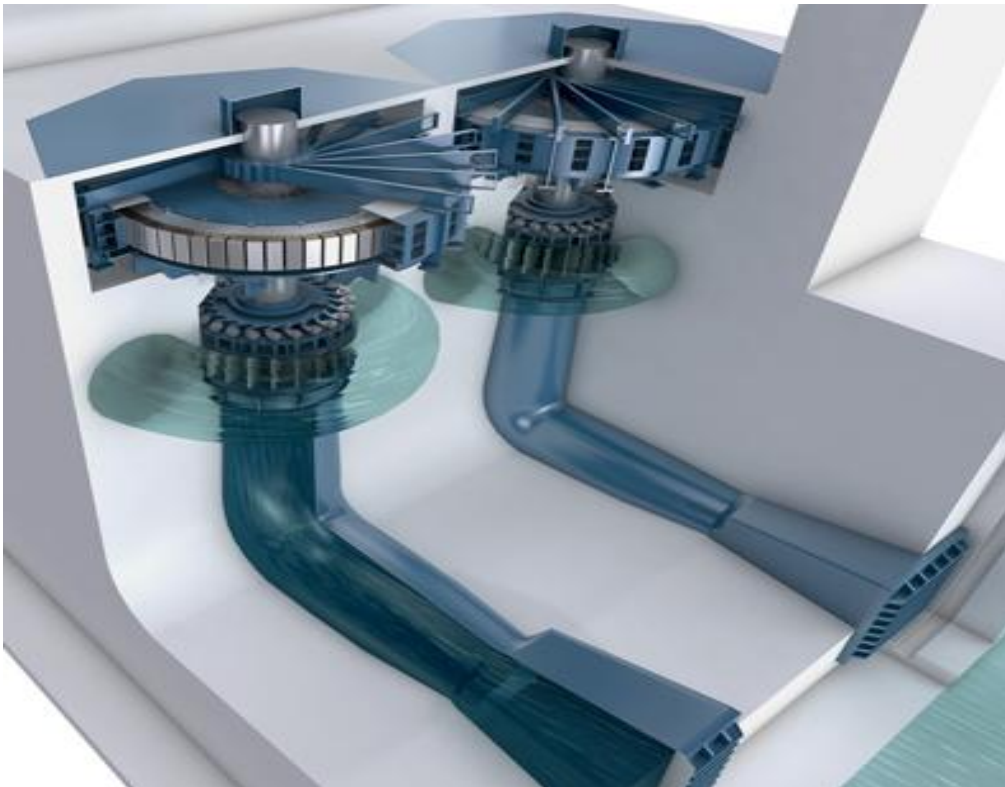


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# «ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ»



ΧΑΝΤΟΛΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΓΚΟΤΣΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Π.Υ.)

ΠΑΤΡΑ  
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2016

--	--	--

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	8
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	12
1.1 ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ .....	12
1.2 Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ .....	13
1.3 ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΚΟΠΟΥ .....	14
1.4 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ .....	17
1.5 ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΣΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΑΛΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ .....	17
1.6 ΟΙ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΩΣ ΕΡΓΑ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΚΟΠΟΥ .....	18
1.7 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ .....	19
1.8 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ .....	20
1.8.1 ΣΤΑΘΜΟΙ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ .....	20
1.8.2 ΣΤΑΘΜΟΙ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (ταμιευτήρα) .....	21
1.8.3 ΥΔΡΑΝΤΛΗΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ .....	21
1.9 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ .....	22
1.9.1 Ο ΕΤΗΣΙΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ .....	22
1.9.2 Ο ΕΒΔΟΜΑΔΙΑΙΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ .....	23
1.9.3 Ο ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ .....	23
1.9.4 Ο ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ ΑΝΑΡΡΥΘΜΙΣΗΣ .....	23
1.9.5 ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ .....	24
1.9.6 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ .....	25
1.10 ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ .....	26
1.10.1 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΥΗΕ .....	27
1.10.2 ΤΥΠΟΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	28
1.10.3 ΟΙ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ .....	28
1.11 ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	29
<b>2 ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ</b> .....	31
2.1 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΔΡΑΣΕΩΣ .....	32
2.2 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΣ .....	36
2.2.1 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΜΙΚΤΗΣ ΡΟΗΣ (FRANCIS) .....	38
2.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ .....	40
2.2.2.1 Η έννοια του μανομετρικού ύψους στις Ρευστοδυναμικές μηχανές .....	41
2.2.2.2 Συμμετρικοί εκ περιστροφής όγκοι ελέγχου .....	43
2.2.2.3 Υδροστρόβιλοι, Τρίγωνα ταχύτητας .....	44
2.2.2.4 Απόδοση δρομέα και βαθμός αντίδρασης συναρτήσει γωνιών $\alpha_1$ και $\beta_1$ .....	47
2.2.2.5 Καθορισμός βασικών λειτουργικών παραμέτρων .....	49
2.2.2.6 Ειδικός αριθμός στροφών .....	50
2.2.2.7 Επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών .....	52
2.2.2.8 Σημείο λειτουργίας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης .....	57
2.2.3 ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΣ ΚΕΛΥΦΟΣ .....	58
2.2.4 ΒΑΝΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ .....	63
2.2.5 ΣΕΡΒΟΜΟΤΕΡ .....	64
2.2.6 ΟΔΗΓΑ ΚΙΝΗΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ .....	65
2.2.7 ΔΡΟΜΕΑΣ .....	68
2.2.8 ΑΓΩΓΟΣ ΦΥΓΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΕΞΟΔΟΥ .....	75
2.2.9 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΛΗΘΟΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΥΗΕ .....	77
2.3 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ (KARLAN) .....	78
2.4 ΦΘΟΡΕΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ .....	80
2.4.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ - ΣΠΗΛΛΙΩΣΗ .....	80

--	--	--

2.4.2	<b>ΜΟΡΦΕΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ</b> .....	88
2.4.2.1	Σπηλαίωση εισόδου εξωτερικής επιφάνειας (extrados).....	88
2.4.2.2	Σπηλαίωση εισόδου εσωτερικής επιφάνειας (intrados).....	88
2.4.2.3	Σχηματισμός στροβίλων Karman .....	89
2.4.2.4	Στήλη σπηλαίωσης .....	89
2.4.2.5	Σπηλαίωση πλήμνης.....	92
2.4.2.6	Σπηλαίωση της στεφάνης (ή ακροπτερυγίων) .....	92
2.4.2.7	Στάθμη τοποθέτησης Υδροστροβίλου .....	92
2.4.3	<b>ΦΘΟΡΕΣ ΑΠΟ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ</b> .....	93
2.5	<b>ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΥΠΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ</b> .....	93
3	<b>ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΗΣ</b> .....	95
3.1	ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ .....	95
3.2	ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ.....	96
3.3	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ .....	97
3.3.1	<i>ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ</i> .....	100
3.3.2	<i>ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ</i> .....	100
3.4	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	101
3.4.1	<i>ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ</i> .....	102
3.5	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	103
3.5.1	<i>ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ</i> .....	103
3.5.2	<i>ΤΟ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ</i> .....	104
3.5.3	<i>ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ</i> .....	104
3.5.4	<i>ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ</i> .....	105
3.5.5	<i>ΚΡΟΥΣΤΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ</i> .....	105
4	<b>ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ – ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ</b> .....	109
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ.....	110
4.2	ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ.....	111
4.2.1	<i>ΛΙΜΝΗ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ</i> .....	113
4.2.2	<i>ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ ΩΣ ΕΡΓΟ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΚΟΠΟΥ</i> .....	114
4.3	ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ .....	115
4.4	ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ .....	116
4.5	ΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ .....	116
4.6	ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ.....	120
4.7	ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑ .....	120
4.8	ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ FRANCIS.....	121
4.9	ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ .....	123
4.10	ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ.....	124
4.11	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ .....	125
4.12	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ .....	126
4.13	ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ.....	126
4.14	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ .....	127
5	<b>ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</b> .....	128
5.1	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	128
5.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	129
5.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	130
5.3.1	<i>Υδρολογικά δεδομένα ΥΗΣ Καστρακίου</i> .....	130
5.3.2	<i>Υδρολογικά δεδομένα ΥΗΣ Καστρακίου για το έτος 2012</i> .....	131
5.3.3	<i>Υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας Μονάδων ΥΗΣ για την εξυπηρέτηση των απαιτούμενων ενεργειακών αναγκών του δικτύου</i> .....	134
5.3.4	<i>Μέσο ύψος πτώσης, ταχύτητα αγωγού, παροχή</i> .....	138
5.3.5	<i>Εύρεση απωλειών όλων των τμημάτων του Υδροηλεκτρικού εγκατάστασης</i> .....	140
5.3.6	<i>Υπολογισμός σπηλαίωσης NPSH</i> .....	144
5.3.7	<i>Υπολογισμός της γωνίας σχεδιασμού <math>\alpha_{opt}</math> ανοίγματος των ρυθμιστικών κινητών πτερυγίων</i> ...	145

--	--	--

5.3.8 Υπολογισμός ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  και παραμέτρου σπηλαίωσης  $\sigma_{kr}$  υδροστροβίλου Francis 146

6	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΥΗΣ ΣΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	147
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	149

### Περιεχόμενα Εικόνων, Διαγραμμάτων και Πινάκων

Εικόνα 1. Τμήμα του συγκροτήματος Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	15
Εικόνα 2. Περιγραφή των τριών ΥΗΣ κατά μήκος του ποταμού Αχελώου. [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε] .....	16
Εικόνα 3 ΥΗΣ φυσικής ροής [πηγή: <a href="http://etoiledumarine.over-blog.com/article-en-travaux">http://etoiledumarine.over-blog.com/article-en-travaux</a> ] .....	20
Εικόνα 4 ΥΗΣ Καστρακίου με ταμιευτήρα [πηγή: αρχείο ΥΗΣ Καστρακίου] .....	21
Εικόνα 5 Διάγραμμα υδραντλητικού σταθμού [πηγή: Pumped-storage hydroelectricity] .....	22
Εικόνα 6. Ετήσιος ταμιευτήρας ΥΗΣ Κρεμαστών στο σύστημα ταμιευτήρων του π. Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε.] .....	22
Εικόνα 7. Εβδομαδιαίος ταμιευτήρας ΥΗΣ Καστρακίου στο σύστημα ταμιευτήρων του π. Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε.] .....	23
Εικόνα 8 Ημερήσιος / Αναρρυθμιστικός τ. ΥΗΣ Στράτου στο σύστημα ταμιευτήρων του π. Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε.] .....	23
Εικόνα 9 Διατομή χωμάτινου φράγματος [πηγή: cy/moa/wdd/Wdd.nsf/0/.../\$file/Text.pdf] .....	25
Εικόνα 10 Τομή φράγματος βαρύτητας. 1: Στάθμη λίμνης. 2: Σχάρα (φίλτρο καθαρισμού νερού). 3: Υδροηλεκτρικός σταθμός. 4: Καταθλιπτικός σωλήνας [πηγή: cy/moa/wdd/Wdd.nsf/0/.../\$file/Text.pdf] .....	25
Εικόνα 11 Το θολωτό φράγμα του Ταυρωπού Καρδίτσας. [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε] .....	25
Εικόνα 12 Τύποι φραγμάτων. [πηγή: cy/moa/wdd/Wdd.nsf/0/.../\$file/Text.pdf] .....	25
Εικόνα 13 ΥΗΣ Καστρακίου (αγωγοί προσαγωγής, φράγμα) [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε.] .....	28
Εικόνα 14. Τμήματα ΥΗΣ Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε.] .....	29
Εικόνα 15 Υδρολογικός κύκλος [πηγή: el.wikipedia.org/wiki/Κύκλος_του_νερού] .....	29
Εικόνα 16. Καμπύλη διάρκειας [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	30
Εικόνα 17 Διαμόρφωση ενός υδροηλεκτρικού έργου [πηγή: users.sch.gr] .....	31
Εικόνα 18 Υδροστρόβιλος τύπου Pelton. [πηγή: .cnhydropower.com/hydropower-knowledge/category/pelton_turbine] .....	32
Εικόνα 19 Σχηματική απεικόνιση στροβίλου Pelton [πηγή: .cnhydropower.com/hydropower-knowledge/category/pelton_turbine] .....	33
Εικόνα 20 Διάταξη υδροστροβίλου Pelton οριζόντιου άξονα με 2 δέσμες, κατακόρυφου άξονα με 6 δέσμες. [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	34
Εικόνα 21 Τομή ακροφυσίου Pelton [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	35
Εικόνα 22 α) Δρομέας και σκαφίδια υδροστροβίλου Pelton, β) Σκαφίδιο δρομέα, γ) Εκτροπή δέσμης στα σκαφίδια [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	35
Εικόνα 23. α) Τύπου Francis, β) Τύπου Kaplan [πηγή: tpe.barrage.free.fr] .....	37
Εικόνα 24 Ιστορική εξέλιξη των πτερυγίων δρομέα για τον υδροστρόβιλο Francis .....	39
Εικόνα 25 Σχηματική αναπαράσταση Υδραυλικών συστημάτων που εμπεριέχουν Ρευστοδυναμικές μηχανές [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	40
Εικόνα 26 Σχηματική αναπαράσταση της σχέσης 15. [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	42
Εικόνα 27 Ροπή δύναμης ως προς σημείο [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	43
Εικόνα 28 Τρίγωνα ταχυτήτων [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	45
Εικόνα 29 Τρίγωνα ταχυτήτων [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης_Ρευστοδυναμικές_μηχανές] .....	47
Εικόνα 30 Συσχέτιση $n_s = f(H_K)$ υδροστροβίλων Francis με την ονομαστική διαθέσιμη υδραυλική πτώση .....	50
Εικόνα 31 Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου συναρτήσει του $n_q$ και $n_s$ .....	51
Εικόνα 32 Μεσημβρινή τομή δρομέα και τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου για ενδεικτικές τιμές του ειδικού αριθμού στροφών [πηγή: Δ. Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές] .....	55
Εικόνα 33 Διάγραμμα Απωλειών συναρτήσει του ογκομετρικού αριθμού στροφών ( $n_q$ ) .....	56

