

ΕΦ&ΑΣΚ 5.2.4 έως 5.6.13

Κ ΕΦ Α Λ Α Ι Ο 5

ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Ασκήσεις και Εφαρμογές

βασιζόμενες στην ύλη του ομώνυμου Κεφαλαίου 5 του βιβλίου Ρευστοδυναμικές Μηχανές (ΡΔΜ) του συγγραφέα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η αρίθμηση ασκήσεων, σχέσεων, σχημάτων και πινάκων αντιστοιχεί στην αρίθμηση στο βιβλίο ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.

5.2.4	Υδροστρόβιλος Pelton σε Υδροηλεκτρικό Σταθμό: εφ για προκαταρκτική διαστασιολόγηση	
5.25		
5.2.8	Σχεδιασμός υδροστροβίλου Pelton με βάση υπάρχουσα εγκατάσταση	5.28
5.2.8Α-1	Υπολογισμός της ισχύος υδροστροβίλου Pelton	5.28
5.2.8Α-2 ή 5.2.8Γ	Υπολογισμός της ισχύος υδροστροβίλου Pelton: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	
5.3.2Α	Επιλογή υδροστροβίλου Φράνσις	5.32
5.3.2Β	Κανονικό σημείο λειτουργίας υδροστροβίλου	5.33
5.3.2Γ	Υδροστρόβιλος Francis σε συνδυασμένη λειτουργία στροβίλου- αντλίας ανατροφοδότησης	
5.3.4	Σχεδιασμός στροφείου υδροστροβίλου τύπου Φράνσις με αριθμητική (Μέθοδος Pfl/Pet)	
5.37		
5.3.5	Προκαταρκτικός υπολογιστικός σχεδιασμός στροφείου υδροστροβίλου Francis	5.38
5.3.8-1	Καθορισμός τύπου και υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας υδροστροβίλου: ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
5.3.8-2	Υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας υδροστροβίλου Francis	5.41
5.4.3Α	Α: Καταλληλότητα υδροστροβίλου για δεδομένη υδατόπτωση	5.45
5.4.3Β	Β: Σπηλαιώση σε υδροστρόβιλο Kaplan	5.45
5.4.3Γ	Γ: Ο σωληνοστρόβιλος τύπου Kaplan	5.46
5.4.3Δ	Δ: Σχεδιασμός υδροστροβίλου Kaplan	5.46
5.4.3Ε	Ε: Υδροστρόβιλος Kaplan ισχύος 34,7 MW	5.46
5.4.5	Σχεδιασμός υδροστροβίλου Kaplan: Αριθμητική	5.51
5.5.2Α	Υπολογισμός υδροστατικών δυνάμεων σε φράγματα	5.64
5.5.4Α	Διώρυγες υδατοτροφοδότησης υδροστροβιλικών εγκαταστάσεων	5.69
5.5.4Β	Διαστασιολόγηση διώρυγας	5.71
5.5.4Γ	Απώλεια ενέργειας από αλλαγές διεύθυνσης ροής σε διώρυγες τροφοδότησης από ταμιευτήρες φραγμάτων	5.75
5.5.8Α	Ταλάντωση νερού στον πύργο αναπάλσεως	5.84
5.5.8Β	Υπολογισμός ύψους πύργου αναπάλσεως	5.84
5.5.8Γ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Για την περίπτωση του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5/46 ,,,,,,,,,,ΛΥΣΗ δεν υπάρχει	5.85
5.5.9Α	5.7-20 5.5.9Α Υπολογισμός δυνάμεων ροής σε καμπυλότητα υδαταγωγού	

5.5.9B	Δυνάμεις ροής σε αγωγό	5.87
5.6.6A	Προεπιλογή τύπου μικροϋδροστροβίλου	5.98
5.6.9	Εκμετάλλευση υδατόπτωσης με μικροϋδροστρόβιλο σε εγκατάσταση παράκαμψης φράγματος με ανοιχτό αγωγό διέλευσης ιχθύων	5.101
5.6.10	Εκμετάλλευση υδατόπτωσης με μικροϋδροστρόβιλο μεταξύ δύο δεξαμενών νερού σε αστικό δίκτυο υδροδότησης	5.101
5.6.11	Μικρό υδροηλεκτρικό έργο μέσης υδατόπτωσης εξαρτώμενης από καιρικές συνθήκες 5.103	
5.6.12	“Mini” υδροηλεκτρικός σταθμός χαμηλής υδατόπτωσης	5.105
5.6.13	Καθορισμός διαμέτρου στροφείου μικροϋδροστροβίλου και βασικές διαστάσεις μηχανής 5.106	

5.7-1 έως 5.7-45 βλ. olesmazi B

5.7-1	5.1.3A	Επιλογή υδροστροβίλου τύπου Kaplan
5.7-2	5.1.3B	Επιλογή υδροστροβίλου Pelton
5.7-3	5.1.3Γ	Υδροστρόβιλος Francis - επαλήθευση χαρακτηριστικών στοιχείων
5.7-4	5.1.3 Δ	Υδροηλεκτρικός σταθμός με στρόβιλο Pelton
5.7-5	5.1.5E	Επιλογή υδροστροβίλου
5.7-6	5.2.2A	Κινητήριες δυνάμεις και ρευστομηχανική μετατροπή ενέργειας στον Υδ Pelton
5.7-7	5.3.5B	Σχεδιασμός πρωτότυπου υδρ Φράνσις βάσει ομοίου προτύπου Υδροστροβίλ ΕΛ;;;
5.7-8	5.3.7A	Ενεργειακό όφελος διαχύτη σε υδροστρόβιλο Francis
5.7-9	5.3.7B	Ενεργειακό όφελος γωνιόσχημου (καμπύλου) υδροστροβίλου Κάπλαν ΕΛ;;;
5.7-10	5.4.4A	Υδροστρόβιλος Κάπλαν: διαστασιολόγηση.....ΕΛ;;;
5.7-11	5.4.7A	Ελικοϋδροστρόβιλος παλιρροϊκού ρεύματος ΕΛ;;;
5.7-12	5.4.7B	Ελικοϋδροστρόβικος....ΕΛ;;;
5.7-13	5.4.7Γ	Ελικοϋδροστρόβιλοι σε συστοιχία....ΕΛ;;;
5.7-14	5.5.3A	... ορθογωνική διώρυγα....ΕΛ;;;
5.7-15	5.5.4Δ	..διώρυγα .. ΕΛ;;;
5.7-16	8. BF8.8	Υδροστρόβιλος Pelton: Διαστασιολόγηση και τρίγωνα ταχυτήτων
5.7-17	5.5.5A	Βελτιστοποιημένη διαστασιολόγηση υδαταγωγού τροφοδοσίας υδροστροβίλων άμεσης τροφοδότησης από ταμιευτήρες φραγμάτων
5.7-18	5.5.5AA	διάμετρος αγωγού...ΕΛ;;;
5.7-19	5.5.5B	Υδαταγωγοί υδροστροβιλικών σταθμών ως ‘σωληνογραμμές μεταφοράς ενέργειας’
5.7-20	5.5.9A	Υπολογισμός δυνάμεων ροής σε καμπυλότητα υδαταγωγού
5.7-21	5.5.3B	διώρυγα.....ΕΛ;;;
5.7-22	5.6.1	μικροϋδροστροβίλος...ΕΛ;;;
5.7-23	5.5.3AA	Διώρυγα τροφοδοσίας υδροστροβιλικής εγκατάστασης
5.7-24	5.5.3Γ	...διώρυγα...ΕΛ;;;
5.7-25	5.5.3Δ	διώρυγα..... ΕΛ;;;
5.7-26	5.5.6A	σωληναγωγός.....ΕΛ;;;
5.7-27	5.5.6B	σήραγγα.....ΕΛ;;;
5.7-28	5.3.8-3	Φράνσις.....ΕΛ;;;
5.7-29	5.3.8-4	Κάπλαν.....ΕΛ;;;
5.7-30	5.5.7A	...αγωγός δικλείδα...ΕΛ;;;
5.7-31	5.5.7B	υδραυλικό πλήγμα,,,ΕΛ;;;

5.7-32	5.5.7Γ....κλείσιμο δικλείδας	ΕΛ;,,,,;
5.7-33	5.6.2Αμικροϋδροστροβίλος.....	ΕΛ;,,,,; αναρρίθμηση σε 5.6.2Α ένεκα 5.6.2Β
5.7-34	5.6.2Βμικροϋδροστροβίλος....	ΕΛ;,,,,;
5.7-35	5.6.3αντλία ως μικροϋδροστροβίλος....	ΕΛ;,,,,;
5.7-36	5.2.4Β Υπολογισμός ισχύος υδροστροβίλου Pelton	ΕΛ;,,,,;
5.7-37	5.6.5	ΕΛ;,,,,;
5.7-38	8. BF8.3 Υδροστροβίλος αντίδρασης	
5.7-39	8. BF8.5 Υδροστροβίλος Pelton: υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας η, Y, P, M	
5.7-40	8...5.2.2-BFP 8.2: Ισχύς και διάμετρος στροφείου υδροστροβίλου Pelton	
5.7-41	8. BF8.6 Υδροστροβίλος δράσης μεγάλου μανομετρικού	
5.7-42	5.2.9Α 5.2.6Α Υδροστροβίλος εγκάρσιας ροής: διαστασιολόγηση στροφείου	
5.7-43	5.2.9Β Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής με χρ καμπύλης Κορντιέ	
5.7-44	8. BF8.9 Διαχύτης υδροστροβίλου Francis	

Εισαγωγικές παρατηρήσεις και παραδοχές:

5.2.4Α Υδροστροβίλος Pelton σε Υδροηλεκτρικό Σταθμό: Προκαταρκτική διαστασιολόγηση

Για την αξιοποίηση υδατόπτωσης δημιουργείται σε υψόμετρο $H_{\text{υψ}} = 980 \text{ m}$ ο ταμιευτήρας, ο οποίος επιτρέπει την κατασκευή υδροηλεκτρικού σταθμού ΥΗΣ με τοποθέτηση του υδροστροβίλου σε υψόμετρο $H = 110 \text{ m}$ και εξασφαλισμένη παροχή νερού $Q = 100.800 \text{ m}^3/\text{h}$. Το μηχανοστάσιο ευρίσκεται σε τέτοια απόσταση από τον ταμιευτήρα, ώστε το μήκος του αγωγού προσαγωγής υπό μεταβαλλόμενη κλίση να είναι $L = 1080 \text{ m}$. Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός περιλαμβάνει τον καθορισμό των εξής αρχικών βασικών στοιχείων:

(α) Να καθορισθεί η ισχύς του υδροστροβίλου P . Να ληφθεί υπόψη, ότι οι συνήθεις διαθέσιμες κατασκευές τροχών Pelton περιορίζονται στη μέγιστη ισχύ των περίπου 150 MW.

(β) Να διαστασιολογηθεί ο αγωγός προσαγωγής διαμέτρου d_a , ο οποίος πρόκειται να είναι κατασκευασμένος από χάλυβα με ολική τραχύτητα $k = 0,1 \text{ mm}$ και μέση ταχύτητα 9 m/s .

(γ) Να ευρεθεί η ταχύτητα εκβολής u_1 της δέσμης νερού στα ακροφύσια του στροβίλου, η διάμετρος της, η δύναμη προσπτώσεως της δέσμης στα πτερύγια και η ισχύς του ακροφυσίου με συντελεστή εκροής $\phi = 0,98$. Η γωνία προσπτώσεως της δέσμης νερού προκύπτει λαμβάνοντας την γωνία εκτροπής με τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή $\alpha/2 = 8^\circ \rightarrow \alpha \approx 16^\circ$.

(δ) Να υπολογισθεί η συνολική ισχύς του ΥΗΣ και ο υδραυλικός βαθμός απόδοσής του αλλά και του υδροστροβίλου.

(ε) Να ευρεθούν ο αριθμός στροφών n του υδροστροβίλου, η διάμετρος του D , η ταχύτητα περιστροφής u_π , ο αριθμός πτερυγίων z επιλέγοντας τον ειδικό αριθμό στροφών για υδροστροβίλους Πέλτον, σχ. (5.2.9), $n_s = 3,42 \cdot Q^{0,5} / H^{0,75} \approx 20$.

Είναι: πυκνότητα νερού $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, επιτάχυνση βαρύτητας $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$, δυναμικό ιξώδες $\mu = 0,0015 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ και τάση ατμών 4.000 Pa , δηλ. ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση (προς αποφυγή σπηλαίωσης) στο ανώτατο σημείο του αγωγού ευρισκόμενο 65 m κάτω από την επιφάνεια του ταμιευτήρα στο στόμιο εκροής απ' αυτόν για τη σχετικά υψηλή θερμοκρασία των σχεδόν 30°C για ασφάλεια.

ΛΥΣΗ: (α) Δεδομένα μελετητικά και τεχνικά στοιχεία:

Με το ύψος υδατόπτωσης $H_{\text{geo}} = 980 - 110 = 870 \text{ m}$ προκύπτει από το διάγραμμα $H(\eta_s)$ στο ΣΧΗΜΑ 5.1/14 ΡΔΜ ή $H(Q)$ με $Q = 100800 / 3600 = 28 \text{ m}^3/\text{s}$ στο ΣΧΗΜΑ 5.1/13 ο καταλληλότερος τύπος του υδροστροβίλου να είναι Pelton.

Το καθοριστικό ζητούμενο για ολόκληρη την εγκατάσταση είναι η διαθέσιμη μέγιστη ροϊκή ισχύς P_{fl} υπολογιζόμενη άμεσα από το δεδομένο **γεωδαιτικό ύψος** H_{ges} και την **παροχή νερού** Q

$$P_{fl} = Q \cdot \Delta p = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_{ges} = 28 \cdot 1000 \cdot g \cdot 870 \rightarrow P_{fl} = 238.889.994 \text{ W} \approx 239 \text{ MW}$$

5.2.8 Σχεδιασμός υδροστροβίλου Pelton με βάση υπάρχουσα εγκατάσταση

Στο σχεδιοσκαρίφημα δίνεται κατασκευαστική τομή του υδροστροβίλου Pelton δύο ακροφυσίων (στον υδροηλεκτρικό σταθμό του Καπρούν, Αυστρία, από το **ΣΧΗΜΑ 5.1/4 ΡΔΜ**). Ο κατασκευαστής (Escher Wyss, Ελβετία) δίνει τα εξής χαρακτηριστικά: ύψος υδατόπτωσης $H_g = 845 \text{ m}$, παροχή $Q = 8,41 \text{ m}^3/\text{s}$, αριθμός στροφών $n = 500 \text{ min}^{-1}$, ισχύς $P_{H\lambda} = 83.200 \text{ PS}$ ($1 \text{ PS} = 0,7355 \text{ kW}$), μέση διάμετρος στροφείου $D = 2,26 \text{ m}$ και αριθμό πτερυγίων $z = 23$. Από το σχήμα διακρίνουμε επίσης, ότι η διάμετρος της δέσμης νερού είναι $d_o = 165 \text{ mm}$ με ρύθμιση της προσβολής με εκτροπέα και ρύθμιση παροχής με κινητή περόνη εντός του ακροφυσίου. Το ύψος απωλειών ροής της υδατόπτωσης είναι το 2,4% του H_g :

$$H_v = 0,024 \cdot H_g.$$

Να γίνει προκαταρκτικός σχεδιασμός της μηχανής επαληθεύοντας τα στοιχεία του υδροστροβίλου με βάση εκκίνησης το δεδομένο ύψος υδατόπτωσης και την παροχή εφαρμόζοντας τους τύπους του κειμένου και σε περίπτωση αποκλίσεων να αιτιολογηθούν οι διαφορές. Ειδικότερα να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

(α) Με βάση τον αριθμό ταχυστροφίας σ , τον ειδικό αριθμό στροφών n_q και τα διαγράμματα μονομετρικού-παροχής $H(Q)$ και $H(n_q)$ να επιβεβαιωθεί καταρχάς ο τύπος του στροβίλου.

(β) Να υπολογισθούν: ταχύτητα περιστροφής στροφείου ω βάσει των δεδομένων D και n , ειδικό έργο Y και ισχύς νερού P στην είσοδο του υδροστροβίλου, ταχύτητα εκροής c_1 από το ακροφύσιο και η διαθέσιμη ισχύς υδατόπτωσης P_g , ολικός βαθμός απόδοσης $\eta_{ολ} = P_{H\lambda}/P_g$ της εγκατάστασης και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μηχανής $\eta = P_{H\lambda}/P$.

(γ) Είναι η δεδομένη διάμετρος στροφείου συμβατή με τα λοιπά δεδομένα της μηχανής; Ποια η θεωρητική μέγιστη ισχύς του στροφείου P_{max} , σχ.(5.2.6). Ποια η ταχύτητα δέσμης νερού με συντελεστή απωλειών ακροφυσίου $\varphi = 0,98$.

(δ) Να υπολογισθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων και να υπολογισθεί η ισχύς πτερύγωσης με την εξίσωση στροβιλομηχανών του Euler, σχ.(3.1.24β), λαμβάνοντας υπόψη, ότι η απόλυτη γωνία εκροής από τα πτερύγια είναι τέτοια, ώστε να μεγιστοποιείται το ειδικό έργο πτερύγωσης.

(ε) Να υπολογισθεί ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό απόδοσης ακροφυσίου η_{AK} (που πρέπει να υπολογισθεί), τον μηχανικό βαθμό απόδοσης στροφείου $\eta_\mu = 0,99$ και τον βαθμό απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας $\eta_{ΗΓ} = 0,99$.

ΛΥΣΗ: (α) Αριθμός ταχυστροφίας σ και ειδικός αριθμός στροφών n_q από τις σχ.(5.1.5):

5.2.8Α-1 5.2.8Α Υπολογισμός της ισχύος υδροστροβίλου Pelton: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

1. Πάνω στα σκαφίδια ενός υδροστροβίλου Pelton που περιστρέφεται με αριθμό στροφών $n = 500 \text{ min}^{-1}$ και έχει μέση ακτίνα $R_m = 0,6 \text{ m}$, προσπίπτει εφαπτομενικά δέσμη νερού με απόλυτη **ταχύτητα από το ακροφύσιο** $c_1 = 60 \text{ m/s}$ (ταχύτητα νερού ως προς το έδαφος). Ζητούνται: 1. Η εφαπτομενική ώθηση του σκαφιδίου όταν η παροχή της δέσμης είναι $Q = 720 \text{ m}^3/\text{h}$. 2. Να υπολογιστεί η ισχύς που απορροφάται από τον υδροστρόβιλο.

5.2.8Α-1

15.1.1

Πάνω στα σκαφίδια ενός υδροστρόβιλου Pelton που περιστρέφεται με $n = 500 \text{ min}^{-1}$ και έχει μέση ακτίνα $P_m = 0.6 \text{ m}$, προσπίπτει εφαπτομενική δέσμη νερού με απόλυτη ταχύτητα $c = 60 \text{ m/s}$ (ταχύτητα νερού ως προς το έδαφος)

Ζητούνται:

1. Η εφαπτομενική ώθηση του σκαφιδίου όταν η παροχή της δέσμης είναι $\dot{V} = 720 \text{ m}^3/\text{h}$.
2. Να υπολογιστεί η ισχύς που απορροφάται από τον υδροστρόβιλο.

ΛΥΣΗ

1. Υποθέτουμε ότι εκσφενδονίζουμε νερό από ένα ακροφύσιο

5.2.8A-2 Υπολογισμός της ισχύος υδροστροβίλου Pelton (5.2.8Γ)

Υδροστρόβιλος τύπου Πέλτον λειτουργεί με παροχή νερού στο ακροφύσιο $Q = 41 \text{ m}^3/\text{min}$ από ύψος υδατόπτωσης $H_g = 240 \text{ m}$ και με απώλειες $h_v = 0,08 \cdot H_g$ μέχρι την εισροή στον στρόβιλο. Το κάθε πτερύγιο (σκαφίδιο) εκτρέπει την ελεύθερη δέσμη νερού κατά 160° προς την πλευρά του ακροφυσίου (εξερχόμενη από το πτερύγιο υπό γωνία 10° ως προς το επίπεδο περιστροφής αλλά κατ' αντίθετη φορά). Το στροφέιο περιστρέφεται με περιφερειακή ταχύτητα ίση με το 90% της ιδανικής περιφερειακής ταχύτητας, με δεδομένο συντελεστή ταχύτητας ακροφυσίου $\phi = 0,97$ και περιφερειακή απόλυτη ταχύτητα μηδενική $c_{2u} = 0$.

(α) Βρίσκονται τα παραπάνω στοιχεία λειτουργίας σε συμφωνία με υδροστρόβιλο τύπου Πέλτον;

(β) Να υπολογισθεί η ισχύς της μηχανής και ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης.

ΛΥΣΗ: (α) Παροχή $Q = 41/60 = 0,683 \text{ m}^3/\text{s}$ και γεωδαιτικό μανομετρικό $H_g = 240 \text{ m}$ δίνουν στο διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/13 ΡΔΜ** υδροστρόβιλο τύπου Pelton.

(β) Μανομετρικό στην είσοδο του στροβίλου $H = H_g - h_v = H_g - 0,08 H_g = 0,92 \cdot 240 = 220,8 \text{ m}$
δίνει ταχύτητα δέσμης νερού προσβολής των πτερυγίων ίση με τη ταχύτητα εκροής στο ακροφύσιο:

5.2.8A-2 ή 5.2.8Γ

5.3.2B Κανονικό σημείο λειτουργίας υδροστροβίλου

Ο υδροστρόβιλος Francis, - βλ. μηκοτομή* από το **ΣΧΗΜΑ 5.3/5 ΡΔΜ** - λειτουργεί με ύψος υδατόπτωσης $113,5 \text{ m}$, αριθμό στροφών $107,1 \text{ min}^{-1}$ και έχει εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 415 MW . Η παροχή νερού είναι $415 \text{ m}^3/\text{s}$ (~13,1 δισεκατομμύρια κυβ. μέτρα ετησίως) και η διάμετρος του στροφείου $7,13 \text{ m}$.

(α) Να εντοπισθεί το σημείο κανονικής λειτουργίας (ΣΚΑΛ) στα διαγράμματα $H(Q)$ και $H(n_q)$ και να ευρεθούν συμπτώσεις ή αποκλίσεις.

(β) Να ευρεθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου.

(γ) Να υπολογισθεί η διάμετρος στροφείου με την βοήθεια της καμπύλης Cordier (Κορντιέ) και να γίνει σύγκριση με την τιμή της εκφώνησης.

(δ) Είναι ο αριθμός στροφών σύγχρονος; Εάν ναι, να ευρεθεί ο αριθμός ζευγών πόλων της ηλεκτρογεννήτριας καθώς επίσης και το προσεγγιστικό μέγεθός της με βάση το **ΣΧΗΜΑ 5.3/5** και τα δεδομένα της εκφώνησης.

ΛΥΣΗ: (α) Με $H = 113,5 \text{ m}$ και $Q = 415 \text{ m}^3/\text{s}$ το διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/13** δείχνει, ότι πρόκειται μονοσήμαντα για υδροστρόβιλο Francis ισχύος περίπου 400 MW . Ακριβείς τιμές δύσκολα διακρίνονται.

5.3.2Α Επιλογή υδροστροβίλου Φράνσις για δεδομένη υδατόπτωση και παροχή

Για την αξιοποίηση ωφέλιμης υδατόπτωσης ύψους $H = 199 \text{ m}$ με παροχή $Q = 31 \text{ m}^3/\text{s}$ πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος υδροστρόβιλος και να υπολογισθούν τα κύρια λειτουργικά και κατασκευαστικά στοιχεία ως εξής:

- (α) Ο τύπος του υδροστροβίλου, η προεκτιμώμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης.
- (β) Ο αριθμός στροφών για σύγχρονη λειτουργία με την ηλεκτρογεννήτρια των 50 Hz .
- (γ) Η διάμετρος του στροφείου, η περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίων, η μέση αξονική ταχύτητα ροής διαμέσου του στροφείου και η αξονική ταχύτητα εκροής από το στροφείο.
- (δ) Να κριθεί εάν είναι σκόπιμη η χρησιμοποίηση διαχύτη εκροής και να αιτιολογηθεί η απάντηση με αριθμητική εκτίμηση.

Για την επίλυση να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα ύψους – παροχής $H(Q)$, ύψους – ειδικού αριθμού στροφών $H(n_q)$ και αριθμού διαμέτρου – ταχυστροφίας (καμπύλη του Cordier) $\delta(\sigma)$, **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1.12 έως 14 PDM**, και να γίνει επίσης υπολογιστική επιβεβαίωση των τιμών ανάγνωσης από αυτά. Να ληφθούν βαθμοί απόδοσης ηλεκτρογεννήτριας $\eta_{\text{ΗΓ}} = 97\%$ και στροβίλου $\eta_{\text{PDM}} = 92\%$ και $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

ΛΥΣΗ: (α) Στο διάγραμμα $H(Q)$, βλ. **ΣΧΗΜΑ 5.1.12 και 13 PDM**, εντοπίζουμε το σημείο του ζεύγους τιμών (193 m και $21 \text{ m}^3/\text{s}$) μέσα στο πεδίο εφαρμογών **στροφείου τύπου Francis** με την ισχύ στην προσεγγιστική τιμή $P \approx 50 \text{ MW}$ (όσο επιτρέπει η ευκρίνεια ανάγνωσης). Σημειώνεται, ότι η ισχύς αυτή εξ ορισμού κατασκευής του διαγράμματος είναι η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η ηλεκτρογεννήτρια $P_{\text{ΗΓ}}$. Στο διάγραμμα $H(n_q)$, βλ. **ΣΧΗΜΑ 5.1/12B και 14**, διαπιστώνεται επίσης, ότι ο υδροστρόβιλος είναι τύπου Francis με ειδικό αριθμό στροφών στο διάστημα $n_q = 35 \text{ έως } 45 \text{ min}^{-1}$.

