoulli. Είναι,

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = H_R + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f \text{ στροβ}}$$

ένθα  $h_{f \text{ στροβ}}$  αι απώλειαι φορτίου εντός του υδροστροβίλου και  $H_R$  το υπό του υδροστροβίλου αναπτυσσόμενον φορτίον το οποίον ισούται προς 0.89 φοράς το καθαρόν φορτίον (= 53.067 m). Είναι,

$$53.067 = 0.89 \times 53.067 - 2.2 + 3.5 + \frac{7.6^2}{2.0 \times 9.81} + h_{f \text{ στροβ}}$$

άρα,

$$h_{f \text{ στροβ}} = 1.593 \text{ m}$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

δ) Οι απώλειαι φορτίου  $h_{f_{αφ}}$  εντός του αγωγού φυγής, ιδέ Σχήμα 8, υπολογίζονται επίσης εκ της ενεργειακής εξισώσεως του Bernoulli. Είναι,

$$\frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_3}{\rho g} + z_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{f_{αφ}}$$

$$-2.2 + 3.5 + \frac{7.6^2}{2.0 \times 9.81} = 0.0 + 0.0 + \frac{2.1^2}{2.0 \times 9.81} + h_{f_{αφ}}$$

άρα,

$$h_{f_{αφ}} = 4.019 \text{ m}$$

ε) Οι μηχανικαί απώλειαι  $n_m$  του υδροστροβίλου υπολογίζονται εκ της εξισώσεως,

$$n = n_m n_h n_v$$

ένθα  $n$  ( $= 0.835$ ) η ολική απόδοσις,  $n_h$  ( $= 0.89$ ) η υδραυλική απόδοσις και  $n_v$  ( $= 1.0$ ) η ογκομετρική απόδοσις. Είναι,

$$n_m = \frac{0.835}{0.89 \times 1.0} = 0.938$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σπηλαίωση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Με τον όρο σπηλαίωση εννοείται η εμφάνιση θυλάκων ατμού του νερού η οποία προέρχεται λόγω εξάτμισης του νερού.

Η σπηλαίωση είναι ένα φαινόμενο ανάλογο της ζέσεως (βρασμού) του με τη μόνη διαφορά ότι το φαινόμενο της ζέσεως εμφανίζεται στους  $100^{\circ}\text{C}$ , υπό κανονική πίεση, ενώ στην περίπτωση της ροής δια μέσω των υδραυλικών στροβιλομηχανών, η θερμοκρασία του νερού είναι σχεδόν ίδια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά η πίεση είναι αισθητά μικρότερη της ατμοσφαιρικής.

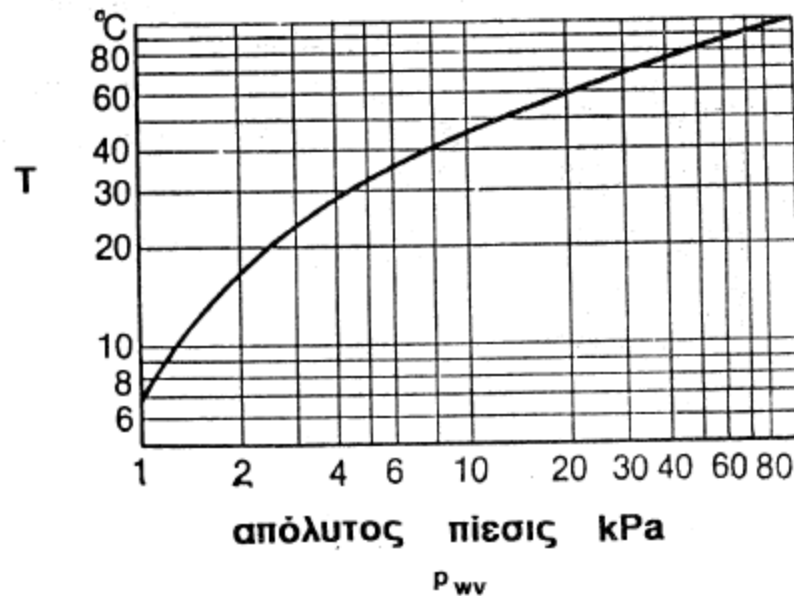
Ειδικότερα με τον όρο σπηλαίωση γίνεται η θεώρηση ότι το νερό όχι μόνο εξατμίζεται, αλλά σε γειτονικές θέσεις είναι δυνατόν να υπάρξει υγροποίηση τμημάτων της ποσότητας του νερού που έχει ατμοποιηθεί.

Όταν η πίεση είναι μικρότερη της κρίσιμης πίεσης των κεκορεσμένων ατμών τότε είναι δυνατό να αρχίσει η μετατροπή του ύδατος σε αέρια κατάσταση (ατμός). Όταν σε διπλανές θέσεις η πίεση είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης πίεσης τότε τα τμήματα των ατμοποιημένων μερών επανέρχονται βιαίως (καταστρέφονται) στην υγρή κατάσταση.

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σηλαίωση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Στο σχήμα 3.37 παρουσιάζεται η μεταβολή της κεκορεσμένης τάσης των ατμών ύδατος με τη θερμοκρασία.

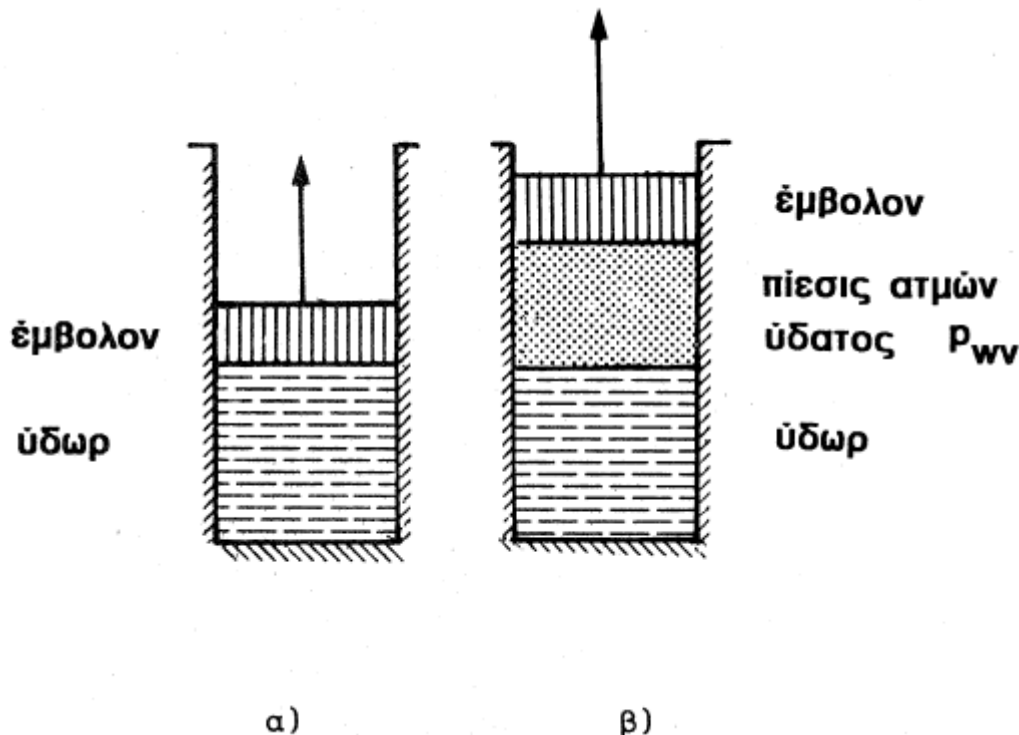


Σε ύψος 2200masl η ατμοσφαιρική πίεση είναι περίπου 80.0KPa (100KPa = 1.0bar) και το καθαρό νερό ζέει στους 93.0 C. Εάν η πίεση λάβει την τιμή των 2.0 KPa, τότε το καθαρό νερό θα αρχίσει να ζέει στους 20.0 C.

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σηλαίωση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Στο σχήμα 3.38 παρουσιάζεται κύλινδρος που περιέχει νερό.



Επί της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εφαρμόζεται αεροστεγώς η επιφάνεια του εμβόλου, επομένως δεν υπάρχουν φυσαλίδες ύδατος (Σχήμα 3.38α).

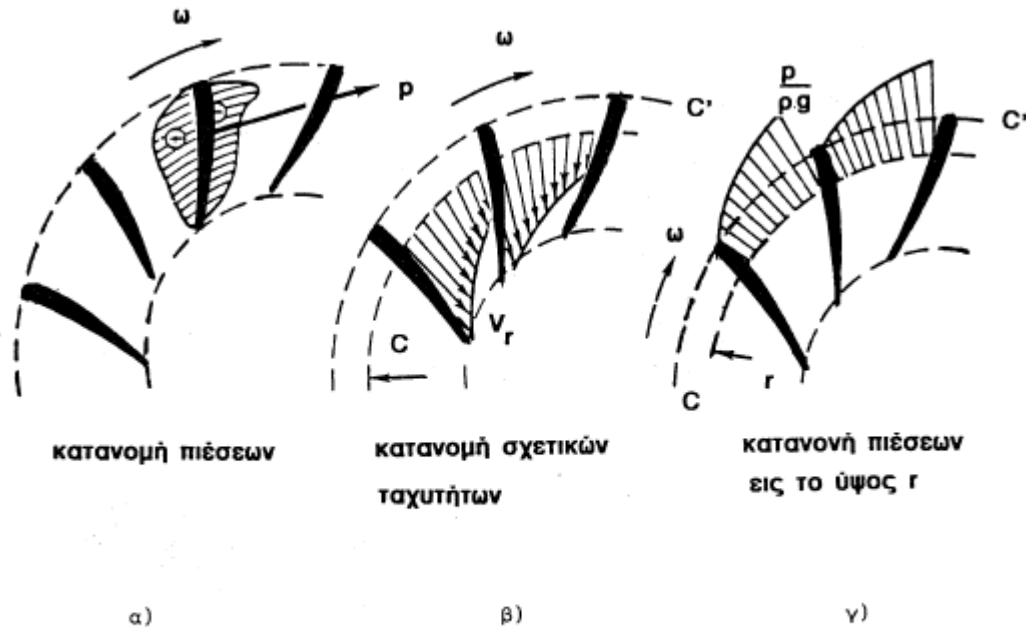
Κινώντας προς τα πάνω το έμβολο και ξεπερνώντας την αρχική δύναμη αντίδρασης, δημιουργείται χώρος μεταξύ της επιφάνειας του εμβόλου και της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (Σχήμα 3.38β). Ο χώρος αυτός είναι πλέον συμπληρωμένος με κεκορεσμένους ατμούς ύδατος για συγκεκριμένη πίεση  $p_{wv}/\rho g$  (saturated water vapour pressure).