--	--	--

Εικόνα 34 Διάγραμμα απωλειών διαφόρων τμημάτων υδροστροβίλου Francis συναρτήσει του ύψους πτώσης. [πηγή: web.iitd.ac.in/.../mel346/mel346-21&22.p]Francis Turbines .....	56
Εικόνα 35 Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων συναρτήσει των φορτίων [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές] .....	57
Εικόνα 36. Χαρακτηριστικές λειτουργίας υδροστροβίλου συναρτήσει του ανοίγματος Α των ρυθμιστικών πτερυγίων για σταθερή υδραυλική πτώση Η [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές] .....	58
Εικόνα 37. Τομή πλήρους σχεδιασμού υδροστροβίλου Francis.[πηγή: Уроки аварии СШГЭС].....	59
Εικόνα 38 α)Μεταβολή των αδιάστατων παραμέτρων Ce και Cz συναρτήσει του nS, β) Κύριες διαστάσεις αγωγού απαγωγής υδροστροβίλου Francis [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές].....	61
Εικόνα 39 α)Μεσημβρινή τομή και κύριες διαστάσεις δρομέα β) Κύριες διαστάσεις του σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλου Francis [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές].....	62
Εικόνα 40 διαβάθμιση στατικής πίεσης και ταχύτητας στον Υδροστροβίλο Francis με την μέθοδο CFD. 62	
Εικόνα 41. Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας υδροστροβίλου. [πηγή:Francis Turbine_Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, CallenHecker].....	63
Εικόνα 42.α) Σύστημα by-pass β) βάνα εξισορρόπησης πίεσης [πηγή:valves typeconstr/hpge].....	63
Εικόνα 43 Υδραυλικό πλήγμα.[πηγή: Francis Turbines-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker] 64	
Εικόνα 44 Σύστημα Σερβομοτέρ με τα κινητά πτερόγυια. [πηγή: αρχείοΥΗΣ Καστρακίου].....	64
Εικόνα 45 Αναλυτικό σχέδιο Υδροστροβίλου Francis περιλαμβανομένου των βασικών στοιχείων .....	65
Εικόνα 46 Μηχανισμός κίνησης κινητών πτερυγίων (Σερβομοτέρ) [πηγή:Θεργο-24].....	65
Εικόνα 47 Έλεγχος ροής μέσω τις γωνίας ανοίγματος των κινητών πτερυγίων [πηγή: learn engineering, <a href="http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo">www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo</a> ] .....	66
Εικόνα 48 Ομοίωμα οδηγού πτερώγωσης σε στρόβιλο Francis(ανοικτή- κλειστή θέση) [πηγή:Θεργο-24] .....	66
Εικόνα 49. α) Σύστημα κίνησης κινητών πτερυγίων, β) τοποθέτηση κινητών πτερυγίων σε ΥΗΣ.....	67
Εικόνα 50 α) Τοποθέτηση δρομέα β) Κατασκευή τμημάτων Υδροστροβίλου Francis .....	68
Εικόνα 51 Μεσημβρινή τομή και κύριες διαστάσεις δρομέα .....	69
Εικόνα 52 Κατανομή δυνάμεων στο στροφέιο. [πηγή:Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker] .....	70
Εικόνα 53 Διαστασιολόγηση κελύφους δρομέα. [πηγή:Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker] .....	70
Εικόνα 54 Στροφέιο – πτερωτή υδροστροβίλου Francis, εισαγωγή νερού ακτινικά και εξαγωγή του αξονικά [πηγή: learn engineering, <a href="http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo">www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo</a> ] .....	72
Εικόνα 55 α) Ασκοούμενες δυνάμεις επάνω στα πτερόγυια. β)μορφή πτερόγιου [πηγή: learn engineering, <a href="http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo">www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo</a> ] .....	72
Εικόνα 56 Διαβάθμιση ταχυτήτων,(α) και πίεσης (β) ρευστού που αναπτύσσονται στο από το σημείο εισόδου στον δρομέα έως την έξοδό του στον αγωγό φυγής μέσω ανάλυσης CFD .[πηγή: <a href="http://cfdsupport.com/water-turbine-">cfdsupport.com/water-turbine-</a> ].....	72
Εικόνα 57 (α) παραδοσιακό στροφέιο (β)x-blade.....	73
Εικόνα 58 Σημείο σχεδιασμού Εκτός σημείου σχεδιασμού .....	74
Εικόνα 59 Ροή ρευστού κατά την πορεία του στον αγωγό εξαγωγής.....	74
Εικόνα 60 Αγωγός εξαγωγής [πηγή: learn engineering, <a href="http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo">www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo</a> ].....	75
Εικόνα 61. Μηχανολογικό σχέδιο Υδροστροβίλου Francis [πηγή: αρχείο ΥΗΣ Καστρακίου] .....	76
Εικόνα 62. α)Μεταβολή των αδιάστατων παραμέτρων Ce και Cz συναρτήσει του n <sub>s</sub> , β) Κύριες διαστάσεις αγωγού απαγωγής υδροστροβίλου Francis [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’].....	77
Εικόνα 63 Διατομή υδροστροβίλου Kaplan [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’] .....	78
Εικόνα 64 Υδροηλεκτρικό έργο με υδροστροβίλο τύπου Kaplan.[πηγή: Water Turbine   yokealjauza]....	79
Εικόνα 65 Τύποι φθορών τριβής. [πηγή: Norwegian University of Science and Technology] .....	81
Εικόνα 66 Μηχανισμοί φθοράς [πηγή: Norwegian University of Science and Technology] .....	82
Εικόνα 67 Σπηλαίωση σε πτερόγυια στροφέιου Francis. [πηγή: youtube.com/watch?v] .....	82
Εικόνα 68.(α). εγκατάσταση υδροστροβίλου ως προς την διώρυγα απαγωγής (β) δυνάμεις πίεσης επάνω στο πτερόγυιο του δρομέα. [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές].....	83
Εικόνα 69 εγκατάσταση υδροστροβίλου ως προς την διώρυγα απαγωγής.[πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές].....	84
Εικόνα 70. Συσχέτιση της παραμέτρου σπηλαίωσης σ <sub>κρ</sub> υδροστροβίλων συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών εξαρτωμένου του υλικού κατασκευής του δρομέα [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’].....	86
Εικόνα 71 (α).Ρωγμή σταθερού πτερυγίου στην βάση του (β).σπηλαίωση στο τελείωμα του πτερυγίου[πηγή: youtube.com/watch?v]	87

--	--	--

Εικόνα 72 Η διαφορά πίεσης είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό μιας δύναμης (F) και κατά συνέπεια περιστροφή του στροφείου, όπως και η διαφορά πίεσης για την ανάπτυξη σπηλαίωσης.....	87
Εικόνα 73 Διάγραμμα ανάπτυξης Τάσης ατμών συναρτήσεως θερμοκρασίας και πίεσης.....	87
Εικόνα 74 Διάγραμμα σπηλαίωσης extrados - intrados [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’] .....	89
Εικόνα 75 Μορφή στήλη σπηλαίωσης. [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’].....	91
Εικόνα 76 Ταλαντώσεις σε διάφορα τμήματα του στροβίλου. [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’] .....	92
Εικόνα 77 Νομογράφημα της εταιρείας Energotech .....	93
Εικόνα 78. Νομογράφημα της εταιρείας Udo-Leuschner .....	94
Εικόνα 79 Νομογράφημα της εταιρείας Andritz .....	94
Εικόνα 80 Ρυθμιστής στροφών, εξωτερικά οι ενδείξεις, εσωτερικά ο μηχανισμός.[πηγή: ΔΕΗ Α.Ε].....	95
Εικόνα 81 Ταμπλό ρυθμιστή στροφών αριστερά, θάλαμος ελαίου ψύξης δεξιά. .[πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	95
Εικόνα 82. Ρυθμιστής τάσης μονάδας. .[πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	97
Εικόνα 83 Γεννήτρια υδροστρόβιλου [πηγή: Ένεργο-24] .....	97
Εικόνα 84 Προσαρμογή άξονα γεννήτριας με το στροφείο υδροστρόβιλου Francis [πηγή: learn engineering, <a href="http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo">www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo</a> ] .....	97
Εικόνα 85 Τομή γεννήτριας υδροηλεκτρικού σταθμού [πηγή: Ένεργο-24] .....	99
Εικόνα 86.α) Γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας ως της το ρεύμα διέγερσης. β) Η καμπύλη μαγνήτισης της σύγχρονης γεννήτριας [πηγή: Stephen J. Chapman, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ”] .....	101
Εικόνα 87 Μετασχηματιστής ισχύος [πηγή: Voith Hydro, <a href="http://youtube.com/watch?v=pNx76qvT9EU">youtube.com/watch?v=pNx76qvT9EU</a> ].....	101
Εικόνα 88. α) Μια τριφασική συστοιχία μετασχηματιστών που αποτελείται από ανεξάρτητους μετασχηματιστές δημιουργώντας τριφασικό μετασχηματιστή, β) Η δεύτερη τεχνική είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά, επειδή παρουσιάζει μικρότερο βάρος και όγκο, είναι πιο φθηνή και λειτουργεί με κάπως μεγαλύτερη απόδοση. [πηγή: Stephen J. Chapman, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ”] .....	103
Εικόνα 89. Κρουστικό ρεύμα που οφείλεται στο ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή κατά την εκκίνηση. [πηγή: Stephen J. Chapman, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ”].....	106
Εικόνα 90. Πινάκίδα μετασχηματιστή διανομής. Προδιαγραφές, τάσης, συχνότητας, φαινόμενης ισχύος και ενδιάμεσων λήψεων [General Electric Company] .....	107
Εικόνα 91 Διάγραμμα συσχέτισης μετασχηματιστή ισχύος – βοηθητικού μετασχηματιστή .....	108
Εικόνα 92 Αχελώος ποταμός. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.] .....	109
Εικόνα 93 Πίνακας στοιχείων ΥΗΣ Καστρακίου.....	110
Εικόνα 94 Το φράγμα Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	111
Εικόνα 95. Χαρακτηριστικά Φράγματος ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε].....	111
Εικόνα 96 Απεικόνιση τομής φράγματος [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	112
Εικόνα 97. Τρεις λίμνες που απαρτίζουν το συγκρότημα Αχελώου. Χρήση τους σαν έργα πολλαπλού σκοπού. [πηγή: ΒΙΒΛΙΟ : ΑΧΕΛΩΟΣ του Νίκου Πέτρου] .....	113
Εικόνα 98 Χαρακτηριστικά λίμνης Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	113
Εικόνα 99. Ανάλυση ροής ύδατος ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε].....	114
Εικόνα 100. Σχέδιο Μηκοτομής σήραγγας εκτροπής, έξοδος [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	115
Εικόνα 101. Αγωγοί πτώσεις. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	116
Εικόνα 102. Τρόπος στήριξης και σύνδεσης Αγωγών πτώσεως [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε].....	116
Εικόνα 103. Γεωμετρία αγωγού προσαγωγής στην σύνδεση του στο σημείο υδροληψίας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	117
Εικόνα 104. Γεωμετρία Αγωγών πτώσεως [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	118
Εικόνα 105. Διάταξη αγωγού προσαγωγής – υδροστρόβιλου Francis – γεννήτριας – μετασχηματιστή-γερανογέφυρα [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε].....	119
Εικόνα 106. Απεικόνιση Υδροστρόβιλου Francis.[πηγή: Ένεργο-24] .....	121
Εικόνα 107. Σχηματική αναπαράσταση κάτοψης τεσσάρων μονάδων ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	122
Εικόνα 108. Μηχανισμός ρυθμιστή στροφών. Δεξαμενή αέρα και ελαίου υψηλής πίεσης [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	123
Εικόνα 109. Αυτόματος ρυθμιστής τάσης μονάδας. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε].....	124
Εικόνα 110. Τεχνικά χαρακτηριστικά αυτόματου ρυθμιστή τάσης μονάδας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	124
Εικόνα 111. Άνω μέρος γεννήτριας ΥΗΣ Καστρακίου . [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	125
Εικόνα 112. Υπόμνημα Γεννήτριας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε] .....	126

--	--	--

Εικόνα 113. πορεία ρεύματος παραγωγής από τους μετασχηματιστές στον χώρο του ΥΗΣ στον ανυψωτή τάσης και στον υποσταθμό [πηγή: Voith Hydro, youtube.com/watch?v=pNx76qVt9EU] .....	126
Εικόνα 114. Πορεία εναλλαγής μορφών ενέργειας σε έναν Υδροηλεκτρικό σταθμό. [πηγή: Ήνεργο-24] ..	128
Εικόνα 115. Τυπική διάταξη μελέτης υδραυλικής ενέργειας. [πηγή: Σημειώσεις Ρευστοδυναμικών Μηχανών ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας].....	129
Εικόνα 116. Διάγραμμα κατανομής όγκου νερού εισροής.....	130
Εικόνα 117. Σημεία εισόδου-εξόδου-αναρρόφησης και κατάθλιψης [πηγή: Voith Hydro].....	140

Πίνακας 1. Επιλογή βαθμού απόδοσης βάση του ειδικού αριθμού στροφών και για κάθε τύπο υδροστροβίλου	51
Πίνακας 2. Σχέσεις υπολογισμού γωνίας ανοίγματος κινητών πτερυγίων	68
Πίνακας 3. Υπολογισμός $\sigma_{cr}$ συναρτήσει του $n_s$ για υδροστροβίλους αντίδρασης	86
Πίνακας 4. Υπολογισμός $n_s$ συναρτήσει του $H$ για υδροστροβίλους δράσης/αντίδρασης	86
Πίνακας 5. Πινακίδα τεχνικών πληροφοριών όλων των στοιχείων του ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	110
Πίνακας 6 Τεχνικά στοιχεία σήραγγας εκτροπής [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	115
Πίνακας 7. Τεχνικά στοιχεία Υδροληψίας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	116
Πίνακας 8. Τεχνικά στοιχεία Υπερχειλιστή [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	120
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά γερανογέφυρας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	120
Πίνακας 10. Στοιχεία στροβίλου στον ΥΗΣ Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	121
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά Σύγχρονης Γεννήτριας. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	125
Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά μετασχηματιστή ισχύος ΥΗΣ [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	126
Πίνακας 13. Πίνακας εργασιών συντήρησης [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	127
Πίνακας 14. Υδρολογικά δεδομένα ΥΗΣ Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	131
Πίνακας 15. (συνέχεια πίνακα 2) [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	132
Πίνακας 16. Στοιχεία 4 μονάδων σχετικά με παραγόμενη ενέργεια και κατανάλωση νερού. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]	134
Πίνακας 17. Στοιχεία λειτουργίας 4 μονάδων	135
Πίνακας 18. Ταχύτητα αγωγού συναρτήσει του Ύψους Πτώσης [πηγή: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΑΣ, Ρευστοδυναμικές Μηχανές]	139
Πίνακας 19. Ιδιότητες του νερού [πηγή: Google]	142
Πίνακας 20. Πίνακας απωλειών σωληνώσεων [πηγή: Σημειώσεις ΘΨΚ1 ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας]	142
Πίνακας 21. Υπολογισμός Απωλειών.	143
Διάγραμμα Υπολογισμών 1. Συντελεστής χρησιμοποίησης νερού για παραγωγή .....	136
Διάγραμμα Υπολογισμών 2. Μέση ειδική Κατανάλωση νερού .....	136
Διάγραμμα Υπολογισμών 3. Φορτίο-Ισχύς.....	136
Διάγραμμα Υπολογισμών 4. Καμπύλη διάρκειας φορτίου .....	137
Διάγραμμα Υπολογισμών 5. Απόδοση ΥΗΣ Καστρακίου .....	137
Διάγραμμα Υπολογισμών 6. Παραγωγή ενέργειας ΥΗΣ Διάγραμμα Υπολογισμών 7. Εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα ΥΗΣ .....	138
Διάγραμμα Υπολογισμών 8. Κατανάλωση νερού ΥΗΣ.....	138
Διάγραμμα Υπολογισμών 9 Διάγραμμα στατικής πίεσης σε εγκατάσταση υδροστροβίλου. [πηγή: Σημειώσεις Ρευστοδυναμικών Μηχανών ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας].....	141
Διάγραμμα Υπολογισμών 10 Διάγραμμα απωλειών τμημάτων υδροστροβίλου Francis [πηγή: Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker] .....	143

--	--	--

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην μελέτη λειτουργίας και παραγωγής ενέργειας για τον Υδροηλεκτρικό Σταθμό Καστρακίου του Συγκροτήματος Αχελώου.

Σε μια εποχή που η χρήση συμβατικών πηγών και η εξάντληση αυτών αποτελούν τον κύριο λόγο περιβαλλοντικής ανησυχίας στον τομέα της ενέργειας, είναι όσο ποτέ άλλοτε αναγκαίο να απευθυνθούμε σε εναλλακτικές και ανανεώσιμες μορφές αυτής. Αυτό μας παρακίνησε ν' ασχοληθούμε στην εργασία μας με τη μελέτη λειτουργίας και τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας ενός Υδροηλεκτρικού Εργοστασίου και να περιγράψουμε τον τρόπο που μια τέτοια εγκατάσταση διαχειρίζεται το νερό με τις ελάχιστες δυνατές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η χώρα μας ευνοεί την ανάπτυξη και αξιοποίηση τέτοιου είδους εγκαταστάσεων λόγω του ανάγλυφου της ηπειρωτικής Ελλάδας (οροσειρές, πηγές, ποτάμια κτλ.). Είναι γεγονός ότι οι υδάτινοι πόροι εξαντλούνται λόγω της ραγδαίας αύξησης των καταναλώσεων, που απορρέει από τη μεγάλη οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των λαών.

Τα υδροηλεκτρικά είναι συνήθως έργα πολλαπλού σκοπού. Πρόκειται για εξαιρετικά μεγάλες επενδύσεις και για το λόγο αυτό η βέλτιστη χρήση τους είναι ένα ζήτημα πολύ σημαντικό για την οικονομία της χώρας, αλλά και για την ανάπτυξη νέων υδραυλικών εγκαταστάσεων πολλαπλών χρήσεων. Οι χρήσεις νερού που συνδυάζονται με την παραγωγή ενέργειας είναι: ύδρευση, βιομηχανική χρήση (ψύξη, κλιματισμός), άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία, ποτάμιες μεταφορές, αλιεία και αναψυχή. Ο καθορισμός της προτεραιότητας στις διάφορες χρήσεις είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως: ανάπτυξη, προτεραιότητες της χώρας, γεωγραφική θέση, μοντέλα ανάπτυξης κ.ά. Στη χώρα μας τα ΥΗΕ εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξυπηρετούν κυρίως την ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία και την παροχή βιομηχανικού νερού.

Ευχαριστούμε θερμά τους: κ. Σαλάππα Γεώργιο, Λάππα Γεώργιο, Σταράμο Αθανάσιο, Καλογερομήτρο Γεώργιο, Τσελίκα Κων/νο, Ζηνέλη Θεοφάνη και Μπιστιντζάνο Δημήτριο από τον ΥΗΣ Καστρακίου και την ΔΕΗ Α.Ε. για τις χρήσιμες πληροφορίες που μας παρέδωσαν με σκοπό τη χρήση τους στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες και στον κ. Λιαρόπουλο Γεώργιο από τον ΥΗΣ Γλαύκου του Συγκροτήματος Αχελώου για τις ουσιαστικές γνώσεις και επεξηγήσεις που μας μετέδωσε σχετικά με την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Επίσης, ευχαριστούμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Ανδρέα Βούρο για την έμπρακτη υποστήριξη όλη αυτή την περίοδο. Τέλος, τις οικογένειές μας, τους φίλους και όσους λοιπούς συνέβαλαν με την υπομονή και τη στήριξή τους στη διεκπεραίωση αυτού του έργου, τους τελευταίους έξι μήνες.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Χαντόλιας Δημήτριος

Γκοτσόπουλος Θεόδωρος



--	--	--

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της Πτυχιακής Εργασίας είναι η παρουσίαση της γενικής λειτουργίας ενός Υδροηλεκτρικού Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας που λειτουργεί με μονάδες Francis και η ανάλυση της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας μέσα από όλα τα επιμέρους τμήματα, στάδια της εγκατάστασης. Η ανάπτυξη του θέματος σχηματίζεται σε έξι ξεχωριστά κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στη διαχείριση των υδάτων, όταν πρόκειται για τα υδροηλεκτρικά έργα, με την έννοια της σπουδαιότητας τους ως φυσικός πόρος. Υπάρχουν διάφορα είδη ταμιευτήρων και τύπων σταθμών παραγωγής αναλογικά πάντα με τη δυναμικότητα ύδατος που παρέχεται στην εγκατάστασή μας.

Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματεύεται τα είδη των υδροστροβίλων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις και τα κριτήρια επιλογής αυτών ανά περίπτωση, με ιδιαίτερη ανάλυση για τον υδροστρόβιλο αντιδράσεως τύπου Francis και τα μέρη που τον απαρτίζουν. Επίσης, αναλύονται διεξοδικά οι φθορές υδροστροβίλων και ειδικά η σπηλαιώση, τα οποία αποτελούν ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης στον τομέα σχεδιασμού των στροφείων αλλά και της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης γενικότερα.

Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του ΥΗΣ Καστρακίου, και γίνεται εκτενής περιγραφή επιμέρους τμημάτων του όπως είναι ο Ρυθμιστής Στροφών, ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης καθώς επίσης η Σύγχρονη Γεννήτρια και ο Μετασχηματιστής Ισχύος.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στα επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης του ΥΗΣ Καστρακίου στο Συγκρότημα Αχελώου, τα οποία έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί βάσει επιστημονικής μελέτης σε θέματα στατικής, αντοχής και λειτουργικότητας, όπως το φράγμα, οι αγωγοί προσαγωγής, οι υδροστρόβιλοι Francis κτλ.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί την λεπτομερή ανάλυση των υπολογισμών για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας του Σταθμού. Σε αυτή λαμβάνονται υπόψη όλες οι επιμέρους παράμετροι που συμβάλλουν στη διαδικασία και επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, οπότε μιλάμε για μια προσομοίωση της λειτουργίας της εγκατάστασής μας σε πραγματικές συνθήκες.

Εν κατακλείδι, το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει την σημαντική συμβολή των ΥΗΣ της ΔΕΗ στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Δίκτυο.

### Συντομογραφίες

ΥΗΣ = Υδροηλεκτρικός Σταθμός

ΔΕΗ = Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού


## **ABSTRACT**

The purpose of the dissertation, is the presentation of the general operation, of a hydroelectric power station that works with Francis turbines and the analysis of the energy production process, through all the individual parts and stages of the installation. The analysis of the subject is taking part in six separate chapters.

The first chapter states water management when it comes to hydroelectric projects in the sense of their importance as a natural resource. We have various kinds and types of reservoir plants always proportional to the amount of water supplied to our plant.

The second chapter describes the types of turbines that are widely used in hydroelectric installations and their selection per case, with a special analysis of the Francis reaction type turbine and the parts that compose it. Also analyzed in detail the types of turbine wear and especially cavitation, which are particularly an interesting object of study in parts of rotor designment and hydropower installations in general.

The third chapter states the electromechanical equipment of HPP Kastraki, and there is an extensive description of its individual parts such as the Speed Regulator, the Automatic Voltage Regulator, as well as the Synchronous Generator and the Power Transformer.

The fourth chapter deals with the individual parts of the installation of HPP Kastraki in Acheloos Complex, which are designed and manufactured under scientific study on statics, stress resistance and functionality issues, such as the dam, the penstocks, the Francis turbines, etc.

The fifth chapter is a detailed analysis of the calculations for the Hydroelectric Power Generation of the plant. In this, all the parameters that contribute to the process and influence the final result are being taken into account, so we are talking about a simulation of the HPP operating under real conditions.

In conclusion, the sixth chapter refers to the contribution of PPC HPP at the National Interconnected Grid.

### **Abbreviations**

HPP = Hydropower Plant

PPC = Public Power Corporation

--	--	--

### ΕΤΥΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΞΗΣ ΥΔΩΡ

**ΥΨΙΛΟΝ (Υ)** (χωνί, τρόπο συλλογής),  
**ΔΕΛΤΑ (Δ)** (τρόπο αντιμετώπισης από την Δύναμη του με κατασκευή φράγματος τύπου ΔΕΛΤΑ – πεπλατυσμένη βάση, στενή κορυφή- πυραμίδες που διασώθηκαν από τον κατακλυσμό της Αιγιδος),  
**ΩΜΕΓΑ (Ω)** (Σχηματική απεικόνιση της Γαίας επί των Υδάτων, απέραντος ως Ωκεανός ) και τέλος  
**ΡΟ (Ρ)** ηχητικών γράμμα ροής- ρευστόν και ενέργειας υγρού ρέοντος μετά ήχου rrrrrr!!!!).

Τέσσερα μόλις γράμματα και έχουμε όλες τις βασικές πληροφορίες εις μίαν ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ των τεσσάρων γραμματικών κωδίκων με πληθώρα ζωτικών πληροφοριών περί του σηματοδοτούμενου ύδατος:

Τρόπο συλλογής, τρόπο προστασίας δια φράγματος τύπου ΔΕΛΤΑ, είναι απέραντο ως Ωκεανός και η Γαία επιπλέει επάνω του (αναλογία των  $\frac{3}{4}$  ύδατος- ξηράς) και τέλος είναι ρευστόν, υγρόν, περιέχον ενέργεια και ήχο!!!

--	--	--

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημασία των Υδροηλεκτρικών Σταθμών (ΥΗΣ) της ΔΕΗ Α.Ε. για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων της Ελλάδας είναι πάρα πολύ μεγάλη, καθώς τα περισσότερα από αυτά αποτελούν έργα πολλαπλού σκοπού, δηλ. χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ύδρευση, αρδεύσεις, αντιπλημμυρική προστασία, αναψυχή, ιχθυοκαλλιέργειες, αθλητικές δραστηριότητες και συμβάλλουν στην ήπια τουριστική ανάπτυξη.

Η διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων είναι ένα σημαντικό και πολύπλοκο πρόβλημα. Ιδιαίτερες δυσκολίες παρουσιάζει η διαχείριση του νερού των ταμιευτήρων που η χρήση τους είναι πολλαπλή. Η διαχείριση τότε επιβάλλεται να γίνεται με σύνεση και φειδώ ώστε και να καλύπτονται οι ανάγκες της χώρας σε νερό και παράλληλα να διατηρούνται τα απαραίτητα αποθέματα ασφαλείας.

Η εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών έργων της ΔΕΗ Α.Ε. (φράγματα, ταμιευτήρες, μονάδες παραγωγής, σταθμοί, υποσταθμοί, βοηθητικές εγκαταστάσεις, κλπ.) γίνεται με στόχο τη βέλτιστη λειτουργία των ΥΗΣ ως υδραυλικά έργα πολλαπλού σκοπού.

### 1.1 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ

Τα υδροηλεκτρικά έργα ταξινομούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα διαφέρουν σημαντικά από της μεγάλης κλίμακας σε ότι αφορά τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον.

- Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων περιορίζει τη μετακίνηση των ψαριών, της άγριας ζωής και επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής.
- Αντίθετα, τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια και η λειτουργία τους παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική όχληση. Για το λόγο αυτό, οι υδροηλεκτρικές μονάδες μικρότερης δυναμικότητας των 30 MW χαρακτηρίζονται ως μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα και συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Κατά τη λειτουργία τους, μέρος της ροής ενός ποταμού οδηγείται σε στρόβιλο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας και συνακόλουθα ηλεκτρικής μέσω της γεννήτριας. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού κατόπιν επιστρέφει στο φυσικό ταμιευτήρα ακολουθώντας τη φυσική της ροή.

Είναι ιδιαίτερα σημαντική η γνώση για τον ρόλο και τις διαφορές αυτών καθώς παίζουν μεγάλο ρόλο ανάλογα με το σκοπό που απαιτείται κάθε φορά.

#### Ø Πλεονεκτήματα

- Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις απαιτηθεί, σε αντίθεση με τους θερμικούς σταθμούς που απαιτούν σημαντικό χρόνο προετοιμασίας,
- Είναι μία "καθαρή" και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με τα προαναφερθέντα συνακόλουθα οφέλη (εξοικονόμηση συναλλάγματος, φυσικών πόρων, προστασία περιβάλλοντος),
- Μέσω των υδατοταμιευτήρων δίνεται η δυνατότητα να ικανοποιηθούν και άλλες ανάγκες, όπως ύδρευση, άρδευση, ανάσχεση χειμάρρων, δημιουργία υγροτόπων, περιοχών αναψυχής και αθλητισμού.

--	--	--

### Ø Μειονεκτήματα

- Μεγάλο κόστος κατασκευής φραγμάτων και εγκατάστασης εξοπλισμού, καθώς και ο συνήθως μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την αποπεράτωση του έργου,
- Η έντονη περιβαλλοντική αλλοίωση της περιοχής του έργου (συμπεριλαμβανομένων της γεωμορφολογίας, της πανίδας και της χλωρίδας), καθώς και η ενδεχόμενη μετακίνηση πληθυσμών, η υποβάθμιση περιοχών, οι απαιτούμενες αλλαγές χρήσης γης. Επιπλέον, σε περιοχές δημιουργίας μεγάλων έργων παρατηρήθηκαν αλλαγές του μικροκλίματος, αλλά και αύξηση της σεισμικής επικινδυνότητας τους.

## 1.2 Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ

Η συμβολή των μεγάλων Υδροηλεκτρικών Έργων (ΥΗΕ) στην ισόρροπη ανάπτυξη και στην ενεργειακή επάρκεια της χώρας, είναι λίγο πολύ γνωστή σε όλους. Παρά τις επιφυλάξεις που υπάρχουν και πρέπει να υπάρχουν όταν γίνονται σοβαρές παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον, δεν αμφισβητείται ότι τα ΥΗΕ -στις περισσότερες των περιπτώσεων- ομόρφυναν τη φύση και δημιούργησαν νέες, βελτιωμένες οικολογικές ισορροπίες.

Τα ΥΗΕ, είναι συνήθως έργα πολλαπλού σκοπού. Πρόκειται για εξαιρετικά μεγάλες επενδύσεις και για το λόγο αυτό η βέλτιστη χρήση τους είναι ένα ζήτημα πολύ σημαντικό για την οικονομία της χώρας, αλλά και για την ανάπτυξη νέων υδραυλικών εγκαταστάσεων πολλαπλών χρήσεων. Αυτό όμως προϋποθέτει, εκτός των άλλων, τον καθορισμό της μεθοδολογίας με την οποία θα προσεγγιστεί το δυσεπίλυτο πρόβλημα το καταμερισμού του κόστους στους επιμέρους χρήστες. Μια χρήσιμη και κατατοπιστική προσέγγιση του προβληματισμού αυτού, ο οποίος για τους περισσότερους δεν είναι ορατός με την πρώτη ματιά, επιχειρείται με το κείμενο που ακολουθεί. Ταυτόχρονα δίδονται χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση της πραγματικής φύσης και σημασίας αυτών των τόσο σημαντικών έργων. Το πόση μεγάλη σημασία έχει το νερό στη ζωή δεν χρειάζεται να τονιστεί. Το ζήτημα θίγεται με σκοπό να κατανοηθεί η πολυπλοκότητα της διαχείρισης του υδροδυναμικού της χώρας, που η βέλτιστη αξιοποίησή του απαιτεί ορθολογική εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών έργων ώστε παράλληλα με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας να ικανοποιούνται και οι διάφορες άλλες ανάγκες. Είναι γεγονός ότι οι υδάτινοι πόροι εξαντλούνται λόγω της ραγδαίας αύξησης των καταναλώσεων, που απορρέει από τη μεγάλη οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των λαών. Σε κάθε χώρα μελετώνται πλαίσια για την ολοκληρωτική και πολλαπλή αξιοποίηση των γλυκών νερών που διατίθενται. Παλαιότερα, για τις αρδεύσεις χρησιμοποιούνταν τα νερά των ποταμών που όμως, το ακανόνιστο των παροχών τους κυρίως κατά τους ξηρούς μήνες που αναπτύσσονται και οι περισσότερες καλλιέργειες, δημιουργούσε μεγάλες ελλείψεις. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του είδους αυτού, άρχισαν να κατασκευάζονται στη διάρκεια του 19ου αιώνα -με την εξέλιξη της τεχνικής- φράγματα και τεχνητές λίμνες.

Η κατασκευή ΥΗΕ άρχισε προς το τέλος του 19ου αιώνα, με εγκαταστάσεις που ανήκαν σε ιδιώτες. Βέβαια μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο σε πολλές χώρες οι ηλεκτρικές εταιρείες εξαγοράστηκαν από το κράτος και έγιναν δημόσιοι οργανισμοί. Οι εγκαταστάσεις αυτές εξυπηρετούσαν βασικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα όμως εξυπηρετούσαν και αρδευτικές ανάγκες και τη βελτίωση της παραγωγής στις καλλιεργούμενες εκτάσεις, διότι με τη ρύθμιση των παροχών των λεκανών, εξασφάλιζαν τις απαραίτητες παροχές νερού στις περιόδους ξηρασίας. Αργότερα κατασκευάστηκαν φράγματα για την τροφοδοσία συστημάτων ύδρευσης πληθυσμών και για τις ανάγκες βιομηχανικών συγκροτημάτων. Τελικά οι υδροηλεκτρικές μονάδες που εντάχθηκαν στα έργα αυτά,

--	--	--

αποδείχθηκαν εξαιρετικά χρήσιμες για την κάλυψη των αιχμών που παρουσιάζονται στα ηλεκτρικά συστήματα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων εξυπηρετούνται πολλαπλοί σκοποί.

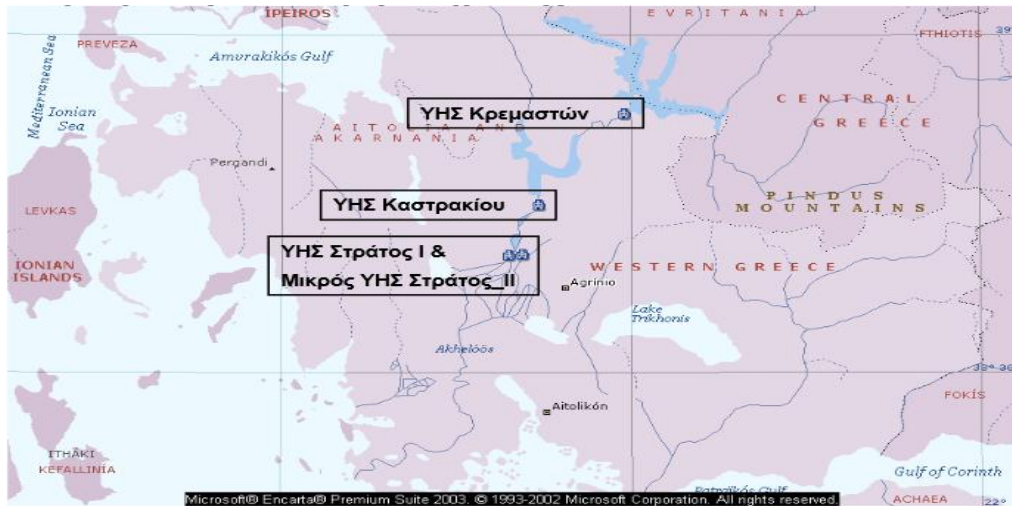
### **1.3 ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΚΟΠΟΥ.**

Πρέπει να τονιστεί ότι, για ορισμένες χρήσεις το νερό είναι αναντικατάστατο, όπως είναι για παράδειγμα η οικιακή χρήση. Σε άλλες περιπτώσεις όμως μπορεί εν μέρει να αντικατασταθεί αλλά με κάποιο κόστος. Η επιφάνεια των αρδευόμενων εκτάσεων μπορεί να μειωθεί και η γεωργική παραγωγή να αναπληρωθεί από παραγωγή άλλων περιοχών ή από ξερικές καλλιέργειες. Ακόμη, η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας μπορεί να αντικατασταθεί με θερμοηλεκτρική. Σε κάθε περίπτωση όμως το νερό μπορεί να χρησιμοποιείται όχι μόνον για κατανάλωση, αλλά να έχει διαδοχικές ή ταυτόχρονες χρήσεις για διαφορετικούς σκοπούς. Η ρύθμιση της παροχής των ποταμών που στοχεύει στην άμβλυση των μεταβολών των φυσικών παροχών, είναι γενικά ένα σοβαρό πλεονέκτημα για όλες τις χρήσεις.

Τις περισσότερες φορές κατά την πολλαπλή χρήση των υδάτων υπάρχουν αντιτιθέμενες επιδιώξεις και η ικανοποίηση όλων αυτών των χρήσεων είναι συνήθως ένα οξύ πρόβλημα. Ιδίως σε περιπτώσεις που υπάρχει ανεπάρκεια νερού θα πρέπει να συντονίζονται όλοι οι ενδιαφερόμενοι και κατά τη συνεργασία τους να κυριαρχεί η φρόνηση. Προφανώς, στο οικονομικό επίπεδο, θα πρέπει το κόστος κατασκευής και λειτουργίας να επιμερίζεται σε όλους.

