

Υδραυλικές Μηχανές και Ενέργεια

Διάλεξη 10 - Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως (μικτής ροής)

Σκουληκάρης Χαράλαμπος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχ. Η/Υ, MSc,

PhD

hskoulik@civil.auth.gr

Ανασκόπηση 9^{ου} μαθήματος

- Εκδρομή στα υδροηλεκτρικά έργα του ποταμού Νέστου

Περιεχόμενα 10^{ου} μαθήματος

A/A	Τρόπος διδασκαλίας	Μάθημα	Περιγραφή	Ώρες
8	Διάλεξη	Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως	- Σχεδιασμός δρομέα υδροστροβίλου Pelton, Μοναδιαία ποσότητα και χαρακτηριστικά διαγράμματα, Ασκήσεις -Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, Κύρια μέρη υδροστροβίλου αξονικής ροής Kaplan, Τρίγωνα ταχυτήτων -	3
9	Εκδρομή στο πεδίο	Εκδρομή στα φράγματα του Νέστου	- Εκδρομή στα φράγματα του Νέστου	5
10	Διάλεξη	Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως	- Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, Κύρια μέρη υδροστροβίλου αξονικής ροής Kaplan, Τρίγωνα ταχυτήτων - Ασκήσεις - Υδροστρόβιλοι μικτής ροής, Κύρια μέρη υδροστροβίλου Francis, Βασικές εξισώσεις βαθμίδος μικτής ροής, Σπειροειδές κέλυφος, Αγωγοί φυγής Ασκήσεις	3

Συγγράμματα/Εκπαιδευτικό υλικό

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΠΡΩΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Υπό
Ιωάννου Βασιλείου Σούλη
Αναπληρωτού Καθηγητού
Δημοκρτείου Πανεπιστημίου Θράκης



ΞΑΝΘΗ

εκδόσεις - ΑΙΒΑΖΗΣ - Θεσσαλονίκη

ΥΔΡΑΥΛΙΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΑΙ Μηχανική Ρευστών ΤΡΙΤΟΣ ΤΟΜΟΣ ΛΥΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Υπό
Ιωάννου Βασιλείου Σούλη
Αναπληρωτού Καθηγητού
Δημοκρτείου Πανεπιστημίου Θράκης



ΞΑΝΘΗ 2007

εκδόσεις: ΑΙΒΑΖΗΣ Θεσσαλονίκη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως μικτής ροής

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Πρόβλημα 2.1

Υδροστρόβιλος τύπου Kaplan έχει εξωτερικήν διάμετρον ίσην προς 4.6 m ενώ τα πτερύγια εδράζονται επί κυλινδρικής βάσεως διαμέτρου 2.5 m. Η περιστροφική ταχύτης ισούται προς 250.0 στροφαί ανά πρώτον λεπτόν, το καθαρόν ύψος λειτουργίας είναι 15.0 m και η αποδιδόμενη ισχύς της μηχανής είναι 22500.0 KW. Η υδραυλική απόδοσις είναι 89.0% ενώ η ολική απόδοσις είναι 78.3%. Ζητείται να υπολογισθούν: α) αι γωνίαι α_1 , α_2 καθώς και β) αι γωνίαι β_1 , β_2 των πτερυγίων αι αναφερόμεναι εις το μέσον του ύψους αυτών.

3.1 Υδροστροβίλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Λύσις

α) Εις το Σχήμα 5 δεικνύονται τα τρίγωνα λειτουργίας του αξονικής ροής υδροστροβίλου. Η διάμετρος η αναφερομένη εις το μέσον του ύψους των πτερυγίων είναι,

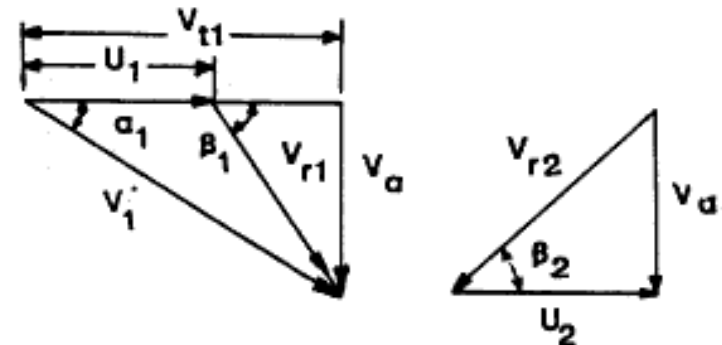
$$D_m = \frac{4.6 + 2.5}{2.0} = 3.55 \text{ m}$$

Η γραμμική ταχύτης περιστροφής των πτερυγίων εις το μέσον του ύψους των είναι,

$$U_m = \frac{\pi D_m N}{60.0} = \frac{3.14 \times 3.55 \times 250.0}{60.0} = 46.446 \text{ m/s}$$

Είναι $U_1 = U_2 = U_m$ και $V_{a1} = V_{a2} = V_a$. Η γωνία α_2 είναι ίση προς 90.0° (Kaplan). Εκ της εξισώσεως 3.62 είναι,

$$H_R = \frac{U V_{t1}}{g}$$



α) εισόδου

β) εξόδου

Σχήμα 5 Τρίγωνα λειτουργίας εισόδου και εξόδου υδροστροβίλου αξονικής ροής

3.1 Υδροστροβίλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

ενώ το καθαρόν φορτίον H_n και το φορτίον H_R συνδέονται με την εξίσωσιν,

$$H_R = n_h H_n$$

Εκ των ανωτέρω δύο εξισώσεων είναι,

$$H_n n_h = \frac{U V_{t1}}{g} \quad \text{και επομένως,}$$

$$V_{t1} = \frac{g H_n n_h}{U} \quad \text{άρα,}$$

$$V_{t1} = \frac{9.81 \times 15.0 \times 0.89}{46.446} = 2.819 \text{ m/s}$$

Η παροχή δύναται να υπολογισθή εκ της βασικής εξισώσεως,

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

$$Q = \frac{I}{\rho g n H_n} = \frac{22500000.0}{1000.0 \times 9.81 \times 0.783 \times 15.0} = 195.28 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Αλλά η παροχή αυτή διέρχεται δι' επιφανείας A η οποία δίδεται εκ της εξισώσεως,

$$A = \frac{\pi (D_{εξ}^2 - D_{εσ}^2)}{4.0} = \frac{3.14 \times (4.6^2 - 2.5^2)}{4.0} = 11.71 \text{ m}^2$$

άρα η παροχή Q θα είναι,

$$Q = A V_a$$

και επομένως η αξονική ταχύτης θα είναι,

$$V_a = \frac{Q}{A} = \frac{195.28}{11.71} = 16.675 \text{ m/s}$$

Εκ του τριγώνου εισόδου των ταχυτήτων, ιδέ Σχήμα 5α, θα είναι,

$$\epsilon\varphi\alpha_1 = \frac{V_a}{V_{t1}} = \frac{16.675}{2.819} = 5.915 \quad \text{άρα } \alpha_1 = 80.405^\circ$$

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

β) Επίσης, εκ του τριγώνου εισόδου των ταχυτήτων θα είναι,

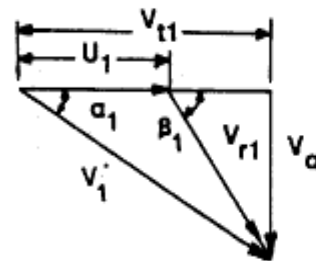
$$\epsilon\phi\beta_1 = \frac{V_a}{V_{t1} - U_1} = \frac{16.675}{2.819 - 46.446} = -0.382 \quad \text{άρα } \beta_1 = -20.907^\circ$$

Επομένως, το Σχήμα 5α δεν ανταποκρίνεται προς την πραγματικότητα. Το ορθόν τρίγωνον λειτουργίας είναι το Σχήμα 5γ και η γωνία η σχηματιζομένη μετά της εφαπτομένης και της σχετικής ταχύτητας είναι $180.0 - 20.907 = 159.093^\circ$.

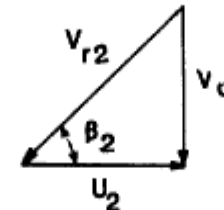
Εκ του τριγώνου εξόδου των ταχυτήτων, ιδέ Σχήμα 5β, θα είναι,

$$\epsilon\phi\beta_2 = \frac{V_a}{U_2} = \frac{16.675}{46.446} = 0.359$$

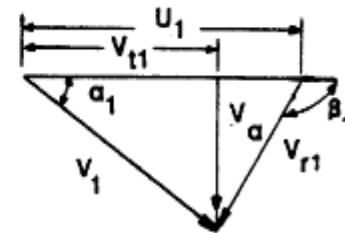
και επομένως $\beta_2 = 19.749^\circ$



α) εισόδου



β) εξόδου



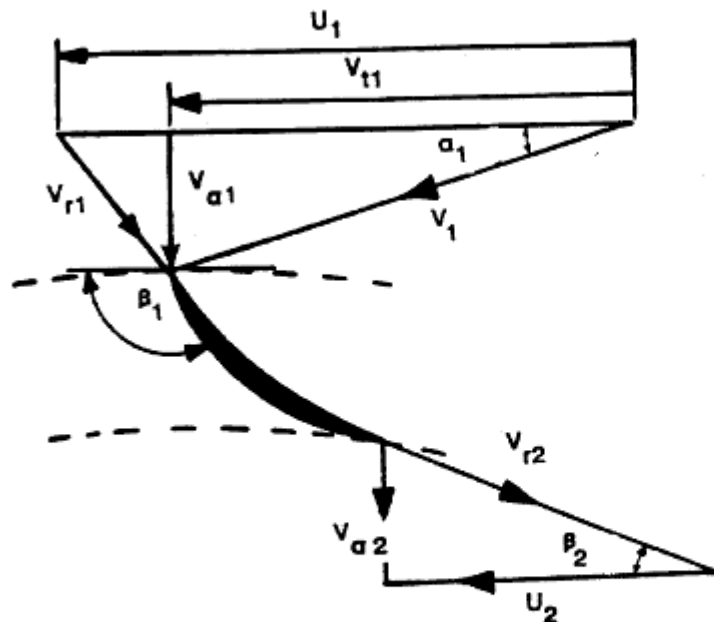
γ) ορθόν εισόδου

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Πρόβλημα 2.2

Κατακορύφου άξονος υδροστροβίλου αξονικής ροής, με μηδενική εφαπτομενική συνιστώσαν ταχύτητας εις την έξοδον, η αναπτυσσομένη ισχύς υπό του δρομέως είναι 16600.0 KW ενώ η παροχή η διερχομένη διά της μονάδος, και όταν το καθαρόν ύψος πτώσεως είναι 35.0 m, ισούται προς 15.0 m³/s. Η διάμετρος του δρομέως είναι ίση προς 1.65 m και περιστρέφεται με 345.0 στροφάς ανά λεπτόν της ώρας. Το ύδωρ εισέρχεται εντός του δρομέως με μηδενικήν γωνίαν προσπτώσεως (η σχετική ταχύτης είναι παράλληλος προς την εφαπτομένην επί του εμπροσθίου άκρου του πτερυγίου) και αξονικήν ταχύτητα εισόδου ίσην προς 5.9 m/s ενώ η αντίστοιχος τιμή της ταχύτητας εξόδου είναι 5.4 m/s. Μεταξύ της εισόδου εις τον δρομέαν του υδροστροβίλου και της εξόδου του ύδατος προς τον αγωγόν φυγής η διαφορά πιεζομετρικού φορτίου είναι 65.0 m. Ζητείται να υπολογισθούν: α) το μέτρον και η διεύθυνσις της ταχύτητας εις την είσοδον εις τον δρομέαν, β) η γωνία εισόδου των πτερυγίων, γ) αι απώλειαι φορτίου εντός του δρομέως, δ) η απώλεια ισχύος εντός του δρομέως και ε) αι χρηματικά απώλειαι διά περίοδον λειτουργίας 8.0 μηνών εκάστου μηνός υπολογιζομένου προς 30.0 ημέρας και με την προϋπόθεσιν ότι η KWh τιμάται προς 25.5 δραχμάς.