Η πίεση στο χώρο αυτό, ανεξάρτητα αν το έμβολο κινηθεί περισσότερο προς τα πάνω ή κάτω ορίζεται ως  $p_{wv}/\rho g$ .

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σηλαίωση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Στο σχήμα 3.40 παρουσιάζεται η μεταβολή των πιέσεων γύρω από τυπικό πτερύγιο υδροστροβίλου αξονικής ροής. Παρατηρούνται τα εξής:



- Η πίεση επί της κυρτής επιφάνειας είναι μικρότερη της πίεσης που ασκείται επί της κοίλης επιφάνειας, γεγονός το οποίο συνεπάγεται την ανάπτυξη ροπής.
- Μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα  $V_r$  αναπτύσσεται επί της κυρτής επιφάνειας.
- Επί της γραμμής C-C' (Σχήμα 3.40γ) δείχνεται η κατανομή της πίεσης  $p/\rho g$ .

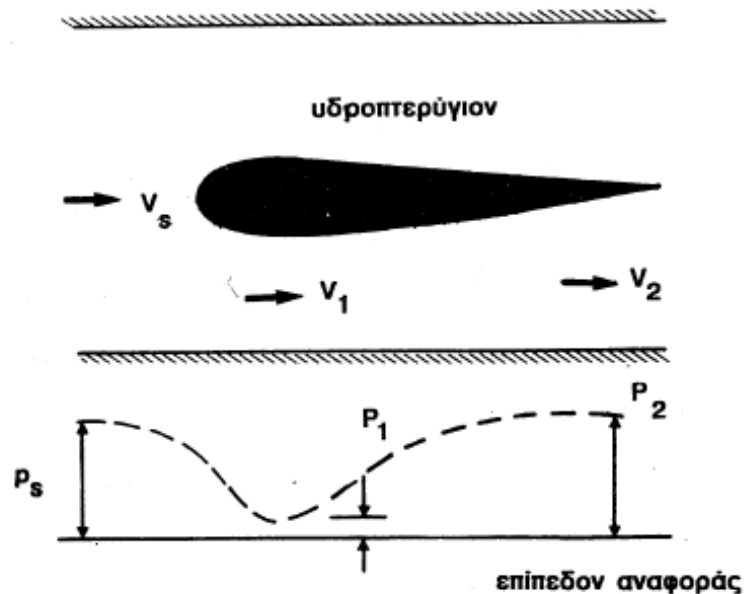
Σχήμα 3.40 Εις τον μεταξύ των πτερυγίων ακτινικής ροής χώρο υπάρχει έντονος διαφοροποίησης των φυσικών ποσοτήτων ροής

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σπηλαιώση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η πίεση μειώνεται σημαντικά επί των κυρτών επιφανειών των πτερυγίων. Η επιφάνειες αυτές ονομάζονται και επιφάνειες αναρροφήσεως. Όταν η μείωση αυτή της πίεσης είναι σημαντική τότε είναι δυνατό να εμφανιστεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης το οποίο δεν είναι καθόλου επιθυμητό.

Εάν εντός του χώρου ροής τοποθετηθεί ένα υδροπτερύγιο, τότε η μεταβολή του διαθέσιμου χώρου ροής (Σχήμα 3.42) θα αποφέρει αλλαγή στην τιμή της ταχύτητας και πτώση της αντίστοιχης τιμής της πίεσης.



Σχήμα 3.42 Κατανομή πιέσεων περίεξ συμμετρικού υδροπτερυγίου διά την μελέτην του φαινομένου της σπηλαιώσεως



## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σπηλαίωση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Εάν δηλώσουμε το μειωμένο χώρο ροής με το δείκτη  $s$ , τότε λόγω της εφαρμογής της εξίσωσης του Bernoulli θα είναι:

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (3.113)$$

Εάν θεωρηθεί ότι η ταχύτητα  $V_s$  είναι μικρή (μηδενική) και με την προϋπόθεση ότι θα εμφανιστεί σπηλαίωση όταν  $p_1/\rho g = p_{wv}/\rho g$  τότε:

$$\frac{\frac{p_s}{\rho g} - \frac{p_{wv}}{\rho g}}{(V_1^2/2g)} = 1.0 \quad (3.114)$$

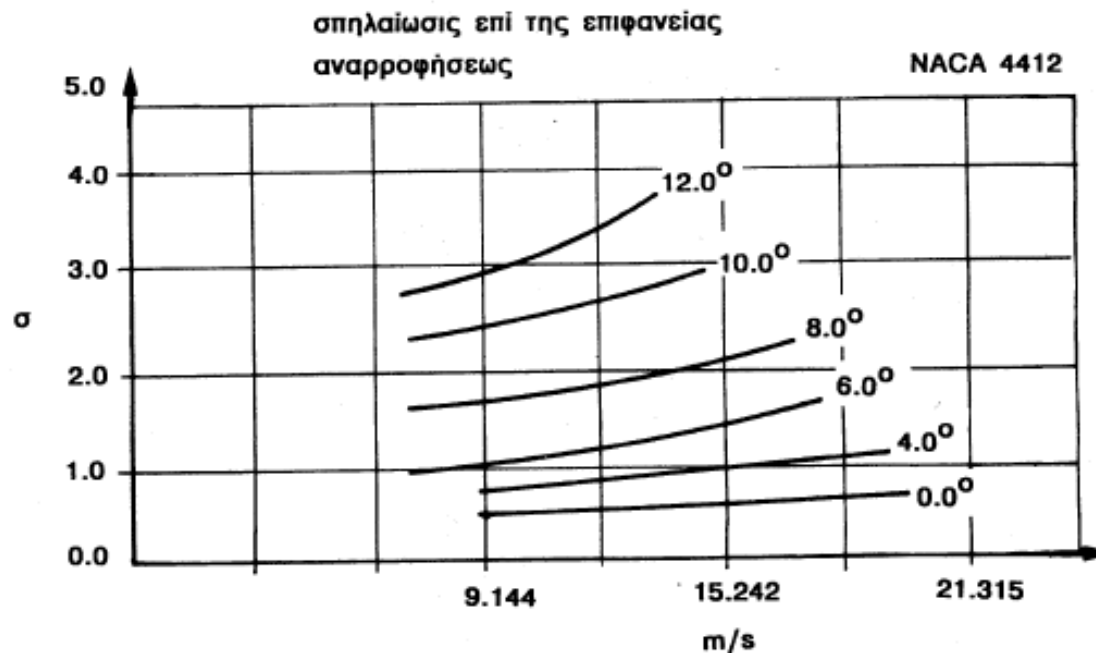
Ο **αριθμός Thoma  $\sigma$**  ή συντελεστής σπηλαίωσης ορίζεται το αριστερό μέρος της παραπάνω εξίσωσης και έχει ως ιδεατή τιμή την τιμή 1.0:

$$\sigma = \frac{\frac{p_s}{\rho g} - \frac{p_{wv}}{\rho g}}{(V_1^2/2g)} \quad (3.115)$$

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σπηλαιώση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Από την κατανομή της πίεσης γύρω από υδροτομές μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής σπηλαιώσης αυξάνει όσο μεγαλώνει η γωνία προσβολής του ύδατος επί του πτερυγίου (Σχήμα 3.44).