Οι χρήσεις νερού που συνδυάζονται με την παραγωγή ενέργειας είναι: ύδρευση, βιομηχανική χρήση (ψύξη, κλιματισμός), άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία, ποτάμιες μεταφορές, αλιεία και αναψυχή. Ο καθορισμός της προτεραιότητας στις διάφορες χρήσεις είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως: ανάπτυξη, προτεραιότητες της χώρας, γεωγραφική θέση, μοντέλα ανάπτυξης κ.ά. Στη χώρα μας τα ΥΗΕ εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξυπηρετούν κυρίως την ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία και την παροχή βιομηχανικού νερού. Παρακάτω αναφέρεται ως παράδειγμα ο καταμερισμός ενός Υδροηλεκτρικού συγκροτήματος (Αχελώου) ως έργο πολλαπλού σκοπού.

--	--	--



ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ Α.Ε.  
ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ / ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Εικόνα 1. Τμήμα του συγκροτήματος Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.]

### Υδροηλεκτρικό Συγκρότημα Αχελώου YHS Κρεμαστών

Ο YHS Κρεμαστών είναι ο μεγαλύτερος Υδροηλεκτρικός Σταθμός της Ελλάδας

**Θέση:** Δυτική Στερεά Ελλάδα, Ν. Αιτωλοακαρνανίας  
**Σκοπός:** υδροηλεκτρική παραγωγή, αντιπλημμυρική προστασία  
**Έναρξη εμπορ. λειτ.:** 1966  
**Εγκατ. ισχύς:** 437,2 MW (4x109,3)  
Francis type turbines  
**Μέση ετήσ. Παραγ.:** 848 GWH  
**Φράγμα:** χωμάτινο, 165 m ύψος  
**Ωφελ. χωρητ. ταμ.:** 3300 m.c.m.



### Υδροηλεκτρικό Συγκρότημα Αχελώου YHS Καστρακίου

**Θέση:** Δυτική Στερεά Ελλάδα, Ν. Αιτωλοακαρνανίας  
**Σκοπός:** υδροηλεκτρική παραγωγή, άρδευση, ύδρευση  
**Έναρξη εμπορ. λειτ.:** 1969  
**Εγκατ. ισχύς:** 320 MW (4x80)  
Francis type turbines  
**Μέση ετήσ. Παραγ.:** 598 GWH  
**Φράγμα:** χωμάτινο, 96 m ύψος  
**Ωφελ. χωρητ. ταμ.:** 53 m.c.m.



--	--	--

## Υδροηλεκτρικό Συγκρότημα Αχελώου ΥΗΣ Στράτος I & Μικρός ΥΗΣ Στράτος II

Θέση: Δυτική Στερεά Ελλάδα,  
Ν. Αιτωλοακαρνανίας

Σκοπός: υδροηλεκτρική  
παραγωγή,  
άρδευση

Έναρξη εμπορ. λειτ.: 1989

Εγκατ. ισχύς: 150 MW

Francis type turb.

**6,2 MW**

**Tube-S type turb.**

Μέση ετήσ. Παραγ.: 237 GWH

Φράγμα: χωμάτινο,

26 m ύψος

Ωφελ. χωρητ. ταμ.: 11 m.c.m.



Εικόνα 2. Περιγραφή των τριών ΥΗΣ κατά μήκος του ποταμού Αχελώου. [πηγή: ΔΕΗ.Α.Ε]



--	--	--

## 1.4 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ

Ορισμένοι ΥΗΣ είναι επιφορτισμένοι με την εξυπηρέτηση μιας μόνο χρήσεως, η οποία καθορίζει τη λειτουργία τους και μόνον δευτερευόντως λαμβάνονται υπόψη άλλες πιθανές χρήσεις. Στις περιπτώσεις αυτές τα κριτήρια εκμετάλλευσης είναι απλά. Εξαρτώνται από τον κύριο στόχο, στον οποίο πρέπει να υπακούουν οι δευτερεύουσες χρήσεις. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι δευτερεύουσες χρήσεις βελτιώνουν τα συνολικά αποτελέσματα της συνολικής εκμετάλλευσης. Δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι, τα πλεονεκτήματα δεν είναι στενά αναλογικά με τον όγκο των νερών που χρησιμοποιούνται. Ένα σημαντικό ζήτημα που επηρεάζει καθοριστικά το όφελος είναι η ασφαλής διάθεση του νερού, δηλαδή η κάλυψη των αναγκών των χρηστών να είναι εξασφαλισμένη.

Το ζήτημα της βέλτιστης εκμετάλλευσης των ΥΗΣ πολλαπλού σκοπού παρουσιάζει δυσκολίες επειδή, όπως προαναφέρθηκε, οι χρήσεις έχουν αντικρουόμενες ανάγκες που μεγεθύνονται σε περιόδους ξηρασίας. Η τάση επηρεασμού της εκμετάλλευσης των ΥΗΣ σύμφωνα με τις προτεραιότητες που θέτει ο κάθε χρήστης σπάνια οδηγεί στη βέλτιστη συνολική χρήση. Είναι επομένως αναγκαίο να καθοριστούν οι βάσεις (κριτήρια) κατανομής των εξόδων (κόστους) της εκμετάλλευσης των ΥΗΣ στις διαφορετικές και επιμέρους χρήσεις. Να καθορίσουμε δηλαδή, μεταξύ των άλλων, τις συνθήκες λειτουργίας στις οποίες ορισμένοι χρήστες να αποζημιώνονται από άλλους, όταν εξαιτίας τους δεν θα απολαμβάνουν τις προβλεπόμενες παροχές.

Η εκμετάλλευση των ΥΗΣ πολλαπλού σκοπού στο βέλτιστο βαθμό είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί χωρίς να προκληθούν αδικίες σε χρήστες που συνέβαλαν στην κατασκευή τους. Σε περίπτωση αντικειμενικής αδυναμίας, θα έπρεπε να μην κατασκευάζονται έργα εξυπηρέτησης πολλαπλών σκοπών, στο βαθμό που η χρησιμοποίησή τους για ένα μόνο σκοπό είναι συμφέρουσα.

Στην Ελλάδα παρόλο που τα ΥΗΕ μελετώνται συνήθως ως έργα πολλαπλού σκοπού, η λειτουργία τους προσαρμόζεται συνήθως στις ανάγκες τρίτων προς τη ΔΕΗ χρηστών με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καταμερισμός σταθερού και λειτουργικού κόστους. Καίτοι υπάρχει σχετικός νόμος για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων (ν. 1739/87) κάτι τέτοιο δεν έχει συμβεί μέχρι σήμερα.

## 1.5 ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΣΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΑΛΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ

Το όφελος που προσφέρουν οι ΥΗΣ σε ένα Διασυνδεδεμένο Ηλεκτρικό Σύστημα το οποίο τροφοδοτείται κυρίως από θερμοηλεκτρικές μονάδες σταθερού φορτίου, είναι το γεγονός ότι, μπορούν να αναλαμβάνουν με ευελιξία τις αιχμές της ζήτησης που εμφανίζονται στο δίκτυο, απαλλάσσοντας έτσι τις τελευταίες από επώδυνες μεταβολές φορτίου. Για τον λόγο αυτό η αξία της ενέργειας που παράγεται από έναν ΥΗΣ είναι αντιστρόφως ανάλογη της έκτασης των περιορισμών που επιβάλλονται από τη ζήτηση του νερού για την εξυπηρέτηση τρίτων.

**Από πλευράς υδροηλεκτρικής παραγωγής** μπορούμε να κατατάξουμε τους ΥΗΣ σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

1. ΥΗΣ που εξυπηρετούν τις εκτός ηλεκτροπαραγωγής χρήσεις (π.χ. άρδευση), οι οποίες απαιτούν οι σταθμοί παραγωγής να βρίσκονται εκτός λειτουργίας για ορισμένες χρονικές περιόδους. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε αυτούς συνεισφέρει

--	--	--

απλώς στην εξοικονόμηση καυσίμων που καταναλώνουν οι θερμικοί σταθμοί και κάθε φορά που τίθενται εκτός λειτουργίας, τα φορτία τους πρέπει να αναληφθούν από άλλους σταθμούς του συστήματος. Στην κατηγορία αυτή υπάγεται ο ΥΗΣ Ν. Πλαστήρα στον ποταμό Ταυρωπό, ο οποίος σήμερα λειτουργεί σε συνάρτηση με τις αρδευτικές ανάγκες.

2. ΥΗΣ συντονισμένοι με τις χρήσεις οι οποίες έχουν ανάγκη συνεχούς κατανάλωσης νερού (ύδρευση, ναυσιπλοΐα). Οι συγκεκριμένοι ΥΗΣ μπορούν να συγκριθούν, ως προς τη λειτουργία τους, με ένα θερμικό σταθμό σταθερού φορτίου. Λειτουργούν υποχρεωτικά όλο το 24ωρο επειδή η χωρητικότητα του ταμιευτήρα τους είναι ασήμαντη. Τέτοιος είναι ο ΥΗΣ Λούρου κοντά στη Φιλιπιάδα.
3. ΥΗΣ με ταμιευτήρες ημερήσιας ή εβδομαδιαίας ρύθμισης, στους οποίους μπορούμε να επικεντρώσουμε τη λειτουργία του σταθμού τις ώρες που εμφανίζονται οι αιχμές των φορτίων του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος, φυσικά με τις δεσμεύσεις που επιβάλλουν οι άλλες χρήσεις και η συνολική επάρκεια του νερού (ΥΗΣ Στράτου, Ασωμάτων, Πλατανόβρυσης, **Καστρακίου**, και Σφηκιάς).
4. ΥΗΣ που τροφοδοτούνται από μεγάλους ταμιευτήρες ετήσιας ρύθμισης, στους οποίους η παραγωγή ενέργειας προέχει σε σχέση με τις άλλες χρήσεις που θεωρούνται δευτερεύουσες. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν συνήθως σύμφωνα με τις ανάγκες του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος (ΥΗΣ Κρεμαστών, Πολυφύτου, Θησαυρού, κ.ά.).

Φυσικά υπάρχουν και ΥΗΣ που η συντονισμένη εκμετάλλευσή τους δεν ταξινομείται στις παραπάνω περιπτώσεις. Η τελική αξία της παραγόμενης ενέργειας στις περιπτώσεις των τεσσάρων κατηγοριών πρέπει να αναπροσαρμόζεται με βάση τους εξής συντελεστές: για την ομάδα 1: 0.5, για την ομάδα 2: 1.0, για την ομάδα 3: 2.0, για την ομάδα 4: 2.5

Οι συντελεστές αυτοί αναδεικνύουν σε πιο βαθμό μπορεί να επηρεαστεί η τελική αξία της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των ΥΗΣ, αναλόγως των διευθετήσεων που ισχύουν για την εξυπηρέτηση διαφορετικών σκοπών από την παραγωγή ενέργειας.

## 1.6 ΟΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΩΣ ΕΡΓΑ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΚΟΠΟΥ

Στην συνέχεια εξετάζονται οι ωφέλειες ή οι επιπτώσεις που έχουν σχέση με την εκμετάλλευσή των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων και ιδιαίτερα των ταμιευτήρων ως έργα πολλαπλού σκοπού:

### Ø Ύδρευση

Οι ταμιευτήρες με την μεγάλη χωρητικότητά τους και το εξαιρετικής ποιότητας νερό εξυπηρετούν πολλές περιοχές εξασφαλίζοντας μεγάλες ποσότητες πόσιμου νερού σε περίπου 2,5 εκατομμύρια πολίτες (Άρτα, Πρέβεζα, Λευκάδα, Αγρίνιο, Καρδίτσα, Θεσσαλονίκη). Η διατήρηση της καλής ποιότητας του νερού ως αγαθό απαραίτητο για την ζωή και σε ανεπάρκεια διότι αυξάνεται η κατανάλωση και υποβαθμίζεται η ποιότητα, είναι ο πρώτος στόχος. Χρειάζονται καθημερινές μάχες απόκρουσης παντός είδους αιτήσεων για ανθρωπογενείς δραστηριότητες στις τεχνητές λίμνες (δρομολόγηση πλοίων, ιχθυοκαλλιέργειες, ναυταθλητισμός, αναψυχή κ.τ.λ.).

### Ø Αρδευση

Οι ταμιευτήρες της ΔΕΗ εξασφαλίζουν μεγάλες ποσότητες νερού την θερινή περίοδο με αιχμή τον Ιούλιο – Αύγουστο για την άρδευση εκτεταμένων περιοχών στα κατάντη των φραγμάτων. Υπολογίζεται ότι αρδεύονται περίπου 5 εκατομμύρια στρέμματα αυξάνοντας τόσο την αξία της περιουσίας των αγροτικών πληθυσμών όσο και το ετήσιο εισόδημα. Θα

--	--	--

μπορούσε να προσθέσει κανείς ότι τόσο μεγάλες αρδευόμενες περιοχές συμβάλλουν στην γενικότερη αναβάθμιση του περιβάλλοντος. Με τον τρόπο αυτό οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις ενισχύουν την απασχόληση μεγάλου μέρους του πληθυσμού και διατηρούν την γλωρίδα και πανίδα που χωρίς νερό θα καταστρεφόταν. Οι ταμιευτήρες αρδεύουν μεγάλες πεδιάδες όπως Αγρινίου, Μεσολογγίου, Άρτας, Θεσσαλίας, Ημαθίας, Πιερίας, Καβάλας, Ξάνθης κ.τ.λ.).

#### Ø Αντιπλημμυρική Προστασία

Η ΔΕΗ Α.Ε. με τα φράγματα που κατασκεύασε στα κυριότερα ποτάμια της Ελλάδας προσφέρει αντιπλημμυρική προστασία στα κατάντη και επέτρεψε την αξιοποίηση μεγάλων γόνιμων παραποτάμιων εκτάσεων εκατοντάδων χιλιάδων στρεμμάτων. Καλλιεργούνται χωρίς φόβο από πλημμύρες παραποτάμιες περιοχές κοντά στις εκβολές (Λάδωνας, Αχελώος, Αραχθός, Αλιάκμονας, Νέστος κ.τ.λ.).

#### Ø Ξηρασία – Λειψυδρία

Οι ταμιευτήρες των υδροηλεκτρικών σταθμών προφυλάσσουν πολλές περιοχές της χώρας από μεγάλες καταστροφές και αποφυγή δραματικών καταστάσεων λόγω παρατεταμένης ξηρασίας που εμφανίζεται στη Μεσόγειο. Αρκεί να θυμηθεί κανείς το 1990, ένα από τα ξηρότερα έτη του αιώνα, όπου η Αθήνα με τα 3 εκατομμύρια ανθρώπων, βρέθηκε μπροστά στο φάσμα της έλλειψης πόσιμου νερού. Εξετάσθηκε η λύση για μεταφορά νερού με δεξαμενόπλοια από τον Αχελώο. Βέβαια αυτή ήταν η μόνη εφικτή λύση διότι το έργο μεταφοράς νερού της Τριχωνίδας δεν μπορούσε να εκτελεστεί σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα και η Τριχωνίδα δεν είχε τόσες ποσότητες νερού. Το έτος 2000 και ιδιαίτερα το 2001 ήταν πολύ ξηρά. Με τη συνετή διαχείριση του νερού των ταμιευτήρων, τη συνεργασία των αρχών της πολιτείας (Υπουργεία Περιφέρειες, Νομαρχίες, Δήμοι) και με τα αποθέματα ασφάλειας καλύφθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό οι ανάγκες της Θεσσαλίας, Μακεδονίας και Θράκης, όπου οι υδάτινοι πόροι είναι σε ανεπάρκεια. Έτσι προστατεύεται το φυσικό περιβάλλον και προστατεύονται τα εισοδήματα εκατομμυρίων πολιτών.

#### Ø Επιπτώσεις

Τα φράγματα και οι ταμιευτήρες που δημιουργούνται κάνουν ανάσχεση πλημμυρών και κατακρατούν τα φερτά υλικά. Με τον τρόπο αυτό τροποποιούν το δέλτα των ποταμών και επιδρούν αρνητικά στα φυσικά οικοσυστήματα. Βέβαια δεν είναι ο μόνος λόγος υποβάθμισης αυτών των οικοσυστημάτων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα για καταπατήσεις που μειώνουν την παροχευτικότητα. Αυτό έχει ως συνέπεια την δυσκολία στη χρησιμοποίηση των υπερχειλιστών χωρίς να προκληθούν ζημιές στα κατάντη. Επίσης με την δημιουργία του ταμιευτήρα χάνονται αγροτικές εκτάσεις, χωριά πνίγονται, μνημεία ιστορικά σκεπάζονται από το νερό.