Δίνεται το “ωφέλιμο” ύψος υδατόπτωσης, δηλ. πρακτικά η ροϊκή ενέργεια στην διατομή εισροής, την οποία καλείται η μηχανή να μετατρέψει σε μηχανική (περιστροφική) στον άξονά της με βαθμό απόδοσης

5.3.2Γ Υδροστρόβιλος Francis σε συνδυασμένη λειτουργία στροβίλου - αντλίας

Υδροστρόβιλος Francis λειτουργεί επίσης ως αντλία ανατροφοδότησης του ταμιευτήρα του. Απεικονίζεται σε τομή στο **ΣΧΗΜΑ 5.3/6 PDM** (κατασκευή Voith για τον ΥΗΣ Vianden, Λουξεμβούργο). Ως στρόβιλος έχει αριθμό στροφών $n = 3.000 \text{ min}^{-1}$ και παράγει $P = 1,84 \text{ MW}$ ηλεκτρική ισχύ με ύψος υδατόπτωσης $H = 290 \text{ m}$.

- (α) Να επιβεβαιωθεί ο τύπος του υδροστροβίλου, να ευρεθεί η διάμετρος του στροφείου, να συγκριθεί με τη διάμετρο των 300 mm της διατομής του σχήματος στην εκροή, η οποία είναι ταυτόχρονα διατομή εισροής στον διαχύτη απορροής και να σχολιασθούν οι ενδεχόμενες διαφορές.
- (β) Η διάμετρος του άξονα της μηχανής δίνεται στην τομή με $100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$. Να ευρεθεί με ποια μέγιστη διατμητική τάση (επιτρεπτή) $\tau_{\text{επιτρ}}$ έχει διαστασιολογηθεί ο άξονας.

ΛΥΣΗ: (α) Με τις τιμές H και P το διάγραμμα $H(Q)$, **ΣΧΗΜΑ 5.1/13**, μας οδηγεί οριακά έξω από την περιοχή εφαρμογών του στροβίλου Francis και μέσα στο πεδίο του υδροστροβίλου Pelton. Η απόκλιση

αυτή οφείλεται αφενός στο μεγάλο ύψος υδατόπτωσης αφετέρου στον χαρακτήρα του στροβίλου ως 'αντιστρεπτού'. Με τις τιμές ύψους 290 m και ισχύος 1,84 MW η ανάλυση δίνει την προσεγγιστική και σχετικά μικρή παροχή $Q \approx 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Όμως η επιλογή του τύπου Francis έγινε, για να είναι δυνατόν να λειτουργήσει επίσης ως αντλία με απλή αντιστροφή της φοράς περιστροφής.

5.3.4 Σχεδιασμός στροφείου υδροστροβίλου τύπου Φράνσις (Μέθοδος Pfeleiderer/Petermann)

Ζητείται να διαστατολογηθεί ο κατάλληλος υδροστρόβιλος για να αξιοποιηθεί η υδροδυναμική ενέργεια μιας υδατόπτωσης με παροχή νερού $Q = 11.880 \text{ m}^3/\text{h}$ και καθαρό αξιοποιήσιμο ύψος από τον στρόβιλο $H = 49,7 \text{ m}$ τοποθετημένο σε μηχανοστάσιο ευρισκόμενο στο υψόμετρο των 400 m. Ο στρόβιλος έχει βαθμό απόδοσης $\eta = 86\%$ και πρόκειται να συνδεθεί απευθείας, στον ίδιο άξονα, με την ηλεκτρογεννήτρια συχνότητας $f = 50 \text{ Hz}$. Στη πλευρά εκροής, δηλ. πλευρά της χαμηλής πίεσης, όπου το νερό εκρέει προς τον διαχύτη απορροής, το γεωδαιτικό μέγιστο ύψος είναι $h_{Amax} = 1,7 \text{ m}$ (ονομαζόμενο στη πράξη ύψος 'αναρρόφησης' λόγω της χαμηλότερης πίεσης).

Γνωστά μελετητικά στοιχεία και τεχνικά δεδομένα: Οι ιδιότητες νερού υπό συνθήκες $20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$ και $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$: πυκνότητα $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, δυναμικό ιξώδες $\mu = 0,001 \text{ kg/(ms)}$ και $p_s = 0,0234 \text{ bar} = 2.337 \text{ Pa}$ η τάση ατμών, δηλ. η πίεση "βρασμού" με τοπική εξάτμιση του νερού, βλ. ΠΙΝΑΚΑ 2.1-1 ΡΔΜ. Καθαρό αξιοποιήσιμο ύψος είναι αυτό το μέρος της υδατόπτωσης που διατίθεται στον υδροστρόβιλο προς μετατροπή του σε ισχύ (έχουν δηλ. αφαιρεθεί οι απώλειες πίεσης του αγωγού προσαγωγής ή άλλες πριν από τον στρόβιλο). Επίσης είναι: $g = 9,80665 \approx 9,81 \text{ m/s}^2$, $t_{max} = 24 \text{ MPa}$ η επιτρεπτή διατμητική τάση για τον άξονα της μηχανής. Η αρίθμηση των διατομών ροής γίνεται όπως στο ΣΧΗΜΑ 5.3/14 ΡΔΜ: 3 εισροή στη κινητή πτερύγωση, 2 αμέσως μετά την ακμή εισροής, 1 ακμή εκροής και 0 εκροή από τη κινητή πτερύγωση και εισροή στον διαχύτη.

ΛΥΣΗ: Στο υψόμετρο των 400 m η ατμοσφαιρική πίεση είναι $966,114 \text{ mbar} = 96611,4 \text{ Pa}$, βλ. ΠΙΝΑΚΑ 2.3-1 ΡΔΜ, μεταβαλλόμενη αναλόγως των μετεωρολογικών συνθηκών, οι οποίες κατά κανόνα

5.3.5A Προκαταρκτικός υπολογιστικός σχεδιασμός στροφείου υδροστροβίλου Francis

Να σχεδιασθεί το στροφείο ενός υδροστροβίλου τύπου Francis για να λειτουργήσει υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας για υδατόπτωση 60 m και παροχή νερού $10.800 \text{ m}^3/\text{h}$ με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή μέσω ηλεκτρογεννήτριας τριφασικού ρεύματος. Το διαθέσιμο ύψος του στροφείου από τη στάθμη λεκάνης απορροής (μέγιστο ύψος 'αναρρόφησης') στην πλευρά εκροής είναι δεδομένο $H_s = 2,4 \text{ m}$ με θερμοκρασία νερού 20°C . Ο υδροστρόβιλος προορίζεται να εγκατασταθεί σε υψόμετρο 400 m, όπου η πίεση είναι $0,93758 \text{ atm}$ ($0,95 \text{ bar}$). Για τον σχεδιασμό ζητούνται ειδικότερα:

(α) Να γίνει έλεγχος για ενδεχόμενη σπηλαίωση και να υπολογισθεί ο αριθμός στροφών.

(β) Η ισχύς του στροβίλου με τιμή βαθμού απόδοσης $\eta = 86\%$, η οποία να επιβεβαιωθεί με τα δεδομένα του ΠΙΝΑΚΑ 5.1-3 ΡΔΜ.

(γ) Διάμετρος του άξονα μηχανής και της πλήμνης.

(δ) Διάμετρος του στομίου εισροής του στροφείου.

(ε) Διάμετρος και πλάτος εκροής και περιφερειακή ταχύτητα του στροφείου.

(ζ) Να περιγραφεί ο τρόπος μορφολογίας των κινητών πτερυγίων με βάση τη θεωρία στη παράγραφο 5.3.6 και τα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.3/13 έως /15 ΡΔΜ.

Μελετητικά δεδομένα: Για τους υδροστροβίλους Francis δίνονται στην παράγραφο 5.3.3 ΡΔΜ στοιχεία και κατευθυντήριες οδηγίες σχεδιασμού.

ΛΥΣΗ: (α) Υπολογισμός αριθμού στροφών: Κύριο μέλημα του σχεδιασμού είναι να αποφεύγεται η σπηλαίωση. Γι' αυτό ο αριθμός στροφών υπολογίζεται μέσω του αριθμού σπηλαίωσης S_s του

5.3.8-1 Καθορισμός τύπου και υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας υδροστροβίλου

aB Ch !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

Σχεδιάζεται να εγκατασταθεί υδροστροβίλος με δυνατότητα να παροχετεύει $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ νερού από ύψος υδατόπτωσης $H = 62 \text{ m}$. Ο αγωγός μεταφοράς νερού έχει μήκος $L = 100 \text{ m}$, διάμετρο $d = 2 \text{ m}$ και τραχύτητα $k = 1 \text{ mm}$. Ο συντελεστής απωλειών εισόδου στον στροβίλο είναι $\zeta = 0,25$ και ο

$$\eta_{\Delta} = \frac{P_3 - P_2}{\rho \cdot (c_{22} - c_{32})/2}, \text{ όπου}$$

συντελεστής απόδοσης διαχύτη $\eta_{\Delta} = 0,8$ οριζόμενος με τον τύπο είναι c ταχύτητα και p πίεση, αντιστοίχως, στις διατομές εισροής A_2 και εκροής A_3 . Δίνονται το κινηματικό ιξώδες του νερού 20°C $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, ο βαθμός απόδοσης στροβίλου $\eta_{\text{στρ}} = 80\%$ χωρίς τον διαχύτη, ο λόγος διατομών διαχύτη $A_3/A_2 = 2$, η διάμετρος εισροής του διαχύτη $d_2 = 1,54 \text{ m}$ και ζητούνται:

(α) Να επιλεγεί ο τύπος του υδροστροβίλου.

(β) Πόση είναι η ισχύς της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στον σωληναγωγό υδατοτροφοδότησης καθώς και την επίδραση του διαχύτη, δηλ. αφενός το όφελος από την ανάκτηση ενέργειας πίεσης αφετέρου τις απώλειες τριβής $\Delta p_{\nu\Delta}$ σ' αυτόν. Πόσο βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης με τη προσθήκη του διαχύτη;

(γ) Αν η εγκατάσταση του στροβίλου γίνει σε ύψος $H_A = 3 \text{ m}$ πάνω από την επιφάνεια της λεκάνης απορροής και το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης της μηχανής είναι $N.P.S.H. = 3 \text{ m}$ να ελεγχθεί αν παρουσιάζεται σπηλαίωση.

ΛΥΣΗ: (α) Το διάγραμμα μανομετρικού-παροχής $H(Q)$ στο σημείο $H=62 \text{ m}/Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/12A** και **/13 ΡΔΜ** καθώς και μανομετρικού - ειδικού αριθμού στροφών $H(n_q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/12B** και **/14** υποδεικνύουν οριακά υδροστροβίλο τύπου Kaplan με ειδικό αριθμό στροφών $n_q = 80$ έως 100 (με n σε min^{-1}).

(β) Η ισχύς της υδατόπτωσης είναι $P = \dot{m} \cdot Y$ με παροχή μάζας

5.3.8-2 Υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας ακτινικού υδροστροβίλου δεδομένης περύγωσης.

Το διαθέσιμο μανομετρικό υδατόπτωσης για τη κίνηση υδροστροβίλου είναι 59 m . Η εξωτερική διάμετρος του στροφείου του είναι $D_1 = 0,52 \text{ m}$, η εσωτερική $D_2 = 0,36 \text{ m}$ και το πλάτος στην είσοδο $b_1 = 74 \text{ mm}$. Λόγω του πάχους πτερυγίων η επιφάνεια εισροής είναι το 93% της γεωμετρικής επιφάνειας για περύγια μηδενικού πάχους και η μεσημβρινή ταχύτητα ροής μέσα στη κινητή περύγωση μένει σταθερή $c_{1m} = c_{2m}$. Η γωνία εισόδου των ακίνητων πτερυγίων (γωνία της απόλυτης ταχύτητας c_1 ως προς την εφαπτομένη στη περιφέρεια D_1) είναι ταυτόχρονα γωνία εισροής στη κινητή περύγωση $\alpha_1 = 24^\circ$, η γωνία κλίσης των κινητών πτερυγίων 94° και η γωνία εξόδου αυτών $\beta_2 = 32^\circ$. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης είναι 0,94 και οι υδραυλικές απώλειες 10%.

(α) Να υπολογισθεί ο αριθμός στροφών για εισροή του νερού χωρίς κρούση (δηλ. εφαπτομενικά στη καμπύλη χορδή στην ακμή εισροής του κινητού πτερυγίου),

(β) Να βρεθεί η ισχύς P_w στον άξονα της μηχανής,

(γ) Ποιος ο τύπος του υδροστροβίλου;

(δ) Να υπολογισθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων,

(ε) Ποιος είναι ο βαθμός αντίδρασης r και ο αριθμός πίεσης ψ του στροφείου. Ποια η σχέση τους με τον τύπο του στροβίλου;

ΛΥΣΗ (α) Το σκαρίφημα δεξιά δείχνει την οδηγό και τη κινητή περύγωση και γενικώς τα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο της κινητής περύγωσης. (Τα υπολογισμένα τρίγωνα ταχυτήτων βάσει του παρόντος υπολογισμού, βλ. (δ)).

5.4.3A Καταλληλότητα υδροστροβίλου Kaplan για δεδομένη υδατόπτωση **aB**

Ο υδροστρόβιλος τύπου Kaplan κατακόρυφου άξονα έχει διάμετρο στροφείου $D = 7,4 \text{ m}$ και δίνεται από τον κατασκευαστή (εταιρεία Voith, Γερμανία) στην μηκοτομή του σχήματος υπό κλίμακα (από το **ΣΧΗΜΑ 5.4/6 PΔM**). Ενδιαφερόμενος κατασκευαστής Υδροηλεκτρικού Σταθμού διαθέτει ταμειευτήρα ικανής ποσότητας παροχής υπό ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης $H = 22,5 \text{ m}$ και προκειμένου να αποφασίσει σας αναθέτει να εκτιμήσετε, αν ο υδροστρόβιλος είναι κατάλληλος για την εκμετάλλευση της υδατόπτωσης. Γι' αυτό καλείσθε να απαντήσετε ειδικότερα στα εξής:

(α) Να ευρεθούν τα σημαντικά μεγέθη λειτουργίας του στροβίλου λαμβάνοντας υπόψη, ότι ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου είναι 93% και της ηλεκτρογεννήτριας 98%.

Επίσης για κανονική λειτουργία ζητούνται:

(β) Να υπολογισθούν: παροχή, η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτροπαραγωγής, ο αριθμός στροφών υδροστροβίλου και ηλεκτρογεννήτριας για δίκτυο ηλεκτρορρέυματος 50 Hz και η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων.

(γ) Να ευρεθεί η εξωτερική διάμετρος του κοίλου άξονα με εσωτερική διάμετρο 400 mm (όπως φαίνεται στην σχεδιαστική τομή) και επιτρεπόμενη διατμητική τάση $\tau_{\text{επ}} = 20 \text{ MPa}$.

(ε) Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα τι προτείνετε στον κατασκευαστή – επενδυτή;

ΛΥΣΗ: (α) Υδροστρόβιλος Καπλάν κατακόρυφου άξονα με διαμορφωμένο από σκυρόδεμα σπειροειδές κέλυφος για την πρόσφορη ρευστοδυναμική προσαγωγή του νερού στο στροφείο είναι κατάλληλος για ύψη υδατοπτώσεως μέχρι και 30 m, όπως εξάλλου φαίνεται από το διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/13 PΔM**. Επίσης το διάγραμμα μανομετρικού – ειδικού αριθμού στροφών $H(n_q)$, **ΣΧΗΜΑ 5.1/14**, δίνει το διάστημα βέλτιστης λειτουργίας με κριτήριο τον ειδικό αριθμό στροφών

5.4.3B Σπηλαίωση σε υδροστρόβιλο Καπλάν **aB** λύση λείπει

Κατά τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου Kaplan κατακόρυφου άξονα στη μηκοτομή στην προηγούμενη εφαρμογή 5.4.3A, βλ. **ΣΧΗΜΑ 5.4/6 PΔM**,

(α) Να εξετασθεί ο σχεδιασμός σε σχέση με τον κίνδυνο σπηλαίωσης χρησιμοποιώντας τον αριθμό σπηλαίωσης S_q και τον αριθμό Thoma σ_{TH} και

(β) Να υπολογισθεί η ποσότητα ενέργειας ροής στην έξοδο από το στροφείο και πώς μπορεί να αξιοποιηθεί στον διαχύτη εκροής, ο οποίος εξάλλου κατά σύμβαση θεωρείται αναπόσπαστο μέρος της μηχανής. Να θεωρηθεί ευθύγραμμος διαχύτης κατάλληλης γεωμετρίας σύμφωνα με την μεθοδολογία της παραγράφου 5.3.7.

Δεδομένα: Διάμετρος στροφείου $D = 7,4 \text{ m}$, ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης $H = 22,5 \text{ m}$, ειδικό έργο $Y = 220,65 \text{ J/kg}$, παροχή λειτουργίας είναι $Q = 573,73 \text{ m}^3/\text{s}$, αριθμός στροφών $n = 1,25 \text{ s}^{-1}$

ΣΧΗΜΑ 5.4/6 Αξονική τομή (μηκοτομή) υδροστροβίλου Kaplan ως εφαρμογή για την επιλογή τύπου και μεγέθους του υδροστροβίλου.

5.4.3Γ “Σωληνοστρόβιλος” τύπου Kaplan

Ο υδροστρόβιλος τύπου Kaplan οριζοντίου άξονα σε σωληνωτό κέλυφος (“σωληνοστρόβιλος”) στην υπό κλίμακα μεσημβρινή τομή (από το **ΣΧΗΜΑ 5.4/7 PΔM**) έχει διάμετρο στροφείου 6,0 m. Η ηλεκτρογεννήτρια ΗΓ ευρίσκεται στον εξωτερικό χώρο. Κατά βάσιμη εκτίμηση οι βαθμοί απόδοσης του στροβίλου και της ηλεκτρογεννήτριας είναι 93% και 98%, αντίστοιχα.

(α) Με βάση την μεθοδολογία της προηγούμενης εφαρμογής 5.4.3A να καθορισθεί το πλέον εύλογο σημείο εφαρμογής του στροβίλου (στα διαγράμματα $H(Q)$ και $H(n_q)$). Επιπρόσθετα να υπολογισθούν:

(β) Ο αριθμός ταχυστροφίας και ο αριθμός διαμέτρου. Οι τιμές τους δικαιολογούν το τύπο του υδροστροβίλου;

(γ) Η παροχή του υδροστροβίλου και ο αριθμός στροφών.

(δ) Η εξαγόμενη ηλεκτρική ισχύς και η ροπή καταπόνησης του άξονα του στροβίλου.

(ε) Να υπολογισθεί η διάμετρος του άξονα της μηχανής λαμβάνοντας επιτρεπτή διατμητική τάση $\tau_{\text{επ}} = 25 \text{ N/mm}^2$ και να συγκριθεί με τη διάμετρο στην υπό κλίμακα μηκοτομή με απλή μέτρηση 'υποδεκαμέτρου'.

Υπόδειξη: Ο υπολογισμός μπορεί να αρχίσει με το ζεύγος τιμών (H,Q) στο μέσο περίπου του πεδίου εφαρμογής στο διάγραμμα H(Q), βλ. **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/12 έως /15 ΡΔΜ**.

ΛΥΣΗ: (α) Το επίκεντρο του πεδίου εφαρμογής του υδροστροβίλου Kaplan οριζόντιου άξονα ευρίσκεται με την βοήθεια του διαγράμματος H(Q), **ΣΧΗΜΑ 5.1/13**, όπου στη περιοχή Z για στρόβιλο σωληνωτού κελύφους φαίνεται, ότι το μέσο ύψος υδατόπτωσης είναι $H \approx 11 \text{ m}$ ή ως ειδικό έργο

$Y = g \cdot H = g \cdot 11 = 107,87 \text{ J/kg}$ (με $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$) και κατά το διάγραμμα H(n_q), **ΣΧΗΜΑ 5.1/14**, η περιοχή τιμών του ειδικού αριθμού στροφών είναι $n_q = 180 \text{ έως } 230 \text{ min}^{-1}$ (με ακρίβεια ανάγνωσης

5.4.3Δ Σχεδιασμός εγκατάστασης υδροστροβίλου Kaplan

Υδροστρόβιλος τύπου Καπλάν κατακόρυφου άξονα εν λειτουργία σε Υδροηλεκτρικό Σταθμό έχει ονομαστική ισχύ $P = 25 \text{ MW}$ υπό αριθμό στροφών $n = 200 \text{ min}^{-1}$ και δίνεται σε σχεδιαστική τομή (από το **ΣΧΗΜΑ 5.4/8 ΡΔΜ**, κατασκευάστρια γερμανική εταιρεία Voith) με μέγεθος αναφοράς τη διάμετρο του στροφέιου με $D_2 = 3.500 \text{ mm}$. Το αντίστοιχο ύψος υδατόπτωσης είναι $H = 38 \text{ m}$ και η παροχή νερού $Q = 270.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Η ισχύς παράγεται από ηλεκτρογεννήτρια με συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος 50 Hz .

(α) Να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα τύπου του στροβίλου και να υπολογισθεί το ειδικό έργο αυτού.

(β) Να υπολογισθεί το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH) καθώς και το γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης λαμβάνοντας τον χαρακτηριστικό αριθμό αναρρόφησης $S_q \leq 0,9$ και ειδικά εδώ με την εύλογη τιμή $0,8$.

(γ) Να υπολογισθούν τα εξής χαρακτηριστικά και λειτουργικά μεγέθη του υδροστροβίλου: αριθμός ζευγών πόλων της ηλεκτρογεννήτριας για ηλεκτρόρρευμα 50 Hz , βαθμός απόδοσης εγκατάστασης, ταχύτητα εισροής νερού στις διατομές των οδηγών περυγίων, στην εισροή και την εκροή του έλικα πτερύγωσης, στη διατομή (είσοδο) του διαχύτη, όπου απολήγει η πλήμνη. Να ληφθεί γενικώς υπόψη, ότι με δεδομένη την διάμετρο του στροφέιου – από ακροπτερύγιο σε ακροπτερύγιο – είναι εύκολο να ευρεθούν οι απαιτούμενες για τον υπολογισμό διαστάσεις, αφού η μηκοτομή είναι σχεδιασμένη υπό κλίμακα.

(δ) Να περιγραφεί σε αδρές γραμμές ο τρόπος διαστασιολόγησης του στροφέιου, ο οποίος μπορεί να διεξαχθεί με υπόδειγμα την ανάλυση της παραγράφου 5.4.2.

ΛΥΣΗ: (α) Με τα δεδομένα, ισχύς $P = 25 \text{ MW} = 25.000 \text{ kW}$, αριθμός στροφών $n = 200/60 = 3,333 \text{ s}^{-1}$, παροχή όγκου $Q = 270.000/3.600 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ το ειδικό έργο υδροστροβίλου είναι

$$Y = g \cdot H = g \cdot 38 = 372,655 \text{ m}^2/\text{s}^2. \quad \text{Ειδικός αριθμός στροφών, σχ.(5.1.2):}$$

5.4.3Ε Υδροστρόβιλος αντίθλιψης τύπου Kaplan ισχύος 34,7 MW

Το σχεδιοσκαρίφημα του κατασκευαστή (από το **ΣΧΗΜΑ 5.4/9 ΡΔΜ**) παρουσιάζει σε μηκοτομή υδροστρόβιλο τύπου Καπλάν ονομαστικής ισχύος $P = 34,7 \text{ MW}$ υπό αριθμό στροφών $n = 65,2 \text{ min}^{-1}$. Στη δεδομένη ισχύ το ύψος υδατόπτωσης είναι $H = 9,6 \text{ m}$ και η παροχή $Q = 1.468.800 \text{ m}^3/\text{h}$ ($408 \text{ m}^3/\text{s}$). Οι διαστάσεις του στροβίλου εκτιμώνται με βάση την υπό κλίμακα μηκοτομή και την δεδομένη διάμετρο του

στροφείου $D = 7,80 \text{ m}$ με περύγια μεταβαλλόμενου βήματος (δηλ. ρυθμιζόμενης κλίσης ως προς το επίπεδο περιστροφής).

(α) Να ελεγχθεί η συμβατότητα του τύπου του στροβίλου με τα διαγράμματα $H(Q)$, $H(n_q)$ και του Cordier (Κορντιέ) και με τους αριθμούς ταχυστροφίας και διαμέτρου, οι οποίοι ταυτοποιούν την κατασκευή του.

(β) Μέσω του χαρακτηριστικού αριθμού αναρρόφησης, βλ. παράγραφο 4.14.6 ΡΔΜ, να ευρεθεί το γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης για λειτουργία υδροστροβίλου υπό θερμοκρασία 20°C και ατμοσφαιρική πίεση 1atm . Πώς διαφοροποιείται το αποτέλεσμα και τι επίπτωση έχει στη διαρρύθμιση της εγκατάστασης του υδροστροβίλου, αν ληφθεί $S_q = 0,64$ σύμφωνα με τον ΠΙΝΑΚΑ 5.4-2;

(γ) Να υπολογισθεί ο αριθμός πόλων της ηλεκτρογεννήτριας και ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

(δ) Να εκτιμηθεί υπολογιστικά η διάμετρος του κοίλου άξονα (λόγω εσωτερικού μηχανισμού ρύθμισης κλίσης περυγίων) με βάση την επιτρεπόμενη διατμητική τάση $\tau_{\text{επ}} = 33 \text{ MPa}$.