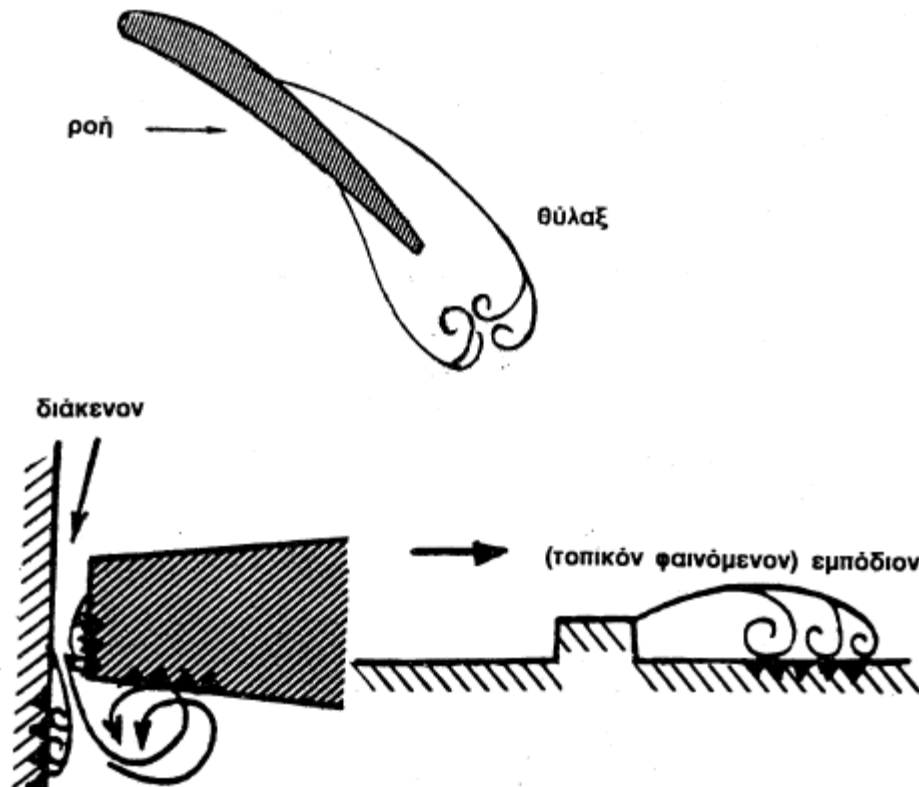


Σχήμα 3.44 Επίδρασις της γωνίας προσβολής και της ταχύτητος επί του αριθμού Thoma περίξ υδροπτερυγίου NACA 4412

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σπηλαιώση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Οι χαρακτηριστικοί 3 τύποι σπηλαιώσης που συναντώνται σε υδραυλικές στροβιλομηχανές είναι οι εξής:



1. Διατομής: Η σπηλαιώση δημιουργείται όταν τα πτερύγια είναι συνεχώς εκτεθειμένα σε χαμηλή πίεση.
2. Διακένων: Στην περίπτωση αυτή το νερό μεταβάλλει έντονα την πίεσή του όταν διέρχεται από μια περιοχή σε μια άλλη. Παράδειγμα αποτελεί ο χώρος μεταξύ της κορυφής του πτερυγίου και του περιβλήματος της μηχανής.
3. Τοπικές: Αυτές δημιουργούνται όταν το νερό περάσει πάνω από τοπικές ανωμαλίες του χώρου ροής (π.χ τα κεφάλια των βιδών )

Σχήμα 3.46 Χαρακτηριστικοί τύποι σπηλαιώσεως εντός υδραυλικών στροβιλομηχανών

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.3 Σπηλαίωση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Τα αποτελέσματα της σπηλαίωσης επί των υδραυλικών στροβιλομηχανών είναι τα εξής:

- a) Με ικανή σπηλαίωση οι υδραυλικές απώλειες αυξάνουν με απωτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης λειτουργίας της μηχανής.
- b) Τα ακουστικά φαινόμενα γίνονται πλέον αισθητά και αυξάνονται οι ταλαντώσεις του υδραυλικού-μηχανικού συστήματος της υδραυλικής στροβιλομηχανής, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης λειτουργίας και τη φθορά της μηχανής.
- c) Στην περίπτωση λειτουργίας της στροβιλομηχανής ενώ έχουν αναπτυχθεί φαινόμενα σπηλαίωσης, προκαλείται φθορά και στα τοιχώματα που βρίσκονται κοντά στα πτερύγια.

Τα μέτρα τα οποία πρέπει να ληφθούν για αποφυγή του φαινομένου είναι:

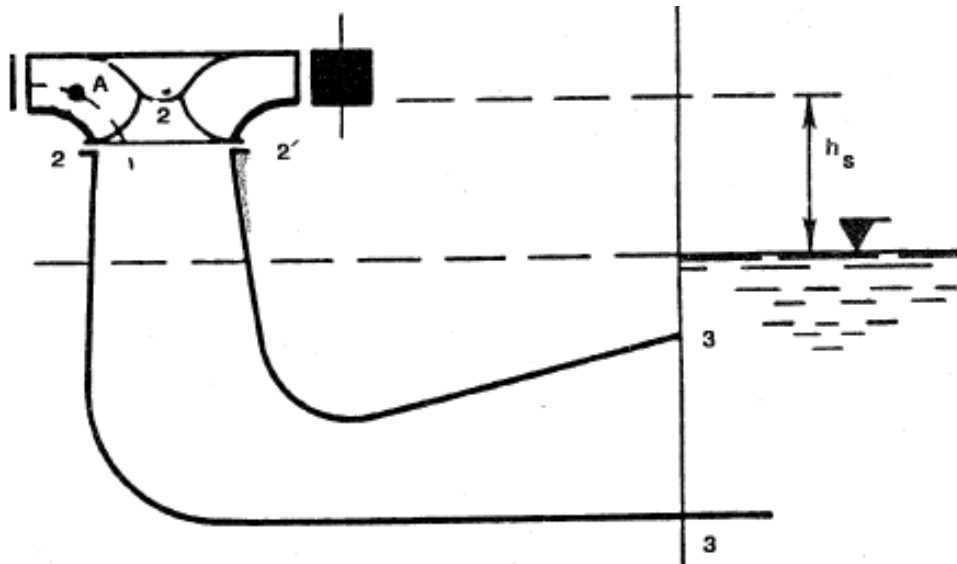
- a) Ο σχεδιασμός των αγωγών φυγής και των άλλων αγωγών θε πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπεται η πτώση της απόλυτης πίεσης σε επίπεδα μικρότερα της πίεσης των κεκορεσμένων ατμών.
- b) Λόγω της μείωσης της πίεσης και αύξησης της τιμής της ταχύτητας (εξίσωση Bernoulli) είναι αναγκαίο η τιμή της ταχύτητας να μην υπερβαίνει την τιμή ορισμένου ορίου.
- c) Η εσωτερική επένδυση των επιφανειών των υδραυλικών στροβιλομηχανών πρέπει να γίνεται με υλικά που αντιστέκονται στην εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης.

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Για να μην υπάρξει η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης θα πρέπει η πίεση  $p/\rho g$  σε κάθε σημείο του χώρου ροής να είναι μεγαλύτερη  $p_{wv}/\rho g$  (πίεση κεκορεσμένων ατμών ύδατος) σε κάθε χρονικό βήμα λειτουργίας, δηλαδή  $p/\rho g > p_{wv}/\rho g$ .

Ας θεωρήσουμε το Σχήμα 3.48 και έστω ότι η μικρότερη απόλυτος πίεση  $p/\rho g$  εμφανίζεται στο σημείο A του δρομέα.



Σχήμα 3.48 Τοποθέτησις υδροστροβίλου αντιδράσεως

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Η πίεση στο σημείο A μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{P_A}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} - \frac{\Delta p_{A-2}}{\rho g} \quad (3.115)$$

όπου η πίεση  $p_2/\rho g$  δίνεται από την εξίσωση 3.103 και είναι η πίεση επί της διατομής 2-2' στην έξοδο της ροής από το δρομέα, και  $\Delta p_{A-2}/\rho g$  παριστά την επιπλέον πτώση πίεσης στη διατομή 2-2' ως προς το σημείο A.

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - [h_s + (\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g}) + h_1] \quad (3.103)$$

Η πίεση επομένως μπορεί να γραφτεί

$$\frac{\Delta p_{A-2}}{\rho g} = K_{A-2} \frac{v_A^2}{2g} \quad (3.116)$$

όπου  $K_{A-2}$  συντελεστής ο οποίος παραμένει σταθερός σε παρόμοιους τρόπους λειτουργίας της μηχανής. Από τις εξισώσεις 3.03, 3.15 και 3.116 προκύπτει ότι

$$\frac{P_A}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - h_s - (\alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} - h_1 + K_{A-2} \frac{v_A^2}{2g}) \quad (3.117)$$

όπου  $\alpha_2$  και  $\alpha_3$  συντελεστές διόρθωσης κινητικού ύψους στις αντίστοιχες θέσεις 2 και 3.

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Οι απώλειες μπορούν να εκφραστούν ως :

$$h_1 = \gamma_2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.118)$$

όπου  $\gamma_2$  συντελεστής απωλειών φορτίου. Είναι:

$$v_2 = \frac{k_2 Q}{A_2} \quad (3.119)$$

$$v_3 = \frac{k_3 Q}{A_3} \quad (3.120)$$

όπου  $k_2$   $k_3$  συντελεστές ανομοιομορφίας της ροής στις αντίστοιχες θέσεις 2 και 3. Η παροχή  $Q$  σε όρους μοναδιαίας παροχής δίνεται από τη σχέση:

$$Q = Q_u D^2 H_n^{1/2} \quad (3.121)$$

Ενώ τα εμβαδά  $A_2$  και  $A_3$  μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του θεωρητικού εμβαδού διατομής διαμέτρου  $D$  με αντίστοιχους συντελεστές  $\lambda_2$  και  $\lambda_3$  ως:

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

$$A_2 = \frac{\lambda_2 \pi D^2}{4.0} \quad (3.122)$$

$$A_3 = \frac{\lambda_3 \pi D^2}{4.0} \quad (3.123)$$

Τότε θα είναι:

$$v_2 = \frac{k_2 Q_u H_n^{1/2}}{(\lambda_2 \pi / 4.0)} \quad (3.124)$$

$$v_3 = \frac{k_3 Q_u H_n^{1/2}}{(\lambda_3 \pi / 4.0)} \quad (3.125)$$

Οπότε η εξίσωση 3.117 λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{p_A}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - h_s - \frac{(a_2 \frac{\lambda_2^2}{2g} - a_3 \frac{\lambda_3^2}{2g} - y_2 \frac{\lambda_2^2}{2g} + K_{A-2} \frac{\lambda_A^2}{2g}) 16.0 Q_u^2 H_n}{2 g \pi^2} \quad (3.126)$$



## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

Εάν τεθεί ως συντελεστής σπηλαίωσης  $\sigma$  η παρακάτω ποσότητα

$$\sigma = \frac{\left( a_2 \frac{\lambda_2^2}{2g} - a_3 \frac{\lambda_3^2}{2g} - y_2 \frac{\lambda_2^2}{2g} + K_{A-2} \frac{\lambda_A^2}{2g} \right) 16.0 Q_u^2}{2 g \pi^2} \quad (3.127)$$

Τότε η εξίσωση 3.126 τελικά γράφεται ως

$$\frac{P_A}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - h_s - \sigma H_n \quad (3.128)$$

Στην παραπάνω εξίσωση είναι προφανές ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει σπηλαίωση πρέπει:

$$\frac{P_a}{\rho g} - h_s - \sigma H_n > \frac{P_{wv}}{\rho g} \quad (3.129)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι δυνατό να υπολογιστεί το στατικό ύψος αναρροφήσεως  $h_s$  βάση του οποίου πρέπει να τοποθετηθεί ο υδροστρόβιλος προκειμένου να εξασφαλιστεί η απουσία σπηλαίωσης, είναι δηλαδή:

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

$$h_s < \frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_{wv}}{\rho g} - \sigma H_n \quad (3.130)$$

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η τιμή του καθαρού φορτίου πτώσεως  $H_n$  πρέπει να είναι η μέγιστη δυνατή η μέγιστη δυνατή, και πως η ατμοσφαιρική πίεση  $p_a/\rho g$  εξαρτάται άμεσα από το απόλυτο υψόμετρο της υδροδυναμικής θέσης. Η παρακάτω εξίσωση δίνει προσεγγιστικά την παραπάνω εξάρτηση:

$$\frac{P_a}{\rho g} = 10.33 - \frac{\text{υψόμετρον}}{900.0} \quad (3.131)$$

Επομένως εάν υποθεθεί ότι για θερμοκρασία νερού στους 14.0 °C είναι  $p_{wv}/\rho g = 0.3\text{m}$ , τότε η εξίσωση 3.130 γράφεται :

$$h_s < 10.03 - \frac{\text{υψόμετρον}}{900.0} - \sigma H_n \quad (3.132)$$

Για λόγους ασφαλείας από το φαινόμενο της σπηλαίωσης εισάγεται συντελεστής  $k_\lambda$  του οποίου η τιμή είναι μεταξύ 1.10 και 1.20, επομένως η εξίσωση 3.132 γίνεται:

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως

$$h_s < 10.03 - \frac{\text{υψόμετρον}}{900.0} - k_\lambda \sigma H_n \quad (3.133)$$

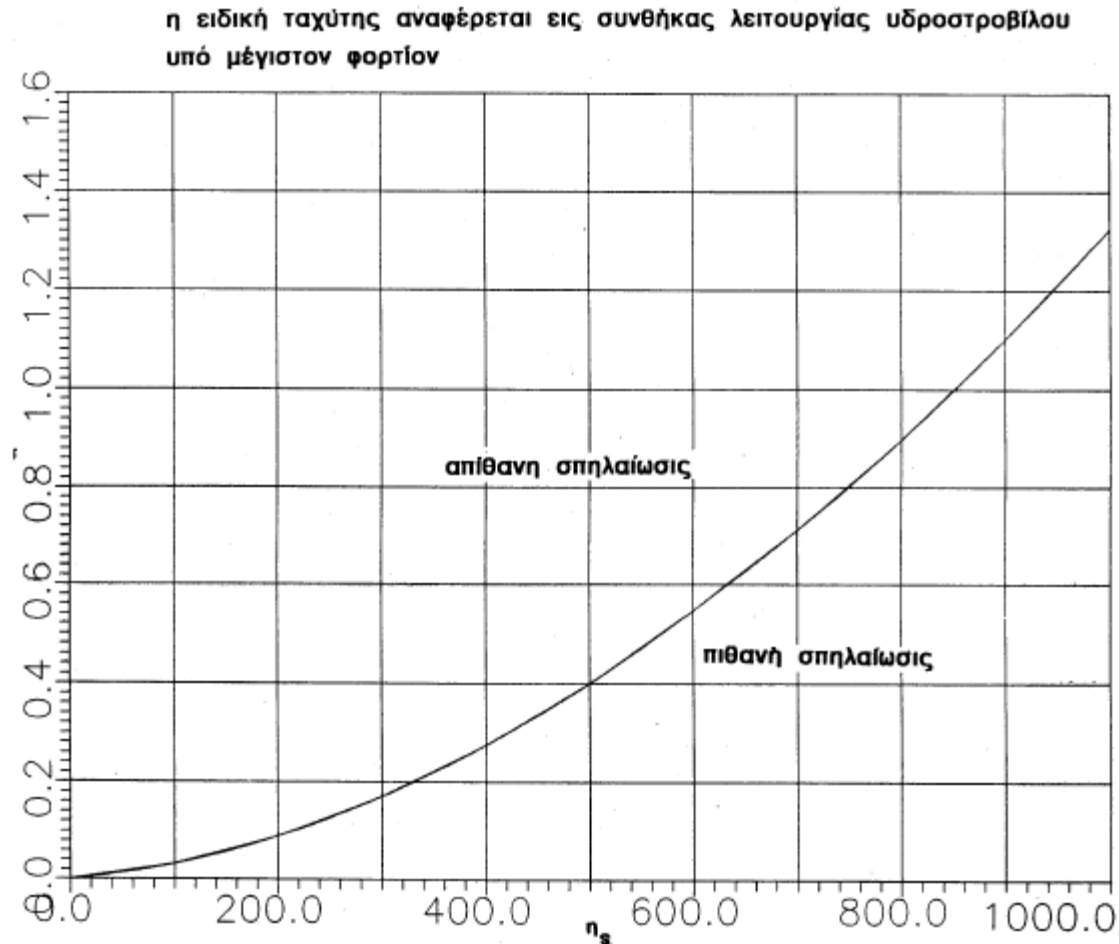
Η εξίσωση 3.17 δηλώνει ότι ο συντελεστής σπηλαιώσης εξαρτάται από τον τύπο της υδραυλικής μηχανής (αυξάνεται ραγδαίως με αύξηση του  $Q_u$  ή της ειδικής ταχύτητας  $n_s$ ) και τον τρόπο λειτουργίας αυτής. Η γενική εξάρτηση του συντελεστή σπηλαιώσης  $\sigma$  υπό συνθήκες μέγιστης απόδοσης της ισχύος του υδροστροβίλου δείχνεται στο σχήμα 3.49.

Η μέση τιμή μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικές εξισώσεις και δίνεται ως:

$$\sigma = \frac{(n_s + 30.0)^{1.8}}{200000.0} \quad (3.134)$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

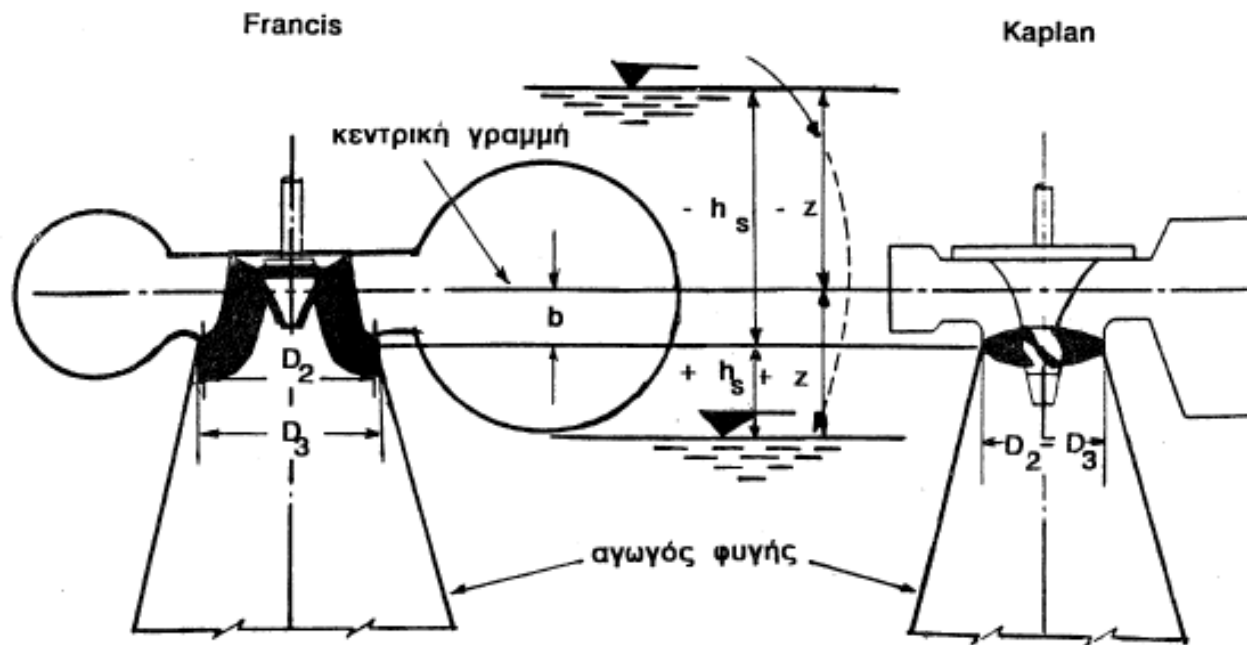
### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως



Σχήμα 3.49 Μεταβολή συντελεστού σπηλαιώσεως με τον αριθμόν ειδικής ταχύτητος υπό συνθήκας μεγίστου φορτίου

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.4 Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως



Σχήμα 3.50 Τοποθέσεις κατακορύφων υδροστροβίλων τύπων Francis και Kaplan.