3.1 Υδροστροβίλοι δράσεως-Ασκήσεις



Λύσις

α)- Τα τρίγωνα λειτουργίας του υδροστροβίλου δεικνύονται εις το Σχήμα 6α. Εκ του τριγώνου των ταχυτήτων της εισόδου είναι,

$$V_1 = (V_{a1}^2 + V_{t1}^2)^{1/2} \quad \text{ένθα,}$$

$V_{a1} = 5.9 \text{ m/s}$. Εκ της εξισώσεως 3.62 είναι,

$$H_R = \frac{U V_{t1}}{g}$$

διότι η V_{t2} είναι, εκ της εκκωνήσεως του προβλήματος, ίση προς 0.0 m/s. Αλλά,

$$H_R = \frac{I_R}{\rho g Q} = \frac{16600000.0}{1000.0 \times 9.81 \times 15.0} = 112.81 \text{ m}$$

Η γραμμική ταχύτης $U = U_1 = U_2$ και ισούται προς,

$$U = \frac{\pi D N}{60.0} = \frac{3.14 \times 1.65 \times 345.0}{60.0} = 29.79 \text{ m/s}$$

α)

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Επομένως η V_{t1} είναι,

$$V_{t1} = \frac{g H_R}{U} = \frac{9.81 \times 112.81}{29.79} = 37.148 \text{ m/s}$$

άρα η απόλυτος ταχύτης V_1 είναι,

$$V_1 = (5.9^2 + 37.148^2)^{1/2} = 37.61 \text{ m/s}$$

Ενώ η γωνία αυτής μετά της εφαπτομενικής διεύθυνσεως είναι,

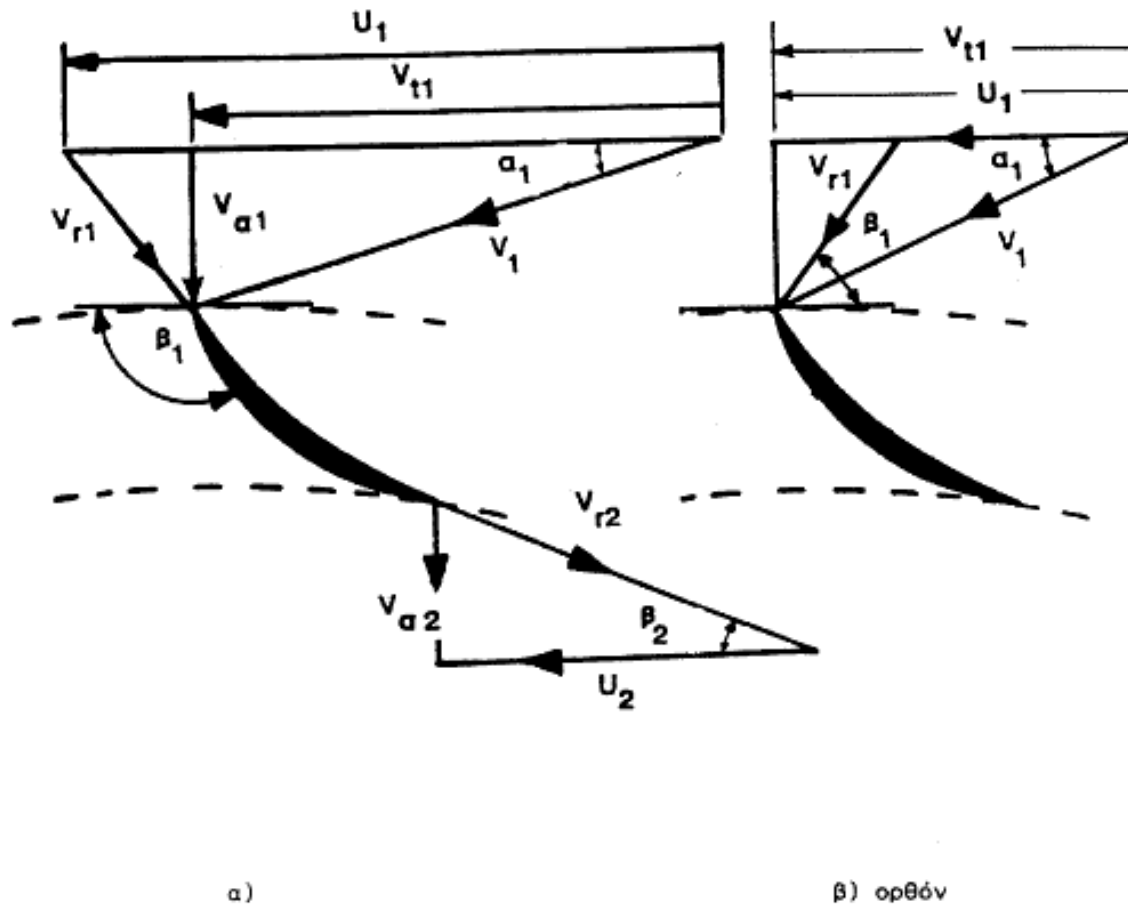
$$\epsilon\phi\alpha_1 = \frac{V_{a1}}{V_{t1}} = \frac{5.9}{37.148} = 0.1568 \quad \text{άρα, } \alpha_1 = 9.02^\circ$$

β) Η γωνία β_1 είναι,

$$\epsilon\phi(180.0 - \beta_1) = \frac{V_{a1}}{U - V_{t1}} = \frac{5.9}{29.79 - 37.148} = -0.801 \quad \text{άρα,}$$

$180.0 - \beta_1 = -38.724$ και $\beta_1 = 218.724^\circ$. Προφανώς ο σχηματισμός του τριγώνου των ταχυτήτων της εισόδου δεν είναι ο ενδεδειγμένος. Η γωνία β_1 πρέπει να είναι $218.724 - 180.0 = 38.724^\circ$ και το ορθόν τρίγωνον των ταχυτήτων δεικνύεται εις το Σχήμα 6β με γωνίαν $\beta_1 = 38.724^\circ$.

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις



Σχήμα 6 Τρίγωνα λειτουργίας εισόδου - εξόδου

3.1 Υδροστροβίλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

γ) Οι απώλειες φορτίου εντός του δρομέως h_{f1-2} δύνανται να υπολογισθούν δι' εφαρμογή της ενεργειακής εξισώσεως μεταξύ των θέσεων 1, (είσοδος) και 2 (έξοδος) του δρομέως. Είναι,

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{U v_{t1}}{g} + h_{f1-2}$$

αλλά $z_1 = z_2$, $v_1 = 37.61 \text{ m/s}$, $v_2 = v_{a2} = 5.4 \text{ m/s}$, $U = 29.79 \text{ m/s}$, $v_{t1} = 37.148 \text{ m/s}$, ενώ,

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = 65.0 \text{ m} \quad \text{άρα,}$$

$$h_{f1-2} = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} - \frac{U v_{t1}}{g} = 65.0 + \frac{37.61^2}{2.0 \times 9.81} - \frac{5.4^2}{2.0 \times 9.81} - \frac{29.79 \times 37.148}{9.81} = 22.8 \text{ m}$$

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

δ) Η ισχύς η οποία καταναλώνεται εντός του δρομέως είναι,

$$I = \rho g Q h_{f1-2} = 1000.0 \times 9.81 \times 15.0 \times 22.8 = 3355306.9 \text{ W} \\ = 3355.3 \text{ KW} = 3.35 \text{ MW}$$

ε) Οι οκτώ μήνες έχουν $8.0 \times 30.0 \times 24.0 = 5760.0$ ώρας, άρα διά συνεχήν λειτουργίαν κατά το ανωτέρω χρονικόν διάστημα αι απώλεια εις KWh θα είναι,

$$3355.3 \times 5760.0 = 19326568.0 \text{ KWh}$$

και εις δραχμάς η ενέργεια αυτή θα είναι,

$$19326568.8 \times 25.5 = 4.83 \times 10^8 \text{ δραχμάς.}$$

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Πρόβλημα 2.3

Υδροστρόβιλος αξονικής ροής τύπου Kaplan έχει ολικήν απόδοσιν λειτουργίας ίσην προς 92.7%. Το καθαρόν ύψος πτώσεως είναι 18.6 m και η αποδιδόμενη ισχύς του δρομέως είναι 18.5 MW. Ο λόγος Φ ($= \frac{U}{V_1}$) της περιστροφικής ταχύτητος U προς την απόλυτον ταχύτητα V_1 είναι 1.45. Ο λόγος Ψ ($= \frac{V_{a1}}{V_1}$) της αξονικής ταχύτητος V_{a1} προς την απόλυτον ταχύτητα είναι 0.73. Ο λόγος της διαμέτρου D_{es} του κυλίνδρου επί του οποίου εδράζονται τα πτερύγια προς την εξωτερικήν διάμετρον D_{ex} των πτερυγίων είναι 0.38. Ζητείται να υπολογισθούν: α) η διάμετρος του δρομέως των πτερυγίων, β) η περιστροφική ταχύτης του δρομέως.

3.1 Υδροστροβίλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

Λύσις

α) Η αποδιδόμενη υπό του δρομέως ισχύς είναι,

$$I_R = \eta \rho g Q H_n$$

και επομένως η παροχή Q είναι,

$$Q = \frac{I_R}{\eta \rho g H_n}$$

αλλά $I_R = 18500000.0 \text{ W}$, $\eta = 0.927$ και $H_n = 18.6 \text{ m}$. Άρα,

$$Q = \frac{18500000.0}{0.927 \times 1000.0 \times 9.81 \times 18.6} = 109.37 \text{ m}^3/\text{s}$$

Είναι,

$$Q = A V_{\alpha 1} = \frac{\pi (D_{\epsilon\xi}^2 - D_{\epsilon\sigma}^2)}{4.0} V_{\alpha 1} = \frac{\pi [D_{\epsilon\xi}^2 (1.0 - D_{\epsilon\sigma}^2/D_{\epsilon\xi}^2)]}{4.0} V_{\alpha 1}$$

3.1 Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής-Ασκήσεις

επομένως,

$$D_{εξ} = \left[\frac{4.0 Q}{\pi (1.0 - D_{εσ}^2/D_{εξ}^2) V_{α1}} \right]^{1/2}$$
$$= \left[\frac{4.0 \times 109.37}{3.14 \times (1.0 - 0.38^2) \times 0.73 \times (2.0 \times 9.81 \times 18.6)^{1/2}} \right]^{1/2} = 3.42 \text{ m}$$

διότι $D_{εσ}/D_{εξ} = 0.38$ και $V_{α1} = \Psi V_1 = \Psi (2.0 g H_n)^{1/2}$ με $\Psi = 0.73$.

β) Η γραμμική ταχύτητα U του δρομέως είναι,

$$U = \Phi V_1 = 1.45 \times (2.0 \times 9.81 \times 18.6)^{1/2} = 1.45 \times 19.103 = 27.699 \text{ m/s}$$

Η περιστροφική ταχύτητα είναι,

$$N = \frac{60.0 U}{\pi D} = \frac{60.0 \times 27.699}{3.14 \times 3.42} = 154.685 \text{ στροφές ανά λεπτόν}$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

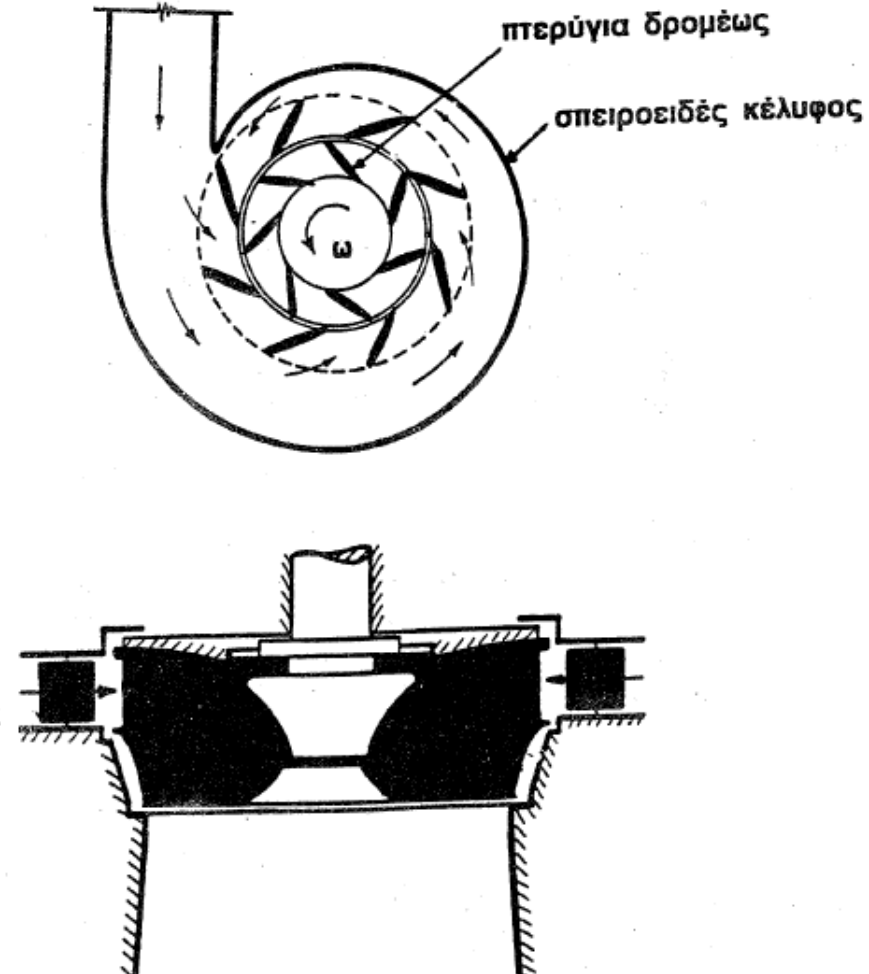
3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.1 Κύρια μέρη υδροστροβίλου Francis

Οι υδροστροβίλοι μικτής ροής ή υδροστροβίλοι Francis έχουν απόδοση λειτουργίας η οποία μπορεί να φτάσει στο 90.0%, το ύψος πτώσης κυμαίνεται μεταξύ 15.0 και 300.0m ενώ η ειδική ταχύτητα βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 60 και 300.