ΛΥΣΗ: (α) Με τα ονομαστικά μεγέθη του υδροστροβίλου ισχύς $P = 34.700 \text{ kW} = 34,7 \cdot 10^6 \text{ W}$, αριθμός στροφών $n = 65,2 \text{ min}^{-1} = 1,0867 \text{ s}^{-1}$ και παροχή όγκου $Q = 408 \text{ m}^3/\text{s}$ είναι

5.4.5 Σχεδιασμός υδροστροβίλου Kaplan με διαστασιολόγηση πτερωτής

Ζητείται ο σχεδιασμός ενός υδροστροβίλου με χαρακτηριστικά λειτουργίας μανομετρικό υδατόπτωσης $H = 5,17 \text{ m}$ και κανονική παροχή $Q = 20.610 \text{ m}^3/\text{h}$. Ως ελάχιστη ατμοσφαιρική πίεση ένεκα μετεωρολογικών συνθηκών να ληφθούν τα 980 mbar , θερμοκρασία νερού 20°C και μέγιστη διαφορά ύψους μεταξύ ακμής αναρρόφησης του στροφείου και της ελάχιστης στάθμης της λεκάνης απορροής $2,4 \text{ m}$. Ο αριθμός στροφών του υδροστροβίλου να είναι σύγχρονος με αυτόν της ηλεκτρογεννήτριας προς παραγωγή ηλεκτρορρεύματος συχνότητας 50 Hz .

(Ο σχεδιασμός γίνεται με τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.4.4 ΡΔΜ με βάση – αλλά τροποποιημένη – τη μέθοδο των Pfeleiderer-Petermann).

ΛΥΣΗ: Με $H = 5,17 \text{ m}$ το διάγραμμα $H(n_q)$ (στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/12 έως 1/14 ΡΔΜ) δείχνει αμέσως, ότι πρόκειται για υδροστρόβιλο Κάπλαν στην περιοχή υψηλών ειδικών αριθμών στροφών

$$n_q = 220 \text{ έως } 280 \text{ με } n \text{ σε } \text{min}^{-1}$$

5.5.2Α Φράγμα σε ταμιευτήρα υδροστροβίλου: Υπολογισμός υδροστατικών δυνάμεων

Να γίνει προκαταρκτικός υπολογισμός του φράγματος σε ταμιευτήρα υδροστροβίλου στο σκαρίφημα, αριστερά, με τη βοήθεια απλής εξιδανίκευσης, δεξιά. Οι διαστάσεις μπορούν να υπολογισθούν από το υπό κλίμακα σχέδιο του πραγματικού φράγματος στο ΣΧΗΜΑ 5.5/17 ΡΔΜ με απλή αναγωγή γνωρίζοντας ότι η στάθμη νερού είναι στα $H_1 + H_2 = 51,2 \text{ m}$. Η πυκνότητα της δομής λαμβάνεται με την εύλογη τιμή $\rho_\Delta = 2.500 \text{ kg/m}^3$. Κέντρο αναφοράς για τις ροπές μπορεί να ληφθεί το αριστερό άκρο της βάσης. Ως συνήθως ο αρχικός υπολογισμός να γίνει για μοναδιαίο μήκος φράγματος $L = 1 \text{ m}$.

(α) Να υπολογισθούν οι δυνάμεις F_1 έως F_6 , η συνισταμένη δύναμη R_y στη βάση του φράγματος και η απόστασή της από τη αριστερή ακμή της βάσης και η κατανομή τάσεως επί του εδάφους στη βάση του φράγματος.

(β) Μια πρόσθετη δύναμη ασκούμενη στη βάση της δομής είναι η “υδροστατική άνωση” F_{YA} προκαλούμενη από νερό διερχόμενο από τους πόρους, τις σχισμές και χαραμάδες του εδάφους με τάση

$$F_{YA} = \rho \cdot g \cdot \frac{H_1 + H_2}{2} \cdot (b_1 + b_2 + b_3) \cdot L$$

να διαρρέει προς την κατάντη πλευρά. Προς ασφάλεια τίθεται

σε απόσταση $(b_1 + b_2 + b_3)/3$ από την ανάντη ακμή. Να ευρεθεί η νέα δύναμη R_y και η απόσταση x .

(γ) Εξιδανικεύοντας θεωρούμε ότι μεταξύ άνω δομής του φράγματος βαρύτητας και της **έδρασης** θεμελίωσής του ο συντελεστής **τριβής** είναι $\mu = 0,45$. Να ευρεθεί ο συντελεστής ασφάλειας ολίσθησης – ΣΑΟ - οριζόμενος ως ο λόγος ΣΑΟ = αντίσταση ολίσθησης/δύναμη ολίσθησης.

Κατά προσέγγιση βάσει του **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5/17** οι διαστάσεις του φράγματος είναι: $H_1 + H_2 = 51,2 \text{ m}$,

$$H_1 = 10,2 \text{ m}, \quad H_2 = 41 \text{ m}, \quad b_1 + b_2 + b_3 = 49,4 \text{ m}, \quad b_1 = 8 \text{ m}, \quad b_2 = 2,4 \text{ m}, \quad b_3 = 39 \text{ m}.$$

5.5.4A Διώρυγες υδατοτροφοδότησης υδροστροβιλικών εγκαταστάσεων

Περιγράψτε σε αδρές γραμμές τη μεθοδολογία προκαταρκτικού σχεδιασμού διωρύγων νερού για τη τροφοδότηση εγκαταστάσεων υδροστροβίλων.

ΛΥΣΗ: Ο τεχνικός προκαταρκτικός σχεδιασμός της διώρυγας έχει αφετηρία την μέση ταχύτητα ροής, η οποία πρέπει να είναι “ούτε μικρή”, ώστε να αυξάνονται οι καθιζήσεις, “ούτε μεγάλη”, ώστε να προκαλείται διάβρωση στα τοιχώματα. Ταυτόχρονα πρέπει οπωσδήποτε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η οικονομικότητα της κυκλοφορίας σε περίπτωση που η **διώρυγα είναι πλωτή**. Τότε

- Μέση ταχύτητα δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τις τιμές 1,2 έως 1,4 m/s, ενώ είναι

5.5.4B Διαστασιολόγηση διώρυγας τροφοδοσίας εγκατάστασης υδροστροβίλου

Στην αρχική διατομή διώρυγας για την τροφοδοσία υδροστροβιλικής εγκατάστασης η στάθμη αφετηρίας ευρίσκεται στο υψόμετρο (πάνω από την επιφάνεια θαλάσσης) 134,50 m και η στάθμη απόληξης δεν μπορεί να είναι κάτω από τα 122,50 m. Η ποσότητα υδροληψίας είναι $Q = 21 \text{ m}^3/\text{s}$ και το μήκος παροχέτευσης $L = 8,6 \text{ km}$. Η κοίτη και οι παριές καλύπτονται με στρώμα αδρής άμμου μέσης διαμέτρου κόκκων 1,5 mm με κατάλληλο υπόστρωμα στεγανοποίησης έναντι της απορροφητικότητας εδάφους. Η διατομή είναι τραπεζοειδής με επιλεγμένο κατόπιν αξιολογήσεως μέγιστο βάθος νερού $h = 2,5 \text{ m}$ (θεωρούμενο σταθερό σε όλο το μήκος). Εξ αρχής επιλέγεται η ταχύτητα να είναι χαμηλή στην ενδεικτική τιμή των $V = 0,6 \text{ m/s}$. Να διαστασιολογηθεί η διώρυγα ως ευθύγραμμη κατασκευή λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία από τους **ΠΙΝΑΚΕΣ 5.5-4 και -5 ΡΔΜ**.

ΛΥΣΗ: Το εμβαδόν διατομής Α υπολογίζεται από τον τύπο του **ΠΙΝΑΚΑ 5.5-5**, όταν δίνονται οι διαστάσεις

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{21}{0,6} = 35,0 \text{ m}^2$$

της επιφάνειας, ενώ από την εξίσωση συνέχειας $Q = A \cdot V$ είναι

5.5.4Γ Απώλεια ενέργειας από αλλαγές διεύθυνσης ροής σε διώρυγες

Στην περίπτωση της προηγούμενης εφαρμογής παραγράφου 5.5.4B η διώρυγα είναι μη-ευθύγραμμη και έχει 13 αλλαγές διευθύνσεως κατά μέσο όρο 90° η καθεμία με ακτίνα καμπυλότητας 30 m.

(α) Να ευρεθεί η πρόσθετη απώλεια ενέργειας, όταν η απώλεια της γραμμικής διώρυγας μήκους 8,6 km

ήταν $J_{\text{γραμμική}} = 10,07 \text{ cm/km}$ (με $1 \text{ km} = 100.000 \text{ cm}$), και

(β) η συνολική κλίση της διώρυγας.

ΛΥΣΗ: (α) Ο δοκιμασμένος τύπος απωλειών του Boussinesq (παρότι από τα πρώτα βήματα της υδραυλικής) αρκεί για την προκαταρκτική εκτίμηση, βλ. εφαρμογή παραγράφου 5.5.4A. Ισχύει για

5.5.8A Ταλάντωση νερού στον πύργο αναπάλσεως προκαλούμενη από υδραυλικό πλήγμα

ΛΥΣΗ !!!!!;

Στην εγκατάσταση του **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5/47 ΡΔΜ** η ταχύτητα ροής στον αγωγό τροφοδότησης του στροβίλου είναι $u = 3 \text{ m/s}$, ενώ το μήκος είναι $l = 3.000 \text{ m}$ και η διάμετρος $d = 1,0 \text{ m}$. Ο πύργος αναπάλσεως έχει διάμετρο $d_{\Pi A} = 3,0 \text{ m}$. Λαμβάνοντας τον συντελεστή τριβής στον αγωγό σταθερό με $\lambda = 0,02$ να ευρεθεί η ταλάντωση της επιφάνειας του νερού στον πύργο αναπάλσεως από την στιγμή $t = 0$ της ακαριαίας διακοπής της παροχής $Q = 0$ μέχρι την εύλογη απόσβεσή της, δηλ. να ευρεθεί η χρονική εξέλιξη της απόστασης $y(t)$ από το επίπεδο αναφοράς $y = y_0$ την χρονική στιγμή $t = 0$. Προς τούτο να χρησιμοποιηθεί το σύστημα διαφορικών εξισώσεων, σχ.(5.5.64-66):

$\dot{m} = \rho \cdot Q = \rho \cdot u \cdot A$ σε έκτακτη ανάγκη χρειάζεται να διακοπεί η τροφοδότηση του υδροστροβίλου στο **ΣΧΗΜΑ 5.5/47** με κλείσιμο της βαλβίδας σε χρόνο dt , οπότε η αντίστοιχη μεταβολή ταχύτητας στον αγωγό είναι du και η στάθμη του πύργου αναπάλσεως διατομής $A_{\Pi A}$ μεταβάλλεται κατά dy . Διότι το κρουστικό κύμα προκαλούμενο από το κλείσιμο της δικλείδας δεν επιστρέφει μέσω του αγωγού στον ταμιευτήρα αλλά προκαλεί έντονη ροή νερού από τον αγωγό προς τον πύργο αναπάλσεως. Σ' αυτή τη ροϊκή διεργασία ισχύει η εξίσωση συνέχειας και ορμής, οι οποίες εφαρμοζόμενες δίνουν με $Q = 0$ με το

$$Q = A \cdot u + A_{\Pi A} \cdot \frac{dy}{dt} \rightarrow u = \frac{Q}{A} - \frac{A_{\Pi A}}{A} \cdot \frac{dy}{dt} \rightarrow u = - \frac{A_{\Pi A}}{A} \cdot \frac{dy}{dt}$$

κλείσιμο της δικλείδας (5.5.64)

$$\rho \cdot A \cdot l \frac{du}{dt} = -A \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \rho \frac{u \cdot |u|}{2} - y \cdot A_{\Pi A} \cdot \rho \cdot g \rightarrow y + \frac{A}{A_{\Pi A}} \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u \cdot |u|}{2g} = - \frac{A}{A_{\Pi A}} \cdot \frac{l}{g} \cdot \frac{du}{dt}$$

(5.5.65)

$$K = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{2g} \quad y + \alpha \cdot K \cdot u \cdot |u| = -\alpha \cdot \frac{l}{g} \cdot \frac{du}{dt}$$

και τελικά με $\alpha = A / A_{\Pi A}$ και είναι (5.5.66)

δηλ. ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων, το οποίο μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά ως προς $y(t)$, που είναι η χρονική μεταβολή της στάθμης του νερού στον πύργο αναπάλσεως. Χρησιμοποιούμε την

απόλυτη τιμή ταχύτητας $|u|$ για να διατηρηθεί το πρόσημό της στον προγραμματισμό.

Είναι: διατομή αγωγού $A = \pi \cdot d^2 / 4$, ταχύτητα στον αγωγό $u = Q / A$, διατομή Πύργου Αναπάλσεως $A_{\Pi A} = \pi \cdot d_{\Pi A}^2 / 4$



ΣΧΗΜΑ 5.5/47 Σε συνθήκες σταθερής λειτουργίας των υδροστροβίλων η στάθμη νερού στον πύργο αναπάλσεως ευρίσκεται χαμηλότερα της στάθμης του ταμιευτήρα κατά το ύψος απωλειών $h_v = \Delta p / \rho g$ της πτώσης πίεσης ένεκα τριβής στον αγωγό μεταφοράς, δηλ. σε απόσταση $y_0 = h_v$. Κατά την απότομη διακοπή της παροχής με κλείσιμο της δικλείδας το νερό ένεκα της αδράνειάς του εισρέει στον πύργο αυξάνοντας την αρχική στάθμη μέχρι τελικής ισορροπίας.

Απότομη μεταβολή της παροχής του νερού στον αγωγό υδροηλεκτρικού εργοστασίου προκαλεί υδραυλικό πλήγμα. Ο θάλαμος εκφόρτισης (ή αναπάσεως) μειώνει την επικίνδυνη επίδραση του πλήγματος σε καταστάσεις ανάγκης διακοπής λειτουργίας.

5.5.8B Υπολογισμός ύψους πύργου αναπάσεως σε σύστημα υδροδότησης υδροστροβίλου

Στην εγκατάσταση υδροδότησης υδροστροβίλων με σήραγγα υπό κλίση $J = 0,0001$ μήκους $L = 2,5$ km, διαμέτρου $d = 2,2$ m και μέγιστης ταχύτητας $u_{\max} = 3,1$ m/s παρεμβάλλεται πύργος αναπάσεως (ΠΑ) διαμέτρου $d_{\text{ΠΑ}} = 5,5$ m (βλ. σκαρίφημα από **ΣΧΗΜΑ 5.5/48 ΡΔΜ**). Ο συντελεστής αντίστασης τριβής στη σήραγγα είναι $\lambda = 0,019$, ενώ το ύψος της στάθμης του ταμιευτήρα από τον άξονα του στομίου απόληψης είναι $h_1 = 42$ m.

Να ευρεθεί το αναγκαίο ύψος του πύργου αναπάσεως ΠΑ, η ανώτατη στάθμη και η κατώτατη στάθμη του νερού ως συνέπεια της φόρτισης και αποφόρτισης του πύργου και των συνεπαγόμενων ταλαντώσεων της ελεύθερης στάθμης νερού σ' αυτόν.

Μέθοδος ανάλυσης: Να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος αναλυτικός τύπος (π.χ. των Quantz/Meerwarth, βλ. ΡΔΜ & βιβλιογραφία) προσαρμοσμένος στα δεδομένα για τις μέγιστες μεταβολές του ύψους της στάθμης στον Πύργο Αναπάσεως ΠΑ με τις σχ. (5.5.67 και 68) ως εξής:

$$\Delta h_{\text{ανω}} = u_{\max} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot L}{A_{\text{ΠΑ}} \cdot g}} - \frac{h_v}{2} \quad (1) \text{ για αιφνίδια εκφόρτιση του ΠΑ κατά την άμεση}$$

έναρξη λειτουργίας του υδροστροβίλου,

$$\Delta h_{\text{κάτω}} = u_{\max} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot L}{A_{\text{ΠΑ}} \cdot g}} - \frac{h_v}{4} \quad (2) \text{ για αιφνίδια φόρτιση του ΠΑ κατά τη διακοπή της}$$

παροχής προς τον υδροστρόβιλο,

όπου h_v είναι οι μέγιστες απώλειες ύψους αντίστοιχου των απωλειών πίεσης από τριβή, π.χ. κατά Darcy –

Weisbach $h_v = \frac{\Delta p_v}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{u_{\max}^2}{2g}$. Η διατομή του ΠΑ πρέπει να διαστασιολογηθεί με τρόπον, ώστε οι ρυθμίσεις της παροχής στον υδροστρόβιλο να μην επηρεάζουν τις ταλαντώσεις του ΠΑ. Έτσι στο

διάστημα $\Delta h = \Delta h_{\text{ανω}} + \Delta h_{\text{κάτω}}$ η ελάχιστη διατομή πρέπει να είναι $A_{\min} \geq 0,1 \cdot \frac{\lambda \cdot L}{H_n} \cdot \frac{u_{\max}^2}{h_w}$.

Επίσης για να εμποδίζεται η εισροή αέρα, πρέπει το άνοιγμα του ΠΑ στο κάτω μέρος του, που συγκοινωνεί με τον αγωγό νερού, να ευρίσκεται επαρκώς κάτω από τον σταθμό $\Delta h_{\text{κάτω}}$.

ΛΥΣΗ: Σύμφωνα με τους συμβολισμούς του σκαριφήματος τα δεδομένα είναι

$$L = 2.500 \text{ m}, \quad d = 2,2 \text{ m}, \quad u_{\max} = 3,1 \text{ m/s}, \quad d_{\text{ΠΑ}} = 5,5 \text{ m}, \quad \lambda = 0,015, \quad h_1 = 42 \text{ m}, \quad J = 0,0001.$$

5.5.8Γ ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Εκφώνηση & Λύση aB

Για την περίπτωση του **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5/46** με τα δεδομένα της προηγούμενης εφαρμογής 5.5.7Α να χρησιμοποιηθούν τύποι από αναλυτικές λύσεις του συστήματος διαφορικών εξισώσεων του υδραυλικού πλήγματος με πύργο αναπάσεως και να ευρεθούν (α) η διατομή του πύργου και (β) το αναγκαίο ύψος αυτού εφαρμόζοντας τα ίδια αριθμητικά δεδομένα.

Επίλυση στις φροντιστηριακές ασκήσεις του μαθήματος.

5.5.9A Υπολογισμός δυνάμεων ροής σε καμπυλότητα υδαταγωγού 5.7-20

Καμπύλο μεταβατικό τμήμα γωνίας 90° σε σωληναγωγό τροφοδότησης υδροστροβίλου, οριζοντίως τοποθετημένο (‘έδρασμένο’), έχει ονομαστική διάμετρο $DN1000$ (που αντιστοιχεί σε εσωτερική διάμετρο περίπου ενός μέτρου $d \approx 1.000 \text{ mm}$) υπό παροχή $Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{h}$ και πίεση εισροής $p = 40 \text{ bar}$. Με βάση το σχεδιοσκαρίφημα να υπολογισθούν:

(α) Η συνισταμένη ασκούμενη στον αγωγό δύναμη R .

(β) Η δύναμη καταπόνησης συνολικά σε n κοχλίες που συνδέουν τις ωτίδες (φλάντζες) της καμπυλότητας με τις ωτίδες του αγωγού.

(γ) Πώς θα υπολογίσετε τις διαστάσεις των κοχλιών στις ωτίδες; (απλή περιγραφή).

ΛΥΣΗ: (α) Τις ασκούμενες δυνάμεις από το νερό στον καμπύλο αγωγό δίνουν άμεσα οι σχ.(5.5.75 και β) με τους συμβολισμούς του **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5/49 ΡΔΜ**:

5.5.9B Δυνάμεις ροής σε καμπύλο αγωγό τροφοδότη υδροστροβίλου

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του **φράγματος του Grand Coulee** στις ΗΠΑ έχει συνολική ισχύ 6.810 MW με 33 υδροστροβίλους τύπου Francis διαφόρων μεγεθών, εκ των οποίων τρεις έχουν ισχύ 805 MW ο καθένας. Η μέγιστη υδατόπτωση είναι $H = 105 \text{ m}$, όπως φαίνεται από τις διαφορές σταθμών στη τομή του φράγματος στο **ΣΧΗΜΑ 5.5/4 ΡΔΜ**. Οι **πιεστικοί αγωγοί τροφοδότησης** των στροβίλων έχουν διάμετρο $5,5 \text{ m}$. Λαμβάνοντας ως εύλογη τιμή ταχύτητας $4,5 \text{ m/s}$, βλ. **ΠΙΝΑΚΑ 5.5/6 ΡΔΜ**, να υπολογισθούν:

(α) η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο καμπύλο τμήμα ανοίγματος 150° ευρισκόμενο στο κάτω μέρος του αγωγού πριν την είσοδό του στο μηχανοστάσιο και

(β) οι δυνάμεις καταπόνησης των κοχλιών στις ωτίδες (φλάντζες) του αγωγού.

Για λόγους ασφαλείας υπολογισμού η πίεση να ληφθεί ίση με την υδροστατική πίεση. Οι αγωγοί είναι μεν εγκιβωτισμένοι στη δομή του φράγματος αλλά πριν από τον στρόβιλο υποθέτουμε, ότι υπάρχει το καμπύλο μεταβατικό τμήμα γωνίας ανοίγματος 150° με κατάλληλη έδραση για την ανάληψη του βάρους του.

ΛΥΣΗ: (α) Οι ασκούμενες από το νερό δυνάμεις επί του αγωγού δίνονται δίνονται από τη σχ.(5.5.74):

5.6.6A Προεπιλογή τύπου μικροϋδροστροβίλου με τη βοήθεια νομογραφήματος και με υπολογιστική επιβεβαίωση

Σε σχεδιαζόμενο Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο το διαθέσιμο ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης είναι

$H_n = 50 \text{ m}$ με παροχή όγκου $Q = 100 \text{ l/s} = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Να επιλεγεί ο τύπος του μικροϋδροστροβίλου με κατάλληλο σύγχρονο αριθμό στροφών,

(α) με χρήση του νομογραφήματος στο **ΣΧΗΜΑ 5.6/14 ΡΔΜ** και

(β) υπολογιστικά με χρήση των τύπων ομοιότητας και της καμπύλης του Κορντιέ.

ΛΥΣΗ: (α) Χρησιμοποιούμε το νομογράφημα του **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.6/14 ΡΔΜ**, στο οποίο δίνονται οι σύγχρονοι αριθμοί στροφών από $12,5$ έως 3.000 min^{-1} στην άνω οριζόντια κλίμακα. Με βάση τα αναφερόμενα κριτήρια στην παράγραφο 5.6.6 επιλέγουμε το διάστημα από 750 έως 1.500 min^{-1} . Φέρουμε την ευθεία μεταξύ του σημείου $H_n = 50 \text{ m}$ στον δεξιό άξονα και του σημείου $Q = 100 \text{ l/s}$ στον αριστερό άξονα. Σχεδιάζουμε από τα σημεία του άνω οριζόντιου άξονα $n = 750 \text{ min}^{-1}$ τις δυο κάθετες ευθείες στην προηγούμενη ευθεία $Q-H_n$ και με προέκταση ευρίσκουμε τον αντίστοιχο ειδικό αριθμό στροφών n_q και τον τύπο του μικροϋδροστροβίλου ως εξής:

A. $n = 750 \text{ min}^{-1} \rightarrow n_q \approx 12 \text{ min}^{-1}$: στρόβιλος Pelton περισσοτέρων ακροφυσίων

5.6.9 Εκμετάλλευση υδατόπτωσης σε εγκατάσταση παράκαμψης φράγματος με ανοιχτό αγωγό διέλευσης ιχθύων

Ένας μεγάλος υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) για περιβαλλοντικούς λόγους πρέπει να εξοπλισθεί με παρακαμπτήριο ανοιχτό αγωγό ειδικής διαμόρφωσης για να υπάρχει η δυνατότητα, ώστε η ιχθυοπανίδα να ακολουθεί τον ποταμό παρακάμπτοντας το φράγμα και τις εγκαταστάσεις του ΥΗΣ. Το νερό στην ιχθυοδιέλευση πρέπει να έχει παροχή 700 l/s , ενώ στην έξοδό της και λίγο πριν την επανεισροή στον ποταμό η παροχή πρέπει να αυξηθεί για να προσελκυσθούν τα ψάρια προς το ρεύμα. Γι' αυτό κατασκευάζεται πιεστικός αγωγός μεταφοράς πρόσθετου νερού παροχής $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ στην εκροή του ανοιχτού αγωγού, όπως δείχνει το σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑ 5.6/19 ΡΔΜ**), καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Η δημιουργούμενη διαθέσιμη μικτή υδατόπτωση μεταξύ της στάθμης του ταμιευτήρα και της στάθμης απορροής είναι $H = 21,0 \text{ m}$ **μέγιστη** τιμή, $H = 20,0 \text{ m}$ **μέση** τιμή, $H = 18,0 \text{ m}$ **ελάχιστη** τιμή και θα αξιοποιηθεί προς ηλεκτροπαραγωγή μέσω μικροϋδροστροβίλου κατά περίπτωση. Η άνω στάθμη παραμένει σταθερή με την βοήθεια της ρύθμισης του φράγματος, ενώ η στάθμη της λεκάνης απορροής μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή απορροής. Η διάταξη του υδροστροβίλου θα εγκατασταθεί $0,5 \text{ m}$ πάνω από την μέγιστη στάθμη της λεκάνης απορροής στο υψόμετρο 500 m του έργου με θερμοκρασία νερού 20°C . **Σκοπός της προμελέτης είναι**

(α) να καθορισθεί ο τύπος και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του υδροστροβίλου με την μέγιστη δυνατή καταλληλότητά του στην εγκατάσταση.

(β) Με δεδομένο βαθμό απόδοσης 95% της ηλεκτρογεννήτριας να υπολογισθεί η ποσότητα ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση της υδατόπτωσης με παροχή $Q = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ από μέσο ύψος $H = 20 \text{ m}$. Ο πιεστικός αγωγός έχει μήκος $l = 200 \text{ m}$ και διάμετρο $d = 1,0 \text{ m}$.