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.1 Αρχές ομοιότητας

Πριν από την κατασκευή ενός υδροστροβίλου αντιδράσεως, γίνονται μελέτες επί ομοιωμάτων για τον καθορισμό των παρακάτω μεγεθών:

- Η περιστροφική ταχύτητα  $N$  ( αριθμός περιστροφών ανά πρώτο λεπτό)
- Οι γραμμικές διαστάσεις του υδροστροβίλου, δηλαδή η διάμετρος  $D$ ,
- Το ύψος πτώσης  $H$
- Η παροχή  $Q$
- Η ισχύς  $I$

Εάν ορίσουμε ότι ο δείκτης  $m$  χαρακτηρίζει το πειραματικό ομοίωμα και ο δείκτης  $p$  την πρωτότυπη μονάδα τότε:

α) Εάν το ύψος  $H$  έχει την ίδια τιμή τόσο στο μοντέλο όσο και στο πρωτότυπο, δηλαδή  $H_p = H_m$  τότε:

$$v_m = \frac{\pi D_m N_m}{60.0} \quad \text{και} \quad v_p = \frac{\pi D_p N_p}{60.0} \quad (3.135)$$

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.1 Αρχές ομοιότητας

Επειδή όμως  $V_p = V_m$ , αφού κάθε μία ποσότητα ισούται με  $(2.0 \cdot g \cdot H)^{1/2}$  τότε:

$$D_m N_m = D_p N_p \quad (3.136)$$

ή

$$\frac{D_m}{D_p} = \frac{N_p}{N_m} \quad (3.137)$$

Η παροχή είναι ανάλογη του τετραγώνου της γραμμικής διάστασης  $D$ , τότε:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^2 = \left(\frac{N_p}{N_m}\right)^2 \quad (3.138)$$

Τέλος, επειδή η ισχύς  $I$  είναι ανάλογη του γινομένου  $Q \cdot H$  και επειδή  $H_p = H_m$  τότε:

$$\frac{I_m}{I_p} = \frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^2 = \left(\frac{N_p}{N_m}\right)^2 \quad (3.139)$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.1 Αρχές ομοιότητας

β) Εάν οι γραμμικές διαστάσεις είναι ίδιες, δηλαδή η διάμετρος  $D$  έχει την ίδια τιμή τόσο στο μοντέλο όσο και στο πρωτότυπο, δηλαδή  $D_p = D_m$  τότε διαμορφώνονται οι ανάλογες εξισώσεις:

$$\frac{H_m}{H_p} = \left(\frac{N_m}{N_p}\right)^2 \quad (3.140)$$

και

$$\frac{I_m}{I_p} = \left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)^{3/2} = \left(\frac{N_m}{N_p}\right)^3 \quad (3.141)$$



## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.2 Ειδική ταχύτητα

Προκειμένου να μπορέσουμε να συγκρίνουμε υδροστροβίλους ανεξαρτήτως των επι μέρους διαστάσεων κάνουμε χρήση της παραμέτρου της ειδικής ταχύτητας  $v_s$ . Ορίζεται λοιπόν ως ειδική ταχύτητα υδροστροβίλου η ταχύτητα ενός γεωμετρικά όμοιου στροβίλου ο οποίος αναπτύσσει ισχύ 1 KW υπό φορτίο ενός μέτρου  $H=1.0$  m.

Ο λόγος των παροχών μεταξύ τυχαίου στροβίλου και γεωμετρικά όμοιου στροβίλου (ο οποίος συμβολίζεται με το δείκτη  $s$ ) είναι

$$\frac{Q}{Q_s} = \frac{A}{A_s} \frac{V}{V_s} \quad (3.142)$$

Αλλά ισχύει ότι:

$$\frac{A}{A_s} = \left(\frac{D}{D_s}\right)^2 \quad \text{και} \quad \frac{V}{V_s} = \left(\frac{H}{H_s}\right)^{1/2} \quad (3.143)$$

Επομένως η εξίσωση 3.142 γράφεται:

$$\frac{Q}{D^2 H^{1/2}} = \frac{Q_s}{D_s^2 H_s^{1/2}} \quad (3.144)$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.2 Ειδική ταχύτητα

Από τις γραμμικές ταχύτητες ισχύει ότι (επειδή  $D=D_s$  και εξ. 3.140):

$$\frac{U}{U_s} = \frac{D N}{D_s N_s} = \left(\frac{H}{H_s}\right)^{1/2} \quad (3.145)$$

Οι εξισώσεις 3.144 και 3.145 δίνουν

$$\frac{Q}{D^3 N} = \frac{Q_s}{D_s^3 N_s} \quad (3.146)$$

Η ειδική ταχύτητα ορίζεται ως (λύνοντας τις εξ. 3.145 και 3.146 ως προς  $D$  και  $D_s$ ):

$$n_s = N \left(\frac{Q}{Q_s}\right)^{1/2} \left(\frac{H}{H_s}\right)^{3/4} \quad (3.147)$$

ή

$$n_s = N \left(\frac{I}{I_s}\right)^{1/2} \left(\frac{H}{H_s}\right)^{5/4} \quad (3.148)$$

Θέτοντας  $I_s = 1.0 \text{ KW}$  και  $H_s = 1.0\text{m}$  η παραπάνω εξίσωση δίνει

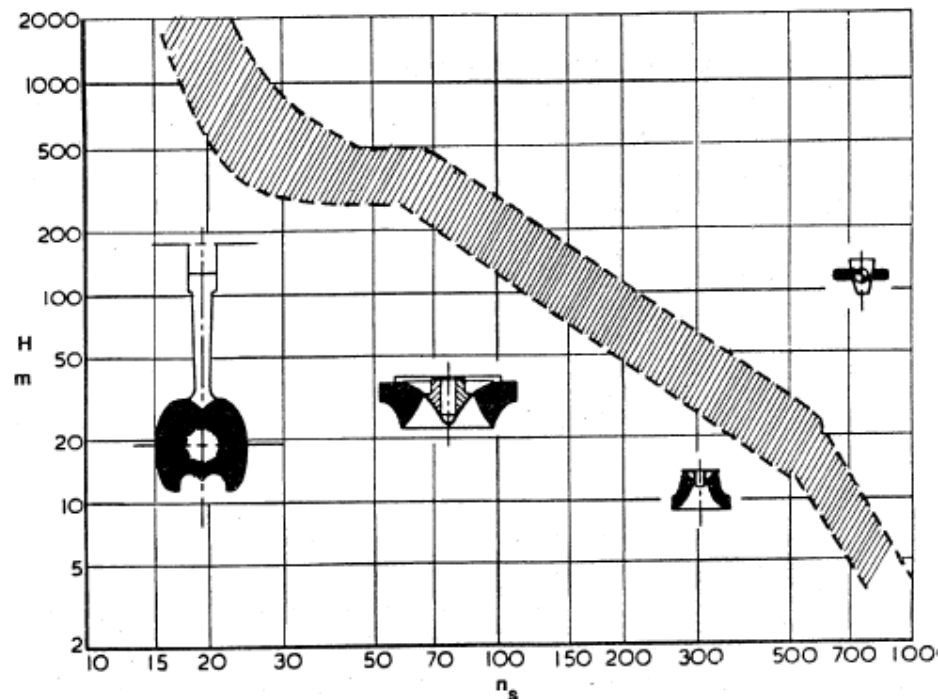
$$n_s = \frac{N I^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (3.149)$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.2 Ειδική ταχύτητα

Είναι προφανές ότι η ειδική ταχύτητα είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του υδροστροβίλου. Η Εξ. 3.149 δείχνει ότι η ειδική ταχύτητα είναι ανάλογη της περιστροφικής ταχύτητας  $N$  και αντιστρόφως ανάλογη του ύψους πτώσης. Αυτό σημαίνει ότι χαμηλή τιμή της ειδικής ταχύτητας συνεπάγεται μεγαλύτερα ύψη πτώσης.



Σχήμα 3.54 Συσχέτισις του ύψους πτώσεως  $H$  μετά της ειδικής ταχύτητος  $n_s$  δι' υδροστροβίλους

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

Τα απαιτούμενα δεδομένα προς επιλογή υδροστροβίλων αντιδράσεως περιλαμβάνουν:

- Το ύψος πτώσης
- Παροχή
- Υδρογράφημα παροχής ελεύθερης επιφάνειας διώρυγας απαγωγής
- Υψόμετρο χώρου εγκατάστασης μονάδων
- Θερμοκρασία ύδατος
- Αναμενόμενα φορτία καταναλώσεως
- Κανονισμοί και απαιτήσεις λειτουργίας
- Ποιότητα ύδατος

Σε περίπτωση που η αρχική προμελέτη του έργου είναι θετική από οικονομικής άποψης, τότε γίνονται μεγαλύτερες αναλύσεις δεδομένων που απαιτούν τον καθορισμό των εξής:

α) Ονομαστικό ύψος πτώσης  $H_r$ : Είναι το καθαρό ύψος πτώσης του νερού για λειτουργία του υδροστροβίλου σε πλήρης άνοιγμα των οδηγών πτερυγίων και για αποδιδόμενη ισχύ στροβίλου τόση ώστε η αποδιδόμενη ισχύς από τη γεννήτρια να ισούται με την ονομαστική της ισχύ.