## 1.7 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ

Τα υδροηλεκτρικά έργα που κατασκευάζονται πάνω σε ποτάμια (χωρίς ταμιευτήρα), εκτρέπουν το κύριο ρεύμα του ποταμού διαμέσου ενός αγωγού προς το στρόβιλο που βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο. Όμοια, τα υδροηλεκτρικά έργα με ταμιευτήρα κατακρατούν την ποσότητα του ύδατος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε ένα σχετικά μεγάλο μέρος του ποταμού – οικοσυστήματος, το οποίο βρίσκεται κατάντη του έργου, να μειώνεται σημαντικά η παροχή του νερού με αρνητικές συνέπειες για τη γλωρίδα και την πανίδα. Για το λόγο αυτό η παροχή που οδηγείται στο στρόβιλο είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη κατά ένα ποσό που ονομάζεται οικολογική παροχή ( $Q_{eco}$ ) η οποία παρακάμπτει το στρόβιλο. Η οικολογική παροχή αποτελεί την ελάχιστη παροχή που πρέπει να διέρχεται κατά μήκος ενός ποταμού. Υπολογίζεται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παροχών, τις διατομές


του ποταμού και τους όγκους νερού που απαιτούνται για τη συντήρηση συγκεκριμένων ειδών και υδροβιότοπων. Στην Ελλάδα η οικολογική παροχή είναι ίση με το μεγαλύτερο από τις παρακάτω ποσότητες:

- Το 30% της μέσης παροχής του Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου και
- Το 50% του Σεπτεμβρίου

Σε καμία περίπτωση η οικολογική παροχή δεν πρέπει να είναι κάτω από 30 lt/sec.

## 1.8 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Τόσο από τις μετρήσεις όσο και από την εμπειρία στην εκμετάλλευση διαπιστώνεται ότι η δυτική πλευρά της Ελλάδας έχει διπλάσια έως τριπλάσια ποσότητα κατακρημνίσεων σε σχέση με την ανατολική πλευρά. Είναι ένα δεδομένο που πρέπει να λάβουμε υπόψη στις αποφάσεις για την κατασκευή των ΥΗΕ, για την εκμετάλλευσή τους αλλά και γενικότερα για την σωστή διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Η υγρή περίοδος στην Ελλάδα διαρκεί από την αρχή Οκτωβρίου μέχρι το τέλος Μαΐου όταν ολοκληρώνεται το λιώσιμο των αποθεμάτων χιονιού στις ορεινές περιοχές των λεκανών απορροής. Η στρατηγική της ΔΕΗ Α.Ε., όσον αφορά στα αποθέματα νερού στους ταμιευτήρες των ΥΗΣ, είναι να βρίσκονται στο μέγιστο στην αρχή της θερινής (ξηρής) περιόδου ώστε να καλύπτονται οι αυξημένες ανάγκες. Αναφέρεται ενημερωτικά ότι η συνολική ειδική κατανάλωση για την παραγωγή μιας ΚWH είναι περίπου  $2 \text{ m}^3$ . Στις επόμενες ενότητες θα αναφέρουμε τύπους διαχείρισης της υδραυλικής ενέργειας.

### 1.8.1 ΣΤΑΘΜΟΙ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Στους σταθμούς αυτούς γίνεται χρήση της υδραυλικής ενέργειας της φυσικής ροής του ποταμού.

- Σε μια τυπική εγκατάσταση, απαιτείται ένας μικρός υδραγωγός τροφοδότησης για να οδηγήσει το νερό στο(ους) στρόβιλο(ους) χρησιμοποιώντας τη φυσική ροή του ποταμού, με μικρή ή καμία αλλαγή του καναλιού του ποταμού και μικρή κατακράτηση νερού ενώ δεν απαιτείται ταμιευτήρας.
- Συνήθως χρησιμοποιούνται στρόβιλοι χαμηλής ταχύτητας τύπου Kaplan ή Francis με ρυθμιζόμενα περύγια για την καλύτερη εκμετάλλευση των διακυμάνσεων στις ροές.
- Οι στρόβιλοι σχεδιάζονται για να διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες νερού σε χαμηλές πιέσεις.



Εικόνα 3 ΥΗΣ φυσικής ροής [πηγή: <http://etoiledumarin.over-blog.com/article-en-travaux>]


### 1.8.2 ΣΤΑΘΜΟΙ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (ταμιευτήρα)

Οι περισσότεροι ΥΗΣ που υπάρχουν στην Ελλάδα είναι σταθμοί ταμιευτήρα.

- Οι ταμιευτήρες κατασκευάζονται προφανώς σε περιοχές που ευνοούνται από την μορφολογία του εδάφους.
- Το τυπικό εύρος χωρητικότητας των ταμιευτήρων είναι 1-10 km<sup>3</sup>.
- Ο σταθμός δεν είναι κατ' ανάγκη κοντά στο φράγμα, αλλά στη θέση εκείνη στην οποία έχουμε την μέγιστη δυνατή υψομετρική διαφορά.
- Το νερό από το κάτω μέρος του ταμιευτήρα μεταφέρεται με σωλήνες (καταθλιπτικοί σωλήνες) στον ΥΗΣ. Υπάρχουν συνήθως δύο αποφρακτικά όργανα. Ένα στο φράγμα, στο σημείο που το νερό μπαίνει στους σωλήνες και το οποίο χρησιμοποιείται για να σταματήσουμε τη ροή του νερού προκειμένου να εκτελεσθούν εργασίες συντήρησης ή επισκευές στους καταθλιπτικούς σωλήνες. Το άλλο είναι στο τέλος των καταθλιπτικών σωλήνων και χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να διακόψουμε τη ροή στο(ους) στρόβιλο(ους).
- Χρησιμοποιούνται στρόβιλοι Francis μέσης ταχύτητας ή Pelton υψηλής ταχύτητας.
- Στους ΥΗΣ αυτούς υπάρχει και ένας ταμιευτήρας απόσβεσης ή ηρέμησης για να αποσβένει τα κρουστικά κύματα που προκύπτουν στις απότομες αλλαγές ισχύος.



*Εικόνα 4 ΥΗΣ Καστρακίου με ταμιευτήρα [πηγή: αρχείο ΥΗΣ Καστρακίου]*

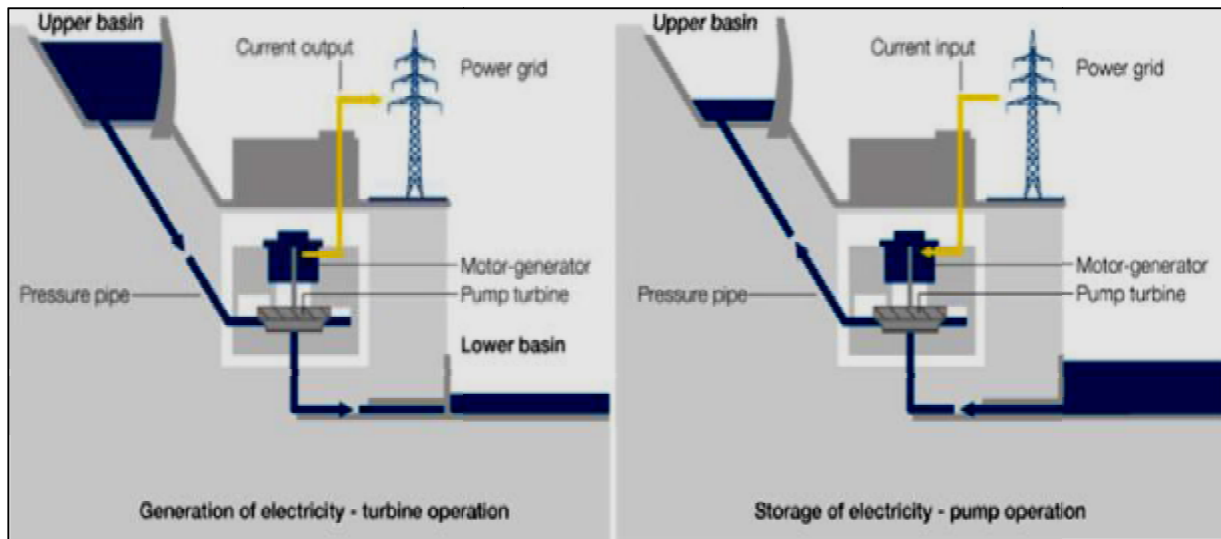
### 1.8.3 ΥΔΡΑΝΤΛΗΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

- Αποτελούνται από δύο ταμιευτήρες, τον *ταμιευτήρα άνω* και τον *ταμιευτήρα κάτω στάθμης* (ανάτη και κατάνη λίμνη), την *αντλία*, το *στρόβιλο* και τη *γεννήτρια*.
- Συνήθως ο στρόβιλος και η αντλία είναι ενσωματωμένοι σε μια υδρομηχανική, τον *αντλιοστρόβιλο*, ο οποίος ανάλογα με τη φορά περιστροφής του αντλεί νερό ή κινείται από το νερό.

Μεγάλες ποσότητες ενέργειας μπορούν να αποθηκευτούν μόνο με μηχανικό τρόπο και αυτός είναι ο λόγος της μεγάλης ανάπτυξης των υδραντλητικών σταθμών.

- Στα συστήματα αυτά, χρησιμοποιείται η περίσσεια φθηνή ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (π.χ. τη νύχτα, οπότε η γεννήτρια λειτουργεί σα σύγχρονος κινητήρας που κινεί το στρόβιλο σαν μια τεράστια αντλία) για την άντληση νερού από την κατάνη στην ανάτη λίμνη.
- Στις αιχμές ζήτησης του φορτίου ο σταθμός λειτουργεί σα συμβατικός ΥΗΣ παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια καθώς το νερό ρέει αντίστροφα, από την ανάτη στην κατάνη λίμνη. Τότε παίρνουμε πίσω την αποθηκευμένη ενέργεια.

--	--	--



Εικόνα 5 Διάγραμμα υδραντλητικού σταθμού [πηγή: Pumped-storage hydroelectricity]

## 1.9 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ

Οι ταμιευτήρες ανάλογα την χωρητικότητά τους σε σχέση με το ισοζύγιο της λεκάνης απορροής και τον τρόπο που χρησιμοποιούνται στην εκμετάλλευση διακρίνονται σε: Ετήσιους, Εβδομαδιαίους, Ημερήσιους και Αναρρύθμισης.

### 1.9.1 Ο ΕΤΗΣΙΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Σε μια αλυσίδα ΥΗΣ ενός ποταμού έχει μεγάλη χωρητικότητα. Η διακύμανση της στάθμης του είναι σημαντική λόγω των μεγάλων ποσοτήτων νερού που αποθηκεύονται. Επίσης, ο ταμιευτήρας αυτός χρησιμεύει για την ανάσχεση των πλημμυρών και την τροποποίηση της δίαιτας του ποταμού. Τέτοιοι ταμιευτήρες είναι των Κρεμαστών (Αχελώος), του Πολυφύτου (Αλιάκμονας), του Λάδωνα, του Πουρναρίου I, (Αραχθός), των Πηγών Αώου (Αώος), του Ν. Πλαστήρα (Ταυρωπός) και του Θησαυρού (Νέστος).



Εικόνα 6.Ετήσιος ταμιευτήρας ΥΗΣ Κρεμαστών στο σύστημα ταμιευτήρων του π. Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ.ΑΕ.]

--	--	--

### 1.9.2 Ο ΕΒΔΟΜΑΔΙΑΙΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Βρίσκεται συνήθως αμέσως μετά τον ετήσιο. Έχει μικρή σχετικά χωρητικότητα και διακύμανση στάθμης μέχρι 5 μέτρα περίπου. Τέτοιοι ταμιευτήρες είναι του **Καστρακίου (Αχελώος)** και της Σφηκιάς (Αλιάκμονας).



*Εικόνα 7. Εβδομαδιαίος ταμιευτήρας ΥΗΣ Καστρακίου στο σύστημα ταμιευτήρων του π. Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ.ΑΕ.]*

### 1.9.3 Ο ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Έχει μικρή χωρητικότητα που επαρκεί να αποθηκεύσει τις εισροές το πολύ για μία ημέρα, όταν λειτουργεί ο προηγούμενος σταθμός. Τέτοιοι ταμιευτήρες είναι του Στράτου (Αχελώος), των Ασωμάτων (Αλιάκμονας), της Πλατανόβρυσης (Νέστος) και του Άγρα (Βόδας).



*Εικόνα 8 Ημερήσιος / Αναρρυθμιστικός τ. ΥΗΣ Στράτου στο σύστημα ταμιευτήρων του π. Αχελώου [πηγή: ΔΕΗ.ΑΕ.]*

### 1.9.4 Ο ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ ΑΝΑΡΡΥΘΜΙΣΗΣ

Είναι μικρής χωρητικότητας (Εικόνα 8). Αποθηκεύεται νερό για λίγες ώρες ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες των άλλων χρήσεων (ύδρευση, άρδευση, περιβάλλον) χωρίς να απαιτείται η λειτουργία των ανάντη σταθμών κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν η λειτουργία είναι ασύμφορη διότι η αξία της KWH είναι μειωμένη. Τέτοιοι ταμιευτήρες είναι του Στράτου (Αχελώος), της Αγ. Βαρβάρας (Αλιάκμονας) και του Ν. Πλαστήρα (Ταυρωπός).


### 1.9.5 ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Τα φράγματα είναι έργα δαπανηρά, παρουσιάζουν όμως μακροπρόθεσμα μεγάλα οικονομικά οφέλη και για τον λόγο αυτό επιδιώκεται η κατασκευή τους. Ανάλογα με τον σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει η κατασκευή ενός φράγματος, μελετάται και βρίσκεται τόσο ο καλύτερος τύπος όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Είναι έργα ιδιόμορφα που δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν εφ' όσον το καθένα έχει τη δική του λειτουργία, τους δικούς του φυσικούς παράγοντες και το δικό του φυσικό περιβάλλον, παράμετροι που παίζουν σπουδαίο ρόλο για την θεμελίωση του. Μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

#### ∅ Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν:

- Φράγματα συγκέντρωσης νερού (επιφανειακοί ταμιευτήρες)
- Φράγματα εκτροπής. Εκτρέπουν προσωρινά ή μόνιμα τη ροή του νερού για εργασίες εν ξηρώ ή για διευθέτηση
- Φράγματα ανάσχεσης της ορμής είτε για περιορισμό της διάβρωσης είτε για τεχνητό εμπλουτισμό
- Φράγματα ρύθμισης για τον έλεγχο και την πρόληψη πλημμυρών

#### ∅ Ανάλογα με το σκοπό εκμετάλλευσης :

- Υδροηλεκτρικά
- Αρδευτικά
- Υδρευτικά
- Αντιπλημμυρικά
- Εμπλουτισμού υδροφόρων

Να σημειωθεί ότι τα φράγματα μπορεί να είναι διπλής ή και πολλαπλής σκοπιμότητας με συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριοποιήσεων ανά δύο ή περισσότερων.

#### ∅ Ανάλογα με το ύψος :

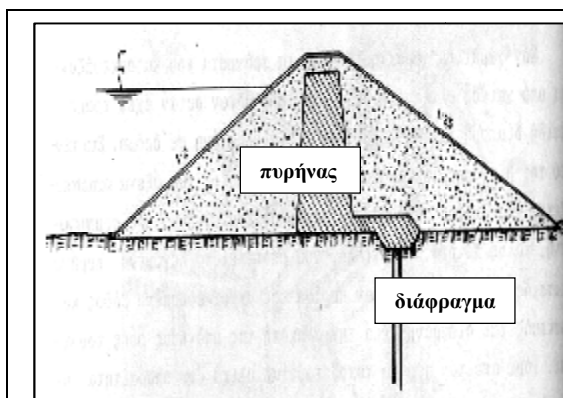
- Μικρά φράγματα ύψους <15m
- Μεγάλα φράγματα ύψους >15m ή  $5 < \text{Ύψος} < 15$  και χωρητικότητα νερού >3.000.000 m<sup>3</sup>
- Πολύ μεγάλα φράγματα ύψους >150m

#### ∅ Βασικές κατηγορίες ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους :

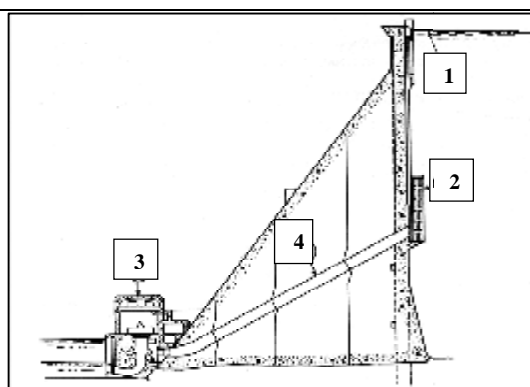
- **Άκαμπτα**
  - Φράγματα βαρύτητας
  - Αντηριδωτά φράγματα
  - Θολωτά φράγματα
- **Εύκαμπτα**
  - Χωμάτινα φράγματα
  - Λιθόρριπτα φράγματα