Σκαρίφημα: Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός με αξιοποίηση υδατόπτωσης σε έργο προστασίας της ιχθυοπανίδας με καθοδήγηση των ψαριών από το αδιέξοδο του φράγματος πάλι στον ποταμό (και αντιστρόφως για ορισμένες εποχές).

$$u = \frac{Q}{\pi d^2/4} = \frac{2}{\pi \cdot 1^2/4} = 2,55 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ΛΥΣΗ: Η ταχύτητα νερού είναι:

Το ύψος απωλειών ροής του αγωγού υπολογίζεται με ακρίβεια με την σχέση Darcy-Weisbach, στην οποία πρέπει να προϋπολογισθεί ο συντελεστής τριβής $\lambda(Re, k)$ κατά τα γνωστά από την

5.6.10 Εκμετάλλευση υδατόπτωσης μεταξύ δύο δεξαμενών νερού σε αστικό δίκτυο υδροδότησης

Το δίκτυο διανομής νερού σε μια ευρύτερη περιοχή περιλαμβάνει δύο δεξαμενές πόσιμου νερού, οι οποίες είναι μεταξύ τους συνδεδεμένες με αγωγό μεταφοράς μήκους 5 km . Η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο δεξαμενών είναι 100 m . Στην είσοδο της χαμηλότερης δεξαμενής λειτουργεί δικλείδα για τον στραγγαλισμό της ροής, ώστε στον αγωγό μεταφοράς να επικρατεί ένα ορισμένο επίπεδο πίεσης που να δίνει τη δυνατότητα να τροφοδοτούνται επαρκώς κατά μήκος του αγωγού απομαστεύσεις προς παρακείμενα μικρά δίκτυα. Κατά συνέπεια προκαλεί αρκετή πτώση πίεσης και έτσι **απώλεια ροϊκής ενέργειας**, η οποία προφανώς μετατρέπεται σε θερμότητα και "χάνεται". Προς **ανάκτηση αυτής της ενέργειας** προτείνεται η τοποθέτηση ενός μικροϋδροστροβίλου σε παράλληλη θέση από αυτή της δικλείδας, βλ. σκαρίφημα (από το **ΣΧΗΜΑ 5.6/20 ΡΔΜ**), ο οποίος θα προκαλεί τον ίδιο στραγγαλισμό ροής παράγοντας όμως ενέργεια ως Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός (**ΜΥΗΣ**). Η παροχή νερού στη θέση του στροβίλου μεταβάλλεται σε συνάρτηση της κατανάλωσης νερού στο δίκτυο διανομής, το οποίο τροφοδοτείται από την κάτω δεξαμενή. **Δεδομένα για τον σχεδιασμό του ΜΥΗΣ είναι:**

- Ωφέλιμος όγκος κάτω δεξαμενής 2.500 m^3 και άνω δεξαμενής 1.000 m^3
- Αγωγός μεταφοράς, μήκος 5.000 m , διάμετρος $DN 300 \text{ mm}$, υλικό χυτοσίδηρος
- Συνιστάται ο συντελεστής τριβής στον αγωγό να ληφθεί $\lambda \approx 0,023$, δηλ. σχετικά υψηλός (βλ.

Διάγραμμα $\lambda(Re, k)$ στο **ΣΧΗΜΑ 2.5/2**), για λόγους επάρκειας του υπολογισμού για μακροχρόνια λειτουργία, που επιφέρει επικαθίσεις κ.ά. επιδράσεις ρευστομηχανικής γήρανσης της εγκατάστασης (εφόσον είναι επιθυμητό μπορεί να γίνει ακριβέστερος υπολογισμός του λ και γενικώς του αγωγού σύμφωνα με τη θεωρία στο υποκεφάλαιο 2.5).

- Απαιτούμενη ελάχιστη πίεση στον αγωγό πριν τον στραγγαλισμό για να εξασφαλίζεται τροφοδότηση

συνδεδεμένων καταναλωτών στον αγωγό:

$$H_{min} = 75 \text{ m} \rightarrow p_{min} = \rho \cdot g \cdot H_{min} = 1.000 \cdot g \cdot 75 = 735.499 \text{ Pa} = 7,355 \text{ bar}$$

- Για να καλυφθούν οι ανάγκες της υδροδότησης από την κάτω δεξαμενή απαιτούνται ημερησίως
- $5.000 \text{ m}^3/\text{d}$ κατά μέσο όρο την θερινή περίοδο επί 6 μήνες ($= 365/2 = 182,5 \text{ d} = 4.380 \text{ h}$)
- $4.000 \text{ m}^3/\text{d}$ κατά μέσο όρο την υπόλοιπη περίοδο επί 6 μήνες.

Σκοπός του προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι:

(α) Να καθοριστούν ο τύπος και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του υδροστροβίλου, τα οποία είναι τα καταλληλότερα από τεχνικής και οικονομικής πλευράς προς εφαρμογή στο προτεινόμενο σχέδιο.

(β) Να προϋπολογισθούν οι συνθήκες λειτουργίας και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας τον βαθμό απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας $\eta_{\text{HT}} = 90\%$.

ΛΥΣΗ: (α) Τύπος και χαρακτηριστικά λειτουργίας του μικροϋδροστροβίλου: Η οριακή συνθήκη να διατηρείται η ελάχιστη πίεση πριν από την δικλείδα ρύθμισης, δηλ. πριν από τον στρόβιλο, στα $H_{min} = 75 \text{ m}$ ($= 7,355 \text{ bar}$) καθορίζει το ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης σε $H_n = H_{min} = 75 \text{ m}$, ενώ το μικτό διαθέσιμο

5.6.11 Μικρό υδροηλεκτρικό έργο μέσης υδατόπτωσης εξαρτώμενης από καιρικές συνθήκες

Σε ορεινή περιοχή δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός ταμειυτήρα με ικανή παροχή και ύψος υδατόπτωσης, ώστε να κατασκευασθεί ένας Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός σε χαμηλότερη θέση υψομετρικής διαφοράς και έτσι μικτού ύψους εκμετάλλευσης $H = 55 \text{ m}$. Η παροχή επηρεαζόμενη άμεσα από τις έντονες εποχικές καιρικές συνθήκες της περιοχής παρουσιάζει την εξής διαθεσιμότητα σύμφωνα με την **υδρολογική προμελέτη**:

A. Χειμερινή περίοδος επί 100 ημέρες μέση παροχή τουλάχιστον $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

B. Επί 55 ημέρες/έτος μεταξύ 0,2 και $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Γ. Επί 210 ημέρες/έτος μεταξύ 0,08 και $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

Πρόκειται για μια απομακρυσμένη περιοχή και το έργο πρέπει να περιορισθεί σε ένα απλό συγκρότημα μικρού όγκου. Επιπρόσθετα εκτιμάται το μήκος του χαλύβδινου αγωγού μεταφοράς σε 200 m , ενώ το μέσο υψόμετρο του έργου είναι 1.000 m με μέση θερμοκρασία νερού 8°C .

Ζητούμενα της υπολογιστικής προμελέτης: Η αναμενόμενη έντονη μεταβολή ισχύος ένεκα της μεταβολής της παροχής από 8% έως 100% υποχρεώνει εξ αρχής να επιλέγουμε την ηλεκτρική ισχύ της ηλεκτρογεννήτριας $P_{\eta\lambda} = 200 \text{ kW}$ (παρότι στη περίοδο μέγιστης παροχής θα μπορούσε να ήταν τουλάχιστον διπλάσια) και τον εφικτό βαθμό απόδοσής της $\eta_{\eta\lambda} = 90\%$. Επίσης ένεκα της μεγάλης αυξομείωσης της παροχής ένεκα καιαιγίδων, βροχοπτώσεων κ.ά. θα υπάρχει αντιστοιχη αυξομείωση της στάθμης της λεκάνης απορροής. Γι' αυτό ο στρόβιλος πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος 3 m πάνω από την κατώτατη στάθμη απορροής, όπως δείχνει το σκαρίφημα της εγκατάστασης (από το **ΣΧΗΜΑ 5.6/21 ΡΔΜ**). Με βάση αυτές τις αρχικές και οριακές συνθήκες για την εκτίμηση υλοποίησης του έργου πρέπει να υπολογισθούν:

- Ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης και διάμετρος του αγωγού

- Χαρακτηριστικά λειτουργίας του υδροστροβίλου και κυρίως ωφέλιμο μανομετρικό, ελάχιστη και μέγιστη παροχή όγκου
- Τύπος υδροστροβίλου και αριθμός στροφών
- Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

ΛΥΣΗ: Το καθαρό ύψος υδατόπτωσης καθορίζει κυρίως η υπό της συνθήκες του έργου επιλεγείσα ισχύς των 200 kW. Η αντίστοιχη εξερχόμενη ισχύς στον άξονα του υδροστροβίλου είναι:

5.6.12 “Mini” υδροηλεκτρικός σταθμός χαμηλής υδατόπτωσης

Στο φράγμα του μικρού ταμιευτήρα του σκαριφήματος (από **ΣΧΗΜΑ 5.6/22 ΡΔΜ**) πρόκειται να δημιουργηθεί ένας Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός. Ο κύριος του έργου σχεδιάζει να υποκαταστήσει τον ρόλο του μηχανικού εκχειλιστή, με τον οποίο ρυθμίζει την άνω στάθμη του ταμιευτήρα, ώστε να παραμένει σταθερή, με έναν κατάλληλο μικροϋδροστρόβιλο. Ο εκχειλιστής θα διατηρηθεί αλλά θα ενεργοποιείται κατά την διάρκεια περιόδων συντήρησης του στροβίλου. Το σχέδιο πρέπει να υλοποιηθεί με τις ελάχιστες δυνατές δομικές παρεμβάσεις. Επίσης κατά την διάρκεια των εργασιών το φράγμα δεν επιτρέπεται να εκκενωθεί. Η υδραυλική μελέτη προβλέπει η στάθμη νερού στον ταμιευτήρα να διατηρείται σταθερή, ενώ η στάθμη της λεκάνης απορροής να μεταβάλλεται ανάλογα με την ροή του νερού. Δίνει επίσης το μικτό

ύψος υδροδότησης σε τρεις θέσεις: $H_{\max}=3,0 \text{ m}$, $H_m=2,8 \text{ m}$ (μέση) και $H_{\min}=2,5 \text{ m}$.

Επίσης η παροχή προβλέπεται να αλλάζει κατά ίσες χρονικές και “υπολογιστικές” περιόδους ως εξής:

- A.** Μέγιστη παροχή για 150 ημέρες ετησίως $Q_{\max}=2,0 \text{ m}^3/\text{s}$,
- B.** Ελάχιστη παροχή για 50 ημέρες/έτος $Q_{\min}=0,5 \text{ m}^3/\text{s}$,
- Γ.** Μέση παροχή για 100 ημέρες/έτος $Q_m=1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Το έργο ευρίσκεται σε υψόμετρο 500 m και η μέγιστη θερμοκρασία νερού μπορεί να φθάσει τους 24 °C.

Σκοπός της υπολογιστικής προεκτίμησης είναι να γίνουν:

- (α) Επιλογή του τύπου υδροστροβίλου με τα τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως ύψη υδατόπτωσης, παροχές, αριθμός στροφών.
- (β) Πρόταση εγκατάστασης και διάταξης του υδροστροβίλου με τις ελάχιστες δυνατές δομικές εργασίες.
- (γ) Πρόταση για την διάταξη υδροστροβίλου – ηλεκτρογεννήτριας.
- (δ) Υπολογιστική εκτίμηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας.

ΛΥΣΗ: (α) Η επιλογή του υδροστροβίλου γίνεται με δεδομένο, ότι θα τοποθετηθεί στο φράγμα, όπου και ο εκχειλιστής, ώστε λόγω του πολύ μικρού διαθέσιμου ύψους υδατόπτωσης να μην υπάρχει ανάγκη αγωγού τροφοδότησης, οπότε το ωφέλιμο ύψος είναι ίσο με το διαθέσιμο $H_n = H$.

Λαμβάνουμε ως υπολογιστικό μέγεθος για την επιλογή το μέσο ύψος και την μέση παροχή:

$$H_{n\ m}=2,8 \text{ m} \ , \ Q=Q_m=1,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Από το διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.6/1** προκύπτει ο κατάλληλος στρόβιλος να είναι μονοσήμαντα τύπου Kaplan.

5.6.13 Καθορισμός διαμέτρου στροφείου μικροϋδροστροβίλου και βασικές διαστάσεις μηχανής

Σε συνέχεια της προεπιλογής του μικροϋδροστροβίλου Kaplan στο σχέδιο του Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού της ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ παραγράφου 5.6.12 με δεδομένα: μανομετρικό $H = 2,8 \text{ m}$, παροχή $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, αριθμός στροφών $n = 8,25 \text{ s}^{-1}$, ισχύς $P = 36,481 \text{ kW}$, ζητείται:

(α) Να υπολογισθεί η διάμετρος του στροφείου με δεδομένο λόγο διαμέτρων πλήμνης/stroφείου $d_p / D \approx 0,4$.

(β) Να ευρεθούν τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής του μικροϋδροστροβίλου με δεδομένα του (υποθετικού) κατασκευαστή από τα διαγράμματα των **ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.6/24 και /25 ΡΔΜ**.

Η μεθοδολογία υπολογισμού είναι παρόμοια με αυτή των υδροστροβίλων με ισχείς άνω των 10 MW, βλ. υποκεφάλαια 5.3, 5.4, 5.5. Με εφαρμογή της μπορούμε να βρούμε την διάμετρο στροφείου και κατόπιν με την βοήθεια διαγραμμάτων του κατασκευαστή του μικροϋδροστροβίλου να προβούμε στην τελική επιλογή της μηχανής (μέγεθος, διαστάσεις, απόδοση, στοιχεία εγκατάστασης) ως ακολούθως.

ΛΥΣΗ: (α) Η διάμετρος του στροφείου ευρίσκεται σε πρώτη υπολογιστική εκτίμηση από την καμπύλη του Κορντιέ (Cordier) $\delta(\sigma)$, **ΣΧΗΜΑ 5.1/15** ή/και τους γνωστούς συναφείς τύπους ομοιότητας με χρησιμοποίηση του ειδικού αριθμού στροφών ή απευθείας του αριθμού στροφών, από τον οποίο

-
- 5.7-1 5.1.3Α Επιλογή υδροστροβίλου τύπου Kaplan
 5.7-2 5.1.3Β Επιλογή υδροστροβίλου Pelton
 5.7-3 5.1.3Γ Υδροστρόβιλος Francis - επαλήθευση χαρακτηριστικών στοιχείων
 5.7-4 5.1.3Δ Υδροηλεκτρικός σταθμός με στρόβιλο Pelton
 5.7-5 5.1.5Ε Επιλογή υδροστροβίλου
 5.7-6 5.2.2Α Κινητήριες δυνάμεις και ρευστομηχανική μετατροπή ενέργειας στον Υδ Pelton
 5.7-7 5.3.5Β Σχεδιασμός πρωτότυπου υδρ Φράνσις βάσει ομοίου προτύπου Υδροστροβίλ ΕΛ;;;
 5.7-8 5.3.7Α Ενεργειακό όφελος διαχύτη σε υδροστρόβιλο Francis
 5.7-9 5.3.7Β Ενεργειακό όφελος γωνιόσχημου (καμπύλου) υδροστροβίλου Κάπλαν ΕΛ;;;;;
 5.7-10 5.4.4Α Υδροστρόβιλος Κάπλαν: διαστασιολόγηση.....ΕΛ;;;;;
 5.7-11 5.4.7Α Ελικοϋδροστρόβιλος παλιρροϊκού ρεύματος ΕΛ;;;
 5.7-12 5.4.7Β Ελικοϋδροστρόβικος....ΕΛ;;;;;
 5.7-13 5.4.7Γ Ελικοϋδροστρόβιλοι σε συστοιχία....ΕΛ;;;;;
 5.7-14 5.5.3Α ... ορθογωνική διώρυγα....ΕΛ;;;
 5.7-15 5.5.4Δ ..διώρυγα .. ΕΛ;;;;;
 5.7-16 8. ΒF8.8 Υδροστρόβιλος Pelton: Διαστασιολόγηση και τρίγωνα ταχυτήτων
 5.7-17 5.5.5Α Βελτιστοποιημένη διαστασιολόγηση υδαταγωγού τροφοδοσίας υδροστροβίλων άμεσης τροφοδότησης από ταμειευτήρες φραγμάτων
 5.7-18 5.5.5ΑΑδιάμετρος αγωγού...ΕΛ;;;;;
 5.7-19 5.5.5Β Υδαταγωγοί υδροστροβιλικών σταθμών ως 'σωληνογραμμές μεταφοράς ενέργειας'
 5.7-20 5.5.9Α Υπολογισμός δυνάμεων ροής σε καμπυλότητα υδαταγωγού
 5.7-21 5.5.3Βδιώρυγα.....ΕΛ;;;;;
 5.7-22 5.6.1μικροϋδροστρόβιλος...ΕΛ;;;;;**5.5.3ΑΑ Δεν υπάρχει στις ΡΔΜ πάει σελ 5.68 κάτω**
5.7-23 5.5.3ΑΑ Διώρυγα τροφοδοσίας υδροστροβιλικής εγκατάστασης
 5.7-24 5.5.3Γ ...διώρυγα...ΕΛ;;;;;
 5.7-25 5.5.3Δδιώρυγα..... ΕΛ;;;
 5.7-26 5.5.6Α.....σωληναγωγός.....ΕΛ;;;
 5.7-27 5.5.6Βσήραγγα.....ΕΛ;;;;;

- 5.7-28 5.3.8-3 Φράνσις.....ΕΛ;;;;;
 5.7-29 5.3.8-4Κάπλαν.....ΕΛ;;;;;
 5.7-30 5.5.7Α ...αγωγός δικλείδα...ΕΛ;;;
 5.7-31 5.5.7Βυδραυλικό πλήγμα,,ΕΛ;;;
 5.7-32 5.5.7Γ....κλείσιμο δικλείδαςΕΛ;;;;;
 5.7-33 5.6.2Αμικροϋδροστροβίλος.....ΕΛ;;;;; αναρρίθμηση σε 5.6.2Α ένεκα 5.6.2Β
 5.7-34 5.6.2Βμικροϋδροστροβίλος....ΕΛ;;;;;
 5.7-35 5.6.3αντλία ως μικροϋδροστροβίλος....ΕΛ;;;
 5.7-36 5.2.4Β Υπολογισμός ισχύος υδροστροβίλου Pelton ΕΛ;;;;
 5.7-37 5.6.5 ΕΛ;;;;
 5.7-38 8. ΒF8.3 Υδροστροβίλος αντίδρασης
 5.7-39 8. ΒF8.5 Υδροστροβίλος Pelton: υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας n, Y, P, M
 5.7-40 8...5.2.2-BFP 8.2: Ισχύς και διάμετρος στροφείου υδροστροβίλου Pelton
 5.7-41 8. ΒF8.6 Υδροστροβίλος δράσης μεγάλου μανομετρικού
 5.7-42 5.2.9Α 5.2.6Α Υδροστροβίλος εγκάρσιας ροής: διαστασιολόγηση στροφείου
 5.7-43 5.2.9Β Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής με χρ καμπύλης Κορντιέ
 5.7-44 8. ΒF8.9 Διαχύτης υδροστροβίλου Francis
-

5.7-1 Επιλογή υδροστροβίλου τύπου Kaplan (5.1.3Α)

Η υδρολογική/υδραυλική εκτίμηση για τον σχεδιασμό υδροηλεκτρικού σταθμού σε φράγμα ενός ποταμού κατάληξε, ότι υπάρχει διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης $H = 23 \text{ m}$ και παροχή νερού $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ για την εγκατάσταση του υδροστροβίλου. Να ευρεθούν με τη βοήθεια των διαγραμμάτων $H(Q)$ και $H(n_q)$:

- (α) Τύπος του υδροστροβίλου και ειδικός αριθμός στροφών n_q .
 (β) Ισχύς του στροβίλου P , αριθμός ταχυστροφίας σ και αριθμός στροφών n .
 (γ) Διάμετρος (εξωτερική) του στροφείου D και η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής u . Να σχολιασθεί η τιμή της.
 (δ) Μέση μεσημβρινή (αξονική) ταχύτητα ροής του νερού c_m καθώς διαρρέει το στροφείο.
 (ε) Γνωρίζοντας ότι εύλογη τιμή της είναι $c_m = 10 - 11 \text{ m/s}$ και ο λόγος διαμέτρου πλήμνης προ εξωτερική διάμετρο είναι συνήθως $d_p/D \approx 0,45$ να ευρεθεί η τελική τιμή της D .

ΛΥΣΗ: (α) Με ύψος υδατόπτωσης $H = 23 \text{ m}$ το διάγραμμα στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/14 ΡΔΜ** υπαγορεύει, ο υδροστροβίλος να είναι τύπου Kaplan κατακόρυφου άξονα με ειδικό αριθμό στροφών

$$n_q \approx 140 \text{ έως } 170 \text{ min}^{-1}$$

- (β) Με $H = 23 \text{ m}$ και παροχή όγκου $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ από το **ΣΧΗΜΑ 5.1/13** επιβεβαιώνεται ο τύπος του

5.7-2 Επιλογή υδροστροβίλου Pelton για ύψος υδατόπτωσης $H = 1.004 \text{ m}$ (5.1.3Β)

Ο υδροστροβίλος Pelton (σε εγκάρσια τομή υπό κλίμακα στο σκαρίφημα) ευρισκόμενος σε λειτουργία σε υδροηλεκτρικό σταθμό φέρει δύο στροφεία οριζοντίου άξονα προσβαλλόμενα το καθένα από ένα ακροφύσιο. Το ύψος υδατόπτωσης είναι $H = 1.004 \text{ m}$, ο αριθμός στροφών $n = 500 \text{ min}^{-1}$ και η παραγόμενη ισχύς ανά στροφείο $P = 33,8 \text{ MW}$ (συνολική ισχύς $2 \times 33,8 = 67,6 \text{ MW}$), ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης εκτιμάται $\eta = 84\%$ (ως προς τη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ $P_{\eta\lambda}$). Να υπολογισθούν:

- (α) Ο ειδικός αριθμός στροφών n_q , ο αριθμός ταχυστροφίας σ , ο αριθμός διαμέτρου δ και η ειδική διάμετρος D_q . Τα αποτελέσματα να συγκριθούν και να σχολιασθούν σε σχέση με τα αντίστοιχα στοιχεία των γνωστών διαγραμμάτων $H(n_q)$ και $H(Q)$, **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/13 και /14 ΡΔΜ**.

(β) Η διάμετρος στροφείου D , η περιφερειακή ταχύτητα u και η ταχύτητα εκροής c από το ακροφύσιο, προς επαλήθευση της σχέσεως $c/u \approx 2$ (όπου $\eta = \eta_{\max}$, βλ. παράγραφο 5.2.2). Να σχολιασθεί το αποτέλεσμα.

ΛΥΣΗ: (α) Από τα δεδομένα της εκφώνησης υπολογίζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη με

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3, g = 9,80665 \text{ m/s}^2, n = \frac{500}{60} = 8,333 \text{ s}^{-1} :$$

5.7-3 Υδροστρόβιλος Francis - επαλήθευση χαρακτηριστικών στοιχείων

(5.1.3Γ)

Ο ρωσικός Υδροηλεκτρικός Σταθμός στο Krasnojarsk συνολικής ισχύος 5.070 MW λειτουργεί με δέκα υδροστροβίλους τύπου Francis ο καθένας ισχύος 507 MW, αριθμού στροφών 78 min^{-1} και υδατόπτωσης 106 m. Ορισμένες βασικές διαστάσεις του υδροστρόβιλου δίνονται στη μηκοτομή (από **ΣΧΗΜΑ 5.1/17 ΡΔΜ**). Λαμβάνοντας ως συνολικό βαθμό απόδοσης $\eta = 0,88$ και χρησιμοποιώντας κυρίως τύπους από τη παράγραφο 5.1.3 ΡΔΜ να υπολογισθούν:

(α) Ο ειδικός αριθμός στροφών n_s , ο αριθμός ταχυστροφίας σ , η ειδική διάμετρος D_s και ο αριθμός διαμέτρου δ .

(β) Είναι οι προϋπολογισθέντες χαρακτηριστικοί αριθμοί συμβατοί με τον τύπο του υδροστροβίλου και γιατί;

(γ) Η διάμετρος και η περιφερειακή ταχύτητα του στροφείου και να συγκριθούν με την διάμετρο των 7.500 mm του πραγματικού στροβίλου και την αντίστοιχη περιφερειακή ταχύτητα του πρωτότυπου.

(δ) Η μέση ταχύτητα εισροής του νερού περιμετρικά της ακίνητης περύγωσης δεδομένου ύψους 1.850 mm στο σχήμα και κατά την εκροή από τον στρόβιλο, όπου και η διατομή εισόδου στον διαχύτη της εγκατάστασης.

(ε) Να σχολιασθούν τα αποτελέσματα σε σχέση με τα κατασκευαστικά δεδομένα του **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1/17** και τα διαγράμματα $H(Q)$, $H(n_s)$ και την καμπύλη του Cordier, **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/3** έως **/15**, αντιστοίχως.

ΛΥΣΗ:(α) Από την εκφώνηση υπολογίζουμε: **Αριθμός στροφών** $n = 78 \text{ min}^{-1} = 1,3 \text{ s}^{-1}$

Παροχή όγκου: από τον τύπο ισχύος στροβίλου, σχ.(5.1.20): $P = \eta \cdot \dot{m} \cdot Y = \eta \cdot (\rho \cdot Q) \cdot (g \cdot H)$

$$Q = \frac{P}{\eta \cdot \rho \cdot g \cdot H} = \frac{507000000}{0,88 \cdot 1000 \cdot g \cdot 106} = 554,24 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

5.7-4 Υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) με στρόβιλο Pelton

(5.1.3Δ)

Από ορεινό φράγμα με στάθμη νερού στο υψόμετρο 1.250 m εξασφαλίζεται παροχή $24 \text{ m}^3/\text{s}$ για την τροφοδοσία υδροηλεκτρικού σταθμού, ο οποίος πρόκειται να κατασκευασθεί σε τοποθεσία υψόμετρου 220 m. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι περίπου 82% ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προ τη διαθέσιμη ενέργεια υδατόπτωσης ανά μονάδα χρόνου (ισχύς υδατόπτωσης).