Η πλειοψηφία των υδροστροβίλων Francis έχουν την άτρακτο σε κατακόρυφη θέση. Σε περιπτώσεις μικρής ισχύος, είναι δυνατό η άτρακτος να βρίσκεται σε οριζόντια θέση.

Το όνομά του το φέρουν από τον μηχανικό που τα κατασκεύασε τον J.B. Francis το 1849.



Σχήμα 3.22 Υδροστροβίλος μικτής ροής (Francis)

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.1 Κύρια μέρη υδροστροβίλου Francis

Τα κύρια μέρη του υδροστροβίλου αντιδράσεως τύπου Francis είναι:

- Το σπειροειδές κέλυφος
- Τα οδηγά πτερύγια
- Ο δρομέας
- Ο αγωγός φυγής

Τα οδηγά πτερύγια (guide runners): Μέσω του σπειροειδούς κελύφους το νερό υποχρεούται να περάσει μέσα ακίνητα οδηγά πτερύγια τα οποία είναι προσαρμοσμένα στην περιφέρεια του δρομέα. Τα οδηγά πτερύγια έχουν σκοπό να κατευθύνουν το νερό προς το δρομέα με συγκεκριμένη γωνία προσβολής, ώστε το νερό να πέφτει στα πτερύγια του δρομέα με τον ελάχιστο σχηματισμό δινών και τις ελάχιστες απώλειες λόγω τριβής.



3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.1 Κύρια μέρη υδροστροβίλου Francis

Δρομέας (runner): Ο δρομέας του υδροστροβίλου Francis αποτελείται από μια σειρά καμπυλωμένων πτερυγίων τα οποία είναι συμμετρικά κατανομημένα και προσαρμοσμένα επί της περιφέρειας. \

Τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα με τέτοιο τρόπο ώστε το νερό να εισέρχεται στο δρομέα ακτινικά στο ύψος της εξωτερικής περιφέρειας και να εξέρχεται κατά την αξονική διεύθυνση στο ύψος της εσωτερικής περιφέρειας.

Η λειτουργία του δρομέα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η απόλυτη ταχύτητα του νερού που διαφεύγει από το δρομέα να έχει σχεδόν μηδενική εφαπτομενική ταχύτητα.



3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

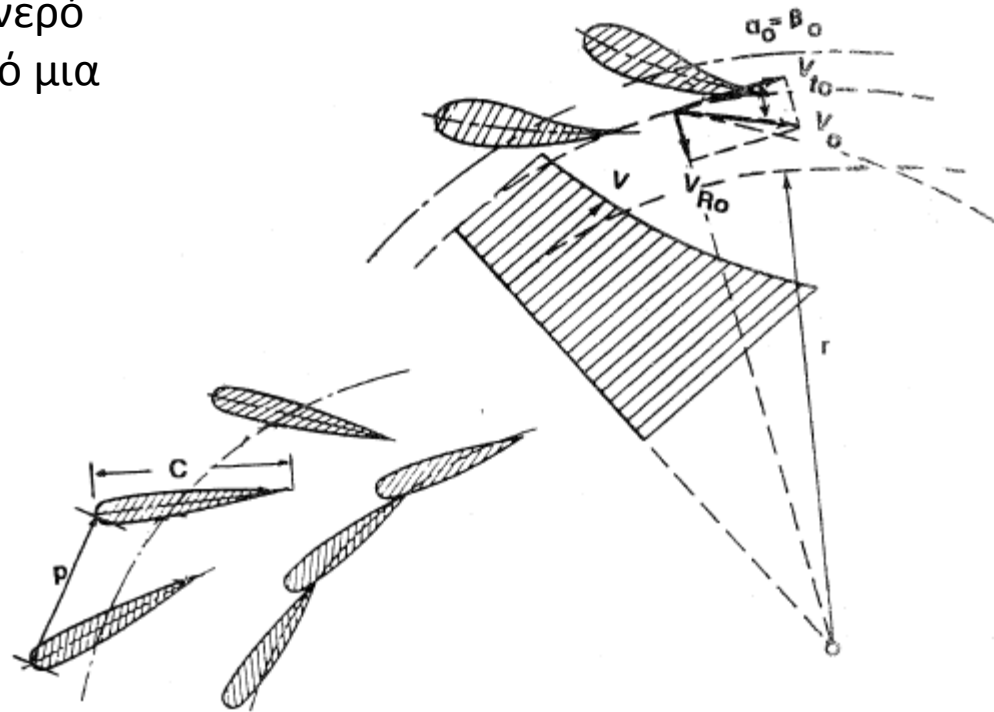
3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Σε όλες τις στροβιλομηχανές μικτής ροής το νερό προσέρχεται προς το δρομέα εξερχόμενο από μια σειρά καθοδηγών πτερυγίων.

Τα πτερύγια θεωρούνται συμμετρικά όταν η κεντρική γραμμή της διατομής είναι ευθεία γραμμή, και μη-συμμετρικά όταν η γραμμή είναι καμπύλη.

Στο σχήμα καθορίζεται η απόσταση p μεταξύ διαδοχικών πτερυγίων και το μήκος της χορδής C . Ο λόγος C/p εκφράζει την πυκνότητα των πτερυγίων σε μια σειρά. Ο λόγος αυτός είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας και συνήθως παίρνει την τιμή 1.1.



έλεγχος παροχής μέσω καθοδηγών πτερυγίων

α) συμμετρική σειρά

β) μη-συμμετρική σειρά

Σχήμα 3.25 Ροή κατάντη των οδηγών πτερυγίων

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

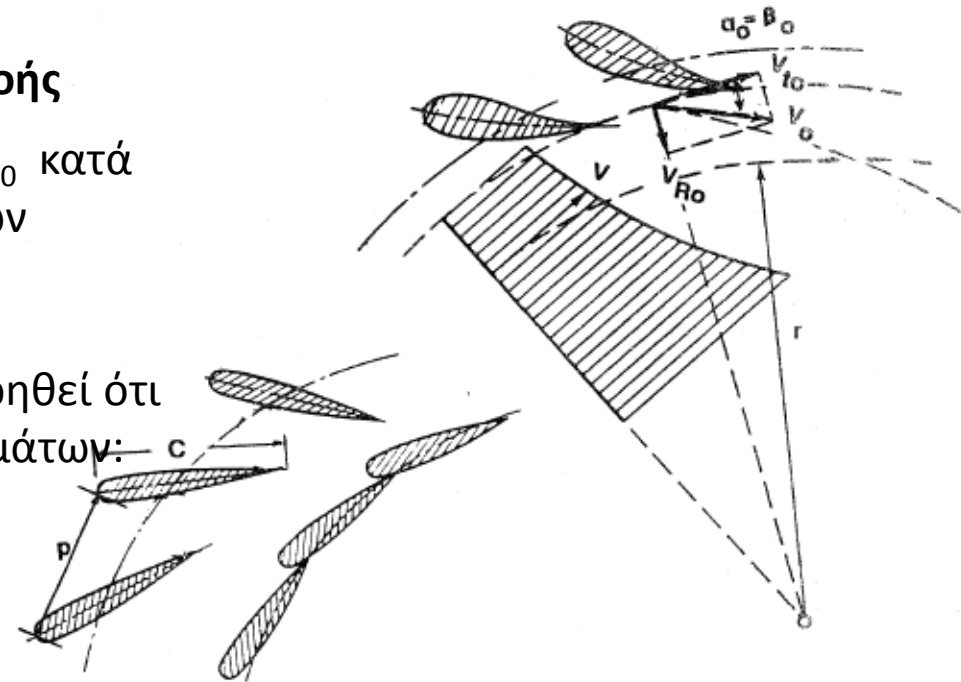
Σε πυκνή σειρά πτερυγίων, η γωνία της ροής β_0 κατά την έξοδο του νερού συμπίπτει με τη γωνία των πτερυγίων α_0 .

Το διάνυσμα της ταχύτητας \bar{V}_0 μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το άθροισμα των δυο επιμέρους διανυσμάτων:

- α) της ακτινικής συνιστώσας \bar{V}_{R0}
- β) της εφαπτομενικής συνιστώσας \bar{V}_{t0}

Δηλαδή:

$$\bar{V}_0 = \bar{V}_{R0} + \bar{V}_{t0}$$



έλεγχος παροχής μέσω καθοδηγών πτερυγίων

α) συμμετρική σειρά

β) μή-συμμετρική σειρά

(3.63)

Σχήμα 3.25 Ροή κατάντη των οδηγών πτερυγίων

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Εάν είναι γνωστές οι διαστάσεις της σειράς των οδηγών πτερυγίων καθώς και η παροχή Q που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο, τότε:

$$V_{Ro} = \frac{Q}{2.0 \pi r_o h_o} \quad (3.64)$$

όπου h_o το ύψος των οδηγών πτερυγίων

Από το Σχήμα 3.25 έχουμε ότι:

$$V_o = \frac{V_{Ro}}{\eta_{μα_o}} \quad (3.65)$$

$$V_{to} = V_o \sigma_{υνα_o} \quad (3.66)$$

Η παρουσία εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας δείχνει ότι υπάρχει περιστροφή της ροής γύρω από τον άξονα 0. Αποδεικνύεται ότι για το χώρο που βρίσκεται κατάντη των οδηγών πτερυγίων και ανάντη του δρομέα, και θεωρώντας την απουσία διατμητικών δυνάμεων ότι (ελευθέρα στρέβλωση) :

$$V_t r = \text{σταθερόν} \quad (3.67)$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Η κίνηση του νερού στο δρομέα θεωρείται ότι συντίθεται από 2 επιμέρους κινήσεις: την απόλυτο και τη σχετική.

Η σχετική κίνηση εννοείται με αναφορά το κινούμενο σύστημα δηλαδή το δρομέα, ενώ η απόλυτη κίνηση είναι με αναφορά ακίνητο σύστημα (παρατηρητή).

Εάν το διάνυσμα της γραμμικής ταχύτητας του δρομέα ορισθεί ως \bar{U} , το διάνυσμα των σχετικών ταχυτήτων με \bar{V}_r , και το διάνυσμα των απόλυτων ταχυτήτων με \bar{V} τότε:

$$\bar{V} = \bar{U} + \bar{V}_r \quad (3.68)$$

Τα μέτρα των παραπάνω διανυσμάτων είναι V , U και V_r αντίστοιχα. Εάν θέσουμε δείκτη 1 στην είσοδο και δείκτη 2 στην έξοδο του νερού από τα πτερύγια του δρομέα τότε η προηγούμενη εξίσωση γράφεται:

$$\bar{V}_1 = \bar{U}_1 + \bar{V}_{r1} \quad (3.69)$$

$$\bar{V}_2 = \bar{U}_2 + \bar{V}_{r2} \quad (3.70)$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

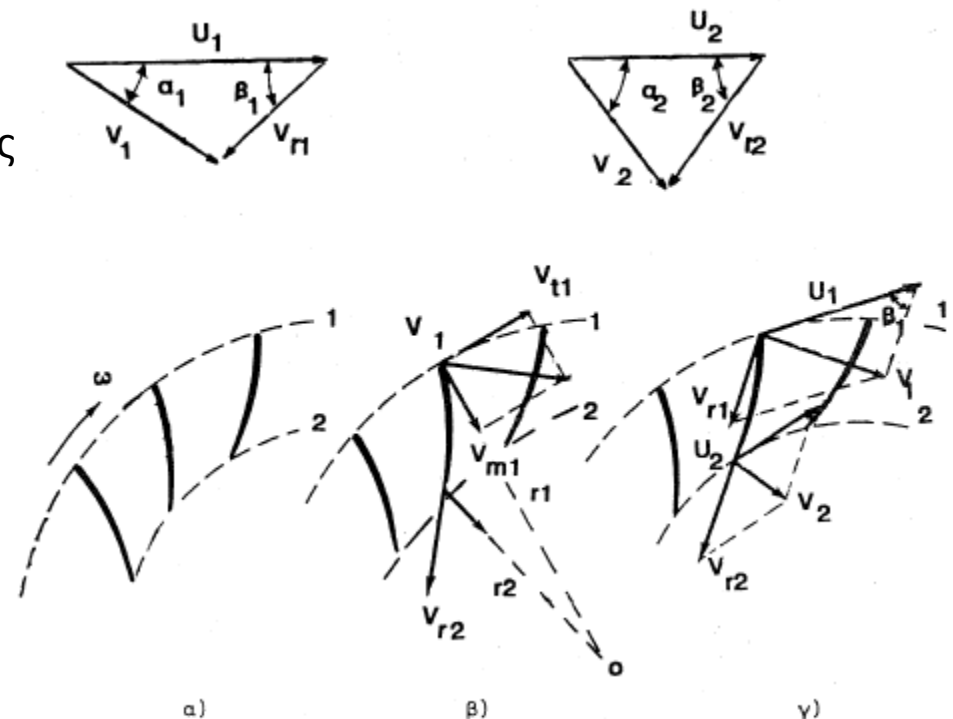
3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Οι προηγούμενες διανυσματικές εξισώσεις ισχύουν για οποιοδήποτε σημείο που βρίσκεται επί των πτερυγίων μεταξύ της εισόδου και εξόδου.