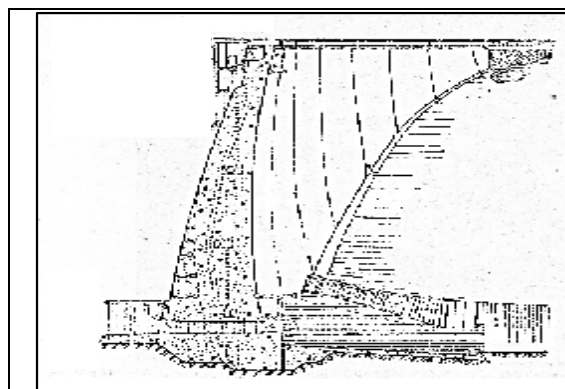
--	--	--



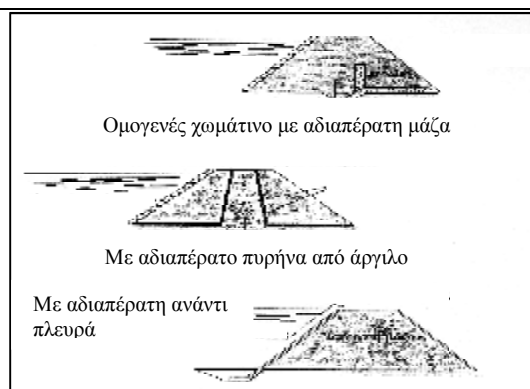
**Εικόνα 9 Διατομή χωμάτινου φράγματος [πηγή: cy/moa/wdd/Wdd.nsf/0/.../\$file/Text.pdf]**



**Εικόνα 10 Τομή φράγματος βαρύτητας. 1: Στάθμη λίμνης. 2: Σχάρα (φίλτρο καθαρισμού νερού). 3: Υδροηλεκτρικός σταθμός . 4: Καταθλιπτικός σωλήνας [πηγή: cy/moa/wdd/Wdd.nsf/0/.../\$file/Text.pdf]**



**Εικόνα 11 Το θολωτό φράγμα του Ταυρωπού Καρδίτσας. [πηγή: ΔΕΗ.ΑΕ]**



**Εικόνα 12 Τύποι φραγμάτων. [πηγή: cy/moa/wdd/Wdd.nsf/0/.../\$file/Text.pdf]**

### 1.9.6 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΤΑΣΕΩΝ

Οι δυνάμεις που δρουν σε ένα φράγμα είναι οι ακόλουθες:

- Το βάρος του σώματος του φράγματος ( $W$ ), που δρα στο κέντρο βάρους του σώματος του φράγματος.
- Οι ανυψωτικές δυνάμεις ( $u$ ). Οι δυνάμεις αυτές (πίεση του νερού των πόρων) μειώνουν το βάρος του φράγματος, καθώς ενεργούν αντίθετα από αυτό στο βυθισμένο τμήμα του σώματος του φράγματος.
- Οι υδροστατικές πιέσεις ( $P$ ). Αυτές οι δυνάμεις είναι διαφορετικές λόγω διαφοράς του φορτίου. Έτσι, έχουν αυξημένη τιμή στο εσωτερικό τμήμα της βάσης του φράγματος (πτέρνα), που μειώνεται συνεχώς όσο προχωρούμε προς το εξωτερικό τμήμα της βάσης του φράγματος (πόδας του φράγματος).
- Η ώθηση της μάζας του νερού ( $T$ ), που αρχίζει να εφαρμόζεται μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα και προκύπτει από την πλευρική ώθηση της μάζας του νερού. Η χειρότερη

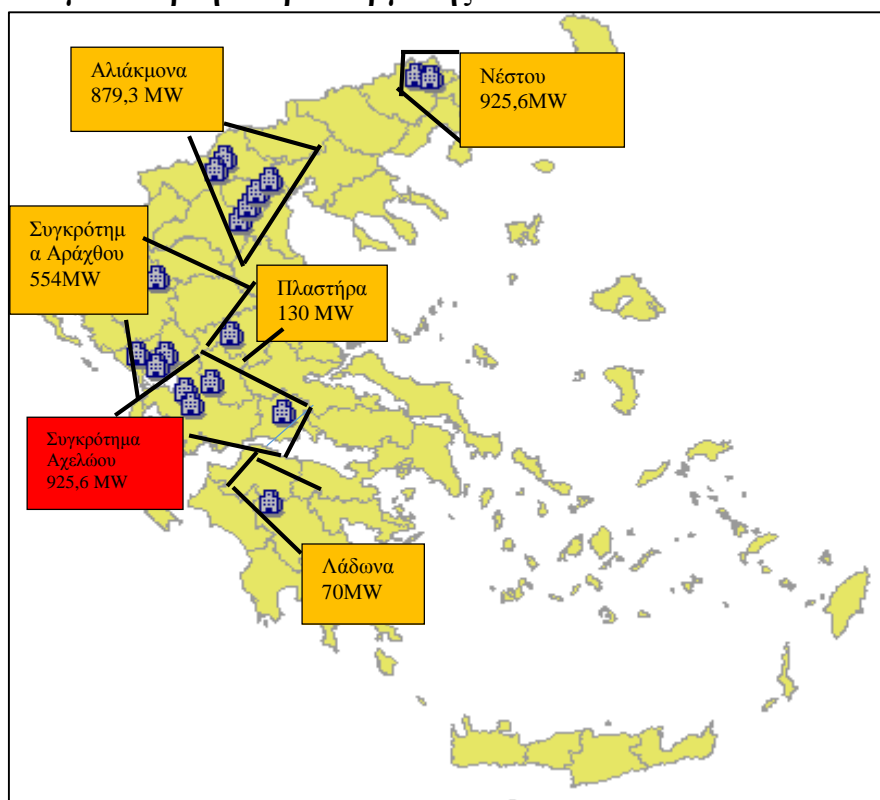
--	--	--

περίπτωση από πλευράς αυτών των ωθήσεων είναι όταν ασκούνται με οριζόντια διεύθυνση.

- Η συνισταμένη δύναμη (R). Η δύναμη αυτή θα πρέπει να έχει τέτοια κλίση που να την περιορίζει μέσα στη βάση του σώματος του φράγματος (η γωνία  $\delta$  πρέπει να έχει μικρή τιμή). Σε αντίθετη περίπτωση η συνιστώσα της δύναμης αυτής που ωθεί το φράγμα προς τα κατάντη θα είναι μεγάλη και συνεπώς το φράγμα θα οδηγηθεί σε αστοχία. Συνεπώς, το κύριο ζητούμενο είναι το διάνυσμα της δύναμης R να διατηρηθεί μέσα στη βάση του φράγματος με τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.
- Η ροπή ανατροπής. Η ροπή αυτή προκαλεί την ολίσθηση του φράγματος προς τα κατάντη και προκύπτει από το φαινόμενο ανατροπής (ανύψωση στην πτέρνα και πίεση προς τα κάτω στο δάκτυλο του φράγματος) που είναι συνέπεια της μικρής κλίσης του διανύσματος της δύναμης R, δηλαδή της μεγάλης γωνίας  $\delta$ .
- Δυναμικές φορτίσεις. Εκτός από τις στατικές φορτίσεις υπάρχουν και οι δυναμικές που επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός τόσο σημαντικού έργου. Οι δυνάμεις αυτές προκύπτουν από δονήσεις, όπως π.χ. από το νερό του ταμιευτήρα, ή από σεισμική δράση .

## 1.10 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

### Ø Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ



Στη δυτική και βόρεια Ελλάδα υπάρχει ιδιαίτερα πλούσιο δυναμικό υδατοπτώσεων λόγω της διαμόρφωσης λεκανών απορροής και των σημαντικών βροχοπτώσεων

- Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 3.060 MW
- Η Μέση Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας είναι 4.000-5.000 GWh
- Η μέση συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 8-10%

--	--	--

- Η ενέργεια που προέρχεται από ΥΗΣ καλύπτει ηλεκτρικά φορτία αιχμής.
- Τα τρία μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα είναι στα Κρεμαστά (437 MW), στο Θησαυρό (384 MW) και στο Πολύφυτο (375 MW)
- Υπάρχει μεγάλη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης υδροηλεκτρικών σταθμών

#### Ø Γενικά

Σε σχέση με τη λειτουργία ενός ΥΗΣ, μας ενδιαφέρουν τα εξής:

1. Η δυνατότητα των Μονάδων παραγωγής να μπορούν, οποιαδήποτε στιγμή χρειαστεί, να τεθούν χωρίς προβλήματα σε λειτουργία και να αποδώσουν στο Δίκτυο τη μέγιστη ισχύ τους.
2. Η βέλτιστη διαχείριση των εισροών και αποθεμάτων νερού στους ταμιευτήρες έτσι ώστε, χωρίς την εμφάνιση κινδύνων για ανθρώπους, εγκαταστάσεις και περιβάλλον, να πετυχαίνουμε την καλύτερη δυνατή ενεργειακή εκμετάλλευση του νερού, καλύπτοντας παράλληλα και τις υποχρεώσεις μας σε παροχή νερού για περιβαλλοντικούς λόγους και αρδεύσεις

**Ιδανικές συνθήκες φόρτισης** μιας Υδροηλεκτρικής Μονάδας (ΥΗΜ) έχουμε όταν:

- Η ΥΗΜ παράγει τη ζητούμενη ενέργεια υπό σταθερό, ονομαστικό φορτίο (ελάχιστη ειδική κατανάλωση – μέγιστος βαθμός απόδοσης) και
- Οι εκκινήσεις της ΥΗΜ είναι οι ελάχιστες δυνατές.

Οι παραπάνω συνθήκες εξασφαλίζουν τη βέλτιστη, από ενεργειακή άποψη, χρήση του νερού και την ελάχιστη φθορά του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της Μονάδας. Σε σχέση με τη λειτουργία των ΥΗΣ, πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες:

1. Τις στάθμες των ταμιευτήρων και τις -μη προβλέψιμες- εισροές νερού, σε σχέση με την ασφάλεια των φραγμάτων, την ανάσχεση των πλημμυρών, την αποφυγή υπερχειλίσης και τη λειτουργία των ΥΗΜ με την ελάχιστη ειδική κατανάλωση.
2. Τις υποχρεωτικές εκροές για περιβαλλοντικούς, αρδευτικούς ή άλλους λόγους, που συνεπάγονται την υποχρέωση, από μέρους των διαχειριστών, της διατήρησης ικανών αποθεμάτων νερού.

#### 1.10.1 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΥΗΕ

- Γρήγορη παραλαβή και απόρριψη φορτίου, και κάλυψη των αιχμών της ζήτησης
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Δεν υπάρχει υποβάθμιση του φυσικού πόρου
- Πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- Βελτίωση του φυσικού περιβάλλοντος (δημιουργία λίμνης και υδροβιότοπου)
- Μηδενικές εκπομπές ρύπων
- Χρήση του νερού και για άλλες ανάγκες (άρδευση, ύδρευση, περιβαλλοντική)
- Έργα υποδομής που συμβάλλουν στην ανάπτυξη της περιοχής
- Παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ενεργειακής απόδοσης για ΑΠΕ
- Μεγάλη αξιοπιστία των υδροστροβίλων
- Παραγωγή ενέργειας χωρίς διακυμάνσεις
- Θέσεις εργασίας
- Χαμηλή έκθεση σε μεταβολές τιμών ενέργειας




*Εικόνα 13 ΥΗΣ Καστρακίου (αγωγοί προσαγωγής, φράγμα) [πηγή: ΔΕΗ.ΑΕ.]*

### 1.10.2 ΤΥΠΟΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

- Υπαίθριος (εξωτερικά φαίνεται το κάλυμμα των μονάδων και η γερανογέφυρα)
- Ημι-υπαίθριος (εξωτερικά φαίνεται μόνο η γερανογέφυρα)
- Ημι-υπαίθριος στεγασμένος (καλυμμένη και η γερανογέφυρα)
- Υπόγειος.

### 1.10.3 ΟΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

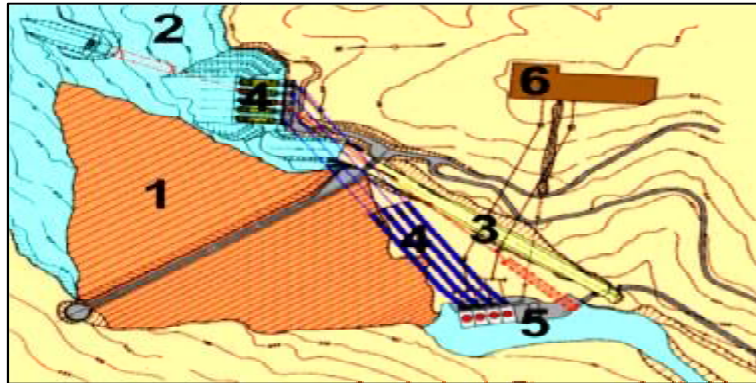
Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις έχουν μεγάλη έκταση ανάλογα με το μέγεθος του ποταμού και το σχέδιο εκμετάλλευσης του νερού της λεκάνης απορροής. Ύστερα από μετρήσεις και έρευνες γίνεται η προμελέτη έργων αξιοποίησης ενός ποταμού, η μελέτη, η κατασκευή και τέλος αρχίζει η εκμετάλλευση του έργου.

Κύρια τμήματα ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι το Φράγμα, ο Ταμιευτήρας, ο Εκχειλιστής ή Υπερχειλιστής, η Υδροληψία, οι Σήραγγες, ο Αγωγός Προσαγωγής / Απαγωγής του νερού, το Εργοστάσιο Παραγωγής, ο Υποσταθμός ανύψωσης τάσεως και οι Γραμμές μεταφοράς.

- Ø **Το φράγμα (1)** κατασκευάζεται σε επιλεγμένη τοποθεσία (στένεμα) του ποταμού. Υπάρχουν πολλά είδη φραγμάτων και χωρίζονται ανάλογα το υλικό με το οποίο κατασκευάζονται (πέτρα, σκυρόδεμα, χώμα και άλλα υλικά). Επίσης, ανάλογα με το ύψος τους, διακρίνονται σε μεγάλα, μεσαία και μικρά.
- Ø **Ο Ταμιευτήρας (2)** σχηματίζεται μετά την έμφραξη της σήραγγας εκτροπής. Η έκταση και η χωρητικότητά του εξαρτώνται από την της λεκάνης απορροής του ποταμού και από το ύψος του φράγματος.
- Ø **Εκκενωτής πυθμένα (3)** είναι τα επιμέρους έργα ή τμήματα του φράγματος που εξασφαλίζουν την ασφάλεια του σε έκτακτες περιπτώσεις όπως είναι οι μεγάλες πλημύρες ή κάποιο άλλο συμβάν που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ένα φράγμα (σεισμοί, γεωλογικά προβλήματα, κατολισθήσεις, κ.τ.λ.).
- Ø **Η Υδροληψία, οι Σήραγγες / Αγωγοί Προσαγωγής - Απαγωγής νερού (4)**, είναι τα έργα που οδηγούν το νερό από τον ταμιευτήρα στο σταθμό παραγωγής και μετά την διέλευσή του από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη κοίτη του ποταμού κατάντη ή στον επόμενο ταμιευτήρα (ανάλογα με την περίπτωση).
- Ø **Το Εργοστάσιο Παραγωγής (5)** είναι το κτίριο που περιέχει τις μονάδες παραγωγής, τους πίνακες ελέγχου και τον βοηθητικό εξοπλισμό που χρειάζεται για την λειτουργία του. Μπορεί να είναι *υπόγειος, υπαίθριος, ημιυπαίθριος*.
- Ø **Ο Υποσταθμός Υψώσεως Τάσεως (6)** βρίσκεται κοντά στο εργοστάσιο. Εκεί είναι εγκατεστημένοι οι μετασχηματιστές ισχύος, το κτίριο ελέγχου και άλλος βοηθητικός

--	--	--

εξοπλισμός. Επίσης στον υποσταθμό βρίσκονται οι διακόπτες των γραμμών που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια και αποτελούν τμήμα του εθνικού συστήματος μεταφοράς υψηλής τάσεως 150 KV και 380 KV.



Εικόνα 14. Τμήματα ΥΗΣ Καστρακίου[πηγή: ΔΕΗ.ΑΕ.]

## 1.11 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Το νερό κάνοντας τον « κύκλο του » στη φύση έχει δυναμική ενέργεια, όταν βρίσκεται σε περιοχές με υψηλό υψόμετρο, η οποία μετατρέπεται σε κινητική, όταν το νερό ρέει προς χαμηλότερες περιοχές. Τα υδροηλεκτρικά έργα εκμεταλλεύονται την ενέργεια του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη χρήση υδροηλεκτρικών τουρμπινών παράγει την υδροηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή φραγμάτων και η συγκέντρωση νερού περιορίζει τη μετακίνηση των ψαριών, της άγριας ζωής και επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα. Τα μικρής κλίμακας συστήματα τοποθετούνται δίπλα σε ποτάμια και κανάλια και έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον οικοσύστημα. Υδροηλεκτρικές μονάδες λιγότερες των 30 MW σε μέγεθος χαρακτηρίζονται μικρής κλίμακας και θεωρούνται ανανεώσιμες πηγές. Φυσικά μόνο σε περιοχές με σημαντικές υδατοπτώσεις, πλούσιες πηγές και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατόν να κατασκευαστούν υδατοταμιευτήρες. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται, χρησιμοποιείται μόνο συμπληρωματικά με άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας, σε ώρες αιχμής. Στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια ικανοποιεί το 10% των ενεργειακών μας αναγκών.