(α) Ποια είναι η αναμενόμενη ισχύς του ΥΗΣ;

(β) Ο ΥΗΣ προορίζεται να λειτουργεί με την απαραίτητη ευελιξία και ασφαλή ετοιμότητα για τη κάλυψη αναγκών αιχμής της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος. Γι' αυτό να εξετασθεί η εγκατάσταση δύο έως τεσσάρων υδροστροβίλων ίδιας ισχύος ο καθένας. Να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος του υδροστροβίλου.

(γ) Να ευρεθούν τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας του στροβίλου, όπως ισχύς, αριθμός στροφών, διάμετρος στροφείου, περιφερειακή ταχύτητα και οποιοδήποτε άλλο λειτουργικό ή κατασκευαστικό

μέγεθος ($\gamma 1$) με την βοήθεια των διαγραμμάτων $H(Q)$ και $H(n_q)$ και ($\gamma 2$) με υπολογιστικό τρόπο προς επίτευξη μεγαλύτερης υπολογιστικής ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

(δ) Στον τελικό υπολογισμό να ληφθεί υπόψη, ότι ο αριθμός στροφών n του υδροστροβίλου πρέπει να είναι σύγχρονος με αυτόν της ηλεκτρογεννήτριας.

ΛΥΣΗ: (α) Η αξιοποιήσιμη υδατόπτωση είναι $H = 1250 - 220 = 1.030 \text{ m}$. Η εγκατεστημένη συνολική ισχύς της εγκατάστασης θα είναι:

$$P = \eta \cdot \dot{m} \cdot Y = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H = 0,82 \cdot 1000 \cdot 24 \cdot g \cdot 1030 = 198.784.718 \text{ W} \rightarrow P = 198,8 \text{ MW}$$

(β) Είναι σκόπιμο να εξετασθούν ορισμένα “σενάρια” σχεδιασμού, δηλ. με έναν, δύο, τρεις και τέσσερις υδροστροβίλους. Διαπιστώνουμε εξ αρχής με βάση το διάγραμμα $H(n_q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/14 ΡΔΜ**, ότι πρόκειται για μηχανές τύπου Pelton, γεγονός επιβεβαιωνόμενο από το διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ**

5.7-5 Επιλογή υδροστροβίλου για υδατόπτωση 151 m και παροχή όγκου $72 \text{ m}^3/\text{s}$ (5.1.5E)

Ένας υδροστρόβιλος έχει τυπικά λειτουργικά χαρακτηριστικά: υδατόπτωση 151 m και παροχή όγκου $72 \text{ m}^3/\text{s}$ και πρόκειται να συνδεθεί απευθείας με ηλεκτρογεννήτρια παραγωγής τριφασικού ρεύματος συχνότητας 50 Hz.

(α) Ποιος τύπος στροβίλου είναι κατάλληλος γι' αυτά τα δεδομένα;

(β) Ποιος αριθμός στροφών πρέπει να επιλεγεί;

(γ) Ποια ισχύς προκύπτει για τον υδροστρόβιλο με προσδοκώμενο βαθμό απόδοσης $\eta = 93\%$.

(δ) Ποια και πώς αλλάζουν τα παραπάνω ζητούμενα, όταν η συχνότητα του ρεύματος είναι 60 Hz (όπως π.χ. στις ΗΠΑ).

ΛΥΣΗ: (α) Από τα **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/13 ΡΔΜ** και ιδιαίτερος **5.1/14** προκύπτει, ότι ο υδροστρόβιλος είναι τύπου Φράνσις με ειδικό αριθμό στροφών n_q μεταξύ των προσεγγιστικών τιμών $n_q = 38$ έως 55 (διαστατικός με n σε min^{-1}).

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \rightarrow n = n_q \cdot \frac{H^{3/4}}{\sqrt{Q}} = (38 \text{ έως } 55) \frac{151^{0,75}}{72^{0,5}}$$

(β) Από τον ειδικό αριθμό στροφών

$$\rightarrow n = 192,9 \text{ έως } 279,2 \text{ min}^{-1} = 3,125 \text{ s}^{-1} \text{ έως } 4,65 \text{ s}^{-1}$$

Ο υπολογιστικός αριθμός ζευγών πόλων ηλεκτρογεννήτριας, σχ. (5.1.25), είναι:

5.7-6 Κινητήριες δυνάμεις και ρευστομηχανική μετατροπή ενέργειας σε Υδροστρόβιλο Pelton (5.2.2A)

Υδροστρόβιλος Pelton λειτουργεί με ένα ακροφύσιο, έχει μέση διάμετρο $D = 1,2 \text{ m}$ (στο μέσο της περύγωσής του όπου και ο άξονας της κινητήριας δέσμης νερού) με γωνία εκροής των περυγίων 4° . Η ένδειξη πίεσης πριν το ακροφύσιο είναι $\Delta p = 10 \text{ bar}$ υπερπίεση, η θερμοκρασία 13°C και η αντίστοιχη παροχή $Q = 1.512 \text{ m}^3/\text{h}$. Να ευρεθούν:

(α) Η δύναμη στο περύγιο, εάν το στροφέιο ήταν ακίνητο.

(β) Η ισχύς του υδροστροβίλου υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.

(γ) Ο αριθμός στροφών και ο μέγιστος πιθανός αριθμός στροφών.

(δ) Η διάμετρος του ακροφυσίου λαμβάνοντας τον συντελεστή ταχύτητας εκροής 0,98.

(ε) Να σχεδιασθεί το τρίγωνο ταχυτήτων και να υπολογισθεί η απώλεια κινητικής ενέργειας στο σκαφίδιο.

ΛΥΣΗ: (α) Το σκαρίφημα (από το **ΣΧΗΜΑ 5.2/5 ΡΔΜ**) είναι το προσομοίωμα του προβλήματος. Οι ρευστοδυναμικές δυνάμεις ορμής στο σκαφίδιο του υδροστροβίλου Pelton παράγουν την ισχύ περιστροφής αυτού. Η γένεση της ισχύος υπολογίζεται με μεγάλη βεβαιότητα εφαρμόζοντας την εξίσωση

ορμής στην περιοχή αλληλεπίδρασης της δέσμης νερού με το πτερύγιο (σκαφίδιο) του στροφείου. (Με διακεκομμένη γραμμή είναι η κατάλληλη επιλογή της επιφάνειας ελέγχου, που διευκολύνει τον υπολογισμό της επίδρασης της εξωτερικής πίεσης). Την δύναμη (ορμής της) ροής δίνει η σχ. (5.2.2) απευθείας ή η σχ. (5.2.2β) με $u_\pi = 0$ (πτερύγιο ακίνητο), με δεδομένη παροχή

$$Q_1 = u_1 \cdot A_1 = 1512/3600 = 0,42 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{και} \quad \alpha/2 = 4^\circ, \text{ με ταχύτητα από την}$$

εξίσωση

5.7-7 Σχεδιασμός υδροστροβίλου υδροστροβίλου Francis βάσει όμοιου προτύπου (μοντέλου) υδροστροβίλου (5.3.5B)

Σχεδιάζεται η κατασκευή πρωτότυπου υδροστροβίλου τύπου Francis με μανομετρικό $H = 62 \text{ m}$ με βάση εργαστηριακές μετρήσεις σε **πρότυπο** (μοντέλο) υδροστροβίλο ίδιου τύπου, το οποίο λειτουργεί με μανομετρικό $H_M = 1,85 \text{ m}$ και παροχή $Q_M = 756 \text{ m}^3/\text{h}$ και εξαγει ισχύ $P = 3 \text{ kW}$ υπό αριθμό στροφών $n_M = 354 \text{ min}^{-1}$. Το γεωμετρικά όμοιο μοντέλο είναι κατασκευασμένο υπό μικρότερη κλίμακα 1 προς 5 (1:5) σε σχέση με το πρωτότυπο και οι συνθήκες λειτουργίας των δυο στροβίλων θεωρούνται δυναμικά όμοιες.

(α) Να υπολογισθεί ο αριθμός στροφών n , παροχή όγκου Q και η ισχύς P του πρωτότυπου υδροστροβίλου γνωρίζοντας βάσει της δυναμικής ομοιότητας, ότι οι αριθμοί πίεσης ψ , παροχής φ και ισχύος λ είναι ίδιοι.

(β) Να υπολογισθούν οι βαθμοί απόδοσης του μοντέλου η_M και του πρωτοτύπου η με τον τύπο του

$$\frac{1-\eta_\Pi}{1-\eta_M} = \frac{D_M^{0,2}}{D_\Pi^{0,2}}$$

Moody, σχ.(3.7.50), για τους υδροστροβίλους Francis.

(γ) Προς αισθητοποίηση του μεγέθους των μηχανών να υπολογισθεί η διάμετρος στροφείου και στους δυο στροβίλους με τη βοήθεια της καμπύλης του Cordier, **ΣΧΗΜΑ 5.1/15 ΡΔΜ** ή του τύπου προσομοίωσης αυτής, σχ.(5.1.5,6,9).

ΛΥΣΗ: (α) Τον αριθμό πίεσης δίνει η σχ.(5.1.14)

$$\psi = \frac{Y}{u^2/2}$$

με το ειδικό έργο $Y = g \cdot H$ και περιφερειακή ταχύτητα $u = \omega \cdot D/2$, $\omega = 2\pi \cdot n$

$$\varphi = \frac{Q}{u \cdot A_D} = \frac{Q}{\pi \cdot n \cdot D^3 \cdot \pi/4}$$

Τον αριθμό παροχής δίνει η σχ.(5.1.15): . Για $\varphi_\Pi = \varphi_M$ προκύπτει

5.7-8 Ενεργειακό όφελος διαχύτη σε υδροστροβίλο Francis (5.3.7A)

Σε εγκατάσταση υδροστροβίλου Φράνσις παροχής $Q = 31 \text{ m}^3/\text{s}$ και ισχύος $P = 50 \text{ MW}$, (βλ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ παραγράφου 5.3.2A), χρησιμοποιείται διαχύτης μήκους L μετά το στροφέιο και μέχρι τη λεκάνη απορροής με την διατομή εκροής του βυθισμένη στην επιφάνεια της, ώστε η εσωτερική ροή να είναι απομονωμένη από τον εξωτερικό χώρο, όπου επικρατεί η ατμοσφαιρική πίεση $p_A = 1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$. Το σκαρίφημα (από το **ΣΧΗΜΑ 5.3/17 ΡΔΜ**) δείχνει τη γεωμετρία του κατακόρυφου διαχύτη με δεδομένα: αμέσως μετά τον στροβίλο διάμετρος εισροής $D_2 = 2,11 \text{ m}$, ταχύτητα εισροής $u_2 = 12,27 \text{ m/s}$, γωνία ανοίγματος $\alpha = 10^\circ$. Ο διαχύτης είναι βυθισμένος σε $h = L/10$ και οι απώλειες στον διαχύτη να υπολογισθούν με τον τύπο, βλ. σχ.(5.3.21): $\Delta p_v = \eta_\Delta \cdot \rho \cdot u_2^2/2$ με $\eta_\Delta = 0,1$.

(α) Ποια είναι η σκοπιμότητα του διαχύτη;

(β) Να καθορισθεί η γεωμετρία του διαχύτη με σκοπό να περιορισθεί, προς όφελος του στατικού έργου, το εξερχόμενο δυναμικό έργο $Y_{δεξ}$ τουλάχιστον στο 20% του εισερχομένου $Y_{εισ}$ λαμβάνοντας υπόψη τον κίνδυνο σπηλαίωσης, η οποία συμβαίνει, όταν $p_2 \leq p_d = 2.337 \text{ Pa}$ η τάση ατμών για νερό 20°C .

(γ) Αν στο (β) προκύπτει κίνδυνος σπηλαίωσης, τότε να ορισθεί η p_2 διπλάσια της p_d και να υπολογισθεί το ασφαλές μήκος του διαχύτη χωρίς σπηλαίωση και το ενεργειακό όφελος αυτού.

(δ) Πόση ενέργεια ετησίως κερδίζεται με τον διαχύτη και πόση μένει ανεκμετάλλευτη στο ερώτημα (β);

(ε) Τι συνεπάγεται η μείωση του ανεκμετάλλετου έργου εκροής π.χ. στο 0,05 του εισερχομένου ειδικού δυναμικού έργου;

(στ) Να υπολογισθεί το ενεργειακό όφελος από την ανάκτηση πίεσης που επενεργεί ο διαχύτης στην εγκατάσταση.

ΛΥΣΗ: (α) Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης (δηλ. τύπου Φράνσις ή Καπλάν) χρησιμοποιούν στην πλευρά εκροής, όπου κατά κανόνα επικρατεί υποπίεση σε σχέση με την ατμόσφαιρα, τον διαχύτη “αναρρόφησης”, ο οποίος έχει σκοπό να επιβραδύνει την απόλυτη ταχύτητα εκροής της ροής νερού από την κινητή πτερύγωση, δηλ. να μετατρέψει την κινητική ενέργεια στο στόμιο εκροής (στόμιο “αναρρόφησης” ένεκα της υποπίεσης) του στροφείου όσο το δυνατόν περισσότερο σε στατική πίεση, ώστε η πίεση εξόδου να εξισωθεί σχεδόν με την ατμοσφαιρική. Αυτή η μετατροπή δυναμικής πίεσης

5.7-9 Ενεργειακό όφελος γωνιόσχημου (καμπύλου) διαχύτη υδροστροβίλου Kaplan (5.3.7B)

Υδροστρόβιλος Kaplan υδροηλεκτρικού σταθμού με παροχή όγκου $Q = 288.000 \text{ m}^3/\text{h}$ και υδατόπτωση ύψους $H = 30 \text{ m}$ έχει διάμετρο στροφείου $D_1 = 3,25 \text{ m}$. Η κατασκευάστρια εταιρεία δίνει το σχέδιο μηκοτομής εγκατάστασης, όπως στο **ΣΧΗΜΑ 5.4/4 ΡΔΜ**, με γωνιόσχημο (καμπύλο) διαχύτη 90° με

διάμετρο εισροής $D_4 = 0,96 \cdot D_1$.

(α) Να επιβεβαιωθεί ο τύπος του υδροστροβίλου.

(β) Να υπολογισθεί η εξαγόμενη ηλεκτρική ισχύς P με συνολικό βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής $\eta = 82\%$.

(γ) Με βάση την δεδομένη παροχή και τη διάμετρο εισροής να υπολογισθεί η μέση ταχύτητα εισροής u_4 και εκροής u_5 στον διαχύτη, όταν η άνω ακμή του στομίου εκροής ευρίσκεται σε βάθος από την επιφάνεια λεκάνης απορροής $H_b = D_4/4$.

(δ) Η είσοδος του διαχύτη απέχει από την επιφάνεια νερού της λεκάνης απορροής $H_4 = 1,25 \cdot D_4$ και οι απώλειες πίεσης αυτού (π.χ. λόγω τριβής, αλλαγής διεύθυνσης ροής) υπολογίζονται με τη σχ.(5.3.21) προσαρμοσμένη ως προς τους συμβολισμούς ως εξής:

$$\Delta p_v = (1 - \eta_D) \cdot \left(1 - \frac{A_4^2}{A_5^2}\right) \cdot \rho \frac{c_4^2}{2} \quad \text{με} \quad \eta_D = 1 - \zeta_D \cdot \frac{m-1}{m+1} \quad \text{με} \quad m = A_5/A_4 \quad \text{και} \quad \zeta_D = 0,15, \quad \text{όπου} \quad A_5 \text{ είναι η}$$

ορθογωνική διατομή εκροής. Να υπολογισθεί η απώλεια πίεσης, η απώλεια σε μονάδες μήκους Δh_v και ως ειδικό έργο απωλειών Y_v .

(ε) Με τη σχ.(5.3.25) να υπολογισθούν η πίεση p_4 στην είσοδο του διαχύτη και με τάση ατμών (πίεση ατμοποίησης) $p_d = 2.327 \text{ Pa}$ για νερό θερμοκρασίας 20°C να ελεγχθεί, αν υπάρχει κίνδυνος σπηλαίωσης.

(στ) Ποιο το ενεργειακό όφελος από τη χρησιμοποίηση του διαχύτη, εκφρασμένο σε ποσοστό της παραγόμενης ισχύος P .

ΛΥΣΗ: (α) Στο διάγραμμα ύψους υδατόπτωσης-παροχής $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/13 ΡΔΜ** με παροχή

$Q = 288000/3600 = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ το σημείο $(30\text{m}/80\text{m}^3/\text{s})$ ευρίσκεται στη περιοχή εφαρμογών του υδροστροβίλου Kaplan κατακόρυφου άξονα. Επίσης με $H = 30 \text{ m}$ το διάγραμμα $H(\eta_q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/14**

επιβεβαιώνει το τύπο του υδροστροβίλου δίνοντας επιπρόσθετα τον ειδικό αριθμό στροφών $\eta_q = 130$

5.7-10 Υδροστρόβιλος Kaplan: διαστασιολόγηση με τις αρχές ομοιότητας και σύγκριση με την πραγματική κατασκευή **(5.4.4A)**

Ο υδροστρόβιλος Kaplan στο **ΣΧΗΜΑ 5.4/8 ΡΔΜ** έχει ισχύ παραγωγής $P = 18,4 \text{ MW}$ υπό ύψος υδατόπτωσης $H = 38 \text{ m}$, και παροχή $Q = 270.000 \text{ m}^3/\text{h}$, αριθμό στροφών $n = 200 \text{ min}^{-1}$ και διάμετρο ακροπτερυγίων $D = 3,5 \text{ m}$. Ζητούνται:

(α) Να ευρεθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης η .

(β) Να επαληθευθεί ο τύπος του στροβίλου μέσω του αριθμού ταχυστροφίας σ και του ειδικού αριθμού στροφών η_q και με τη βοήθεια της καμπύλης του Κορντιέ (Cordier) αλλά και των νομογραφημάτων, βλ. **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/13, /14, /15 ΡΔΜ**.

(γ) Να υπολογισθούν τα ενδεικτικά στοιχεία: διάμετρος ακροπτερυγίων D μέσω του αριθμού διαμέτρου $\delta = A/\sigma + B$ (με $A = 0,4465$, $B = 0,8637$) της προσομοιωμένης καμπύλης του Cordier, η ταχύτητα περιστροφής ακροπτερυγίων u και η μεσημβρινή (αξονική) ταχύτητα ροής διαμέσου της περύγωσης.

(δ) Μετρώντας τον λόγο των διαμέτρων πλήμνης d_π και ακροπτερυγίων D στην υπό κλίμακα μηκοτομή του υδροστροβίλου να επιβεβαιωθεί, ότι είναι $d_\pi/D \approx 0,5$, να υπολογισθούν η πραγματική μεσημβρινή ταχύτητα c_m και περιστροφής u στο στροφέο και να συγκριθούν με αυτές του υποερωτήματος (γ).

ΛΥΣΗ: (α) $\eta = \text{εξαγόμενη ισχύς υδροστροβίλου } P = 18,4 \text{ MW}$ προς την ισχύ υδατόπτωσης $P_H = \dot{m} \cdot Y$.

Με τη παροχή μάζας $\dot{m} = \rho \cdot Q$, $Q = 270000/3600 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$ και το ειδικό έργο

$$Y = g \cdot H = 9,81 \cdot 38 = 372,653 \text{ J/kg}$$

$P_H = 1000 \cdot 75 \cdot 372,653 = 27.948.975 \text{ W} \rightarrow P_H \approx 27,95 \text{ MW}$: $\eta = 18,4/27,95 = 0,65832 \rightarrow \eta = 65,8\%$ (σχετικά χαμηλός).

5.7.11 Ελικοϋδροστρόβιλος παλιρροϊκού ρεύματος **(5.4.7A)**

Σε θαλάσσιο κόλπο παρουσιάζεται έντονο το φαινόμενο παλιρροϊκών ρευμάτων, τα οποία επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους ανά 24ωρο παλιρροϊκό κύκλο καθώς η μέση* ταχύτητα του θαλασσίου ρεύματος είναι $2,4 \text{ m/s}$. Εγκατεστημένος στον θαλάσσιο πυθμένα διπτέρυγος ελικοϋδροστρόβιλος, βλ. **ΣΧΗΜΑΤΑ 5.4/12 και /13 ΡΔΜ**, έχει ονομαστική ισχύ 600 kW , διάμετρο του έλικα 16 m και ταχύτητα ακροπτερυγίων 12 m/s . Επίσης η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού είναι $\rho = 1.025 \text{ kg/m}^3$. Να επανεξεταστούν και ελεγχθούν τα παραπάνω στοιχεία κατασκευής και λειτουργίας του υδροστροβίλου. Ειδικότερα να ευρεθούν:

(α) Το ειδικό έργο Y και ο αριθμός στροφών n του ελικοϋδροστροβίλου.

(β) Ο ειδικός αριθμός στροφών η_q και οι αριθμοί ταχυστροφίας σ , διαμέτρου δ και πίεσης ψ . Σε ποια περιοχή τύπων μηχανών της καμπύλης του Cordier εμπίπτει ο στρόβιλος;

(γ) Η παραγόμενη ηλεκτροενέργεια ανά παλιρροϊκό κύκλο και η ετήσια παραγωγή ενέργειας. (Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε $6.000 \text{ MWh/ετησίως}$ με περίπου **10 MWh** ανά 24ωρο παλιρροϊκό κύκλο).

(δ) Η στροφική ροπή της πτερύγωσης και η μέση υδροδυναμική δύναμη σε κάθε πτερύγιο του στροφέιου με τη παραδοχή, ότι αυτή εφαρμόζεται στο 75% της ακτίνας του.

(ε) Υπάρχει κίνδυνος σπηλαίωσης και γιατί;

(στ) Σε σύγκριση με τους ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα (Α/Κ) ποιες οι ομοιότητες και οι διαφορές; Ισχύει για τον ελικοϋδροστρόβιλο (ΕΥΣ) το όριο του Betz, ότι η μέγιστη αξιοποιήσιμη ισχύς είναι το 59% της ισχύος του ρεύματος νερού στον ΕΥΣ; Βλ. σχετικά **ΣΧΗΜΑ 5.1/6** και αντίστοιχη θεωρία.

*Λαμβάνει υπόψη τον μεταβατικό “νεκρό χρόνο” αλλαγής διεύθυνσης ρεύματος μεταξύ **αμπώτιδας** και **πλημμυρίδας**.

ΛΥΣΗ: (α) Η ισχύς είναι $P = \dot{m} \cdot Y = 600.000 \text{ W}$ με ειδικό έργο Y ,
παροχή μάζας $\dot{m} = \rho \cdot c \cdot A$, ταχύτητα ρεύματος $c = 2,4 \text{ m/s}$,

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 201,062 \text{ m}^2$$

παροχή όγκου $Q = c \cdot A = 2,4 \cdot 201,062 = 482,55 \text{ m}^3/\text{s} = 1.737.176 \text{ m}^3/\text{h}$,

5.7-12 Παλιρροϊκός ελικοϋδροστρόβιλος: υδροδυναμικός σχεδιασμός **(5.4.7B)**

Ο ελικοϋδροστρόβιλος (ΕΥΣ) της ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 5.7.11 **(παραγράφου 5.4.7Α)** έχει ισχύ 600 kW,

αριθμό στροφών $n = 14,322 \text{ min}^{-1}$, ταχύτητα περιστροφής ακροπτερυγίων $u_{\text{ΑΠ}} = 12 \text{ m/s}$, διάμετρο στροφέιου $D = 16 \text{ m}$ και ειδικό έργο $Y = 1,213 \text{ J/kg}$.

Με δεδομένο, ότι οι ελικοϋδροστρόβιλοι (χωρίς περίβλημα) ως ελεύθεροι έλικες σε ρεύμα ασυμπίεστης ροής έχουν παρόμοια ρευστοδυναμική συμπεριφορά με τους Ανεμοκινητήρες (Α/Κ, βλ. Κεφάλαιο 6) ο σχεδιασμός τους μπορεί να γίνει με την ίδια μεθοδολογία, π.χ. των παραγράφων 6.6.5 και 6. Κατά συνέπεια να γίνει υδροδυναμικός σχεδιασμός του ΕΥΣ και ειδικότερα:

(α) Να υπολογισθούν τα πτερύγιά του με επιλογή κατάλληλης υδροτομής (από τις γνωστές αεροτομές, π.χ. αεροτομή Goe 428, βλ. υποκεφάλαιο 2.8) και της συνολικής γεωμετρίας. Προς συντόμευση να γίνει υπολογισμός μόνο για τον ακτινικό σταθμό 75%.

(β) Να εκτιμηθεί (υπολογιστικά) τελικά ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου.