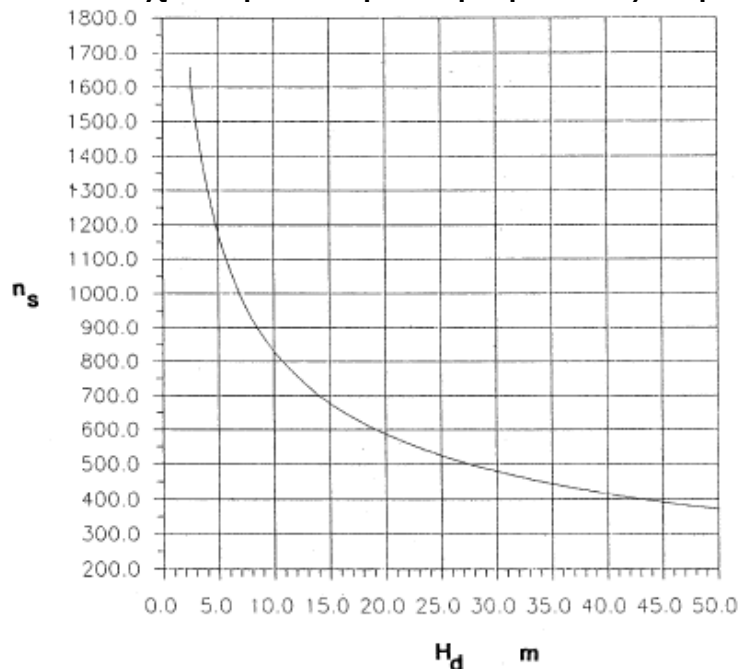
## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

β) Επιλογή του είδους του υδροστροβίλου

γ) Δοκιμαστική επιλογή: Επιλέγεται η ειδική ταχύτητα  $n_s$  βάση της ακόλουθης εξίσωσης, η οποία ισχύει για υδροστροβίλους Kaplan.



$$n_s = \frac{2625.0}{H_d^{1/2}}$$

(Kaplan)

(3.150)

Σχήμα 3.55 Μεταβολή του ειδικού αριθμού στροφών υδροστροβίλου αντιδράσεως τύπου Kaplan μετά του ύψους πτώσεως  $H_d$ . Το διάγραμμα είναι εμπειρικών

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

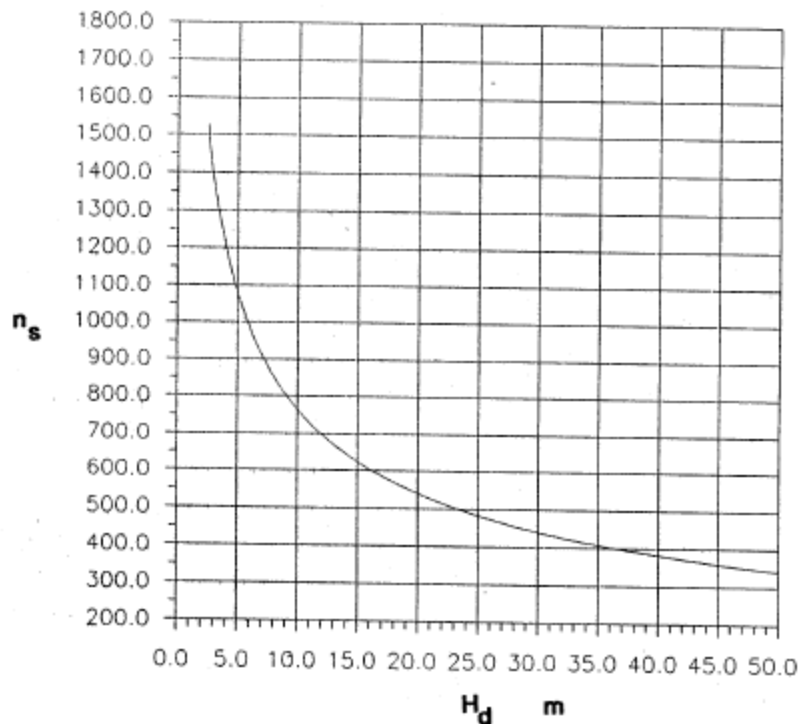
#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

γ) Δοκιμαστική επιλογή: Για υδροστροβίλους τύπου έλικος ισχύει:

$$n_s = \frac{2415.0}{H_d^{1/2}}$$

(έλικος)

(3.151)



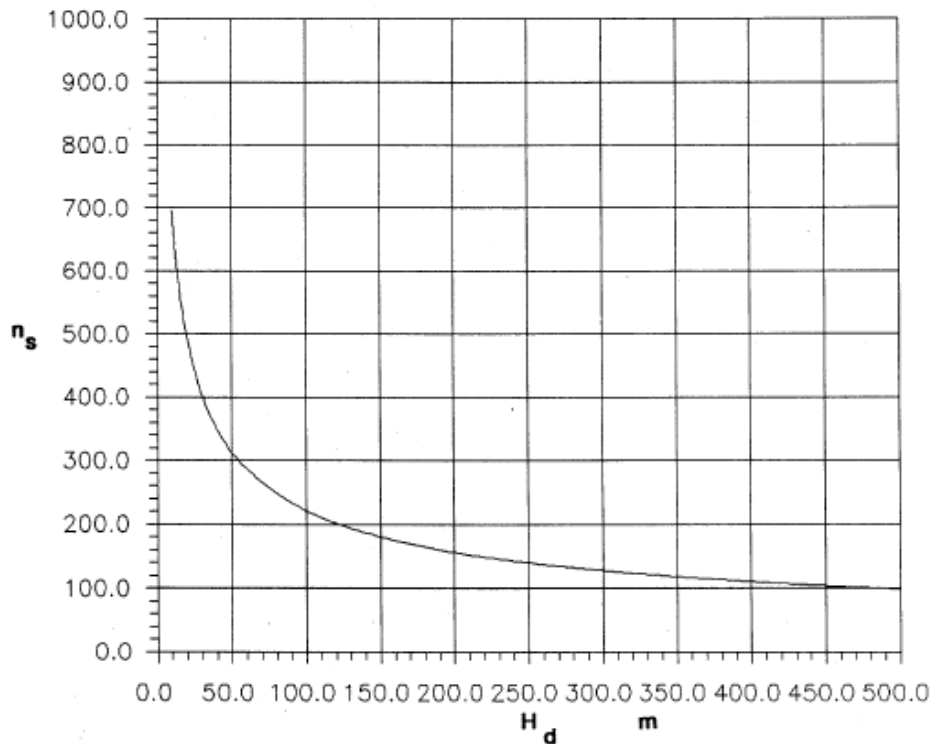
Σχήμα 3.56 Μεταβολή του ειδικού αριθμού στροφών υδροστροβίλου αντιδράσεως τύπου έλικος μετά του ύψους πτώσεως  $H_d$ . Το διάγραμμα είναι εμπειρικών

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

γ) Δοκιμαστική επιλογή: Για υδροστροβίλους τύπου Francis ισχύει:



$$n_s = \frac{2205.0}{H_d^{1/2}} \quad (\text{Francis}) \quad (3.152)$$

Σχήμα 3.57 Μεταβολή του ειδικού αριθμού στροφών υδροστροβίλου αντιδράσεως τύπου Francis μετά του ύψους πτώσεως  $H_d$ . Το διάγραμμα είναι εμπειρικών

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

δ) Δοκιμαστική περιστροφική ταχύτητα: Η δοκιμαστική περιστροφική ταχύτητα υπολογίζεται βάση της εξίσωσης 1.11:

$$N = \frac{n_s H^{5/4}}{I^{1/2}} \quad (3.153)$$

ε) Προσαρμογή περιστροφικής ταχύτητας: Επιλέγεται η περιστροφική ταχύτητα η οποία έχει τιμή που πλησιάζει όσον το δυνατόν περισσότερο την τιμή της σύγχρονης περιστροφικής ταχύτητας βάση της εξίσωσης:

$$N = \frac{120.0 f}{\text{αρ. πόλων}} \quad (3.154)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα της γραμμής μεταφοράς ενέργειας (50.0 Hz). Είναι δηλαδή:

$$N = \frac{6000.0}{\text{αρ. πόλων}} \quad (3.155)$$

Όπου ο αριθμός των πόλων πρέπει να είναι διαιρετός προς 2 και κατά προτίμηση προς 4.



## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

στ) Υπολογισμός ειδικής ταχύτητας: Για την τιμή που έχει επιλεγεί ως σύγχρονη περιστροφική ταχύτητα, επιλέγεται η ειδική ταχύτητα:

$$n_s = \frac{N I^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (3.156)$$

ζ) Υπολογισμός διαμέτρου δρομέα: Ο υπολογισμός της διαμέτρου του δρομέα (τύπου έλικος) στην έξοδο από τους υδροστροβίλους δίνεται από την εξίσωση:

$$D_3 = \frac{(84.47) (0.0258) n_s^{2/3} H^{1/2}}{N} \quad (\text{έλικος}) \quad (3.157)$$

Οι διάμετροι εισόδου ροής στο δρομέα και εξόδου αυτής από τον δρομέα συμπίπτουν. Στην περίπτωση υδροστροβίλου Francis ο υπολογισμός της διαμέτρου του δρομέα δίνεται από την εξίσωση

$$D_3 = \frac{(84.47) (0.0234) n_s^{2/3} H^{1/2}}{N} \quad (\text{Francis}) \quad (3.158)$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

η) Υπολογισμός συντελεστή σπηλαίωσης: ο υπολογισμός του συντελεστή σπηλαίωσης  $\sigma$  γίνεται βάση της εξίσωσης 3.134 και σχήμα 3.49, η οποία δίνει ότι:

$$\sigma = \frac{(n_s + 30.0)^{1.8}}{200000.0} \quad (3.159)$$

ζ) Τοποθέτηση υδροστροβίλου: Ο υπολογισμός της θέσης του υδροστροβίλου δίνεται βάση της ανισότητας 3.130, με  $H$  το μέγιστο ύψος λειτουργίας:

$$h_s < \frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_{wv}}{\rho g} - k_\lambda \sigma H \quad (3.160)$$