Εικόνα 15 Υδρολογικός κύκλος [πηγή: el.wikipedia.org/wiki/Κύκλος\_του\_νερού]

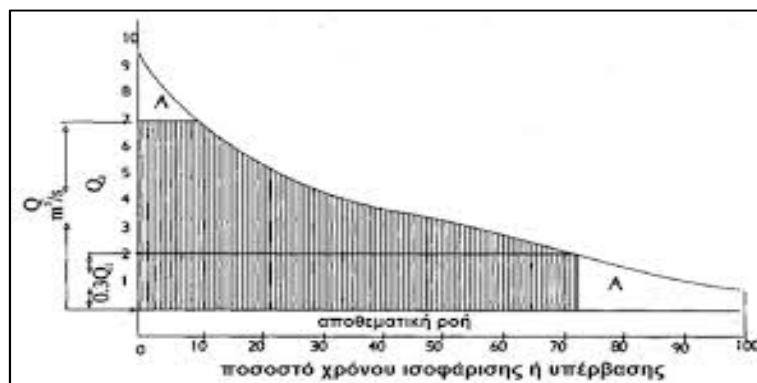
--	--	--

### Ø ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Για την εκτίμηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ένα υδροηλεκτρικό έργο που θα μπορούσε να εγκατασταθεί στη ροή ενός ποταμού, θα πρέπει να υπάρχει χρονοσειρά δεδομένων της μέσης ημερήσιας ροής του ποταμού, για μεγάλη σχετικά χρονική περίοδο, ικανή ν' αναπαραστήσει την πραγματική ποσότητα της φυσικής ροής και να μειωθούν τα σφάλματα στους υπολογισμούς λόγω μεταβλητότητας. Επειδή σπάνια υπάρχουν τόσο μακροχρόνιες μετρήσεις στα σημεία που είναι δυνατόν να εγκατασταθούν οι σταθμοί παραγωγής, πρέπει να γίνονται αναγωγές απ' τα σημεία των ποταμών στα οποία υπάρχουν μετρήσεις (τουλάχιστον 20 ετών) με βάση στοιχεία απ' τη γεωγραφία της περιοχής ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και δεδομένα από περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά (κλίμα, γεωργία, βλάστηση, ανθρώπινη δραστηριότητα, κτλ.).

Με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων ή μετρήσεων είναι δυνατόν να παραχθούν αντιπροσωπευτικές χρονοσειρές της μέσης ημερήσιας ροής ενός ποταμού σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η γραφική παράσταση της χρονοσειράς για ένα έτος ονομάζεται ετήσιο υδρογράφημα.

Απ' το υδρογράφημα μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη διάρκειας παροχής που αποτελεί και το σημαντικότερο στοιχείο για την εκτίμηση του δυναμικού αλλά και για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού έργου. Η καμπύλη διάρκειας παροχής δίνει το ποσοστό του χρόνου  $t$  του έτους όπου η παροχή του ύδατος ισούται ή υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή της ροής ( $Q$ ).



Εικόνα 16 . Καμπύλη διάρκειας [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

Η μορφή της καμπύλης διάρκειας παροχής μπορεί από μόνη της να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την προτεινόμενη εγκατεστημένη ισχύ, τον αριθμό των μονάδων καθώς και ενδείξεις για την οικονομική βιωσιμότητα του ΥΗΣ. Για παράδειγμα η καμπύλη διάρκειας παροχής μπορεί να φανερώσει εάν το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ετήσιας παροχής εμφανίζεται για μικρό χρονικό διάστημα (πλημμυρική παροχή) ή αντίθετα εάν η παροχή είναι σχετικά σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα.

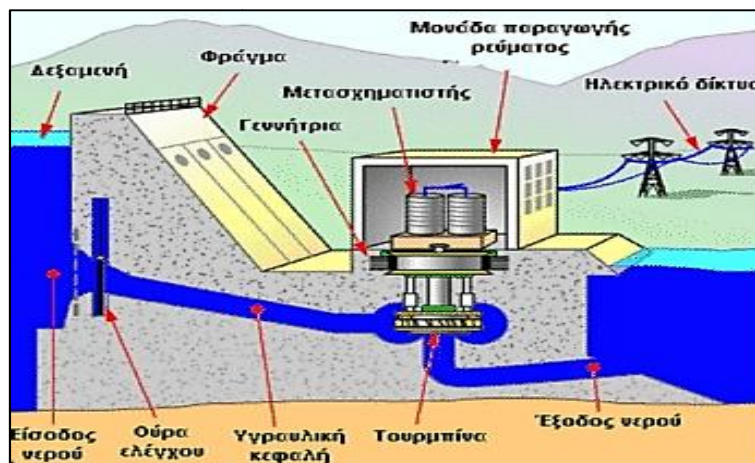
## 2 ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΑΩΝ

Οι υδροστρόβιλοι είναι οι μηχανές μέσω των οποίων μετατρέπεται η ενέργεια του υγρού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, εκτός κάποιων πολύ ειδικών περιπτώσεων, το διακινούμενο υγρό είναι το φυσικό νερό ενώ η ενέργεια που διαθέτει είναι η δυνητική ενέργεια που εκφράζεται από την στάθμη του ως προς την στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή η οποία επιδιώκεται να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια μέσω του υδροστρόβιλου είναι ανανεώσιμη καθώς προέρχεται από μια φάση του υδρολογικού κύκλου, τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις). Κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η δράση του ηλίου, οπότε συνάγεται ότι η υδραυλική ενέργεια προέρχεται και αυτή από την ηλιακή ενέργεια.

Μέρος της ποσότητας του νερού που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις και την τήξη των χιονιών σε μια υδρολογική λεκάνη αποτελεί το επιφανειακό νερό των ποταμών και υδατορεμάτων γενικότερα. Το νερό χάρη στον νόμο της βαρύτητας ρέει προς την χαμηλότερη επιφάνεια μέχρι την κατάληξη του στην θάλασσα. Κατά την φυσική αυτή ροή στην κοίτη του υδατορέματος, η δυνητική ενέργεια του νερού συνεχώς υποβαθμίζεται και μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω των μηχανισμών των υδραυλικών απωλειών. Εάν το νερό μιας φυσικής ροής συλλεχθεί σε μια υψηλότερη στάθμη  $Z_E$  οδηγηθεί σε μια χαμηλότερη στάθμη  $Z_A$  αφού διέλθει μέσω ενός υδροστρόβιλου γίνεται δυνατή η μετατροπή της ανά μονάδα μάζας ενέργειας:

$$g \times (Z_E - Z_A)$$

της διερχόμενης παροχής σε μηχανική ενέργεια αφού αφαιρεθούν πάσης φύσεως απώλειες.



Εικόνα 17 Διαμόρφωση ενός υδροηλεκτρικού έργου [πηγή: users.sch.gr]

Επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια, δηλαδή κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο, δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης της μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας κατ' ευθείαν συζευγμένη στην άτρακτο του υδροστρόβιλου. Για τον λόγο αυτό το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω του οποίου η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ονομάζεται Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ). Γίνεται επίσης φανερό ότι για να είναι δυνατή αξιόλογη παραγωγή μηχανικής-ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να συνυπάρχουν τόσο σημαντική ποσότητα επιφανειακών υδάτων, (βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις), όσο και σημαντικές υψομετρικές διαφορές (έντονο ανάγλυφο τόπου), ώστε να είναι μεγάλη η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του νερού.

--	--	--

Για την μετατροπή της ενέργειας του νερού έχουν κατασκευαστεί διάφοροι τύποι υδροστροβίλων με τους οποίους ανάλογα την περίπτωση της συλλογής του νερού (φράγματα, ποταμοί, χείμαρροι), το ύψος πτώσεις που έχουμε διαθέσιμο, εγκαθιστούμε τον ανάλογο τύπο υδροστροβίλου. Παρακάτω θα αναλυθούν οι κατηγορίες υδροστροβίλων ως προς την περίπτωση που έχουμε.

Οι υδροστροβίλοι ανάλογα με τον βαθμό αντιδράσεως της περωτής διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- υδροστροβίλους **δράσεως** (impulse turbines)
- υδροστροβίλους **αντιδράσεως** (reaction turbines)

## 2.1 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΔΡΑΣΕΩΣ

Οι υδροστροβίλοι δράσεως (βαθμός αντίδρασης ίσος με μηδέν), είναι μερικής προσβολής και, σε κάθε χρονική στιγμή, μόνο ένα τμήμα της περωτής συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Η στατική πίεση δεν μεταβάλλεται μεταξύ εισόδου και εξόδου της περωτής. Ο μόνος τύπος υδροστροβίλου δράσεως που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστροβίλος **τύπου Pelton**. Πήρε το όνομά του από τον Αμερικάνο L. A. Pelton το 1889, ο οποίος τον εφεύρε. Οι υδροστροβίλοι τύπου Pelton χρησιμοποιούνται κυρίως για **μεγάλα ύψη πτώσεως 30-1500m** και **παροχές 0.01-5m<sup>3</sup>/s**. Η απόδοση τους είναι της τάξης του 90%.



*Εικόνα 18 Υδροστροβίλος τύπου Pelton. [πηγή: [.cnhydropower.com/hydropower-knowledge/category/pelton-turbine](http://cnhydropower.com/hydropower-knowledge/category/pelton-turbine)]*

Όπως αναφέρθηκε οι υδροστροβίλοι δράσεως είναι υδροστροβίλοι μερικής προσβολής. Δημιουργείται ελεύθερη δέσμη νερού που προσπίπτει στο σύστημα των περυγίων. Ο υδροστροβίλος δράσεως μετατρέπει όλη τη διαθέσιμη ενέργεια, λόγω πίεσεως, σε κινητική πριν το νερό προσπέσει στα σκαφίδια του δρομέα προσπίπτει μόνο επί του τμήματος της περιφέρειας του δρομέα, ούτως ώστε να μην υφίσταται καμία μεταβολή η στατική πίεση επί του δρομέα.

Σε περιπτώσεις πολύ υψηλής ενέργειας ανά μονάδα μάζας του ρευστού και σε συνδυασμό με μικρές σχετικά παροχές είναι προτιμότεροι για διάφορους οικονομοτεχνικούς λόγους η διαμόρφωση τέτοιων στροβίλων.



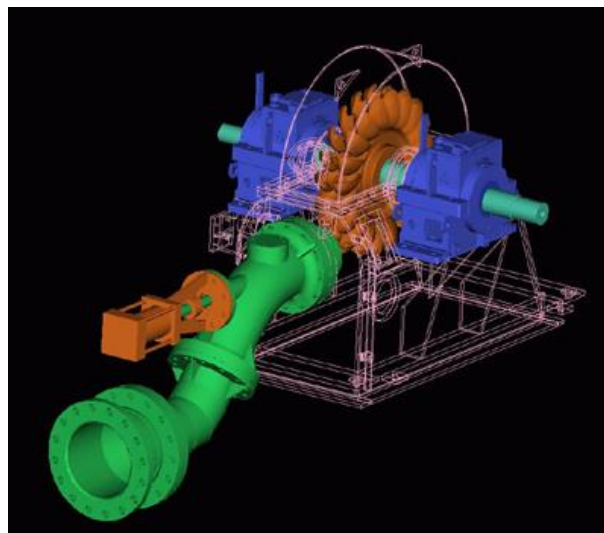
--	--	--

Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους είναι προτιμότερη η διαμόρφωση στροβίλων μερικής προσβολής στις μεγάλες τιμές ενέργειας του ρευστού ανά μονάδα μάζας είναι οι ακόλουθοι:

- **Η ταχύτητα της ροής** είναι πολύ υψηλή, το οποίο σε συνδυασμό με τις μικρές παροχές, άρα τις μικρές διατομές, έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των απωλειών λόγω τριβής στο εσωτερικό της μηχανής, άρα τη μείωση του βαθμού απόδοσης.
- **Η τιμή της στατικής πίεσης** είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα να γίνεται προβληματική η αντοχή του τμήματος εισόδου εάν αυτό ήταν μορφής σπειροειδούς κελύφους (περίπτωση υδροστροβίλου Francis) το οποίο αποτελεί και το ογκωδέστερο τμήμα της μηχανής. Στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton μόνο το τμήμα του ακροφυσίου τροφοδοσίας (που είναι μικρό σε μέγεθος) υπόκειται σε σημαντική τιμή της στατικής πίεσης.
- **Η σημαντική διαφορά της στατικής πίεσης** στον δρομέα θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των ογκομετρικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής εάν αυτή ήταν ολικής προσβολής

Για τους λόγους αυτούς λοιπόν είναι προτιμότερη η διαμόρφωση ενός στροβίλου δράσεως και συγκεκριμένα ενός υδροστροβίλου τύπου Pelton. Οι υδροστροβίλοι Pelton κατασκευάζονται για πολύ μικρές ισχύεις (της τάξεως του KW) έως πολύ μεγάλες (της τάξεως των εκατοντάδων MW).

Το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου Pelton αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε μηχανική, σχηματίζοντας το καθένα δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στον δρομέα, δίνοντας σε αυτόν μια ώθηση, κατά την περιφερειακή διεύθυνση, που δημιουργεί την κινητήρια ροπή. Φυσικά ο δρομέας είναι τοποθετημένος κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η δέσμη του νερού, μετά την πρόσπτωσή της σε αυτόν, να πέφτει με τη βαρύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας φυγής.

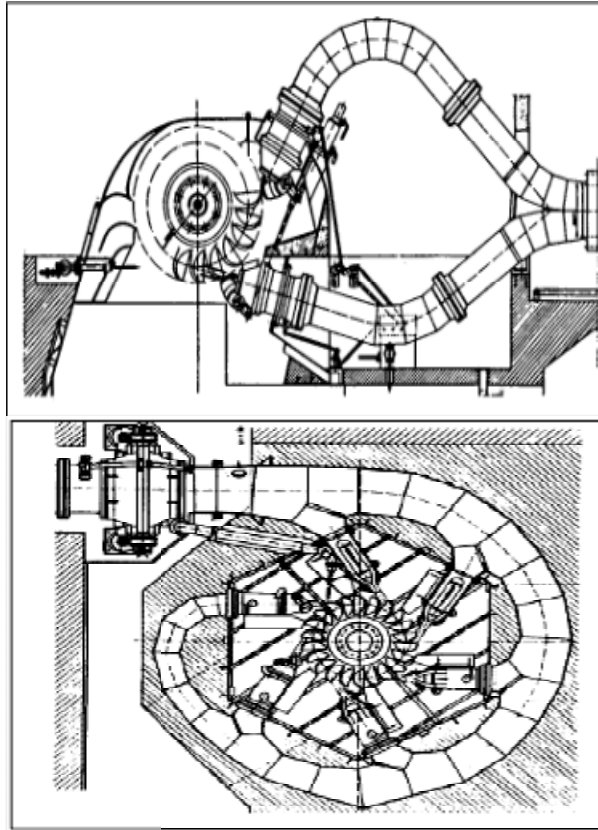


*Εικόνα 19 Σχηματική απεικόνιση στροβίλου Pelton [πηγή: [.cnhydropower.com/hydropower-knowledge/category/pelton-turbine](http://cnhydropower.com/hydropower-knowledge/category/pelton-turbine)]*

Ο άξονας του δρομέα μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην κατακόρυφη διάταξη το βάρος της γεννήτριας και του στροφείου της γεννήτριας παραλαμβάνεται από ωστικό έδρανο. Στους υδροστροβίλους Pelton με περισσότερες δέσμες προτιμότερη είναι η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε όλα τα ακροφύσια να μη βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και να μην παρενοχλείτε η λειτουργία τους από τα απόνερα των σκαφιδιών.

--	--	--

Στην εικόνα 20 δίνονται διατάξεις υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα με δύο και περισσότερες δέσμες.



*Εικόνα 20 Διατάξη υδροστροβίλου Pelton οριζόντιου άξονα με 2 δέσμες, κατακόρυφου άξονα με 6 δέσμες.  
[πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]*

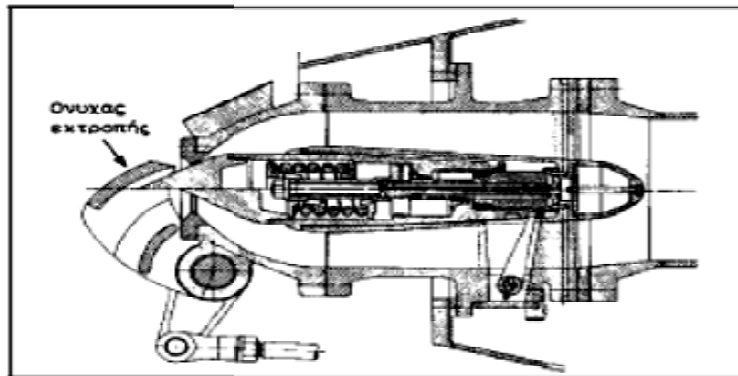
**Τα κύρια μέρη ενός υδροστροβίλου Pelton είναι:**

- **Ο μηχανισμός ελέγχου παροχής.** Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από δύο επιμέρους μηχανισμούς. Σκοπός τους είναι ο έλεγχος της εισερχόμενης παροχής στον δρομέα. Ο πρώτος μηχανισμός αποτελείται από μια βελόνη η οποία βρίσκεται στο άκρο ενός μεταλλικού εμβόλου και μπορεί να ολισθαίνει εντός ενός ακροφυσίου. Το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου Pelton αρχίζει από τη σφαιρική βάνα, στο άκρο του αγωγού προσαγωγής, και καταλήγει στο ή στα ακροφύσια τροφοδοσίας.