ΛΥΣΗ: (α) Η θεωρία των Α/Κ μπορεί να εφαρμοσθεί και στους ΕΥΣ με κάποιους περιορισμούς που θέτουν κυρίως οι διαφορές πυκνότητας ρ , του κινδύνου σπηλαίωσης και του ιξώδους μ . Αριθμητικά είναι

$$\rho_{\text{ΕΥΣ}}/\rho_{\text{Α/Κ}} = 1025/1,25 = 820 \quad \text{και} \quad \mu_{\text{ΕΥΣ}}/\mu_{\text{Α/Κ}} \approx 0,001/1,8 \cdot 10^{-5} \approx 55,6 \quad \text{με αποτέλεσμα να}$$

προκύπτει διαφορά στους αριθμούς Reynolds $Re = \frac{\rho \cdot c \cdot l}{\mu}$. Λ.χ. για μήκος χορδής 1m και λόγο

ταχυτήτων $c_{\text{ΕΥΣ}}/c_{\text{ΑΚ}} \approx 0,2$ είναι $\frac{Re_{\text{ΕΥΣ}}}{Re_{\text{ΑΚ}}} = 0,2 \cdot \frac{1}{55,6} \cdot 820 = 2,95 \approx 3$. Η διαφορά είναι σχετικά μικρή επειδή οι Re

5.7-13 Παλιρροϊκοί ελικοϋδροστρόβιλοι σε συστοιχία: Υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας και κατασκευής **(5.4.7Γ)**

Σε θαλάσσιο κόλπο έχει εντοπισθεί παλιρροϊκό ρεύμα μέσης ταχύτητας $V = 2,5 \text{ m/s}$ σε αξιοποιήσιμη διατομή πλάτους $B = 65 \text{ m}$ και μέσου βάθους $H = 30 \text{ m}$. Το ρεύμα σχεδιάζεται να αξιοποιηθεί με εικοσιτέσσερες (24) πανομοιότυπους τριπτέρυγους ελικοϋδροστρόβιλους (ΕΥΣ) τοποθετημένους σε συστοιχία σε κατακόρυφη μεταλλική σχάρα πακτωμένη με κατάλληλη κατασκευή στον πυθμένα. Κατά πλάτος στερεώνονται εννέα (9) στρόβιλοι σε δύο άνω σειρές και έξη (6) στρόβιλοι στη τρίτη κάτω σειρά ($9 \times 2 + 6 = 24$) σε ικανή απόσταση προς ελαχιστοποίηση ρευστομηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ τους αλλά και με τον πυθμένα και την επιφάνεια θαλάσσης. Ο κατ' αντιστοιχία προς τους ανεμοκινητήρες (Α/Κ) σχεδιασμός προβλέπει συντελεστή ισχύος $C_P = 0,50$ της κάθε μηχανής, για την οποία επιδιώκεται ανάπτυξη ισχύος $P = 50 \text{ kW}$. Ως υπόδειγμα λαμβάνεται (λόγω ομοιότητας ασυμπίεστης Αερο-/Υδροδυναμικής) το αποτέλεσμα βελτιστοποιημένου σχεδιασμού με τα εξής στοιχεία: αριθμός ταχυστροφίας $\lambda = \omega \cdot R / V = 6,0$ με γωνιακή ταχύτητα $\omega = 2\pi \cdot n$, αριθμό στροφών n και ακτίνα ακροπτερυγίων στροφείου $R = D/2$, αριθμός πτερυγίων $z = 3$, βέλτιστη γωνία προσβολής $\alpha_{BAT} = 4^\circ$ της ροής νερού στα πτερύγια με τοπική σχετική ταχύτητα w , συντελεστές άνωσης και αντίστασης $c_{LBAT} = 0,8$ και $c_{DBAT} = 0,012$ για αεροτομή NACA 63-415, βλ. **ΣΧΗΜΑ 6.2/9 ΡΔΜ**. Δίνεται επίσης η κατανομή της γωνίας $\beta = \varphi - \alpha$ της αδιάστατης χορδής $l_{AD} = l/R$ κατά την ακτίνα $r_{AD} = r/R$ λαμβάνοντας υπόψη, ότι η διάμετρος πλήμνης είναι $D_{II} = 0,13 \cdot D$. Η γωνία φ είναι μεταξύ επιπέδου περιστροφής και της σχετικής ταχύτητας w της προσροής των πτερυγίων (β είναι η γωνία μεταξύ χορδής αεροτομής και επιπέδου περιστροφής, γνωστή ως βήμα, βλ. σκαρίφημα). Η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού είναι 1025 kg/m^3 .

Ακτινική κατανομή γωνίας βήματος β και αδιάστατης χορδής l/R τοπικής υδροτομής:

r/R	0,1	0,13	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9	1,0
β	35	30	22,5	15,5	11,5	8,2	6,5	5	4,2	3,5	3,0	2,1
l/R	0,23	0,24	0,2	0,18	0,14	0,12	0,10	0,09	0,85	0,08	0,07	0,06
	5						2					5

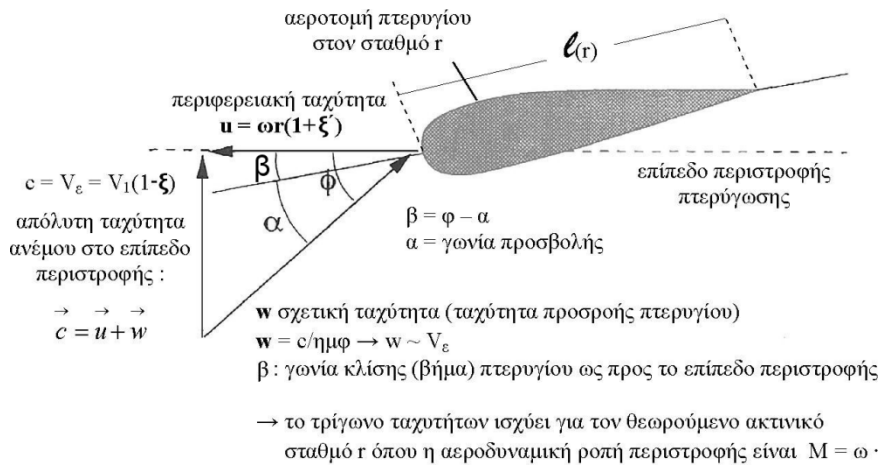
Γνωρίζοντας ότι η διαδικασία σχεδιασμού είναι σχεδόν ή ίδια με αυτή των ανεμοκινητήρων (Α/Κ), βλ. Κεφάλαιο 6, να υπολογισθούν:

(α) Η διάμετρος D του στροφείου και η γεωμετρία των πτερυγίων (μήκος χορδής l , γωνία κλίσης πτερυγίων ως προς το επίπεδο περιστροφής β (βήμα) και η γωνία φ .

(β) Η υδροδυναμική άνωση L και αντίσταση D καθώς και η αξονική F_n και περιφερειακή δύναμη F_t στα πτερύγια, αφού προηγουμένως υπολογισθούν ο αριθμός στροφών και οι ταχύτητες: απόλυτη c , σχετική w

και περιφερειακή u (τρίγωνο ταχυτήτων) μόνο για τον ακτινικό σταθμό $r_{0,75} = 0,75 \cdot R$.

(γ) Η συνολική αξονική δύναμη F_n και η περιφερειακή F_t για κάθε μηχανή και συνολικά για τη μεταλλική κατασκευή, η οποία –χωρίς τις μηχανές– έχει μια μετωπική επιφάνεια $A = 40 \text{ m}^2$ με μέσο συντελεστή υδροδυναμικής αντίστασης $c_D = 0,9$.



Το τρίγωνο ταχυτήτων στην ακμή προσροής του πτερυγίου του έλικα δίνει την σχετική ταχύτητα w , η οποία 'παράγει' τις ρευστομηχανικές δυνάμεις επάνω στο πτερύγιο. Η ανάσχεση της ελεύθερης ροής (ανέμου ή νερού) από το στροφέιο επιφέρει τη μείωση της ταχύτητάς της V_1 σε $V_ε = V_1(1-\xi)$ στο επίπεδο του έλικα με $\xi < 1$ τον αξονικό επαγωγικό συντελεστή. Η περιστροφή των πτερυγίων με τη περιφερειακή ταχύτητα u επιφέρει περιστροφή του απορρεύματος κατά την αντίθετη φορά, η οποία προκαλεί αύξηση της περιφερειακής ταχύτητας του ρευστού (αέρα ή νερού) σε $u = \omega \cdot r \cdot (1 + \xi')$ με $\xi' < 1$ τον περιφερειακό επαγωγικό συντελεστή (από ΣΧΗΜΑ 6.2/1ΡΔΜ, βλ. σχετική ανάλυση στο υποκεφάλαιο 6.6).

ΛΥΣΗ: (α) Η διάμετρος του έλικα ευρίσκεται από τη σχ.(6.1.15) του συντελεστή ισχύος σε ελεύθερη

$$C_p = \frac{P}{A \cdot \rho \cdot V^3 / 2} \rightarrow A = \frac{2 \cdot P}{C_p \cdot \rho \cdot V^3} = \frac{2 \cdot 50000}{0,50 \cdot 1025 \cdot 2,5^3} = 12,488 \text{ m}^2$$

ασυμπίεστη ροή:

5.7-14 Χαρακτηρισμός (κατηγοριοποίηση) ροής νερού σε ορθογωνική διώρυγα τροφοδοσίας ταμιευτήρα υδροστροβιλικού σταθμού. (5.5.3Α)

Διώρυγα ορθογωνικής διατομής πλάτους $b = 5 \text{ m}$ και βάθους $h = 4 \text{ m}$ τροφοδοτεί ταμιευτήρα υδροστροβιλικού σταθμού με παροχή νερού $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$.

(α) Να χαρακτηριστεί η ροή με βάση τον αριθμό Froude και

(β) Να ευρεθούν τα δύο εναλλασσόμενα βάθη, δηλ. το κρίσιμο h^* και το συζυγές αυτού.

ΛΥΣΗ: (α) Ο αριθμός Froude είναι, σχ.(5.5.27), για το δεδομένο βάθος με τους συμβολισμούς της

παραγράφου 5.5.3 ΡΔΜ $Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}}$ με $u = \frac{Q}{A}$ με $A = b \cdot h = 5 \cdot 4 = 20 \text{ m}^2$:

$$u = \frac{25}{20} = 1,25 \text{ m/s}$$

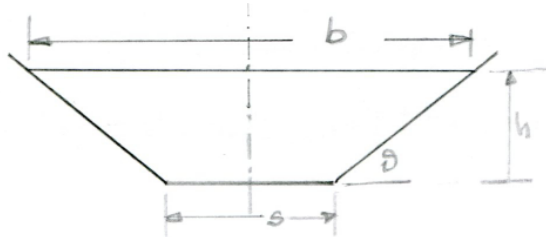
5.7-15 Βέλτιστη υδραυλική διατομή διώρυγας

(5.5.4Δ)

Ο τύπος υπολογισμού της ταχύτητας νερού σε διώρυγα, σχ.(5.5.41), του Manning είναι

$V = C \cdot \sqrt{R \cdot J}$ με J την κλίση του πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε μόνιμη ροή
 $R = D_h / 2$ την υδραυλική ακτίνα = διατομή A / βρεχόμενη περίμετρο Π και $C = R^{1/6} / n$ με n τον συντελεστή τριβής κατά Manning (ενδεικτικές τιμές βλ. Λεζάντα του **ΠΙΝΑΚΑ 2.6/4** αλλά και **ΠΙΝΑΚΑ 5.5.3 PΔM**).

(α) Να εκφρασθεί ο τύπος του Manning για διώρυγα με τραπεζοειδή διατομή (βλ. σκαρίφημα στον **ΠΙΝΑΚΑ 5.5.-5**) με εύρος επιφάνειας b , εύρος πυθμένα s , ύψος h και $z = 1/\epsilon\phi \partial$ με ∂ τη γωνία κλίσης των πλευρών.



(β) Να ευρεθεί η βέλτιστη διατομή ροής A_B , δηλ. όταν η βρεχόμενη περίμετρος έχει την ελάχιστη τιμή της.

(γ) Να ευρεθεί η A_B για ορθογώνια διατομή, δηλ. όταν $b = s$.

(δ) Να ευρεθεί η βέλτιστη παροχή σε (δ1) σκυροδεμάτινη τραπεζοειδή διατομή με βάθος $h = 4 \text{ m}$,

κλίση $J = 0,0012$ και γωνία κλίσης τοιχωμάτων $\partial = 45^\circ$ και (δ2) για ορθογώνια διατομή. Ο συντελεστής τριβής του Manning είναι $n = 0,015$. (δ3) Οι δύο παροχές διαφέρουν. Ποια είναι η φυσική αιτία της διαφοράς τους;

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot J} = \frac{R^{1/6}}{n} \cdot R^{1/2} \cdot J^{1/2} = \frac{R^{2/3} \cdot J^{1/2}}{n}$$

ΛΥΣΗ: (α)

$$Q = V \cdot A \quad \text{με} \quad A = h \cdot s + h \cdot h / \epsilon\phi \partial = h \cdot (s + h \cdot z) \quad \rightarrow \quad Q = h \cdot (s + h \cdot z) \cdot \frac{R^{2/3} \cdot J^{1/2}}{n}$$

(β) Βρεχόμενη περίμετρος $\Pi = s + 2 \cdot \sqrt{h^2 + [h / \epsilon\phi \partial]^2} = s + 2 \cdot h \cdot (1 + z^2)^{1/2}$

$$Q = A \cdot V = \frac{J^{1/2}}{n} \cdot A \cdot \frac{A^{2/3}}{\Pi^{2/3}} \rightarrow Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{5/3}}{\Pi^{2/3}} \cdot J^{1/2}$$

Ορισμός υδραυλικής ακτίνας $R = A / \Pi$

5.7-16 Υδροστροβίλος Pelton: Διαστασιολόγηση και τρίγωνα ταχυτήτων

8. BF8.8

Υδροστροβίλος Pelton έχει διαθέσιμο μανομετρικό $H = 1.000 \text{ m}$ και παροχή όγκου $Q = 3.600 \text{ m}^3/\text{h}$ και προορίζεται να κινεί οκταπολική ηλεκτρογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρορεύματος συχνότητας 50 Hz με βαθμό απόδοσης $\eta_{\text{ΗΓ}} = 98\%$. Ο συντελεστής ταχύτητας του ακροφυσίου είναι $\phi = 0,96$ και ο βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου $\eta = 86\%$.

(α) Να υπολογισθεί η απαιτούμενη διάμετρος στροφείου D , ο αριθμός στροφών του στροφείου, η παραγόμενη ισχύς και η διάμετρος εκροής του ακροφυσίου και της δέσμης νερού. Να ληφθεί υπόψη, ότι η αμφίπλευση εκροή νερού από τα σκαφίδια (πτερύγια) του στροβίλου γίνεται υπό γωνία $\beta = 16^\circ$ και η ταχύτητα πτερυγίων είναι (κατ' **ιδανική** παραδοχή) το μισό της ταχύτητας δέσμης νερού.

(β) Να σκαριφηθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων, να ορισθούν και υπολογισθούν οι ταχύτητες και γωνίες αυτών και να σκιαγραφηθεί η απόλυτη κίνηση του νερού.

ΛΥΣΗ: (α) Ο αριθμός στροφών καθορίζεται από την ηλεκτρογεννήτρια, βλ. σχ.(5.1.26):

$$n = \frac{f}{p} \quad \text{με} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad \text{και} \quad \text{ζεύγη πόλων} \quad p = 8/2 = 4: \quad n = \frac{50}{4} = 12,5 \text{ s}^{-1} = 750 \text{ min}^{-1} \quad \text{ή απευθείας}$$

από τον **ΠΙΝΑΚΑ 5.1-3 PΔM**. Η ταχύτητα εκροής από το ακροφύσιο, σχ.(5.2.11), είναι

5.7-17 Βελτιστοποιημένη διαστασιολόγηση υδαταγωγού μεγάλης διαμέτρου για την άμεση τροφοδότηση υδροστροβίλων από ταμειυτήρες φραγμάτων (5.5.5A)

Οι υπό πίεση σωληνωτοί αγωγοί διαμέτρου D για την απευθείας τροφοδότηση υδροστροβίλων από τον ταμειυτήρα απαιτούν ένεκα της σημασίας τους βελτιστοποιημένο τεχνικό και οικονομικό σχεδιασμό. Ειδικά για εγκαταστάσεις υδροστροβίλων τύπου Francis και Kaplan με διαμέτρους μεγαλύτερες του $D = 1,5 \text{ m}$ και χαλύβδινους σωλήνες η διάμετρος δίνεται* με τον απλό τύπο

$$D = 4,44 \cdot \frac{P^{0,43}}{H^{0,65}}$$

, βλ. σχ.(5.5.49 και 50) ΡΔΜ. Είναι P η ισχύς υδροστροβίλου σε HP ($1 \text{ HP} = 0,746 \text{ kW}$), H το μανομετρικό του σε ft ($1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$) και D η διάμετρος σε ft.

(α) Να μετατραπεί ο τύπος υπολογισμού της διαμέτρου σε μονάδες του S.I.

(β) Εξετάζεται σχεδιαζόμενος υδροηλεκτρικός σταθμός με υδροστρόβιλο Francis με διαθέσιμη υδατόπτωση στο στόμιο εισροής της απόληψης 350 ft. Με την παρεμβολή του χαλύβδινου αγωγού πίεσης και του σχετικού εξοπλισμού εκτιμώντας τις απώλειες σε 20% η ωφέλιμη υδατόπτωση είναι $H = 280 \text{ ft}$. Η καθαρή ισχύς του υδροστροβίλου δίνεται με $P = 155.000 \text{ HP}$. Ποιά η διάμετρος του υδαταγωγού σε μέτρα και σε πόδια;

(γ) Ποια είναι τα βασικά στοιχεία και τα κύρια αποτελέσματα της ανάλυσης που οδήγησαν στη κατάστρωση του τύπου υπολογισμού της D και ποιες οι πρόσφορες ταχύτητες νερού στους αγωγούς;

*κατά τον Zarkaria, βλ. Stevens – Davis in Handbook of Applied Hydraulics.

ΛΥΣΗ: (α) Μετατρέποντας ισχύ σε kW και ύψος σε m, η βέλτιστη διάμετρος σε m είναι

$$D = 4,44 \cdot 0,3048 \cdot \frac{(P/0,746)^{0,43}}{(H/0,3048)^{0,65}} \rightarrow D = 0,70914 \cdot \frac{P^{0,43}}{H^{0,65}} \text{ σε m με } P \text{ σε kW και } H \text{ σε m}$$

5.7-18 Υπολογισμός διαμέτρου αγωγού υδατοτροφοδότησης μικροϋδροστροβίλου (5.5.5AA)

Σε εγκατάσταση μικροϋδροστροβίλου ισχύος $P = 200 \text{ kW}$ ο συνολικός βαθμός απόδοσης με βάση το μανομετρικό είναι $\eta = (H - H_v)/H = 82\%$ με ύψος απωλειών H_v και ύψος υδατόπτωσης

(μανομετρικό) $H = 92 \text{ m}$. Η υδατοτροφοδότηση σχεδιάζεται να γίνεται με αγωγό μήκους $L = 900 \text{ m}$ με ολικό συντελεστή τραχύτητας $\lambda = 0,025$.

(α) Να ευρεθούν: η αναγκαία διάμετρος του αγωγού d , η ταχύτητα ροής c και η παροχή όγκου Q .

(β) Να επαληθευθεί η ισχύς του μικροϋδροστροβίλου.

ΛΥΣΗ: (α) Το ύψος απωλειών H_v υπολογίζεται από τα δεδομένα:

$$\eta = \frac{H - H_v}{H} = 0,82 \rightarrow H_v = H - \eta \cdot H = (1 - \eta) \cdot H = (1 - 0,82) \cdot 92 = 16,56 \text{ m}$$

Ο τύπος των Darcy-Weisbach συνδέει το γνωστό H_v με τα άγνωστα μεγέθη ταχύτητα c και διάμετρο d :

$$H_v = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} \rightarrow \frac{c^2}{d} = \frac{2g \cdot H_v}{\lambda \cdot L} = \frac{2g \cdot 16,56}{0,025 \cdot 900} = 14,435 \rightarrow c = (14,435 \cdot d)^{1/2}$$

5.7-19 Υδαταγωγοί υδροστροβιλικών σταθμών είναι 'σωληνογραμμές μεταφοράς ενέργειας' (5.5.5B)

Οι **αγωγοί υδατοτροφοδότησης** υδροστροβίλων σε ΥΗΣ (ΥδροΗλεκτρικούς Σταθμούς) είναι πρακτικά **“γραμμές μεταφοράς ενέργειας”** (όπως οι αγωγοί μεταφοράς υγρών καυσίμων - pipelines: σωληναγωγοί - φυσικού αερίου, πετρελαίου κ.ά. ή οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας).

Να υπολογισθεί η μεταφερόμενη ενέργεια από σωληναγωγούς υδροστροβιλικών σταθμών με τα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά στις ακόλουθες 5 (πέντε) εγκαταστάσεις ως ενδεικτικά παραδείγματα εν λειτουργία κατασκευών και να ευρεθεί ο τύπος υδροστροβίλου κατά περίπτωση:

(α) **Υδροηλεκτρικός σταθμός** (στη θέση Chadoline/Dixence, Ελβετία) παράγει μέσω υδροστροβίλων ισχύ $P = 150 \text{ MW}$ τροφοδοτούμενων από ταμιευτήρα σε **υψομετρική διαφορά** $H = 1.750 \text{ m}$ με **παροχή όγκου** $Q = 10,3 \text{ m}^3/\text{s}$ σε **χαλύβδινους αγωγούς υψηλής πίεσης** διαμέτρων $d = 1,0$ έως $1,5 \text{ m}$.

(β) **Χαλύβδινος αγωγός** διαμέτρου $2,20 \text{ m}$ με παροχή $25 \text{ m}^3/\text{s}$ τροφοδοτεί **υδροστρόβιλο** ισχύος 157 MW από ταμιευτήρα σε ύψος $H = 750 \text{ m}$ (ΥΗΣ Malignet, Γαλλία):

(δ) **Υδατοσήραγγα επενδυμένη με οπλισμένο σκυρόδεμα** διαμέτρου $2,80$ έως $3,00 \text{ m}$ τροφοδοτεί στρόβιλο ισχύος 336 MW με νερό παροχής $45 \text{ m}^3/\text{s}$ από ύψος 870 m (Fionnay/Dixence, Ελβετία):

(ε) **Υδατοσήραγγα σκυροδεμάτινη** διαμέτρου $3,36 \text{ m}$ μεταφέρει $64 \text{ m}^3/\text{s}$ από ύψος 762 m στον ΥΗΣ ισχύος 448 MW , θέση Kemano, Ιταλία:

ΛΥΣΗ: $\dot{m} = 64.000 \text{ kg/s}$, $Y = g \cdot H = g \cdot 762 = 7.472,7 \text{ J/kg}$,
 $P_N = 478.252.800 \text{ W} = 478,25 \text{ MW}$, $\eta = 448/478,25 = 0,9367$, $u_m = 7,2 \text{ m/s}$.
 Τύπος Υδροστροβίλου σύμφωνα με το διάγραμμα $H(Q)$, **ΣΧΗΜΑ 5.1/13** ΡΔΜ, Pelton.

5.7-20 Υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής: διαστασιολόγηση στροφείου (5.2.6A) 5.7-42 5.2.9A

Υδατόπτωση μικρής ισχύος έχει ύψος $4,5 \text{ m}$ και παροχή $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Επιλέγεται Υδροστρόβιλος Εγκάρσιας Ροής (Υ.Ε.Ρ., τύπου Mitchel – Banki – Ossberger) με σύγχρονο αριθμό στροφών $187,5 \text{ min}^{-1}$.

(α) Να επιβεβαιωθεί ο τύπος του υδροστροβίλου.

(β) Να ευρεθεί η διάμετρος του στροφείου, το εύρος της προσβολής του στροφείου, η ισχύς της μηχανής και ο ειδικός αριθμός στροφών.

(γ) Πόσα ζεύγη πόλων πρέπει να έχει η ηλεκτρογεννήτρια για ηλεκτρόρευμα συχνότητας 50 Hz ;

ΛΥΣΗ: (α) Στο διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.1/13 ΡΔΜ**, κάτω αριστερά, οριοθετείται το πεδίο των υδροστροβίλων εγκάρσιας ροής, που περιλαμβάνει το προκείμενο σημείο $H = 4,5 \text{ m} - Q = 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Επίσης στο **ΣΧΗΜΑ 5.6/2** (υποκεφάλαιο περί μικροϋδροστροβίλων) δίνονται για τους ΥΕΡ τα διαστήματα εφαρμογών τους $0,06 < \sigma < 0,45$ ($10 < n_q < 70$):

Με $Y = H \cdot g = 4,5 \cdot g = 44,13 \text{ J/kg}$ και $n = 187,5/60 = 3,125 \text{ s}^{-1}$ είναι

5.7-21 Διαστασιολόγηση υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής με χρήση της καμπύλης του Κορντιέ

(5.2.9B) 5.7-43

Για τον υδροστρόβιλο εγκάρσιας ροής (Υ.Ε.Ρ., τύπου Mitchel – Banki – Ossberger με $H = 4,5 \text{ m}$, $Q = 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ της προηγούμενης ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 5.7-20 (παραγράφου 5.2.9Α.)

(α) να υπολογισθεί η διάμετρος στροφείου D , το εύρος προσβολής b και η ισχύς της μηχανής με την βοήθεια της καμπύλης του Κορντιέ (Cordier) $\delta(\sigma)$ αλλά με ειδικό αριθμό στροφών $n_q \approx 10 \text{ min}^{-1}$, όπως ισχύει για στρόβιλο προσβολής του στροφείου με μία κυψέλη. Στην περίπτωση αβέβαιου και ασύμφορου αποτελέσματος μπορεί

(β) να επιλεγεί ο επιμερισμός της παροχής σε δύο ή τρεις κυψέλες προσβολής.

ΛΥΣΗ (α) Από τον ορισμό του n_q (διαστατικός με n σε min^{-1}) έχουμε:

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \rightarrow n = n_q \cdot \frac{H^{3/4}}{\sqrt{Q}} = 10 \cdot \frac{4,5^{0,75}}{\sqrt{0,3}} = 56,41 \text{ min}^{-1}$$

Η καμπύλη του Cordier δίνει την εξάρτηση του αριθμού διαμέτρου δ από τον αριθμό ταχυστροφίας σ ,

5.7-22 Επιλογή τύπου και χαρακτηριστικά στοιχεία μικροϋδροστροβίλων

(5.6.1)

Τρεις υδατοπτώσεις προς ηλεκτροπαραγωγή διαθέτουν ύψος H και παροχή Q ως εξής:

(1) $H = 250 \text{ m}, Q = 720 \text{ m}^3/\text{h}$

(2) $H = 60 \text{ m}, Q = 10.800 \text{ m}^3/\text{h},$

(3) $H = 6 \text{ m}, Q = 18.000 \text{ m}^3/\text{h}.$

(α) Να ευρεθεί το διαθέσιμο ειδικό έργο Y και η διαθέσιμη ισχύς της κάθε υδατόπτωσης.