Αν τα πτερύγια κινούνται με γωνιακή ταχύτητα ω , τότε η αντίστοιχη γραμμική ταχύτητα στην είσοδο και την έξοδο της ροής επί των πτερυγίων θα είναι

$U_1 = \omega r_1$ και $U_2 = \omega r_2$ αντίστοιχα, με r_1 και r_2 οι αντίστοιχες ακτίνες.

Έστω ότι οι απόλυτες ταχύτητες του νερού κατά την είσοδο και έξοδο είναι V_1 και V_2 αντίστοιχα, και V_{r1} και V_{r2} οι αντίστοιχες σχετικές ταχύτητες.



Σχήμα 3.26 Τρίγωνα ταχυτήτων δρομέως μικτής ροής

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

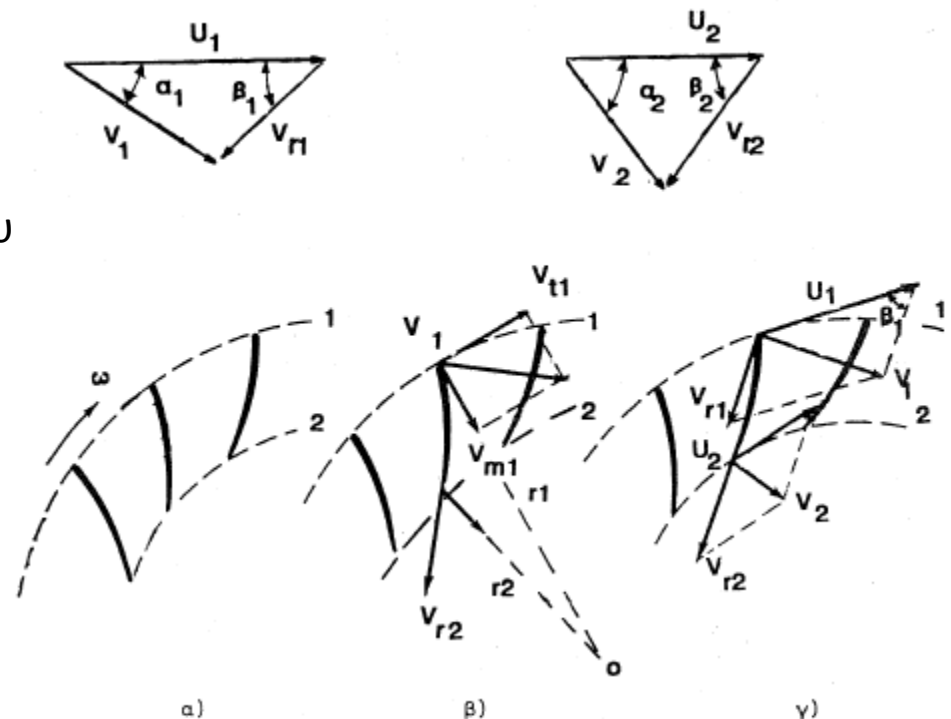
3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι V_{r1} και V_{r2} να είναι εφαπτομενικές του εμπρόσθιου και οπίσθιου άκρου αντίστοιχα του εκάστοτε πτερυγίου. Επίσης, β_1 και β_2 είναι οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ της γραμμικής και σχετικής ταχύτητας, ενώ α_1 και α_2 οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ της γραμμικής και απόλυτης ταχύτητας στην είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα.

Οι συνθήκες λειτουργίας του υδροστροβίλου προκαθορίζονται από την παροχή Q και της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα.

Όταν οι διαστάσεις του δρομέα έχουν πλέον καθοριστεί είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι συνιστώσες του παραλληλόγραμμου (τριγώνου) των ταχυτήτων.



Σχήμα 3.26 Τρίγωνα ταχυτήτων δρομέως μικτής ροής

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Πρώτα καθορίζεται η απόλυτη ταχύτητα εισόδου V_1 για την οποία ισχύει

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{m1} + \bar{V}_{t1} \quad (3.71)$$

όπου \bar{V}_{m1} το διάνυσμα της ταχύτητας επί του μεσημβρινού επιπέδου.

$$V_{m1} = \frac{Q}{2.0 \pi r_1 h_1} \quad (3.72)$$

και

$$V_{t1} = \frac{V_{to} r_{o2}}{r_1} \quad (3.73)$$

όπου r_{o2} η ακτίνα στην έξοδο του οδηγού σειράς των πτερυγιών. Το τρίγωνο των ταχυτήτων είναι δυνατόν να σχηματιστεί γιατί πλέον είναι γνωστές α) η απόλυτη ταχύτητα \bar{V}_1 , β) η γραμμική ταχύτητα U_1 (Σχήμα 3.26β)

Κατά την έξοδο του νερού από τα πτερύγια του δρομέα ισχύει ανάλογη σχέση με την Εξ. 3.72

$$V_{m2} = \frac{Q}{2.0 \pi r_2 h_2} \quad (3.74)$$

και

$$V_{r2} = \frac{V_{m2}}{\eta \mu \beta_2} \quad (3.75)$$

Το τρίγωνο των ταχυτήτων κατά την έξοδο (Σχήμα 3.26γ) επιτρέπει τον υπολογισμό της απόλυτης ταχύτητας V_2 αφού πλέον είναι γνωστές οι σχετική και γραμμική ταχύτητες.

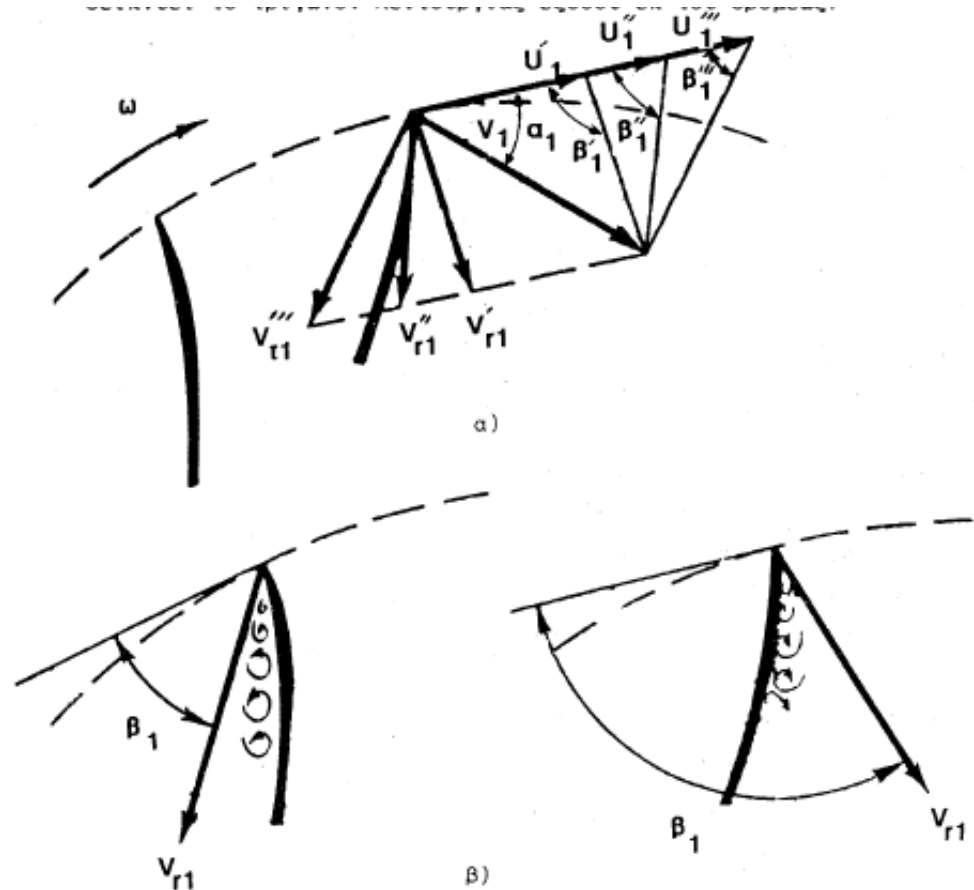
3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Στο Σχήμα 3.27α παρουσιάζονται τα τρίγωνα λειτουργίας εισόδου δρομέα υδροστροβίλου μικτής ροής για διαφορετικές τιμές της γωνίας β_1 .

Το Σχήμα 3.27β δείχνει το σχηματισμό έντονων δινών επί των πλευρών κατάθλιψης και αναρρόφησης των πτερυγίων.



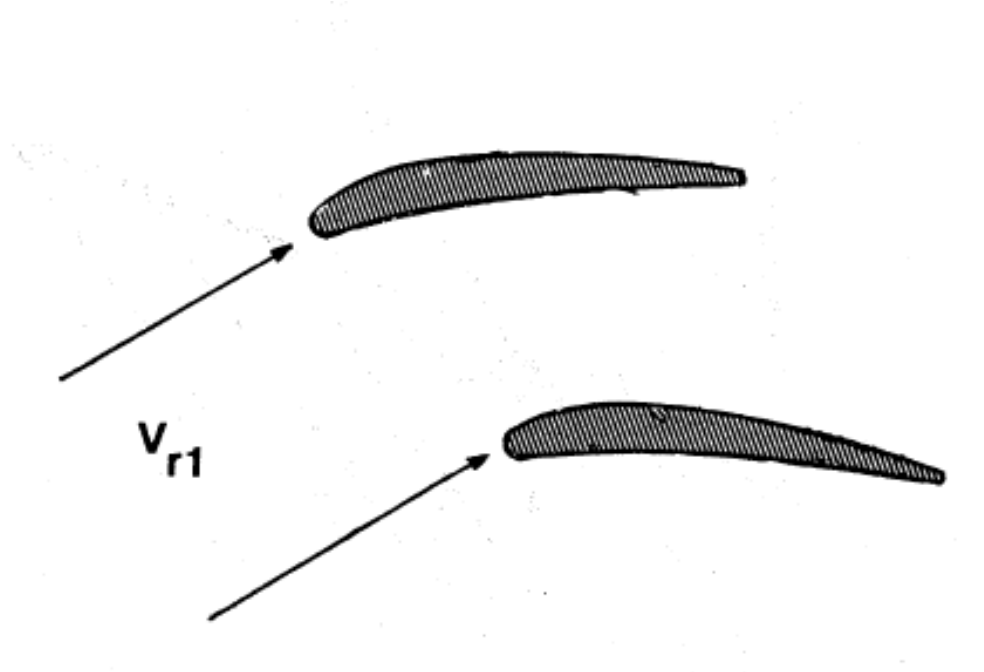
Σχήμα 3.27 Ροή περίε εμπροσθίου άκρου πτερυγίου δρομέως υδροστροβίλου μικτής ροής

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

Επίσης η ταχύτητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο εφαπτομενική επί του εμπρόσθιου άκρου του πτερυγίου, Σχήμα 3.28.