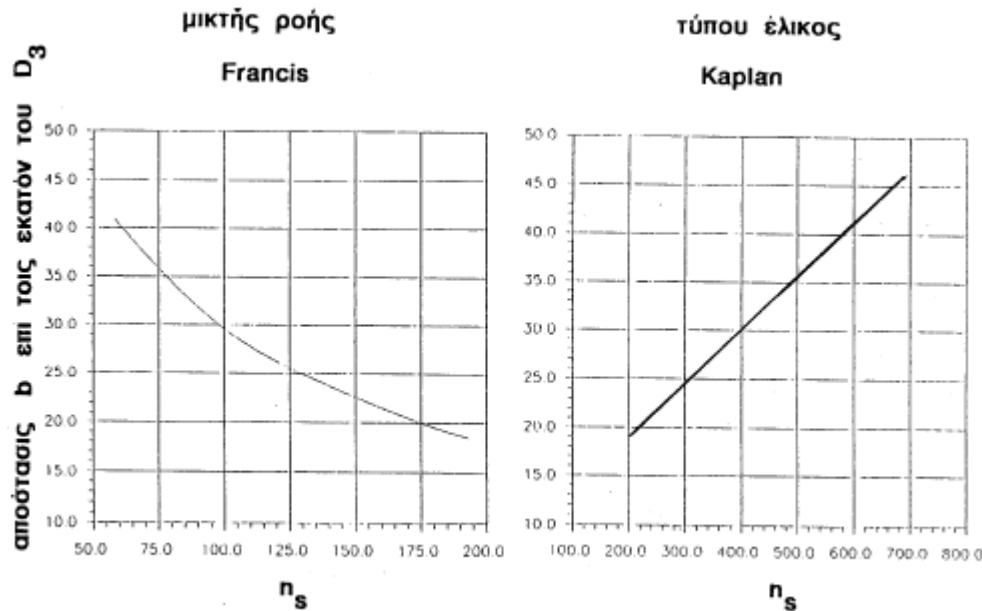
ι) Κύριες διαστάσεις: Οι κύριες διαστάσεις υπολογίζονται συναρτήσει της διαμέτρου  $D_3$ , δηλαδή της διαμέτρου του δρομέα κατά την έξοδο της ροής, Σχήμα 3.50. Το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.58) της διαμέτρου  $D_3$  συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας:

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

ι) Κύριες διαστάσεις: Οι κύριες διαστάσεις υπολογίζονται συναρτήσει της διαμέτρου  $D_3$ , δηλαδή της διαμέτρου του δρομέα κατά την έξοδο της ροής, Σχήμα 3.50. Το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.58) της διαμέτρου  $D_3$  συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας:



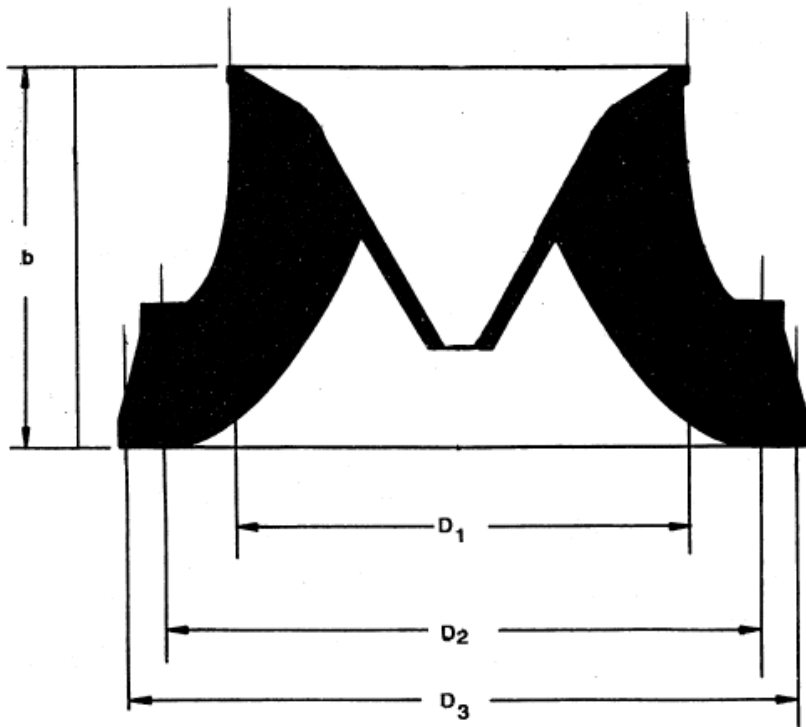
Σχήμα 3.58 Μεταβολή της αποστάσεως  $b$  (μεταξύ διαμέτρου  $D_2$  και της κεντρικής γραμμής, ιδέ Σχήμα 3.50) μετά της ειδικής ταχύτητος  $n_s$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

ι) Κύριες διαστάσεις:



Υπάρχουν επίσης εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της διαμέτρου  $D_3$  ( E. Mosonyi), υδροστροβίλων Francis:

$$D_3 = (0.0216 H_n^{0.35} + 0.685 \frac{1.0}{H_n^{1/4}}) Q^{1/2} \quad (3.161)$$

Η διάμετρος της εισόδου μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$D_1 = \left( \frac{1.0}{0.460 + 0.00829 n_s} \right) D_3 \quad (3.162)$$

Το ύψος των οδηγών πτερυγίων δίνεται ως:

$$b_o = \left( \frac{-0.00702 + 0.00380 n_s}{0.460 + 0.00829 n_s} \right) D_3 \quad (3.163)$$

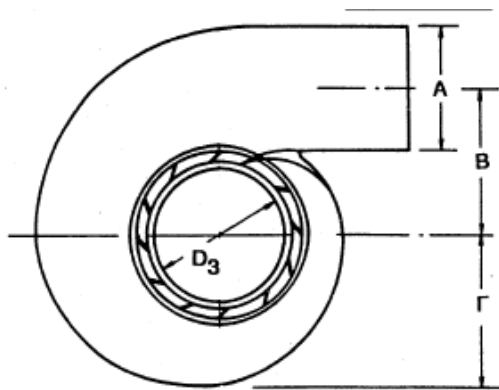
Σχήμα 3.59 Διάγραμμα εμφανίζουν τας τρεις κύριες διαστάσεις δρομέως υδροστροβίλου τύπου Francis με ειδική ταχύτητα  $n_s$  μεγαλύτεραν των 65.0. Εις χαμηλωτέρας ειδικάς ταχύτητας ισχύει  $D_1 > D_3$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

#### 3.2.5.3 Επιλογή υδροστροβίλου

ι) Κύριες διαστάσεις:



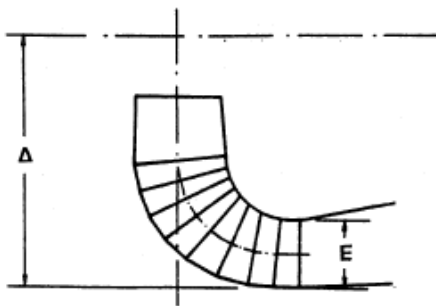
Από το Σχήμα 3.60 είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι λοιπές διαστάσεις του σπειροειδούς κελυφους και του αγωγού φυγής.

Για το σπειροειδές κέλυφος ισχύει:

$$A = (-0.0813 + 0.773 D_3) n_s^{1/10} \quad (3.164)$$

$$B = (0.362 + 1.889 D_3) n_s^{1/10} \quad (3.165)$$

$$\Gamma = (0.162 + 2.288 D_3) n_s^{1/10} \quad (3.166)$$



Για τον αγωγό φυγής

$$\Delta = 0.428 + 2.812 D_3 \quad (3.167)$$

$$E = 0.273 + 0.670 D_3 \quad (3.168)$$

$$Z = -0.568 + 2.741 D_3 \quad (3.169)$$

Σχήμα 3.60 Διάγραμμα εμφανίον τας κυρίας διαστάσεις σπειροειδούς κελύφους και αγωγού φυγής υδροστροβίλου τύπου Francis υψηλού ύψους πτώσεως

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Παράδειγμα : Υδροδυναμικής εγκαταστάσεως δίδονται τα κάτωθι στοιχεία:  
α) εγκατεστημένη ισχύς 52.0 MW, β) ύψος πτώσεως μελέτης,  $H_d$ , 41.5 m, γ) συχνότητας 50.0 Hz, δ) στάθμη διώρυγος φυγής +138.5 m και ε) θερμοκρασία ύδατος 14.0<sup>o</sup> C. Πρόκειται να επιλεχθή εις υδροστρόβιλος τύπου Kaplan και προς τούτο απαιτείται να υπολογισθούν: α) ο ειδικός αριθμών στροφών  $n_s$ , β) η περιστροφική ταχύτης της μονάδος, γ) η διάστασις της διαμέτρου D της μονάδος, δ) η απόστασις b, ιδέ Σχήμα 3.58 και ε) υψόμετρον επιπέδου αναφοράς του υδροστροβίλου (η τιμή του συντελεστού  $k_\lambda$  να ληφθή ίση με 1.15).