(β) Γιατί οι υδροστροβίλοι εντάσσονται στη κατηγορία των μικροϋδροστροβίλων;

(γ) Να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος υδροστροβίλου για την εκμετάλλευσή της χρησιμοποιώντας καταρχάς το διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.6/1ΡΔΜ** και εν συνεχεία με τους αδιάστατους χαρακτηριστικούς αριθμούς ταχυστροφίας σ και επικουρικά με τον ειδικό αριθμό στροφών n_q να ευρεθεί ο μέσος αριθμός στροφών n .

(δ) Να υπολογισθεί η ετήσια παραγωγή ενέργειας λαμβάνοντας για τους υδροστροβίλους ενιαίο βαθμό απόδοσης $\eta = 87\%$ και διαθεσιμότητα λειτουργίας δέκα μηνών.

(ε) Να εκτιμηθεί το μέγεθος του κάθε στροβίλου με βάση την προϋπολογιζόμενη εξωτερική διάμετρο των στροφείων D .

(στ) Είναι οι υδροστροβίλοι ισόθλιπτοι (δηλ. δράσης, με σταθερή πίεση στο χώρο του στροφείου) ή υπέρθλιπτοι (δηλ. αντίδρασης, με πτώση πίεσης στο στροφείο).

(ζ) Απαιτούνται διαχύτες για την αποδοτικότερη λειτουργία των υδροστροβίλων και ποιος ο ρόλος των διαχυτών;

(η) Να υπολογισθεί η διάμετρος των σωληναγωγών τροφοδότησης με βάση μέση ταχύτητα νερού $c = 3,5 \text{ m/s}$.

ΛΥΣΗ: (α) Ειδικό έργο $Y = g \cdot H$, ισχύς $P = \dot{m} \cdot Y$ με παροχή μάζας $\dot{m} = \rho \cdot Q$:

(1) $Y = g \cdot 250 = 2451,7 \text{ J/kg}$, $Q = 720/3600 = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{m} = 0,2 \cdot 1000 = 200 \text{ kg/s}$

$P = 200 \cdot 2451,7 = 490.340 \text{ W} = 490,34 \text{ kW}$

(2) $Y = g \cdot 60 = 588,4 \text{ J/kg}$, $Q = 10800/3600 = 3 \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{m} = 3 \cdot 1000 \text{ kg/s}$

$P = 3000 \cdot 588,4 = 1.765.200 \text{ W} = 1765,2 \text{ kW} \approx 1,77 \text{ MW}$

(3) $Y = g \cdot 6 = 58,84 \text{ J/kg}$, $Q = 18000/3600 = 5 \text{ m}^3/\text{s}$, $\dot{m} = 5 \cdot 1000 \text{ kg/s}$

$P = 5000 \cdot 58,84 = 294.200 \text{ W} = 294,2 \text{ kW}$

5.7-23 Υδροστροβίλος δράσης μεγάλου μανομετρικού

5.7-41 8. BF8.6

Υδροστροβίλος δράσης (ισόθλιπτος, υπό ατμοσφαιρική πίεση) βαθμού απόδοσης $\eta = 0,91$ τροφοδοτείται από ταμειυτήρα στάθμης νερού $h_T = 1.250 \text{ m}$ πάνω από το επίπεδο του στροβίλου μέσω σωληναγωγού μήκους $l = 15 \text{ km}$ και διαμέτρου $d = 3 \text{ m}$ με ολικό συντελεστή αντίστασης $\lambda = 0,0145$, ο οποίος καταλήγει σε ακροφύσιο διαμέτρου εκροής $d_A = 300 \text{ mm}$.

(α) Για μηδενικές απώλειες στο ακροφύσιο ($\eta = 100\%$) να υπολογισθεί η εξαγόμενη ισχύς P του στροβίλου.

(β) Ποιος ο τύπος του υδροστροβίλου; Γιατί;

(γ) Αφού ορισθεί ένας εύλογος αριθμός στροφών, να υπολογισθεί η διάμετρος του στροφείου υποθέτοντας ροή χωρίς απώλειες στα πτερύγια.

ΛΥΣΗ: (α) Ισόθλιπτο περιβάλλον ταμιευτήρα και υδροστροβίλου υπό ατμοσφαιρική πίεση δίνει με την

$$h_T = \frac{c_\Delta^2}{2 \cdot g} + h_v \quad \text{με} \quad h_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} \quad \text{με την ταχύτητα } c \text{ στον σωληναγωγό}$$

εξίσωση ενέργειας:

5.7-24 Κρίσιμη κλίση ροής σε διώρυγα

(5.5.3Γ)

Διώρυγα με παροχή νερού $Q = 90.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ορθογωνικής διατομής πλάτους $b = 5 \text{ m}$ και βάθους $h = 4 \text{ m}$ είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Χρησιμοποιώντας τον τύπο του Manning με συντελεστή τραχύτητας για επιφάνεια σκυροδέματος $n = 0,015$,

(α) να ευρεθεί η κρίσιμη κλίση ροής J^* , ώστε η κλίση σχεδιασμού να παραμένει $J < J^*$.

(β) Για μήκος διώρυγας $L = 1.000 \text{ m}$ ποια είναι η διαφορά υψομέτρων μεταξύ εισροής και εκροής της διώρυγας;

ΛΥΣΗ: (α) Στοχεύοντας, προς ελαχιστοποίηση απωλειών ενέργειας, η ροή να παραμένει υποκρίσιμη (‘ποτάμια’) εφαρμόζουμε τον τύπο του Manning, σχ.(5.5.41), βλ. επίσης Εφαρμογή 5.7-14, με την

κρίσιμη ταχύτητα $V = u^i$, σχ.(5.5.25γ), και το κρίσιμο βάθος, σχ.(5.5.25α),

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \rightarrow J = \left(\frac{n \cdot V}{R^{2/3}} \right)^2 \quad \text{με} \quad J \leq J^i \quad \text{για υποκρίσιμη ροή.}$$

5.7-25 Κανονική παροχή σε διώρυγα

(5.5.3Δ)

Διώρυγα ορθογωνικής διατομής πλάτους $b = 16 \text{ m}$ και βάθους $h = 4 \text{ m}$ είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα με συντελεστή τριβής κατά τον τύπο του Manning $n = 0,015$ και κλίση πυθμένα $J = 0,0012$.

(α) Να υπολογισθεί η κανονική παροχή νερού.

(β) Ποιο είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος της διώρυγας, ώστε η ροή να παραμείνει ποτάμια (υποκρίσιμη);

ΛΥΣΗ: (α) Με τον τύπο του Manning για τον υπολογισμό της ταχύτητας νερού, σχ.(5.5.41),

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}, \quad \text{η παροχή είναι} \quad Q = V \cdot A. \quad \text{Είναι η διατομή ροής} \quad A = b \cdot h = 16 \cdot 4 = 64 \text{ m}^2$$

και η

5.7-26 Διαστασιολόγηση σήραγγας μεταφοράς νερού σε υδροστρόβιλο

(5.5.6Α)

Σωληναγωγός μήκους $l = 0,9 \text{ km}$ και εσωτερικής διαμέτρου $d = 1.800 \text{ mm}$ με τοιχώματα τραχύτητας $k = 0,3 \text{ mm}$ τροφοδοτεί υδροστρόβιλο με παροχή $Q = 27.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Να ευρεθούν οι απώλειες ενέργειας ένεκα τριβής:

(α) Με τον τύπο Darcy-Weisbach,

(β) Με τον τύπο Hazen-Williams με συντελεστή τραχύτητας $C_1 = 120$ και

(γ) Με τον τύπο του Manning με εκθέτη $n = 0,13$. Πυκνότητα και δυναμικό ιξώδες νερού:

$$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3, \quad \mu = 0,01 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)} \quad \text{από ΠΙΝΑΚΑ 7.15-2 ΡΔΜ,} \quad g = 9,80665 \text{ m/s}^2.$$

(δ) Σχολιάστε τα αποτελέσματα (α) έως (γ). Ποιό αποτέλεσμα επιλέγετε τελικά;

(ε) Να υπολογισθεί ο συντελεστής τραχύτητας C_1 στον τύπο των Hazen-Williams από τον συντελεστή

τριβής λ , σχ.(5.5.58),
$$\lambda = \frac{133,4}{C_1^{1,85}} \cdot \frac{1}{v^{0,15} \cdot \text{Re}^{0,15} \cdot d^{0,017}}$$
 και να συγκριθεί με τη δεδομένη τιμή του $C_1 = 120$. Ποιο το ύψος απωλειών σ' αυτή τη περίπτωση;

ΛΥΣΗ: (α) Τύπος των Darcy-Weisbach, σχ.(5.5.46), δίνει απώλεια ενέργειας σε διαστάσεις ύψους:

5.7-27 Λειτουργικά μεγέθη υδροστροβίλου με τροφοδότηση με υδατομεταφορά σε κλειστή βραχώδη σήραγγα (5.5.6B)

Υδροστρόβιλος σε υψόμετρο 450 m τροφοδοτείται με παροχή νερού $Q = 57.600 \text{ m}^3/\text{h}$ από ταμειυτήρα στάθμης υψομέτρου 950 m μέσω σήραγγας κυκλικής διατομής διαμέτρου $d = 2,2 \text{ m}$ και μήκους $l = 1,1 \text{ km}$ διανοιγμένης σε βραχώδες έδαφος με αποτέλεσμα να έχει βραχώδες τοίχωμα με τραχύτητα $k \approx 250 \text{ mm}$ (βλ. π.χ. τιμές στον ΠΙΝΑΚΑ 2.6-2 ΡΔΜ). Λαμβάνοντας πυκνότητα νερού $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ και κινηματικό ιξώδες $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,

(α) Να υπολογισθεί η απώλεια ενέργειας (σε μονάδες ύψους, πίεσης και ειδικού έργου) με τον τύπο των Darcy-Weisbach.

(β) Να υπολογισθεί το καθαρό διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης και η αντίστοιχη διαθέσιμη ισχύς εγκατάστασης.

(γ) Να ευρεθεί η εξαγόμενη ισχύς του υδροστροβίλου βαθμού απόδοσης $\eta = 88 \%$ και ο τύπος του υδροστροβίλου.

ΛΥΣΗ: (α) Απώλεια ενέργειας τριβής (ειδικό έργο απωλειών Y_v) στον αγωγό-σήραγγα:

$$Y_v = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2} \quad \text{με} \quad c = \frac{Q}{A} \quad \text{όπου} \quad Q = 57600/3600 = 16 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{και} \quad A = \frac{2,2^2 \cdot \pi}{4} = 3,8 \text{ m}^2 :$$

5.7-28 Υπολογισμός περύγωσης υδροστροβίλου τύπου Francis (5.3.8-3)

Υδροστρόβιλος λειτουργεί με μανομετρικό $H = 8 \text{ m}$ και παροχή $Q = 2.900 \text{ m}^3/\text{h}$ υπό αριθμό στροφών $n = 306 \text{ min}^{-1}$. Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης είναι $\eta_h = 80 \%$ και ο μηχανισμός βαθμός

απόδοσης $\eta_m = 92 \%$. Στον διαχύτη απορροής μήκους $L = 1,6 \text{ m}$ το νερό εκρέει με ταχύτητα $c_A = 1,25 \text{ m/s}$ (βλ. υδροστρόβιλο Francis, ΣΧΗΜΑΤΑ 5.3/14 έως /15 και διαχύτη, ΣΧΗΜΑ 5.3/16 ΡΔΜ).

(α) Ποια η εξαγόμενη ισχύς και ποιος ο τύπος του υδροστροβίλου.

(β) Πως μεγιστοποιείται το ειδικό έργο περύγωσης του υδροστροβίλου Υ; Να υπολογισθεί το Υ για ακτινικά προσανατολισμένα περύγια στην εισροή της περύγωσης, δηλ. λαμβάνοντας τη σχετική γωνία εισροής $\beta_1 = 90^\circ$, καθώς επίσης και η διάμετρος του στροφείου D_1 και το εύρος εισροής b_1 λαμβάνοντας την απόλυτη γωνία εισροής $\alpha_1 = 20^\circ$. Οι ακμές εισροής των περυγίων είναι παράλληλες προς τον άξονα της κατακόρυφα τοποθετημένης μηχανής.

(γ) Να υπολογισθεί το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου.

(δ) Να υπολογισθεί η ταχύτητα εκροής από το στροφείο c_3 , η οποία ταυτόχρονα είναι η ταχύτητα εισροής στον διαχύτη εκροής με την εύλογη παραδοχή, ότι η διάμετρος εκροής είναι ίση με αυτή της εισροής $D_3 = D_1$.

(ε) Η ακμή εκροής του κάθε περυγίου είναι καμπύλη, όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 5.3/15 ΡΔΜ, με μεταβαλλόμενη γωνία εκροής β_2 αναλόγως της ακτίνας από την πλήμνη μέχρι την εξωτερική διάμετρο D_3 , η οποία λαμβάνεται ίση με τη διάμετρο εισροής $D_3 = D_1$. Αφού υποδιαιρεθεί η διατομή εκροής σε

τέσσερα (4) δακτυλιοειδή τμήματα με ίσες διατομές ροής (παράκυκλοι), διαμέτρων d_1 έως d_4 και πλάτους b_1 έως b_4 να υπολογισθούν οι αντίστοιχες κλίσεις πτερυγίων β_1 έως β_4 και τα τρίγωνα ταχυτήτων εκροής, στα οποία ένεκα $\alpha_2 = 90^\circ$ η απόλυτη ταχύτητα είναι $c_2 = c_{2m}$.

(στ) Να υπολογισθούν και σκαριφηθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων εκροής.

(ζ) Ποιο το όφελος ισχύος στον διαχύτη εκροής;

ΛΥΣΗ:(α) Ο αριθμός ταχυστροφίας (αλλά και ο ειδικός αριθμός στροφών) χαρακτηρίζει τον τύπο

$$\sigma = 2108 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{Y^{3/4}} \quad \text{με}$$

υδροστροβίλου, σχ.(5.1.5 και 8):

$$n = 306/60 = 5,1 \text{ s}^{-1},$$

$$Q = 2900/3600 = 0,806 \text{ m}^3/\text{s}$$

και

$$Y = g \cdot H \cdot \eta_h = g \cdot 8 \cdot 0,8 = 62,76 \text{ J/kg}$$

5.7-29 Υπολογισμός στροφείου υδροστροβίλου Kaplan

(5.3.8-4)

Υδροστρόβιλος Kaplan* παροχής $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, ενεργού μανομετρικού $H = 64,6 \text{ m}$ και

αριθμού στροφών $n = 428 \text{ min}^{-1}$ έχει διάμετρο στροφείου (ακροπτερυγίων) $D_{\text{ΑΠ}} = 1,54 \text{ m}$ και λόγο διαμέτρων πλήμνης/ακροπτερυγίων $D_{\text{π}}/D_{\text{ΑΠ}} = 0,4$.

(α) Ποια είναι η 'μορφή' της ροής και της πτερύγωσης του στροφείου;

Λαμβάνοντας προς μεγιστοποίηση του ειδικού έργου του υδροστροβίλου την απόλυτη γωνία εκροής $\alpha_2 = 90^\circ$ να υπολογισθούν οι γωνίες εισροής και εκροής των πτερυγίων, β_1 και β_2 , και το μετατρεπόμενο ειδικό έργο στο στροφείο (κατά Euler) Y_{EU} ,

(β) στα ακροπτερύγια και

(γ) στη "ρίζα" των πτερυγίων στη διάμετρο πλήμνης $D_{\text{π}}$.

*Πρόκειται για τον υδροστρόβιλο εφαρμογής παραγράφου 5.3.8-1.

ΛΥΣΗ: (α) Σύμφωνα με το διάγραμμα $H(Q)$ στο ΣΧΗΜΑ 5.1/13 ΡΔΜ πρόκειται για υδροστρόβιλο κατακορύφου άξονα. Η πτερύγωση είναι καθαρά αξονική, δηλ. ένας έλικας με πτερύγια υπό μεταβαλλόμενη κλίση κατά την ακτίνα περιστρεφόμενος στο σωληνωτό κέλυφος του στροβίλου. Η ροή είναι πρακτικά ομοαξονική ως προς τον άξονα του στροφείου, δηλ. η μεσημβρινή ταχύτητα παράλληλη

5.7-30 Καταπόνηση υδαταγωγού κατά το βαθμιαίο κλείσιμο δικλείδας

(5.7.7A)

Σωληναγωγός σκυροδέματος τροφοδοτεί μικροϋδροστρόβιλο με παροχή $Q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ και έχει διάμετρο $d = 25 \text{ cm}$ και μήκος $L = 5 \text{ km}$. Η απόληψη νερού γίνεται από ταμειυτήρα με ύψος στάθμης $h_1 = 3,8 \text{ m}$. Σε ορισμένη περίπτωση διακοπής λειτουργίας χρησιμοποιείται δικλείδα, η οποία μέσα σε $\Delta t = 25 \text{ s}$ μηδενίζει τη παροχή. Γνωρίζοντας, ότι η πίεση αντοχής των σκυροδεμάτων αγωγών είναι $3,5 \text{ bar}$ (απόλυτη, δηλ. $\sim 35,7 \text{ m Σ.Ν.}$, Στήλης Νερού),

(α) Να ευρεθεί, εάν υπάρχει κίνδυνος να διαρραγεί ο υδαταγωγός και

(β) Εάν ναι, πως μπορεί να αποτραπεί αυτός ο κίνδυνος.

ΛΥΣΗ: Καθώς κλείνει η δικλείδα, η ροή γίνεται μη-μόνιμη επιβραδυνόμενη με αντίστοιχη αύξηση πίεσης από p_1 σε p_2 λόγω μείωσης της ταχύτητας. Η αύξηση της πίεσης $p_2 - p_1$ στη διατομή 2 πριν την δικλείδα

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot l \cdot \frac{c}{\Delta t}$$

υπολογίζεται με την απλουστευμένη σχ.(5.5.62β), η οποία με τα δεδομένα της εκφώνησης δίνει την p_2 . Η πίεση εισροής για 1 atm πίεση περιβάλλοντος είναι

$$p_1 = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h_1 = 101325 + 1000 \cdot g \cdot 3,8 = 138.590,3 \text{ Pa}$$

5.7-31 Πίεση υδραυλικού πλήγματος σε αγωγό τροφοδότησης υδροστροβίλου

(5.5.7B)

Μικροϋδροστρόβιλος τροφοδοτείται μέσω σωληναγωγού διαμέτρου $d = 0,15 \text{ m}$, μήκους $l = 2 \text{ km}$ και πάχους τοιχωμάτων $s = 6,5 \text{ mm}$ με παροχή $Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ ελεγχόμενη με βαλβίδα πριν τη εισροή στον στρόβιλο.

(α) Στη περίπτωση ξαφνικού ακαριαίου κλεισίματος της βαλβίδας η αύξηση της πίεσεως σε ελαστικό

$$\Delta p = c \cdot \left(\frac{\rho}{\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot s}} \right)^{0,5}$$

σωλήνα δίνεται με τον τύπο

(με c , ρ και K , αντιστοίχως, την ταχύτητα ροής

m/s , πυκνότητα kg/m^3 και το μέτρο ελαστικότητας του νερού $K \approx 2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ και

$E \approx 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2 (= \text{Pa})$ το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού).

(β) Στη περίπτωση βαθμιαίου κλεισίματος σε χρόνο $\Delta t = 5 \text{ s}$ να υπολογισθεί η αύξηση πίεσης Δp απλουστευτικά με την εξίσωση ορμής ($m \cdot c = F \cdot t$).

(γ) Να υπολογισθεί η Δp για ανελαστικό σωλήνα (δηλ. με $E \rightarrow \infty$).

ΛΥΣΗ:(α) Ταχύτητα ροής $c = Q/A$ με $Q = 80/3600 = 0,0222 \text{ m}^3/\text{s}$,

$A = \pi \cdot d^2/4 = \pi \cdot 0,15^2/4 = 0,01767 \text{ m}^2$: $c = 0,0222/0,01767 = 1,26 \text{ m/s}$.

5.7-32 Χρόνος κλεισίματος δικλείδας ασφαλείας κατά τη τροφοδότηση υδροστροβίλου (5.5.7Γ)

Τροφοδοτικός σωληναγωγός νερού μήκους $l = 2.000 \text{ m}$ και διαμέτρου $d = 800 \text{ mm}$ με παροχή $Q = 5.400 \text{ m}^3/\text{h}$ καταλήγει λίγο πριν τον υδροστρόβιλο σε δικλείδα, η οποία κλείνει με ελεγχόμενο τρόπο σε περίπτωση ανάγκης. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας του αγωγού είναι $p = 16 \text{ bar}$ και η μέγιστη πίεση αντοχής αυτού είναι 50% μεγαλύτερη.

(α) Σε πόσο χρόνο πρέπει να κλείνει η δικλείδα για μηδενισμό της παροχής σε περίπτωση ανάγκης; (Δεν λαμβάνεται υπόψη η συμπίεστικότητα του νερού και η ελαστικότητα του αγωγού. Για τον υπολογισμό της πίεσης p να θεωρηθεί, ότι η μεταβολή της ορμής του νερού $I = m \cdot c$ σε χρόνο dt δίνει την παραγόμενη δύναμη F επάνω στη βαλβίδα).

(β) Να ευρεθεί η μέγιστη πίεση για ακαριαίο κλείσιμο βαλβίδας εφαρμόζοντας την εξίσωση του

Joukowsky $\Delta h_{\text{Jou}} \approx 100 \cdot \Delta c$ (απλουστευμένη κατά τον κατασκευαστή KSB, όπου η διαφορά προκαλούμενου ύψους από το πλήγμα είναι ανάλογη της μείωσης της ταχύτητας).

(γ) Ποια είναι η δύναμη που ασκείται στον δίσκο της βαλβίδας και στις δύο περιπτώσεις;

(δ) Ποια η αύξηση πίεσης για ακαριαίο κλείσιμο βαλβίδας λαμβάνοντας υπόψη την συμπίεστικότητα του

νερού με τον τύπο $\Delta p = c \cdot (\rho \cdot K)^{0,5}$ με το μέτρο ελαστικότητας νερού $K \approx 2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, βλ. παράγραφο 5.5.7B ΡΔΜ.

ΛΥΣΗ: (α) $F = \dot{I} = \frac{d}{dt}(m \cdot c) = \frac{dm}{dt} \cdot c + \frac{dc}{dt} \cdot m$. Είναι $dm/dt = 0$ δεδομένης της στεγανότητας του αγωγού, $F = p \cdot A$ με $A = \pi \cdot d^2/4 = \pi \cdot 0,8^2/4 = 0,503 \text{ m}^2$,

5.7-33 Βαθμός απόδοσης μικροϋδροστροβίλου παράγωγου υπό κλίμακα από πρωτότυπο υδροστροβίλο μεγάλης κλίμακας (5.6.2A)

Σε δυο Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς έχουν επιλεγεί οι μικροϋδροστροβίλοι με ύψη υδατόπτωσης H και διαμέτρους στροφείων D ως εξής:

(1) Τύπου Francis με $H = 60 \text{ m}$ και $D = 600 \text{ mm}$ (ισχύος $\sim 1,54 \text{ MW}$) ως υπό κλίμακα παράγωγο πρωτότυπου μεγάλου υδροστροβίλου με $H = 113,5 \text{ m}$ και $D = 7,13 \text{ m}$, βλ. **ΣΧΗΜΑ 5.3/5 ΡΔΜ** (ισχύος $\sim 415 \text{ MW}$) και βαθμό απόδοσης $\eta = 92\%$.

(2) Τύπου Kaplan με $H = 6 \text{ m}$ και $D = 900 \text{ mm}$ (ισχύος $\sim 256 \text{ MW}$) ως υπό κλίμακα παράγωγο πρωτότυπου μεγάλου υδροστροβίλου με $H = 11 \text{ m}$ και $D = 6.700 \text{ mm}$ (ισχύος $\sim 27 \text{ MW}$), βλ. **ΣΧΗΜΑ 6.1/7**, και βαθμό απόδοσης $\eta = 91\%$.

(α) Να υπολογισθούν οι βαθμοί απόδοσης των δύο μικροϋδροστροβίλων θεωρώντας συνθήκες λειτουργίας υπό ίδια θερμοκρασία νερού.

(β) Παρότι οι μικροϋδροστροβίλοι είναι γεωμετρικά όμοιοι με τα μεγαλύτερης κλίμακας πρωτότυπά τους προκύπτουν διαφορετικοί βαθμοί απόδοσης και μάλιστα μικρότεροι. Σε ποιο ρευστομηχανικό φαινόμενο οφείλεται αυτή η διαφορά;

ΛΥΣΗ: (α) (1) Για τους υδροστροβίλους Francis χρησιμοποιείται ο τύπος του Moody, σχ.(5.6.8) ΡΔΜ,

$$\frac{1-\eta_{\Pi}}{1-\eta_M} = \left(\frac{D_M}{D_{\Pi}} \right)^{0,2}$$

(με δείκτη Π για το πρωτότυπο), ο οποίος δίνει βαθμό απόδοσης του

5.7-33 5.6.2A Βαθμός απόδοσης μικροϋδροστροβίλου παράγωγου από γεωμετρικά όμοιο πρότυπο μεγάλης κλίμακαςΕΛ;,,,,; αναρρίθμηση σε 5.6.2A ένεκα 5.6.2B 5.6.2A/1

5.7-34 Σχεδιασμός μικροϋδροστροβίλου Francis ισχύος 3 kW βάσει διαθέσιμου υδροστροβίλου ισχύος 16 MW ως προτύπου (5.6.2B)

Υδροστροβίλος τύπου Francis ισχύος $P=16 \text{ MW}$ λειτουργεί με μανομετρικό $H = 62 \text{ m}$, παροχή $Q = 109.440 \text{ m}^3/\text{h}$ και αριθμό στροφών $n = 410 \text{ min}^{-1}$. Γεωμετρικά όμοιος μικροϋδροστροβίλος σχεδιάζεται να λειτουργήσει σε Μικρό Υδροηλεκτρικό Σταθμό με διαθέσιμο μανομετρικό $H_M = 1,8 \text{ m}$ και

υπό συνθήκες δυναμικής ομοιότητας, δηλ. με ίδιους αριθμούς πίεσης $\psi_M = \psi = Y/(u^2/2)$, παροχής

$$\varphi_M = \varphi = Q/(u \cdot A_D) \text{ και ισχύος } \lambda = \eta \cdot \varphi \cdot \psi, \text{ βλ. σχ.}(5.1.14, 15, 18).$$

(α) Να υπολογισθούν ο αριθμός στροφών n_M , η παροχή όγκου Q_M και η ισχύς P_M του μικροϋδροστροβίλου, ο οποίος κατ' αρχική εκτίμηση είναι μικρότερος υπό κλίμακα 1 προς 5 (1/5).