Σχήμα 3.28 Η V_{r1} πρέπει να είναι εφαπτομενική επί του εμπροσθίου άκρου του πτερυγίου του δρομέως

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.2 Βασικές εξισώσεις βαθμίδας μικτής ροής

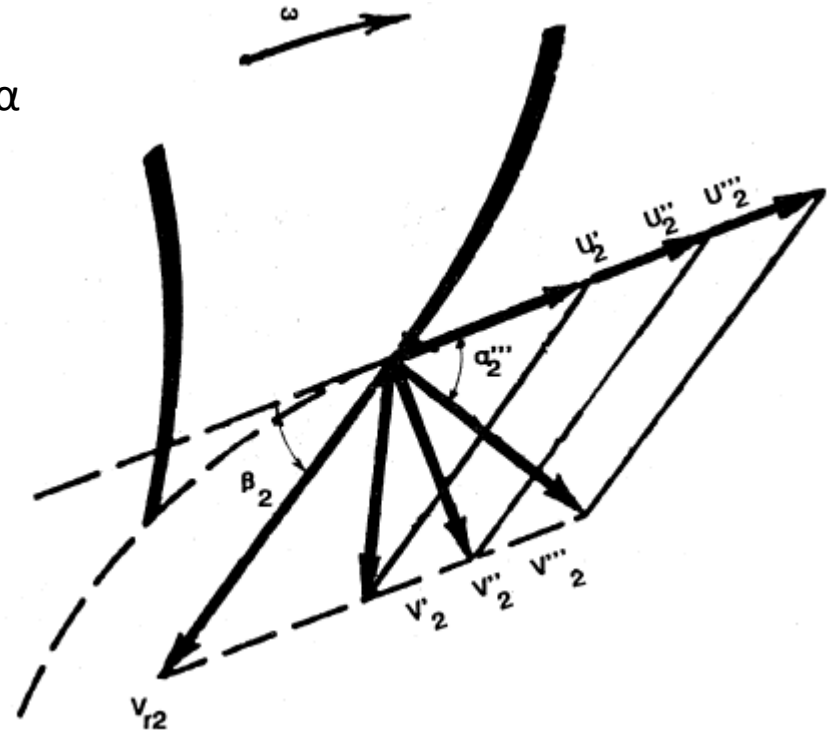
Στο Σχήμα 3.29 δείχνονται τα τρίγωνα ταχυτήτων κατά την έξοδο από το δρομέα.

Η σχετική ταχύτητα βαίνει παράλληλα προς τη γωνία β_2 , αλλά λόγω μεταβολής της γραμμικής ταχύτητας U_2 μεταβάλλεται και η απόλυτη ταχύτητα V_2 .

Εάν η γωνία α_2 είναι μικρότερη των 90.0° τότε η περιστροφή της ροής στην έξοδο ακολουθεί τη διεύθυνση περιστροφής των πτερυγίων.

Εάν η γωνία α_2 είναι μεγαλύτερη των 90.0° τότε η περιστροφή της ροής στην έξοδο ακολουθεί αντίθετη διεύθυνση σε σχέση με τη διεύθυνση περιστροφής των πτερυγίων.

Εάν η γωνία α_2 είναι 90.0° τότε δεν υπάρχει περιστροφή της ταχύτητας στην έξοδο. Αυτή η συνθήκη είναι η πλέον ευνοϊκή για τη λειτουργία του στροβίλου γιατί οι απώλειες είναι ελάχιστες, αφού $V_2 = 0.0 \text{ m/sec}$ και οι απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου της απόλυτης ταχύτητας.



Σχήμα 3.29 Ροή εις το οπίσθιον άκρον πτερυγίου δρομέως

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

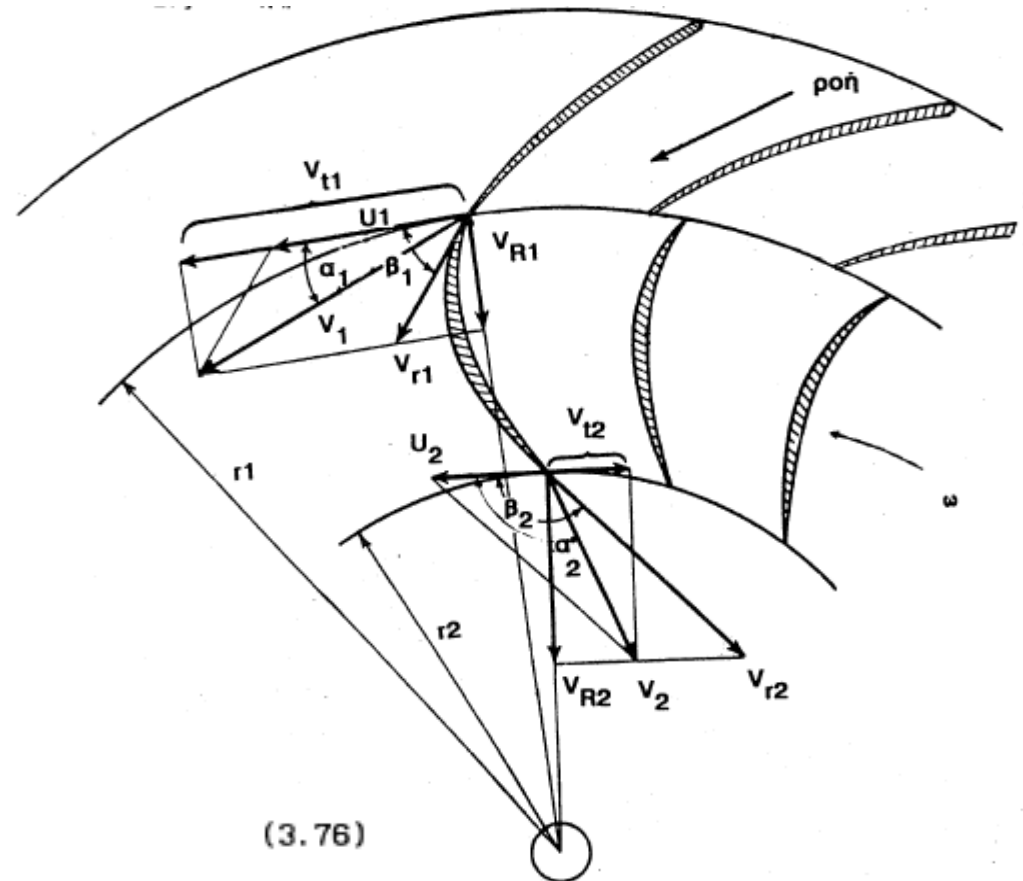
3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Στο Σχήμα 3.30 δείχνονται τα τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου-εξόδου υδροστροβίλου αξονικής ροής.

Από την Εξίσωση 2.19 (το διανυσματικό άθροισμα όλων των εξωτερικών δυνάμεων (ροπών) που δρουν επί συστήματος το οποίο βρίσκεται πέριξ τυχαίου άξονα A-A' είναι ίσο με τη μεταβολή της ροπής της ορμής του συστήματος πέριξ του άξονα αυτού) και Εξίσωση 2.24 (Εξίσωση ενέργειας ανά μονάδα μάζας ρέοντος ρευστού, Εξίσωση Euler, για στροβίλους) η ροπή που αναπτύσσεται στο δρομέα είναι:

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



Σχήμα 3.30 Διάγραμμα τριγώνων λειτουργίας υδροστροβίλου αντιδράσεως αξονικής ροής

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Ο υπολογισμός των V_{t1} και V_{t2} γίνεται ως εξής: από το τρίγωνο εισόδου η εφαπτομενική συνιστώσα V_{t1} της απόλυτης ταχύτητας εισόδου είναι V_1 είναι:

$$V_{t1} = \omega r_1 + V_{R1} \sigma\phi\beta_1 \quad (3.77)$$

Η εφαπτομενική συνιστώσα V_{t2} της απόλυτης ταχύτητας εξόδου είναι V_2 , από το τρίγωνο εξόδου είναι:

$$V_{t2} = \omega r_2 + V_{R2} \sigma\phi\beta_2 \quad (3.78)$$

Κατά συνέπεια η αναπτυσσόμενη ισχύς I_R επί του δρομέα είναι:

$$I_R = T \omega = \rho Q [(\omega r_1 + V_{R1} \sigma\phi\beta_1) r_1 - (\omega r_2 + V_{R2} \sigma\phi\beta_2) r_2] \omega \quad (3.79)$$

Οι ταχύτητες V_{R1} και V_{R2} στην περίπτωση υδροστροβίλων ακτινικής ροής, ταυτίζονται με τις ταχύτητες V_{m1} και V_{m2} (Εξισώσεις 3.72 και 3.74).

Μια άλλη έκφραση της εξίσωσης 3.79 είναι:

$$I_R = \rho Q (V_1 \sigma\upsilon\alpha_1 r_1 - V_2 \sigma\upsilon\alpha_2 r_2) \omega \quad (3.80)$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Δύναται να τεθεί:

$$I_R = \rho g Q H_R \quad (3.81)$$

όπου H_R το εσωτερικό ύψος του δρομέα, οπότε η Εξ. 3.80 δίνει:

$$H_R = \frac{(V_1 \sigma \alpha_1 r_1 - V_2 \sigma \alpha_2 r_2) \omega}{g} \quad (3.82)$$

ή

$$H_R = \frac{U_1 V_1 \sigma \alpha_1 - U_2 V_2 \sigma \alpha_2}{g} \quad (3.83)$$

Η παραπάνω εξίσωση **ονομάζεται εξίσωση του Euler** για τους υδροστροβίλους και αναπαριστά τη κύρια ενεργειακή εξίσωση της ροής στον δρομέα των υδροστροβίλων.

Εάν θέσουμε ως **κυκλοφορία** Γ (m^2/s) το γινόμενο $2.0 \pi r V \sigma \alpha$ τότε η εξίσωση 3.82 γράφεται:

$$H_R = \frac{(\Gamma_1 - \Gamma_2) \omega}{2.0 \pi g} \quad (3.84)$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Η παραπάνω εξίσωση ορίζει πως δημιουργείται φορτίο (ύψος) μόνο όταν τα πτερύγια δημιουργούν διαφορά κυκλοφορίας μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Από το Σχήμα 3.30 ισχύουν επίσης οι εξής εξισώσεις:

$$v_{r1}^2 = U_1^2 + V_1^2 - 2.0 U_1 V_1 \sin\alpha_1 \quad (3.85)$$

$$v_{r2}^2 = U_2^2 + V_2^2 - 2.0 U_2 V_2 \sin\alpha_2 \quad (3.86)$$

Από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων με την εξίσωση 3.83 προκύπτει ότι:

$$H_R = \frac{U_1^2 - U_2^2}{2g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} - \frac{v_{r1}^2 - v_{r2}^2}{2g} \quad (3.87)$$

Οι εξισώσεις 3.83 και 3.87 θεωρούνται οι πλέον βασικές εξισώσεις για τη λειτουργία των υδροστροβίλων για διάφορες τιμές των μεταβλητών ω και H_R .

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Η ολική απόδοση ή απλώς απόδοση n ενός υδροστροβίλου αντιδράσεως είναι ο λόγος της παραχθείσας ισχύος προς τη διαθέσιμη ισχύ, οπότε έχουμε:

$$n = \frac{I_R}{\rho g Q H_n} \quad (3.88)$$

όπου H_n το καθαρό ύψος πτώσης. Ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από το 90.0%. Η απόδοση λειτουργίας σε υδροστροβίλους μικτής ροής συνίστανται από τις παρακάτω αποδόσεις λειτουργίας:

- α) υδραυλικές, n_h
- β) μηχανικές, n_m
- γ) ογκομετρικές, n_v

Επομένως, η ολική απόδοση είναι το γινόμενο των παραπάνω αποδόσεων:

$$n = n_h n_m n_v \quad (3.89)$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Από τους παραπάνω συντελεστές αποδόσεων, ο n_v εμφανίζεται λόγω της ύπαρξης διακένων μεταξύ των περιστρεφόμενων μερών και του περιβάλλοντος χώρου. Κατά συνέπεια ένα μικρό τμήμα της παροχής Q_v διαφεύγει και η διαθέσιμη παροχή προς το δρομέα είναι $Q - Q_v$.

Η διαφυγή γίνεται πάντοτε προς την κατεύθυνση της μειωμένης πίεσης και εξαρτάται από το εμβαδό της επιφάνειας της διατομής του διακένου, δηλαδή:

$$n_v = \frac{Q - Q_v}{Q} \quad (3.90)$$

Για να μειωθούν οι ογκομετρικές απώλειες, n_v (m), στους μεν υδροστροβίλους ακτινικής (μικτής) ροής χρησιμοποιούνται τεχνικές περιορισμού των διαρροών τύπου λαβύρινθου, στους δε υδροστροβίλους αξονικής ροής, το διάκενο που υπάρχει πρακτικά συνεισφέρει ελάχιστα στη διαρροή.