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Λύσις : α) και β) Εκ της εξισώσεως 3.150 ή εκ του Σχήματος 3.55 είναι,

$$n_s = \frac{2625.0}{H_d^{1/2}} = \frac{2625.0}{41.5^{1/2}} = 407.48$$

Εκ της εξισώσεως 3.153 θα είναι,

$$N = \frac{n_s H^{5/4}}{I^{1/2}} = \frac{407.48 (41.5)^{5/4}}{52000.0^{1/2}} = 188.22 \text{ στροφαί ανά λεπτόν. Εδώ ετέθη}$$

ως Η η τιμή του  $H_d$ . Εκ της εξισώσεως 3.155 θα πρέπει να είναι,

$$N = \frac{6000.0}{\text{αρ. πόλων}} \text{ και η τιμή αυτή να είναι αμέσως μικρότερα της τιμής των}$$

188.22. Επομένως ο αριθμός των πόλων της γεννητριάς πρέπει να είναι 32. Τότε η τιμή της Ν θα είναι 187.5 στροφαί ανά πρώτον λεπτόν της ώρας. Επομένως η νέα τιμή της ειδικής ταχύτητος θα είναι, βάσει της εξισώσεως 3.156,

$$n_s = \frac{N I^{1/2}}{H^{5/4}} = \frac{187.5 (52000.0)^{1/2}}{(41.5)^{5/4}} = 405.92$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

γ) Η διάσταση της διαμέτρου  $D$  της μονάδος υπολογίζεται εκ της εξισώσεως 3.157. Είναι,

$$D = \frac{(84.47) (0.0258) (405.92)^{2/3} (41.5)^{1/2}}{187.5} = 4.105 \text{ m}$$

δ) Η απόσταση  $b$ , ιδέ Σχήμα 3.50, υπολογίζεται εκ τού Σχήματος 3.58 και διά  $n_s = 405.92$  είναι  $b = 0.32 \times 4.105 = 1.3136 \text{ m}$ .

ε) Το υψόμετρο επιπέδου αναφοράς του υδροστροβίλου υπολογίζεται εκ της ανισότητος 3.160,

$$h_s < \frac{P_a}{\rho g} + \frac{P_{wv}}{\rho g} - k_\lambda \sigma H$$

ένθα η τιμή του  $P_a/\rho g$  υπολογίζεται εκ της εξισώσεως 3.131 και είναι δι' υψόμετρον  $138.5 \text{ m}$  ίση,

$$\frac{P_a}{\rho g} = 10.33 - \frac{138.5}{900.0} = 10.176 \text{ m}$$



## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Η τιμή του  $\rho_{wv}/\rho g$  υπολογίζεται εκ του Σχήματος 3.37 και είναι, διό θερμοκρασίαν  $14.0^{\circ} \text{C}$ , ίση με  $0.3 \text{ m}$ . Τέλος, η τιμή του συντελεστού σπηλαιώσεως  $\sigma$  προκύπτει εκ της εξισώσεως 3.134 ή εκ του Σχήματος 3.49 και είναι ίση με,

$$\sigma = \frac{(405.92 + 30.0)^{1.8}}{200000.0} = 0.282$$

Επομένως, η τιμή του  $h_s$  πρέπει να είναι,

$$h_s < 10.176 - 0.3 - (1.15) (0.282) (41.5) = -3.582 \text{ m}$$

Εκ του Σχήματος 3.50 προκύπτει ότι η τελική θέσις θα είναι,

$$-3.582 + 1.3136 = -2.2684 \text{ m}$$

Και εν σχέσει μετά του επιπέδου αναφοράς θα είναι,

$$138.5 - 2.2684 = 136.231 \text{ m}$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Παράδειγμα : Υδροδυναμικής εγκαταστάσεως δίδονται τα κάτωθι στοιχεία: α) εγκατεστημένη ισχύς 52.0 MW, β) ύψος πτώσεως μελέτης,  $H_d$ , 41.5 m, γ) συχνότης 50.0 Hz, δ) στάθμη διώρυγος φυγής +138.5 m και ε) θερμοκρασία ύδατος 14.0<sup>o</sup> C. Πρόκειται να επιλεχθή εις υδροστροβίλος τύπου Francis και προς τούτο απαιτείται να υπολογισθούν: α) ο ειδικός αριθμών στροφών  $n_s$ , β) η περιστροφική ταχύτης της μονάδος, γ) η διάστασις της διαμέτρου D της μονάδος, δ) η απόστασις b, ιδέ Σχήμα 3.58 και ε) υψόμετρον επιπέδου αναφοράς του υδροστροβίλου (η τιμή του συντελεστού  $k_\lambda$  να ληφθή ίση με 1.15).

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Λύσις : Το παράδειγμα τούτο διαφοροποιείται του προηγούμενου μόνον κατά τον τύπον της υδραυλικής στροβιλομηχανής (επιλογή τύπου Francis αντί Kaplan).

α) και β) Εκ της εξισώσεως 3.152 ή εκ του Σχήματος 3.57 είναι,

$$n_s = \frac{2205.0}{H_d^{1/2}} = \frac{2205.0}{41.5^{1/2}} = 342.28$$

Εκ της εξισώσεως 3.153 θα είναι,

$$N = \frac{n_s H^{5/4}}{I^{1/2}} = \frac{342.28 (41.5)^{5/4}}{52000.0^{1/2}} = 158.10 \text{ στροφαί ανά λεπτόν. Εδώ ετέθη}$$

ως Η η τιμή του  $H_d$ . Εκ της εξισώσεως 3.155 θα πρέπει να είναι,

## 3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

$N = \frac{6000.0}{\text{αρ. πόλων}}$  και η τιμή αυτή να είναι αμέσως μικρότερα της τιμής των

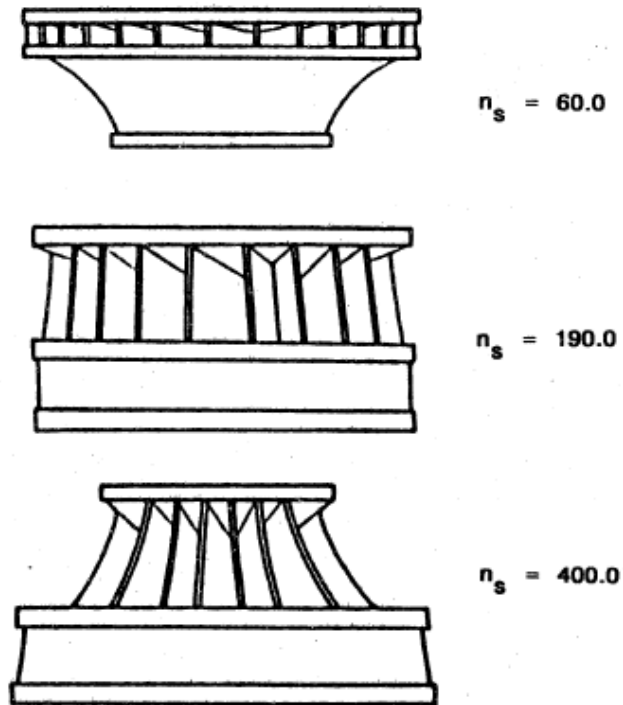
158.10. Επομένως ο αριθμός των πόλων της γεννητριάς πρέπει να είναι 40. Τότε η τιμή της  $N$  θα είναι 150.0 στροφές ανά πρώτον λεπτόν της ώρας. Επομένως η νέα τιμή της ειδικής ταχύτητος θα είναι, βάσει της εξισώσεως 3.156,

$$n_s = \frac{N I^{1/2}}{H^{5/4}} = \frac{150.0 (52000.0)^{1/2}}{(41.5)^{5/4}} = 324.74$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Το Σχήμα 3.61 δείχνει τις γεωμετρίες του δρομέως υδροστροβίλων τύπου Francis εις διαφόρους τιμές της ειδικής ταχύτητος  $n_s$ .



Σχήμα 3.61 Γεωμετρία του δρομέως υδροστροβίλου αντιδράσεως τύπου Francis και αναλογίαι διαστάσεων εν αναφορά με την ειδική ταχύτητα  $n_s$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

γ) Η διάσταση της διαμέτρου  $D$  της μονάδος υπολογίζεται εκ της εξισώσεως 3.158. Είναι,

$$D = \frac{(84.47) (0.0234) (324.74)^{2/3} (41.5)^{1/2}}{150.0} = 4.009 \text{ m}$$

δ) Η απόστασις  $b$ , ιδέ Σχήμα 3.50, υπολογίζεται εκ του Σχήματος 3.58 και διά  $n_s = 324.74$  είναι  $b = 0.27 \times 4.009 = 1.0824 \text{ m}$ .

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

ε) Το υψόμετρον επιπέδου αναφοράς του υδροστροβίλου υπολογίζεται εκ της ανισότητος 3.160,

$$h_s < \frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_{wv}}{\rho g} - k_\lambda \sigma H$$

ένθα η τιμή του  $P_a/\rho g$  υπολογίζεται εκ της εξισώσεως 3.131 και είναι δι' υψόμετρον 138.5 m ίση,

$$\frac{P_a}{\rho g} = 10.33 - \frac{138.5}{900.0} = 10.176 \text{ m}$$

Η τιμή του  $P_{wv}/\rho g$  υπολογίζεται εκ του Σχήματος 3.37 και είναι, διά

θερμοκρασίαν  $14.0^\circ \text{C}$ , ίση με 0.3 m. Τέλος, η τιμή του συντελεστού σπηλαιώσεως  $\sigma$  προκύπτει εκ της εξισώσεως 3.134 ή εκ του Σχήματος 3.49 και είναι ίση με,

$$\sigma = \frac{(324.74 + 30.0)^{1.8}}{200000.0} = 0.194$$

## 3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

### 3.2.5 Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως

Επομένως, η τιμή του  $h_s$  πρέπει να είναι,

$$h_s < 10.176 - 0.3 - (1.15) (0.194) (41.5) = 0.617 \text{ m}$$

Εκ του Σχήματος 3.50 προκύπτει ότι η τελική θέσις θα είναι,

$$0.617 + 1.0824 = 1.6997 \text{ m}$$

Και εν σχέσει μετά του επιπέδου αναφοράς θα είναι,

$$138.5 + 1.6997 = 140.199 \text{ m}$$



***Ευχαριστώ για την προσοχή σας!***