(β) Να ευρεθεί ο αριθμός απόδοσης των δύο υδροστροβίλων εφαρμόζοντας τον τύπο του Moody, σχ.

$$(3.7.50) \text{ ΡΔΜ, } \frac{1-\eta}{1-\eta_M} = \frac{D_M^{0,2}}{D^{0,2}}.$$

(γ) Προς αισθητοποίηση του μεγέθους να υπολογισθεί η διάμετρος στροφείου και στις δυο μηχανές με τη βοήθεια της καμπύλης του Κορντιέ (Cordier), **ΣΧΗΜΑ 5.1/15 ΡΔΜ** ή με τη μαθηματική προσομοίωσή της σχ.(5.6.3,4,6).

ΛΥΣΗ: (α) Ο αριθμός πίεσης είναι $\psi = \frac{Y}{u^2/2}$ με το ειδικό έργο $Y = g \cdot H$ και τη περιφερειακή ταχύτητα στη διάμετρο στροφείου $D = 2R$: $u = \omega \cdot R = \pi \cdot n \cdot D$. Εξίσωση των ψ δίνει:

$$\frac{2g \cdot H_M}{\pi^2 \cdot n_M^2 \cdot D_M^2} = \frac{2g \cdot H}{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D^2} \rightarrow n_M^2 = \frac{H_M}{H} \cdot \frac{D^2}{D_M^2} \cdot n^2 \rightarrow n_M = n \cdot \frac{D}{D_M} \cdot \left(\frac{H_M}{H} \right)^{0,5}$$

5.7-35 Επιλογή ακτινικής υδραντλίας για να λειτουργεί σαν μικροϋδροστρόβιλος Francis (5.6.3)

Εξετάζεται η αξιοποίηση δύο μικρών υδατοπτώσεων με ύψος $H = 45 \text{ m}$ και 115 m και παροχή όγκου $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ και $1.440 \text{ m}^3/\text{h}$, αντιστοίχως, με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο από πλευράς αρχικής επένδυσης. Γι' αυτό αποφασίζεται η χρησιμοποίηση ακτινικών υδραντλιών (τυπικής σειράς εμπορίου) με βάση το διάγραμμα $H(Q)$ στο **ΣΧΗΜΑ 5.6/6 ΡΔΜ**, οι οποίες σε **αντίστροφη** λειτουργία (αναστροφή ροής νερού) θα λειτουργούν ως υδροστρόβιλοι παράγοντας ηλεκτρόρρευμα, π.χ. μέσω του ηλεκτροκινητήρα του συνεχούς ρεύματος, ο οποίος με αναστροφή περιστροφής λειτουργεί σαν ηλεκτρογεννήτρια:

(α) Να επιλεγούν οι αντλίες γι' αυτή τη περίπτωση με βαθμό απόδοσης $\eta \approx 0,76$ (σύμφωνα με το **ΣΧΗΜΑ 5.6/5 ΡΔΜ**) και να υπολογισθεί το παραγόμενο ειδικό έργο Y και η εξαγόμενη ισχύς P των "υδροστρόβιλων".

(β) Συνήθεις βαθμοί απόδοσης ακτινικών αντλιών είναι γύρω στο $\eta \approx 92\%$ στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Πως εξηγείται, ότι κατά τη λειτουργία τους ως υδροστρόβιλοι, δηλ. με αντιστροφή της φοράς ροής του νερού, ο η πέφτει στο $\sim 76\%$; Να στοιχειοθετηθεί η απάντηση με τη βοήθεια του τριγώνου ταχυτήτων γνωρίζοντας (π.χ. από το Κεφάλαιο 8), ότι η σχετική γωνία εισροής β_1 και εκροής β_2

αντλητικών πτερυγώσεων έχουν συνήθεις τιμές $\beta_1 \approx 16^\circ$ και $\beta_2 = 20^\circ$ έως 40° , ενώ για τους ακτινικούς υδροστρόβιλους Francis (με τους οποίους προσομοιάζει η ακτινική αντλία) είναι στην εισροή $\beta_1 \approx 90^\circ$ και στην εκροή $\beta_2 \approx 20^\circ$.

ΛΥΣΗ: (α) **ΣΧΗΜΑ 5.6/6 ΡΔΜ:** Με παροχή (1) $Q = 90/3600 = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ και $H = 45 \text{ m}$ η 1^η αντλία είναι **μονοβάθμιδη**, ενώ η 2^η με παροχή (2) $Q = 1440/3600 = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ και $H = 115 \text{ m}$ είναι **διβάθμιδη**. Παραγόμενο ειδικό έργο για λειτουργία ως υδροστρόβιλος

$$(1) \quad Y = \eta \cdot g \cdot H = 0,76 \cdot g \cdot 45 = 335,4 \text{ J/kg} \quad \text{και} \quad (2) \quad Y = 0,76 \cdot g \cdot 115 = 857,1 \text{ J/kg}$$

με αντίστοιχες εξαγόμενες ισχύεις:

5.7-36 Υπολογισμός ισχύος μικροϋδροστρόβιλου Pelton

(5.2.4B)

Υδροστρόβιλος τύπου Pelton περιστρέφεται με αριθμό στροφών 510 min^{-1} προσβαλλόμενος μέσω ακροφυσίου από δέσμη νερού διαμέτρου $d_d = 32 \text{ mm}$. Πριν το ακροφύσιο η υπερπίεση είναι $8,5 \text{ bar}$ και η ταχύτητα στον αγωγό μεταφοράς $c_{af} = 3,2 \text{ m/s}$. Ο συντελεστής απωλειών του ακροφυσίου είναι $\varphi_{AK} = 0,97$, οι απώλειες κρούσης κατά την πρόσπτωση της υδατοδέσμης στα πτερύγια (σκαφίδια)

$\Delta p_{KP} = 0,06 \cdot \rho \cdot w_1^2 / 2$, ο συντελεστής απωλειών πτερυγίων είναι $\varphi_{\pi\tau} = 0,92$ και η γωνία εκροής του νερού από τα πτερύγια $\beta_2 = 16^\circ$. Να ευρεθούν:

(α) Η θεωρητική ταχύτητα εκροής της δέσμης c_0 , η πραγματική ταχύτητα εκροής c_1 , η περιφερειακή ταχύτητα u και η σχετική ταχύτητα εισροής των πτερυγίων w_1 .

(β) Η απαιτούμενη διάμετρος του στροφείου (άξονας μέχρι το μέσο της δέσμης νερού προσβολής των πτερυγίων).

(γ) Το τρίγωνο ταχυτήτων εκροής, δηλ. w_2 , c_2 και u και οι αντίστοιχες γωνίες.

(δ) Απώλειες ειδικού έργου στο ακροφύσιο, απώλειες κρούσης, απώλειες πτερυγίων, απώλειες εκροής.

(ε) Ο βαθμός απόδοσης.

(στ) Η εξαγόμενη ισχύς του υδροστροβίλου P .

(ζ) Η ιδανική ισχύς του υδροστροβίλου $P_{\max}$ και ο ιδανικός βαθμός απόδοσης η_p και να συγκριθεί με τη 'πραγματική' του (στ) P στον ολικό βαθμό απόδοσης $\eta = P / P_{\max}$.

ΛΥΣΗ: (α) Ταχύτητα εκροής από εξίσωση ενέργειας χωρίς απώλειες (θεωρητική):

5.7-37 5.7-21 5.5.3B Αριθμός Froude και κρίσιμο βάθος σε διώρυγα τετραγωνικής διατομής

ΕΛ;,,,,; aB

5.7-43 Αριθμός Froude και κρίσιμο βάθος σε διώρυγα τετραγωνικής διατομής (5.5.3Δ)

Σε διώρυγα τετραγωνικής διατομής πλάτους $b = 4,3 \text{ m}$ παροχετεύεται νερό για τη τροφοδοσία υδροστροβίλου με παροχή $Q = 64.800 \text{ m}^3/\text{h}$.

(α) Να καθορισθεί ο τύπος της ροής για βάθη διώρυγας $h = 0,56 \text{ m}$, $1,13 \text{ m}$ και $1,7 \text{ m}$ με τη βοήθεια του αδιάστατου χαρακτηριστικού αριθμού Froude, σχ.(5.5.27,28) ΡΔΜ.

(β) Να ευρεθεί το κρίσιμο βάθος ροής.

ΛΥΣΗ: (α) Περιοχές ροής σε ανοιχτούς αγωγούς με κριτήριο τον αριθμό Froude: Με τη ταχύτητα

ρευστού u και τη κρίσιμη ταχύτητα, σχ. (5.5.25γ) ΡΔΜ, $u_c = \frac{Q}{b \cdot h_c} = \sqrt{g \cdot h_c}$ σχηματίζεται ο

αδιάστατος αριθμός Froude $Fr = \frac{u}{u_c} = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h_c}}$, ο οποίος χαρακτηρίζει τη ροή, σχ.(5.5.28 α,β,γ), με *****

5.7-38 Υδροστρόβιλος αντίδρασης: καθορισμός τύπου και στοιχεία λειτουργίας. (8. BF8.3)

Υδροστρόβιλος αντίδρασης κινεί ηλεκτρογεννήτρια με αριθμό στροφών $n = 5 \text{ s}^{-1}$ τροφοδοτούμενος με παροχή $Q = 43.200 \text{ m}^3/\text{h}$ και μανομετρικό $H = 100 \text{ m}$. Έχει πτερύγια σταθερής κλίσης με απόλυτη γωνία εκροής $\alpha_2 = 90^\circ$ και με διάμετρο ακροπτερυγίων $D_2 = 4 \text{ m}$.

(α) Είναι ο στρόβιλος τύπου Francis ή Kaplan; Αξονικός ή ακτινικός;

Να αιτιολογηθεί η απάντηση και να υπολογισθούν:

(β) Η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας εισροής c_{1u} .

(γ) Η στροφική ροπή στον άξονα M και η παραγόμενη ισχύς P για μηχανή χωρίς απώλειες.

ΛΥΣΗ: (α) Τον τύπο υδροστροβίλου δείχνει ο αριθμός ταχυστροφίας σ (ή ο ειδικός αριθμός στροφών n_q) με τιμές σύμφωνα με τις σχ.(5.1.11 και 12) αλλά και τα διαγράμματα στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1/12 και 13 ΡΔΜ, τα οποία αμέσως "δείχνουν", ότι πρόκειται για υδροστρόβιλο Francis, δηλ. με ακτινικό στροφέιο.

$$\sigma = 2,108 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{Y_H^{3/4}} \quad \text{με} \quad Q = 43.200/3.600 = 12 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{και}$$

Είναι κατά τη σχ.(5.1.5)

5.7-39 Υδροστρόβιλος Pelton: υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας n, Y, P, M (8. BF8.5)

Υδροστρόβιλος τύπου Pelton με βαθμό απόδοσης $\eta = 0,86$ εγκατεστημένος σε υψόμετρο 800 m τροφοδοτείται από φράγμα σε υψόμετρο 1.800 m με σωληναγωγό διαμέτρου $d = 600 \text{ mm}$ και μήκους $l = 10 \text{ km}$ με ολικό συντελεστή απωλειών $\lambda = 0,02$. Τα πτερύγια (σκαφίδια) του στροβίλου, στερεωμένα σε στροφέιο διαμέτρου $D = 4 \text{ m}$, προσβάλλει δέσμη νερού διαμέτρου $d_\Delta = 10 \text{ cm}$ μέσω ακροφυσίου με αμελητέες απώλειες με την **ιδανική** ταχύτητα δέσμης εκροής διπλάσια της ταχύτητας

περιστροφής πτερυγίων $c_\Delta = 2 \cdot u_{\pi}$.

Να υπολογισθεί ο αριθμός στροφών n , το ειδικό έργο Y , η παραγόμενη ισχύς P και η στροφική ροπή M στον άξονα του υδροστροβίλου.

ΛΥΣΗ: Ο αριθμός στροφών n προκύπτει από την ταχύτητα περιστροφής $u = \omega \cdot D/2$ μέσω της γωνιακής ταχύτητας $\omega = 2\pi \cdot n$ και της σχ.(5.2.5) $u_{\pi} = c_\Delta/2$ για ιδανική ροή. Η c_Δ υπολογίζεται

5.7-40 Ισχύς και διάμετρος στροφέιου υδροστροβίλου Pelton (8...5.2.2-BFP 8.2)

Υδροστρόβιλος δράσης (δηλ. ισόθλιπτος τύπου Pelton) βαθμού απόδοσης $\eta = 80\%$ τροφοδοτείται από ταμιευτήρα σε υψόμετρο από το μηχανοστάσιο $H_{geo} = 500 \text{ m}$ με αγωγό μεταφοράς διαμέτρου $d = 1 \text{ m}$ και μήκους $l = 8 \text{ km}$ με μέσο συντελεστή αντίστασης $\lambda = 0,015$. Η διάμετρος της δέσμης νερού (ΔN) από το ακροφύσιο είναι $d_{\Delta N} = 100 \text{ mm}$ και ο αριθμός στροφών του στροφέιου $n = 360 \text{ min}^{-1}$. Με $g = g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ και την υπόθεση ότι η πρόσπτωση της δέσμης νερού γίνεται χωρίς απώλειες, δηλ. κατά την σχ.(5.2.6) ΡΔΜ η ταχύτητα περιστροφής πτερυγίων είναι το μισό της

ταχύτητας δέσμης νερού $c_{\Delta N} = 2 \cdot u_{\pi \text{ περ}}$, να υπολογισθούν,

(α) η παροχή νερού και η παραγόμενη ισχύς P με βαθμό απόδοσης της μηχανής $\eta = 83\%$,

(β) η διάμετρος του στροφέιου.

ΛΥΣΗ: (α) Το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ ελεύθερης στάθμης του ταμιευτήρα, σχ.(5.1.38α), δίνει το ειδικό έργο Y μετατρεπόμενο συνολικά σε κινητική ενέργεια της δέσμης νερού:

$$Y = g \cdot H_{geo} - \frac{\Delta p_v}{\rho} = \frac{c_{\Delta N}^2}{2} \quad \text{με τις απώλειες πίεσης} \quad \Delta p_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2}$$

5.7-41 Διαχύτης υδροστροβίλου Francis (5.7-44 8. BF8.9)

Στον διαχύτη εκροής ενός υδροστροβίλου Francis το νερό αμέσως μετά τον στρόβιλο εισρέει με ταχύτητα $c_1 = 10 \text{ m/s}$ και εκρέει με $c_2 = 1 \text{ m/s}$, ενώ η επιφάνεια της λεκάνης απορροής ευρίσκεται $\Delta h = h_1 - h_2 = 8 \text{ m}$ κάτω από την διατομή εισροής του διαχύτη. Οι απώλειες πίεσης στον διαχύτη είναι $\Delta p_v = 10 \text{ kPa}$. Είναι πίεση περιβάλλοντος 1 atm και τάση ατμών (πίεση ατμοποίησης νερού) $p_d = 2.350 \text{ Pa}$.

(α) Να ευρεθεί η πίεση στη διατομή εισόδου και να ελεγχθεί, εάν υπάρχει κίνδυνος σπηλαίωσης.

(β) Σε περίπτωση κινδύνου πως αποτρέπεται τη σπηλαίωση;

ΛΥΣΗ: (α) Το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ εισροής 1 και εκροής 2 του διαχύτη δίνει:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \rho \frac{c_2^2}{2} + \Delta p_v$$

5.7-42 5.6.5 Σπηλαίωση Grenzsaughoehe einer Reaktionsturbine ΕΛ,;;,; όχι

Βλ. s . 73/74 Fig. 3.24

Μάλλον υπάρχει προηγούμενα!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

5.7-43 Αριθμός Froude και κρίσιμο βάθος σε διώρυγα τετραγωνικής διατομής (5.5.3Δ)

Σε διώρυγα τετραγωνικής διατομής πλάτους $b = 4,3 \text{ m}$ παροχετεύεται νερό για τη τροφοδοσία υδροστροβίλου με παροχή $Q = 64.800 \text{ m}^3/\text{h}$.

(α) Να καθορισθεί ο τύπος της ροής για βάθη διώρυγας $h = 0,56 \text{ m}$, $1,13 \text{ m}$ και $1,7 \text{ m}$ με τη βοήθεια του αδιάστατου χαρακτηριστικού αριθμού Froude, σχ.(5.5.27,28) ΡΔΜ.

(β) Να ευρεθεί το κρίσιμο βάθος ροής.

ΛΥΣΗ: (α) Περιοχές ροής σε ανοιχτούς αγωγούς με κριτήριο τον αριθμό Froude: Με τη ταχύτητα

ρευστού u και τη κρίσιμη ταχύτητα, σχ. (5.5.25γ) σχηματίζεται ο αδιάστατος

$$u_c = \frac{Q}{b \cdot h_c} = \sqrt{g \cdot h_c}$$

$$h_c = \left(\frac{Q^2}{g \cdot b^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{18^2}{g \cdot 4^2} \right)^{1/3} \rightarrow h_c = 1,27 \text{ m}$$

(β) Κρίσιμο βάθος, όπου $Fr = 1,0$, σχ.(5.2.25α):

Άρα συνθήκη σχεδιασμού $h > h^* \rightarrow h > 1,27 \text{ m}$, όπως εν προκειμένω $1,7 > 1,27 \text{ m}$.

5.7-44 Νέα, μόνο σχεδιασμός περύγωσης της 5.4.3Δ !!!!!!!

ΣΧΗΜΑ 5.4/8 Πλήρης εγκατάσταση υδροστροβίλου τύπου Kaplan ισχύος 18,4 MW με ύψος υδατόπτωσης 38 m και παροχή 75 m³/s. Ο αριθμός στροφών είναι 200 min⁻¹ και η διάμετρος στροφείου 3,5 m (κατασκευή Voith, ΥΗΣ Rosshaupten).

5.4.3Δ Σχεδιασμός υδροστροβίλου Kaplan

Υδροστρόβιλος τύπου Καπλάν κατακόρυφου άξονα εν λειτουργία σε Υδροηλεκτρικό Σταθμό έχει ονομαστική ισχύ $P = 25 \text{ MW}$ υπό αριθμό στροφών $n = 200 \text{ 1/min}$ και δίνεται σε σχεδιαστική τομή (από το **ΣΧΗΜΑ 5.4/8 ΡΔΜ**, κατασκευάστρια γερμανική εταιρεία Voith) με μέγεθος αναφοράς τη διάμετρο του στροφείου με $D_2 = 3.500 \text{ mm}$. Το αντίστοιχο ύψος υδατόπτωσης είναι $H = 38 \text{ m}$ και η παροχή νερού $Q = 270.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Η ισχύς παράγεται από ηλεκτρογεννήτρια με συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος 50 Hz.

(α) Να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα τύπου του στροβίλου και να υπολογισθεί το ειδικό έργο αυτού.

(β) Να υπολογισθεί το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH) καθώς και το γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης λαμβάνοντας τον χαρακτηριστικό αριθμό αναρρόφησης $S_q \leq 0,9$ και ειδικά με την εύλογη τιμή 0,8.

(γ) Να υπολογισθούν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά και λειτουργικά μεγέθη του υδροστροβίλου (όπως αριθμός ζευγών πόλων της ηλεκτρογεννήτριας, βαθμός απόδοσης, ταχύτητα εισροής και εκροής νερού στις σημαντικές διατομές) και

(δ) Να διαστασιολογηθεί το στροφείο με πλήρη ρευστοδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων. Να ληφθεί γενικώς υπόψη, ότι με δεδομένη την διάμετρο του στροφείου – από ακροπτερύγιο σε ακροπτερύγιο – είναι

εύκολο να γίνει επαλήθευση όσων διαστάσεων του υδροστροβίλου υπολογισθούν από τον υπολογιστικό σχεδιασμό, ο οποίος μπορεί να διεξαχθεί με υπόδειγμα την ανάλυση της παραγράφου 5.4.2.

Να περιγραφεί σε αδρές γραμμές ο τρόπος διαστασιολόγησης του στροφείου;!!!!

ΛΥΣΗ: (α) Με τα δεδομένα ισχύς $P = 25 \text{ MW} = 25.000 \text{ kW}$, αριθμός στροφών $n = 200/60 = 3,333 \text{ s}^{-1}$, παροχή όγκου $Q = 270.000/3.600 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ το ειδικό έργο υδροστροβίλου είναι

$$Y = g \cdot H = g \cdot 38 = 372,655 \text{ m}^2/\text{s}^2.$$

Ειδικός αριθμός στροφών, σχ.(5.1.2):

το οποίο αντιστοιχεί σε ύψος συγκράτησης πίεσης (που αντιστοιχεί στο NPSH της εγκατάστασης) $h_H = Y_H$

5.7-45 Νέα μόνο σχεδιασμός περύγωσης της 5.4.3E

ΣΧΗΜΑ 5.4/9 Υδροστροβίλος Kaplan με διάμετρο στροφείου 7,80 m με περύγια 12.000 kg το καθένα. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς είναι 34,7 MW υπό αριθμό στροφών 65,2 min⁻¹, ύψος υδατόπτωσης 9,6 m και παροχή 40 m³/s (εταιρείας Voith).

5.4.3E Υδροστρόβιλος αντίθλιψης τύπου Kaplan ισχύος 34,7 MW

Το σχεδιοσκαρίφημα (από το **ΣΧΗΜΑ 5.4/9 PDM** του κατασκευαστή) παρουσιάζει σε μηκοτομή υδροστρόβιλο τύπου Καπλάν ονομαστικής ισχύος $P = 34,7 \text{ MW}$ υπό αριθμό στροφών $n = 65,2 \text{ min}^{-1}$. Στη δεδομένη ισχύ το ύψος υδατόπτωσης είναι $H = 9,6 \text{ m}$ και η παροχή $Q = 1.468.800 \text{ m}^3/\text{h}$ (408 m³/s). Οι διαστάσεις του στροβίλου εκτιμώνται με βάση την υπό κλίμακα μηκοτομή και την δεδομένη διάμετρο του στροφείου $D = 7,80 \text{ m}$ με περύγια μεταβαλλόμενου βήματος (δηλ. ρυθμιζόμενης περί τον άξονά τους κλίσης).

(α) Να υπολογισθούν τα γνωστά μεγέθη, τα οποία ταυτοποιούν την κατασκευή του υδροστροβίλου για λειτουργία υπό συνθήκες θερμοκρασίας 20 °C και κανονική ατμοσφαιρική πίεση 1atm. Δηλ. να ελεγχθεί η συμβατότητα του τύπου του στροβίλου με τα διαγράμματα $H(Q)$, $H(\eta_q)$ και Cordier (Κορντιέ) και με τους αριθμούς ταχυστροφίας και διαμέτρου.

(β) Μέσω του χαρακτηριστικού αριθμού αναρροφήσεως $S_a = 0,9$, βλ. παράγραφο 4.14.6, να ευρεθεί το γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης.

(γ) Να υπολογισθεί ο αριθμός πόλων της ηλεκτρογεννήτριας και ο βαθμός απόδοσης.

(δ) Να εκτιμηθεί υπολογιστικά η διάμετρος του κοίλου άξονα (λόγω εσωτερικού μηχανισμού ρύθμισης κλίσης περυγιών) με βάση την επιτρεπόμενη διατμητική τάση $\tau_{\text{επ}} = 33 \text{ MPa}$.

(ε) Να σχεδιασθούν περύγια και στροφείο και ειδικότερα να ευρεθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων για τους τρεις τυπικούς σταθμούς στη πλήμνη, στο μέσο και στα ακροπερύγια, να επιλεγεί η κατάλληλη υδροτομή (από τη σειρά Goe ή NACA) και να επαληθευθεί ο βαθμός απόδοσης.

ΛΥΣΗ: (α) Με τα ονομαστικά μεγέθη του υδροστροβίλου ισχύς $P = 34.700 \text{ kW} = 34,7 \cdot 10^6 \text{ W}$, αριθμός στροφών $n = 65,2 \text{ min}^{-1} = 1,0867 \text{ s}^{-1}$ και παροχή όγκου $Q = 408 \text{ m}^3/\text{s}$ είναι

5.7-37 5.7-21 5.5.3B Αριθμός Froude και κρίσιμο βάθος σε διώρυγα τετραγωνικής διατομής ΕΛ; ; ; ; ; ; aB

5.7-7 **5.3.5B** Σχεδιασμός πρωτότυπου υδροστροβίλου Φράνσις βάσει ομοίου προτύπου (μοντέλου)

Υδροστροβίλου ΕΛ;;;

5.7-8 5.3.7A Υπολογισμός διαχύτη (προσθήκη)

Ακολουθεί προσθήκη Α από γράψιμο της ΕΛΔΗ.

Ακολουθούν ~ 4 σελίδες χειρογράφου.

© tokyo