Ο συντελεστής μηχανικής αποδόσεως, ο n_m είναι ο λόγος της ισχύς που λαμβάνεται από την άτρακτο προς την ισχύ που αποδίδεται από την άτρακτο. Το γεγονός της διαφοροποίησης οφείλεται στις μηχανικές τριβές (απώλειες), h_m (m), που αναπτύσσονται στα περιστρεφόμενα μέρη λόγω της ροής. Ο συντελεστής n_m δίνεται ως:

$$n_m = \frac{I_R}{\rho g (Q - Q_v) H_R} \quad (3.91)$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Ο συντελεστής υδραυλικής απόδοσης ο n_h είναι ο λόγος της ισχύς που αναπτύσσεται από το δρομέα προς τη διαθέσιμη ισχύ, και δίδεται ως:

$$n_h = \frac{I_R}{\rho g (Q - Q_v) H_n} \quad (3.92)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$n_h = \frac{H_R}{H_n} \quad (3.93)$$

Οι υδραυλικές απώλειες $h_h = H_n - H_R$ οφείλονται στις τριβές του ρέοντος νερού που αναπτύσσονται α) εντός του σπειροειδούς κελύφους, $h_{σκ}$ (m), β) στα οδηγία πτερύγια $h_{οπ}$ (m), γ) στα πτερύγια του δρομέα, $h_{δρ}$ (m), δ) εντός του αγωγού φυγής, $h_{αφ}$ (m), και ε) στην έξοδο από τον αγωγό φυγής (στην είσοδο της διώρυγας απαγωγής), $h_{εξ}$ (m). Είναι δηλαδή:

$$h_h = h_{σκ} + h_{οπ} + h_{δρ} + h_{αφ} + h_{εξ} \quad (3.94)$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας

Βάση όλων των παραπάνω η ολική απόδοση (Εξ. 3.88) μπορεί να γραφεί ως:

$$\eta = 1.0 - \frac{h_h + h_m + h_v}{H_n} \quad (3.95)$$

ή:

$$\eta = 1.0 - \frac{(h_{σκ} + h_{οπ} + h_{δρ} + h_{αφ} + h_{εξ}) + h_m + h_v}{H_n} \quad (3.96)$$

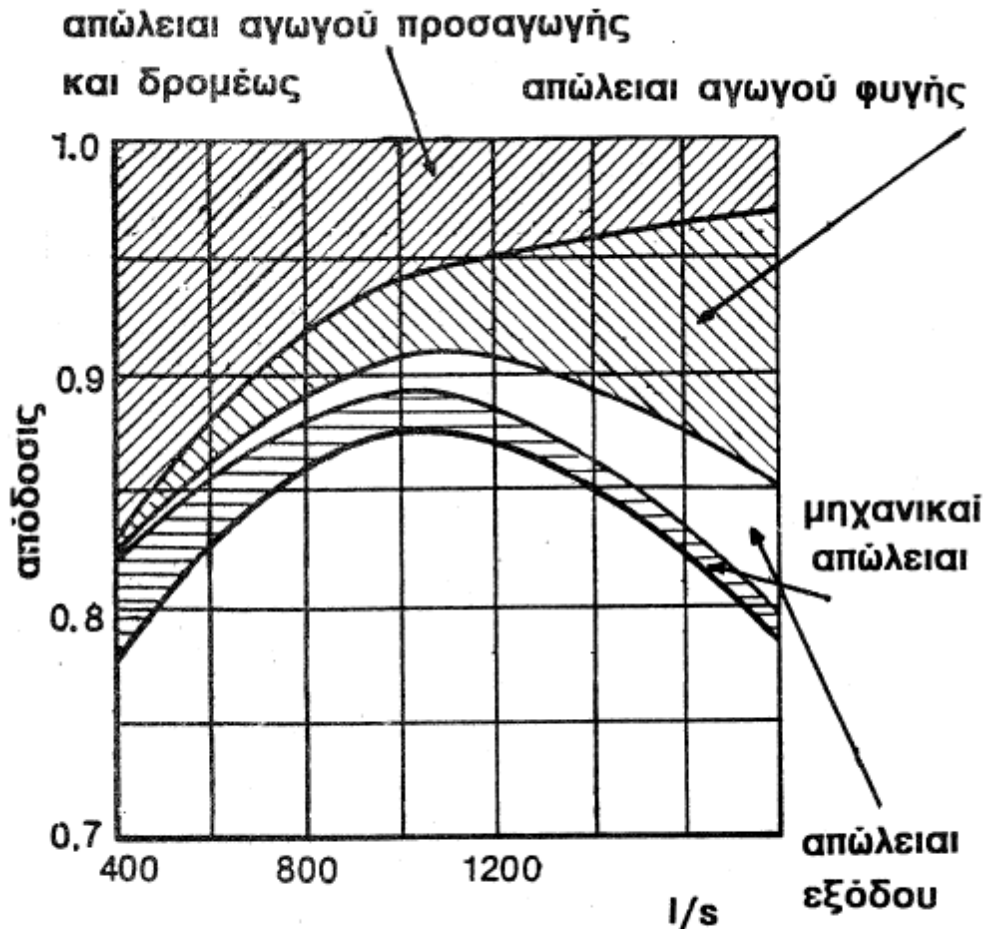
Στο Σχήμα 3.31 παρουσιάζονται οι τυπικές απώλειες σε ομοίωμα υδροστροβίλου που είναι εφοδιασμένος με κινητά πτερύγια (οδηγά και δρομέα), με μοναδιαία περιστροφική ταχύτητα, N_ϵ , ίση με 130.0 (στροφές/λεπτό).

Οι μηχανικές απώλειες είναι ελάχιστες, και οι πλέον βασικές απώλειες είναι οι υδραυλικές απώλειες οι οποίες εξαρτώνται από τη διερχόμενη παροχή μέσω του υδροστροβίλου. Στη συγκεκριμένη περιοχή σχεδιασμού οι απώλειες εντός του σπειροειδούς κελύφους ισούνται περίπου με τις απώλειες του αγωγού φυγής.

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.3 Απόδοση λειτουργίας και απώλειες ενέργειας



Σχήμα 3.31 Απόδοση εντός υδροστροβίλου αξονικής ροής με κινητά πτερόγυλα (οδηγά-δρομέως)

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

Παράδειγμα : Είς υδροστρόβιλος αντιδράσεως τύπου Francis έχει δρομέαν εξωτερικής διαμέτρου $D_1 = 1350.0$ mm και εσωτερικής $D_2 = 675.0$ mm. Το εμβαδόν της διατομής της εισόδου της ροής εις τον δρομέαν είναι το ίδιον μετά του εμβαδού της διατομής της εξόδου της ροής εκ του δρομέως. Τα οδηγία πτερύγια είναι διευθετημένα κατά γωνίαν $\beta_0 = 20.0^\circ$ ενώ η γωνία εξόδου εκ του δρομέως είναι $\beta_2 = 30.0^\circ$, ιδέ Σχήμα 3.30. Με την παραδοχήν ότι η εφαπτομενική ταχύτης εξόδου V_{t2} είναι μηδενική και δοθέντος ότι η παροχή $Q = 7.8$ m³/s, το ολικόν φορτίον $H_n = 29.0$ m, η αναπτυσσομένη ισχύς $I = 1.9$ MW και η περιστροφική ταχύτης του δρομέως N είναι 250.0 στροφαί ανά πρώτον λεπτόν της ώρας, να υπολογισθούν :

- α) η βελτίστη τιμή της γωνίας των πτερυγίων του δρομέως β_1 ,
- β) το ύψος του κινηματικού φορτίου εις την είσοδον του αγωγού φυγής,
- γ) η μηχανική απόδοσις λειτουργίας,
- δ) η υδραυλική απόδοσις λειτουργίας και
- ε) η απόδοσις λειτουργίας του υδροστροβίλου

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

Λύσις : α) Η βελτίστη τιμή της γωνίας β_1 των πτερυγίων του δρομέως εις την είσοδον είναι εκείνη η οποία υποχρεώνει το ύδωρ να εισέρχεται εντός του δρομέως κατά διεύθυνσιν εφαπτομενικήν επί των πτερυγίων. Διά να γίνη η επίλυσις του τριγώνου των ταχυτήτων της εισόδου πλην της γωνίας β_0 και της γραμμικής ταχύτητος U_1 πρέπει να είναι γνωστή μία ακόμη τιμή ταχύτητος. Η γραμμική ταχύτης U_1 υπολογίζεται ως,

$$U_1 = 2.0 \pi r_1 N = 2.0 \times \pi \times 0.675 \times 250.0/60.0 = 17.671 \text{ m/s}$$

Εκ του τριγώνου των ταχυτήτων της εξόδου εκ των πτερυγίων του δρομέως είναι,

$$U_2 = 2.0 \pi r_2 N = 2.0 \times \pi \times 0.3375 \times 250.0/60.0 = 8.836 \text{ m/s}$$

Επειδή $V_{t2} = 0.0 \text{ m/s}$, εκ της εκφωνίσεως, θα είναι $V_2 = V_{R2}$ και επομένως,

$$V_{R2} = U_2 \epsilon\phi\beta_2 = 8.836 \times \epsilon\phi 30^\circ = 5.101 \text{ m/s}$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

Επειδή όμως το εμβαδόν της διατομής της εισόδου της ροής εις τον δρομέαν είναι το ίδιο μετὰ του εμβαδού της διατομής της εξόδου της ροής εκ του δρομέως θα είναι, λόγω της διατηρήσεως της συνεχείας της μάζης,

$$V_{R1} = V_{R2} = 5.101 \text{ m/s}$$

Εκ του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου θα είναι,

$$V_{t1} = V_{R2} \sigma\phi\beta_o = 5.101 \times \sigma\phi 20^\circ = 14.015 \text{ m/s}$$

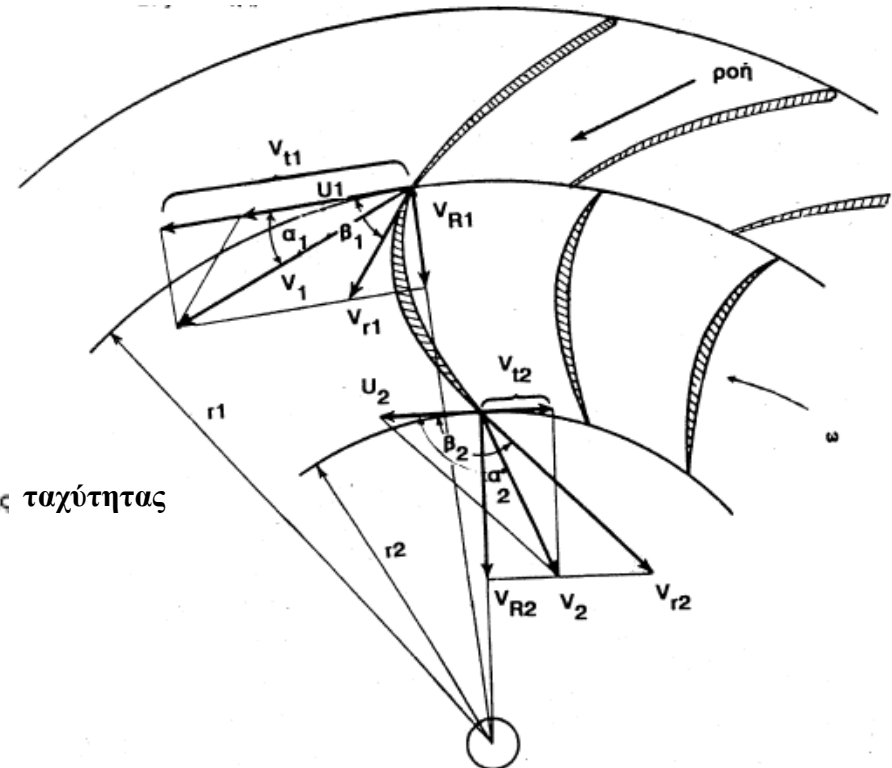
και επομένως η γωνία β_1 η σχηματιζομένη μεταξύ της σχετικής ταχύτητας

V_{r1} και της εφαπτομενικής V_{t1} θα είναι, ιδέ Σχήμα 3.30,

$$\epsilon\phi\beta_1 = V_{R1} / (U_1 - V_{t1}) = 5.101 / (17.671 - 14.015) = 1.395$$

άρα η γωνία β_1 είναι,

$$\beta_1 = \epsilon\phi^{-1} 1.395 = 54.365^\circ$$



Σχήμα 3.30 Διάγραμμα τριγώνων λειτουργίας υδροστρόβιλου αντιδράσεως ακτινικής ροής

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

β) Η είσοδος του αγωγού φυγής έχει σχήμα κυκλικόν με διάμετρον $D_2 = 0.675 \text{ m}$. Επομένως το εμβαδόν θα είναι $A_2 = \pi D_2^2/4.0 = \pi \times 0.675^2/4.0 = 0.358 \text{ m}^2$. Η ταχύτης εις την είσοδον είναι,

$$V_2 = Q/A_2 = 7.8/0.358 = 21.797 \text{ m/s}$$

και το κινηματικόν ύψος, $V_2^2/2g$, είναι $21.797^2/(2.0 \times 9.81) = 24.215 \text{ m}$

γ) Εκ της εξισώσεως 3.76 και δεδομένου ότι $V_{t2} = 0.0 \text{ m/s}$ είναι,

$$T = \rho Q V_{t1} r_1$$

και επομένως η αναπτυσσομένη ισχύς υπό του δρομέως είναι,

$$\begin{aligned} I_R &= \rho Q V_{t1} r_1 \omega = \rho Q V_{t1} U_1 = 1000.0 \times 7.8 \times 14.015 \times 17.671 = \\ &= 1.932 \text{ MW} \end{aligned}$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

Η ισχύς όμως η παραλαμβανομένη υπό της ατράκτου είναι 1.90 MW, άρα η μηχανική απόδοσις n_m λειτουργίας είναι,

$$n_m = 1.90/1.932 = 0.983 = 98.3\%$$

δ) Η υδραυλική απόδοσις λειτουργίας n_h , ιδέ εξίσωσιν 3.92 με $Q_v = 0.0$, είναι,

$$\begin{aligned} n_h &= I_R / (\rho g Q H_n) = (1.932 \times 10^6) / (1000.0 \times 9.81 \times 7.8 \times 29.0) = \\ &= 0.8706 = 87.06\% \end{aligned}$$

ε) Η απόδοσις λειτουργίας n του υδροστροβίλου είναι,

$$n = (1.9 \times 10^6) / (1000.0 \times 9.81 \times 7.8 \times 29.0) = 0.8562 = 85.62\%$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.4 Σπειροειδές κέλυφος

Το σπειροειδές κέλυφος, εκτός από την προστασία που προσφέρει, βοηθά στο να οδηγεί το νερό στα οδηγία πτερύγια των υδροστροβίλων αντιδράσεως. Τα σπειροειδή κελύφη πρέπει να ικανοποιούν τα ακόλουθα:

- α) να δημιουργούν συνθήκες ομοιόμορφης ροής προς τα οδηγία πτερύγια,
- β) να δημιουργούν τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ενέργειας σε όλο το ρου του νερού (από την είσοδο του προσαγωγού σωλήνα, εντός του σπειροειδούς κελύφους και μέχρι την είσοδο του νερού στην σειρά των οδηγίων πτερυγίων
- γ) το είδος και μέγεθος του σπειροειδούς κελύφους πρέπει να είναι σε συμφωνία με τις λοιπές διατάξεις του χώρου.

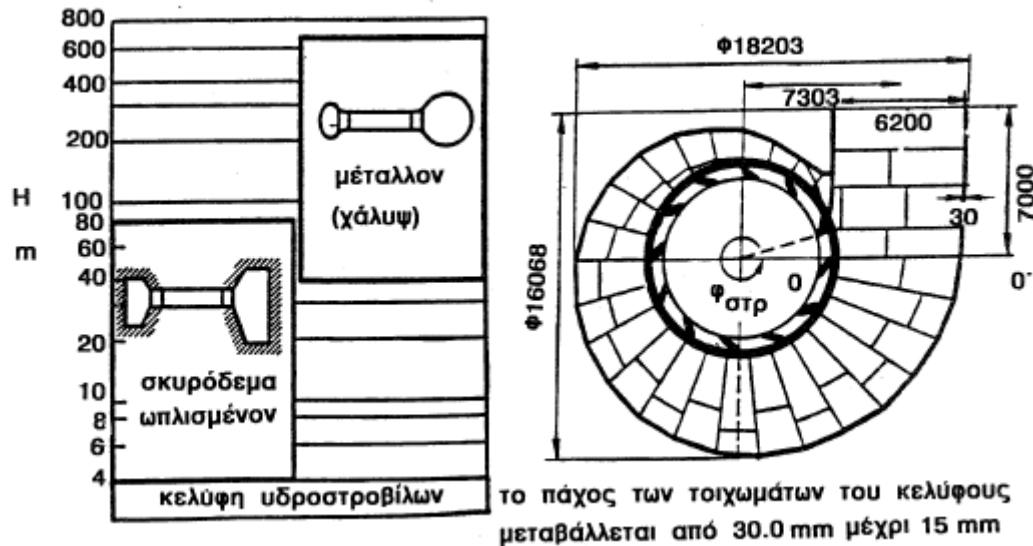
Τα σπειροειδή κελύφη είναι δυνατό να κατασκευαστούν από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Για ύψη πτώσης μεταξύ 4.0 και 80.0 m χρησιμοποιείται σκυρόδεμα, ενώ για ύψη πτώσεις μεταξύ 40.0 μέχρι 700.0 m χρησιμοποιείται χάλυβας (Σχήμα 3.32). Η διατομή 0-0' που είναι κάθετη στην κύρια ροή, θεωρείται ως η αρχή της εισόδου του νερού, ενώ το τέλος του σπειροειδούς κελύφους εννοείται το μέτρο της γωνίας $\phi_{\sigma\tau\rho}$ (στροφής).

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.4 Σπειροειδές κέλυφος

Η γωνία $\varphi_{\text{στρ}}$ λαμβάνει τιμές μεταξύ 340° έως 350° ενώ η διατομή είναι πάντοτε κυκλική και της τιμή του εμβαδού (επομένως και της ακτίνας) μικραίνουν κατά τη διεύθυνση ροής.



Το μεταλλικό κέλυφος του διπλανού σχήματος έχει μεταλλικό πάχος κάλυψης το οποίο μεταβάλλεται από 30.0 mm έως 15.0mm.

Για κελύφη μέχρι και 40.0 mm πρέπει να ισχύει:

$$P_{\max} D_{in} < 1100.0 - 1300.0 \quad (3.97)$$

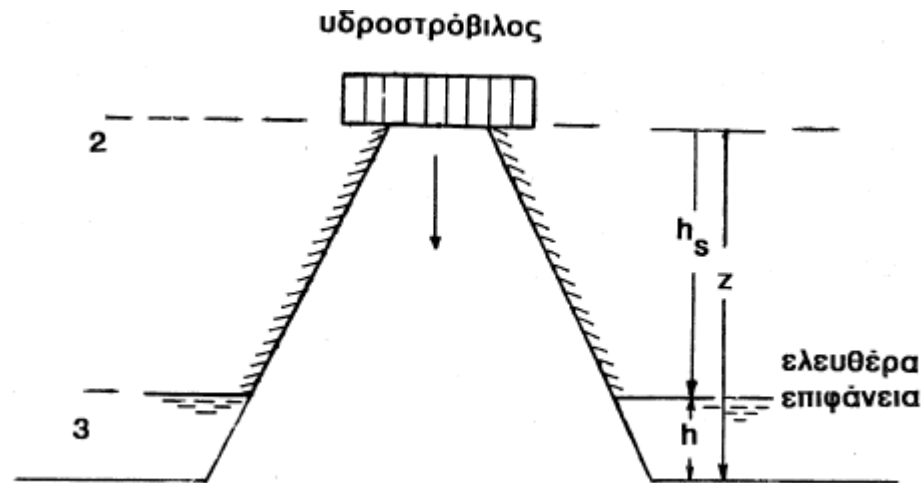
όπου η μέγιστη πίεση p_{\max} εκφράζεται σε MPa και η εσωτερική διάμετρος εισόδου D_{in} του σπειροειδούς κελύφους σε cm.

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

Οι αγωγοί φυγής παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο στη λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου. Αναλύοντας ως προς τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των αγωγών φυγής, Σχήμα 3.34, θεωρούμε ότι η μέση ταχύτητα εισόδου στον αγωγό φυγής είναι η V_2 . Η τιμή της ταχύτητας V_2 καθορίζεται από το τρίγωνο λειτουργίας εξόδου του νερού από το δρομέα.



Σχήμα 3.34 Αγωγός φυγής

Εάν ληφθεί ως επίπεδο αναφοράς ο άξονας που διέρχεται από το σημείο 3, τότε η εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ των σημείων 2 και 3 δίνει:

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

$$\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z = \frac{v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} + h_1 \quad (3.98)$$

όπου h_1 οι απώλειες φορτίου στον αγωγό φυγής. Το απόλυτο φορτίο $p_3/\rho g$, στη θέση 3 ισοδυναμεί με:

$$\frac{p_3}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + h \quad (3.99)$$

όπου h η απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας της διώρυγας φυγής από το επίπεδο που διέρχεται από το σημείο 3. Τότε η Εξ. 3.98 γίνεται:

$$\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z = \frac{v_3^2}{2g} + \left(\frac{p_a}{\rho g} + h\right) + h_1 \quad (3.100)$$

ή

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \left(\frac{v_3^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}\right) - (z - h) + h_1 \quad (3.101)$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

Εάν ορίσουμε ως στατικό ύψος αναρρόφησης, h_s , την ποσότητα $z-h$, δηλαδή:

$$h_s = z - h \quad (3.102)$$

Τότε η εξίσωση 3.101 γράφεται:

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - [h_s + (\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g})] + h_1 \quad (3.103)$$

η ποσότητα $(V_2^2 - V_3^2)/2g$ είναι γνωστή ως δυναμικό ύψος αναρρόφησης, δηλαδή:

$$h_1 = K (\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g}) \quad (3.104)$$

όπου K συντελεστής τοπικών απωλειών. Τότε η εξίσωση 3.103 γράφεται:

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - [h_s + (1.0 - K) (\frac{v_3^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g})] \quad (3.105)$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

Στην περίπτωση που ο αγωγός φυγής έχει κυλινδρικό σχήμα, τότε $V_2 = V_3$ και η εξίσωση 3.105 γράφεται:

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - h_s \quad (3.106)$$

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει ότι το φορτίο στη θέση 2 είναι h_s μέτρα μικρότερο από την ατμοσφαιρική πίεση. Δηλαδή το γεγονός ότι ο υδροστρόβιλος έχει ανυψωθεί στη θέση 2 ενώ θα μπορούσε να είναι στη θέση 3, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικού φορτίου στη θέση 2, το οποίο σε μέγεθος είναι όση η απόσταση h_s . Όλα αυτά ισχύουν σε περίπτωση αγωγού φυγής κυλινδρικού σχήματος.

Αν αλλάξει η γεωμετρία του αγωγού φυγής τότε είναι προφανές ότι $V_2 > V_3$, οπότε αν θέσουμε:

$$h_d = (1.0 - K) \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_3^2}{2g} \right) \quad (3.107)$$

Τότε η εξίσωση 3.103 γράφεται ως:

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - (h_s + h_d) \quad (3.108)$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστροβίλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μια επιπρόσθετη ποσότητα h_d η οποία πρέπει να προστεθεί στην τιμή h_s η οποία υπάρχει λόγω του γεγονότος ότι ο υδροστροβίλος έχει τοποθετηθεί σε θέση πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας φυγής.

Ο αγωγός λοιπόν φυγής δημιουργεί μια επιπρόσθετη ποσότητα η οποία δύναται να προστεθεί στο καθαρό φορτίο πτώσης του υδροστροβίλου. Ενώ δηλαδή χωρίς τον αγωγό φυγής το καθαρό ύψος πτώσης θα ήταν H_n , στην περίπτωση αυτή το καθαρό ύψος πτώσης είναι $H_n + h_d$. Η απόδοση του αγωγού φυγής, $n_{\alpha\phi}$ μπορεί να οριστεί ως:

$$n_{\alpha\phi} = \frac{h_d}{(V_2^2/2g)} \quad (3.109)$$

ή

$$n_{\alpha\phi} = \frac{(1.0 - K) \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_3^2}{2g} \right)}{(V_2^2/2g)} \quad (3.110)$$

Σε άλλες περιπτώσεις η απόδοση μπορεί να οριστεί και ως:

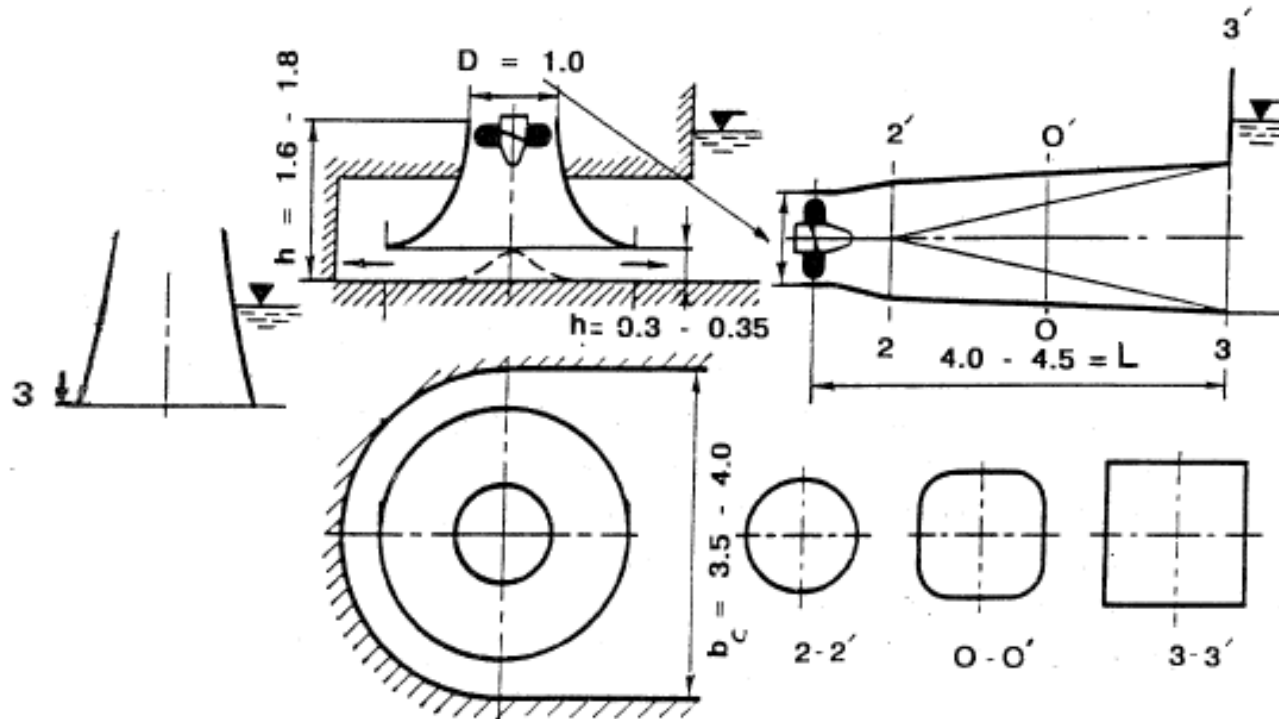
$$n_{\alpha\phi} = \frac{(1.0 - K) \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_3^2}{2g} \right)}{(V_2^2 - V_3^2)/2g} \quad (3.111)$$

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

Δυο είναι τα κύρια είδη αγωγών φυγής: α) αυτοί που έχουν γεωμετρία κολούρου κώνου (straight) και β) αυτοί που έχουν γεωμετρία σχήματος αγκώνα (elbow).



Σχήμα 3.35 Αγωγός φυγής σχήματος κολούρου κώνου (straight)

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής

Ο αγωγός φυγής κολούρου κώνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ισχύος από σχετικά μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Εάν χρησιμοποιηθεί για μεγάλες ισχύεις, τότε η απόσταση L , πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, γεγονός που αυξάνει τα έξοδα του έργου. Η γωνία του σχηματιζόμενου κώνου πρέπει να είναι μικρή ($< 12^\circ$ - $14^\circ.0$), προκειμένου οι απώλειες οι οποίες οφείλονται 1) στην τριβή με τα τοιχώματα και 2) στη δημιουργία και ανάπτυξη δινών εντός της ροής να είναι περιορισμένες.

Με τη χρήση καμπυλωμένων σχηματισμών είναι δυνατό να αυξηθεί η απόδοση της διάχυσης του αγωγού φυγής.

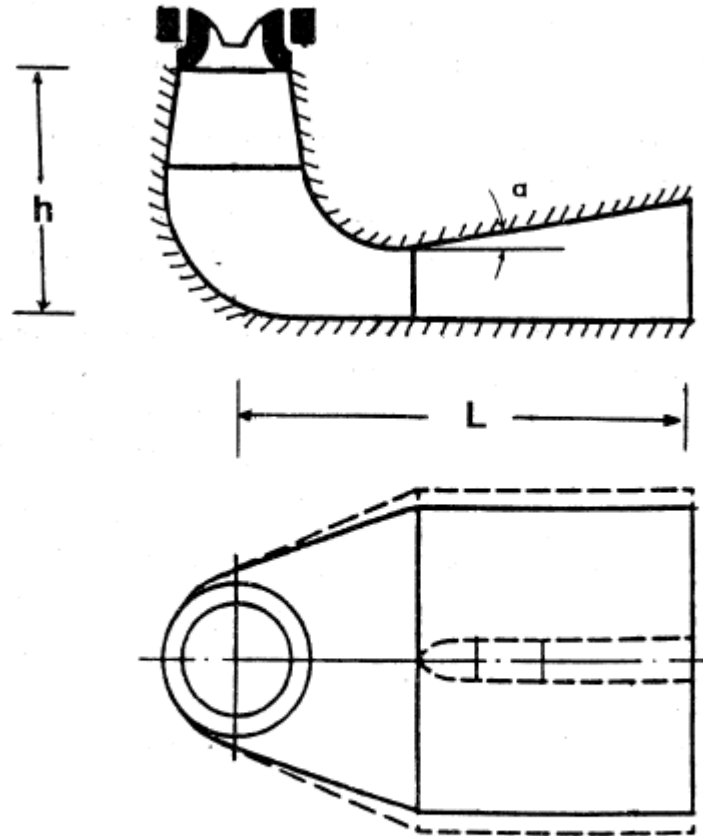
Σε υδροστρόβιλους τοποθετημένους με την άκτρακτο σε οριζόντια θέση, ο αγωγός φυγής στην είσοδο είναι κυκλικής διατομής και βαθμιαίως μετατρέπεται σε ορθογωνική.

Οι αγωγοί φυγής τύπου αγκώνα χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλα τα υδροηλεκτρικά έργα στα οποία υπάρχουν εγκατεστημένοι υδροστρόβιλοι μεγάλης ισχύος με κατακόρυφο άτρακτο. Τρία είναι τα κύρια μέρη του αγωγού φυγής τύπου αγκώνα: α) ο κώνος, β) ο αγκώνας και γ) ο διαχυτής. Τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη του αγωγού φυγής είναι η απόσταση h και το μήκος L . Η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας διευκολύνει την αύξηση της απόδοσης λειτουργίας του αγωγού φυγής (μείωση των απωλειών φορτίου) με ταυτόχρονη ικανοποίηση του λειτουργικού έργου.

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

3.2.1 Υδροστρόβιλοι μικτής ροής

3.2.2.5 Αγωγοί φυγής



Σχήμα 3.36 Αγωγός φυγής τύπου αγκώνος (elbow)

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

Παράδειγμα : Εις ευθύγραμμος αγωγός φυγής σχήματος κολούρου κώνου είναι προσηρμοσμένος εις υδροστρόβιλον τύπου Francis. Η διάμετρος της διατομής εισόδου του ύδατος εις τον αγωγόν φυγής είναι 3.75 m ενώ η αντίστοιχος διάμετρος εις την έξοδον είναι 5.64 m. Η ταχύτης του ύδατος V_2 εις την είσοδον είναι ομοιόμορφος και η τιμή αυτής είναι 7.2 m/s. Εάν η απόστασις h_s του επιπέδου της διατομής της εισόδου του αγωγού φυγής εκ της ελευθέρως επιφανείας του αγωγού διαφυγής είναι 6.0 m και αι απώλειαι ενεργείας συμποσούνται εις το 45.0% του κινητικού ύψους της εξόδου, να υπολογισθούν α) το ύψος πλέσεως εις την είσοδον, β) η ισχύς εις την έξοδον του αγωγού φυγής και γ) αι απώλειαι φορτίου εντός του αγωγού φυγής και κατά συνέπειαν αι απώλειαι ισχύος. (Η πυκνότης του ύδατος να ληθψή ίση με 1000.0 Kg/m^3 , ενώ η επιτάχυνσις της βαρύτητος ίση με 9.81 m/s^2 .)

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

Λύσις : Εκ της εξισώσεως της συνεχείας της μάζης θα είναι,

$$Q = A_2 V_2 = A_3 V_3 \quad \text{άρα,}$$

$$V_3 = (A_2 V_2)/A_3 = (\pi \times 5.64^2/4.0 \times 7.2)/(\pi \times 3.75^2/4.0) = 1.0179 \text{ m/s}$$

Δι' εφαρμογής της εξισώσεως 3.98 εις τα σημεία 2 και 3 του Σχήματος 3.34, είναι,

$$7.2^2/(2.0 \times 9.81) + p_2/\rho g + 6.0 = 1.0179^2/(2.0 \times 9.81) \\ + 0.0 + 0.45 \times 1.0179^2/(2.0 \times 9.81)$$

άρα, $p_2/\rho g = 0.052809 + 0.023764 - 2.64220 - 6.0 = - 8.5656 \text{ m}$ ή $p_2/\rho g = 8.5656 \text{ m}$ αρνητικής πιέσεως ή υποπιέσεως.

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως

β) Η ισχύς εις την έξοδον του αγωγού φυγής είναι,

$$I = \dot{m} V_3^2 / 2.0 = \rho Q V_3^2 / 2.0 = 1000.0 \times (\pi \times 3.75^2 / 4.0 \times 7.2) \times 1.0179^2 / 2.0$$
$$= 41176 \text{ W} = 41.176 \text{ KW}$$

γ) Αι απώλειαι φορτίου εντός του αγωγού φυγής είναι το 45.0% του κινητικού ύψους εις την έξοδον. Είναι λοιπόν,

$$h_1 = 0.45 \times 1.0179^2 / (2.0 \times 9.81) = 0.02376 \text{ m.}$$

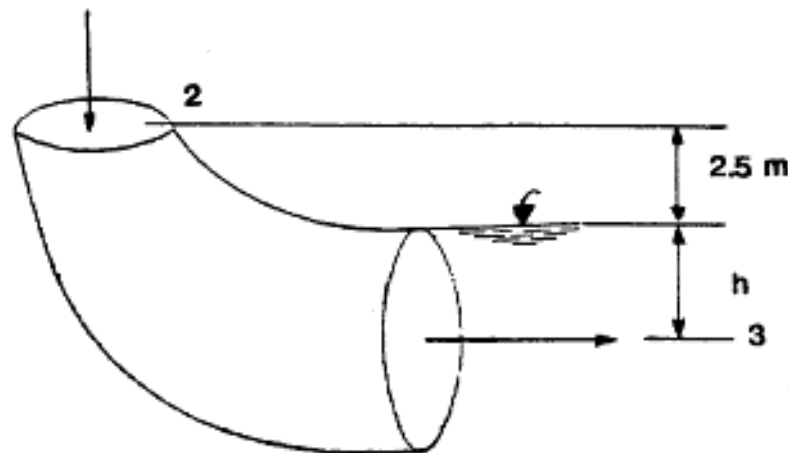
Επομένως, αι απώλειαι ισχύος εντός του αγωγού φυγής θα είναι ίσαι με,

$$\rho g Q h_1 = 1000.0 \times 9.81 \times (\pi \times 3.75^2 / 4.0 \times 7.2) \times 0.02376 = 18538.6 \text{ W}$$
$$= 18.538 \text{ KW.}$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως-Ασκήσεις

Πρόβλημα 2.7

Η διάμετρος της εισόδου του αγωγού φυγής υδροστροβίλου τινός τύπου Καρίαν είναι 1.9 m, ενώ η είσοδος ευρίσκεται 2.5 m άνωθεν της ελεύθερας επιφανείας της διώρυγος απαγωγής, ιδέ Σχήμα 8. Η ανάγνωση ενός μετρητού πίεσεως προσηρμοσμένου επίσης εις την είσοδον δεικνύει πίεσιν 3.6 m κάτωθεν της ατμοσφαιρικής. Η απόδοσις λειτουργίας του αγωγού φυγής είναι 82.0%. Ο υδροστροβίλος αναπτύσσει ισχύν 1100.0 KW όταν το καθαρόν ύψος πτώσεως είναι 8.3 m. Ζητείται να υπολογισθή η απόδοσις του υδροστροβίλου.



Σχήμα 8 Αγωγός φυγής

3.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως-Ασκήσεις

Λύσις

Δι' εφαρμογής της ενεργειακής εξισώσεως μεταξύ των σημείων 2 και 3, ιδέ Σχήμα 8, είναι,

$$\frac{p_2}{\rho g} + (2.5 + h) + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_3}{\rho g} + 0.0 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{f2-3}$$

αλλά, εκ της εξισώσεως 3.104 είναι,

$$h_{f2-3} = K \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} \right)$$

ενώ εκ της εξισώσεως 3.110 είναι,

$$(1.0 - K) \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} \right) = \eta_{\text{αφ}} \frac{v_2^2}{2g}$$

Επομένως, η ενεργειακή εξίσωση γράφεται,

$$\frac{p_2}{\rho g} + (2.5 + h) + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} = \frac{p_3}{\rho g} + K \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} \right) \quad \eta$$

$$\frac{p_2}{\rho g} + (2.5 + h) + (1.0 - K) \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} \right) = \frac{p_3}{\rho g} = h \quad \eta$$

3.2 Υδροστροβίλοι αντιδράσεως-Ασκήσεις

$$\frac{p_2}{\rho g} + 2.5 + \eta_{\text{αφ}} \frac{V_2^2}{2g} = 0.0$$

Αλλά $p_2/\rho g = -3.6 \text{ m}$ και $\eta_{\text{αφ}} = 0.82$ άρα,

$$-3.6 + 2.5 + 0.82 \times \frac{V_2^2}{2.0 \times 9.81} = 0.0$$

και $V_2 = 5.13 \text{ m/s}$

Επομένως, η παροχή είναι,

$$Q = A V_2 = \frac{\pi D_2^2}{4.0} V_2 = \frac{3.14 \times 1.9^2}{4.0} \times 5.13 = 14.53 \text{ m}^3/\text{s}$$

Η απόδοσις είναι,

$$\eta = \frac{I_R}{\rho g Q H_n} = \frac{1100000.0}{1000.0 \times 9.81 \times 14.53 \times 8.3} = 0.9298 = 92.98\%$$

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!