Στην Εικόνα 21 δίνεται τομή ακροφυσίου Pelton: η ρύθμιση της παροχής επιτυγχάνεται μέσω βελόνης η οποία μετακινείται κατά τον άξονα του ακροφυσίου μέσω υδραυλικού, συνήθως, συστήματος

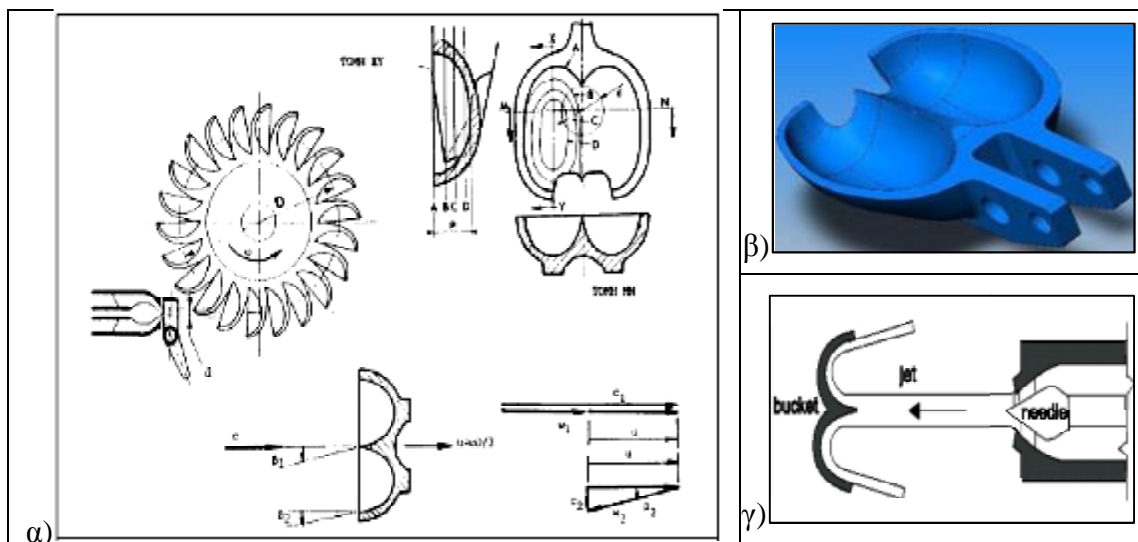
Με τη μετακίνηση της βελόνης μεταβάλλεται η διατομή διέλευσης της παροχής, η διάμετρος της δέσμης και άρα μεταβάλλεται αντίστοιχα η παροχή. Η όλη κατασκευή του ακροφυσίου είναι πολύ στιβαρή λόγω της μεγάλης τιμής της στατικής πίεσης και των μεγάλων ταχυτήτων στη διατομή εξόδου του ακροφυσίου. Για την περίπτωση γρήγορης απόρριψης του φορτίου υπάρχει όνυχας εκτροπής της δέσμης (μεταλλική επιφάνεια), αμέσως μετά τη διατομή εξόδου του ακροφυσίου, αυτός είναι ο δεύτερος μηχανισμός ελέγχου παροχής. Ο όνυχας εκτρέπει τη δέσμη η οποία δεν προσπίπτει πλέον στον δρομέα και στη συνέχεια η παροχή της μειώνεται (μέσω κλεισίματος της βελόνης) με ρυθμό που έχει υπολογιστεί έτσι ώστε η υπερπίεση λόγω του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος να μην ξεπερνά τις επιτρεπόμενες τιμές

--	--	--



Εικόνα 21 Τομή ακροφυσίου Pelton [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

- **Ο δρομέας και τα σκαφίδια.** Ο δρομέας Pelton αποτελείται από έναν κυκλικό δίσκο που στην περιφέρειά του φέρει σκαφίδια τοποθετημένα συμμετρικά, η διαμόρφωση των οποίων δίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 22 α) Δρομέας και σκαφίδια υδροστροβίλου Pelton, β) Σκαφίδιο δρομέα, γ) Εκτροπή δέσμης στα σκαφίδια [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

Ο δρομέας κατασκευάζεται είτε ολόσωμος, είτε τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και προσαρμόζονται σε αυτόν μέσω κοχλίωσης και κωνικής ασφάλειας. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από τη ροή, κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην περίπτωση φυσικά ολόσωμου δρομέα, ολόκληρος ο δρομέας κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διάμετρος του δρομέα είναι συνάρτηση του πλήθους και των διαστάσεων των σκαφιδίων, ενώ το πλήθος των σκαφιδίων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20-22. Η διατομή ενός σκαφιδίου παρουσιάζεται στην εικόνα 23α. Κάθε σκαφίδιο αποτελείται από δύο ημικυκλικά κύπελλα τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με ένα μεταλλικό διαχωριστικό (splitter). Η δέσμη του νερού προσκρούει επί του διαχωριστικού και διαμοιράζεται στα δύο τμήματα. Τα κύπελλα είναι κατασκευασμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι δέσμες του νερού να εξέρχονται από τα σκαφίδια με τη μεγαλύτερη δυνατή μεταβολή της κατεύθυνσής τους, η οποία είναι της τάξης των  $165^\circ$ . Οι υπόλοιπες  $15^\circ$  αποτρέπουν τις δέσμες που εξέρχονται να προσκρούσουν στην πίσω επιφάνεια του αμέσως εξερχόμενου σκαφιδίου. Η χρήση διπλών κυπέλλων γίνεται για λόγους εξισορροπήσεως των

--	--	--

δυνάμεων που αναπτύσσονται στα κύπελλα. Για την ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων και συνεπώς και ισχύος είναι δυνατόν να υπάρχουν παραπάνω από μια δέσμες οι οποίες θα προσπίπτουν στον δρομέα.

- **Το περίβλημα.** Το περίβλημα του δρομέα δεν συμμετέχει στην υδραυλική μηχανική συμπεριφορά του νερού, αλλά αποτρέπει το νερό να χύνεται στον περιβάλλοντα χώρο, προστατεύει από τυχόν ατυχήματα και περιορίζει το νερό να κατευθυνθεί στην διώρυγα φυγής.
- **Υδραυλικό φρένο.** Στην περίπτωση που χρειαστεί να σταματήσει να παράγει ισχύ ο υδροστρόβιλος Pelton η βαλβίδα εισόδου θα κλείσει και συνεπώς δεν θα υπάρχει δέσμη νερού. Επειδή ο δρομέας θα διατηρήσει για κάποιο χρονικό διάστημα την κεκτημένη ταχύτητα του, το υδραυλικό φρένο τον υποβοηθάει να σταματήσει να περιστρέφεται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το φρένο αυτό είναι μια δέσμη νερού η οποία εξέρχεται από

ένα μικρό ακροφύσιο και προσκρούει στην πίσω επιφάνεια των σκαφιδίων επιβραδύνοντάς έτσι την περιστροφική τους κίνηση.

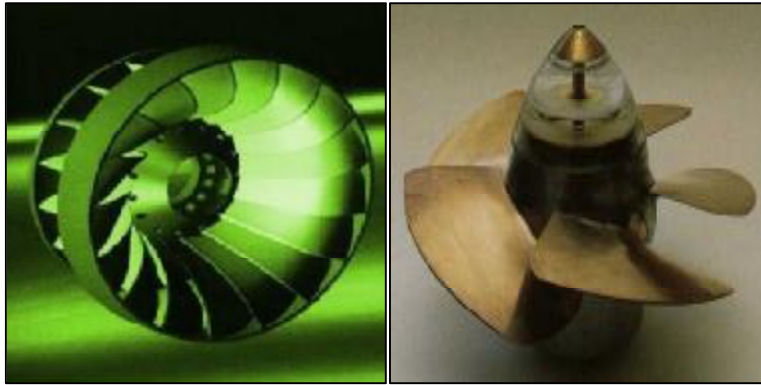
**Ο αυτόματος έλεγχος υδροστροβίλου Pelton.** Η λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού απαιτεί την έναρξη ή την παύση λειτουργίας της μονάδας, καθώς και την μεταβολή της ισχύος της σύμφωνα με το φορτίο, την παροχή ή το ύψος πτώσεως. Όλες αυτές οι λειτουργίες πραγματοποιούνται με τη βοήθεια ενός συστήματος ελέγχου, σκοπός του οποίου είναι η σωστή λειτουργία της μηχανής υπό οποιοδήποτε φορτίο. Ο παραπάνω έλεγχος επιτυγχάνεται με τη διατήρηση σταθερής περιστροφικής ταχύτητας του δρομέα της μηχανής και η τιμή της να είναι ίση με τη σχεδιαστική. Επίσης ο έλεγχος περιλαμβάνει την άριστη κατανομή του φορτίου στις περισσότερες μηχανές που λειτουργούν και επιτρέπει την ταχεία παύση της λειτουργίας της μηχανής σε περίπτωση υπερθέρμανσης των στροφείων ή ελαττωματικής λειτουργίας του συστήματος λιπάνσεως της μηχανής. Όταν πέφτει το φορτίο της γεννήτριας η ταχύτητα του δρομέα αυξάνει. Συνεπώς, η παρέμβαση του αυτόματου ελέγχου συνίσταται για τη μείωση της περιστροφικής ταχύτητας και αυτό επιτυγχάνεται με την μείωση της εισερχόμενης παροχής στη μονάδα. Αντίθετα όταν το φορτίο αυξάνει, η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται και ο σκοπός του μηχανισμού είναι η αύξηση της εισερχόμενης παροχής στη μονάδα.

## 2.2 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΣ

Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρη η πτερωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά. Η στατική πίεση μεταβάλλεται (μειώνεται) μεταξύ εισόδου κι εξόδου της πτερωτής. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως που έχουν επικρατήσει είναι ο υδροστρόβιλος τύπου **Francis**, για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης (**H=20-300m περίπου**) και διάφορες παροχές, και ο υδροστρόβιλος τύπου **Karlan** για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης (**H<15m περίπου**) και μεγάλες παροχές, βολβοειδής (bulb), σωληνωτός (tube), δακτυλίου κ.λπ.

Από την κατάταξη αυτή γίνεται φανερή η διαφοροποίηση που σχετίζεται με τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση:

- **Ακτινικής και μικτής ροής (τύπου Francis)** κατάλληλοι για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης (**H=20-300m περίπου**) και παροχές  $0,15-10\text{m}^3/\text{s}$
- **Αξονικής ροής (τύπου Karlan.)** κατάλληλοι για την αξιοποίηση μικρών υδραυλικών πτώσεων (**H<50m περίπου**) και παροχές  $0,5-50\text{m}^3/\text{s}$

*Εικόνα 23. α) Τύπου Francis, β) Τύπου Kaplan [πηγή: [tre.barrage.free.fr](http://tre.barrage.free.fr)]*


Από κατασκευαστικής πλευράς, χωρίς να υπάρχει παρά μικρή επίπτωση σε ορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά, μπορεί να γίνει διάκριση σε υδροστροβίλους:

- **οριζοντίου άξονα**
- **κατακόρυφου άξονα**

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης στηρίζονται σε ένα διαφορετικό σχεδιασμό, όπου το ρεύμα του νερού περνάει συνεχώς μέσα από ολόκληρη την περιφέρεια του υδρο-στροβίλου, και εξέρχεται αξονικά. Η ροή γίνεται δια μέσω της πτερωτής με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης και γι' αυτό οι πτερωτές τους είναι ολικής προσβολής, δηλαδή λειτουργούν ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό το ρευστό παρέχει μια σταθερή ώθηση στον δρομέα, αντίθετα με τους υδροστροβίλους δράσεως όπου υπάρχει μια σειρά από διαδοχικές κρούσεις επάνω στους κάδους του τροχού. Οι κύριοι τύποι υδροστροβίλων αντιδράσεως είναι ο υδροστρόβιλος Francis ακτινικής και μικτής ροής και οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής όπως ο τύπος Kaplan οι οποίοι εικονίζονται παρακάτω:

### 2.2.1 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΜΙΚΤΗΣ ΡΟΗΣ (FRANCIS)

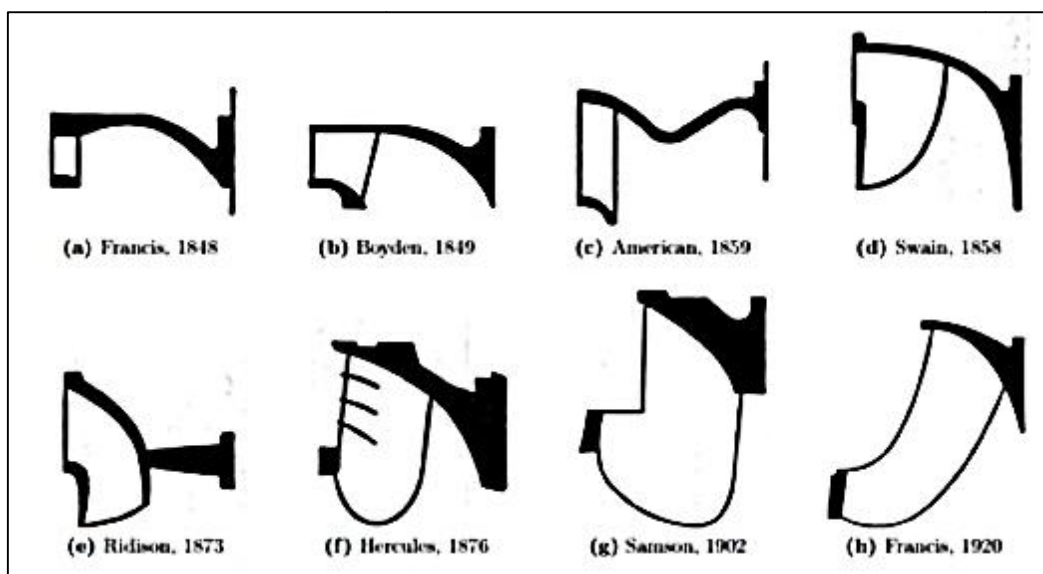
Ο τύπος αυτός υδροστροβίλου αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικανό μηχανικό J. B. Francis το 1849. Η απόδοση της λειτουργίας του μπορεί να φθάσει και το 90%.

Η κατασκευή των υδροστροβίλων είναι συνήθως μονοβάθμιδη, δηλαδή αποτελείται από μια κινητή πτερύγωση και μία (ή δύο) ακίνητες (ή ρυθμιζόμενες) πτερυγώσεις, οι οποίες συνολικά απαρτίζουν τη βαθμίδα του υδροστροβίλου. οι στρόβιλοι, για να αναπτύξουν βέλτιστο μανομετρικό ύψος ή ειδικό έργο (να μεταφέρουν μέγιστη ενέργεια ανά μονάδα βάρους της ροής) απαιτείται, κατά το δυνατόν, μεγαλύτερη τιμή της εφαπτομενικής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας. Επίσης το τμήμα εισόδου της ροής στον υδροστρόβιλο ολικής προσβολής πρέπει να είναι σχεδιασμένο, έτσι ώστε να γίνεται ομοιόμορφης παροχής περιφερειακή τροφοδοσία νερού.

Αυτό σημαίνει ότι ο αγωγός τροφοδοσίας νερού, που μεταφέρει το νερό από την υψηλότερη στάθμη, πρέπει στην απόληξή του να περιβάλει τα ακίνητα οδηγητικά πτερύγια που διαμορφώνουν την τελική μορφή της ροής του νερού, πριν αυτό εισέλθει ομοιόμορφα στην περιφερειακή επιφάνεια του στροφείου κατά την ακτινική διεύθυνση.

Η απαίτηση ομοιόμορφης παροχής περιφερειακά της ακίνητης πτερύγωσης δημιουργεί την ανάγκη σταδιακής μείωσης της διατομής του αγωγού τροφοδοσίας νερού γύρω από τη στεφάνη των ακινήτων πτερυγίων.

--	--	--



**Εικόνα 24** Ιστορική εξέλιξη των πτερυγίων δρομέα για τον υδροστρόβιλο Francis  
[πηγή: Francis Turbines-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker]

Η **Υδροτουρμπίνα Francis** είναι ένας τροχός – δρομέας (runner), (Εικόνα 23α) που φέρει περιφερειακά ειδικά διαμορφωμένα σταθερά πτερύγια (vanes). Ο δρομέας βρίσκεται μέσα σε μια φωλιά, μεταβλητής κυκλικής διατομής και σπειροειδούς γεωμετρίας η οποία φέρει μεταβλητής θέσης πτερύγια – κλαπέτα (guide vanes). Η φωλιά του δρομέα τροφοδοτείται με νερό από τον αγωγό τροφοδοσίας και τα κινητά πτερύγια καθοδηγούν το νερό, ώστε να προσκρούει **εφαπτομενικά** στα πτερύγια του δρομέα. Η φωλιά είναι σπειροειδούς γεωμετρίας ώστε το εναπομείναν νερό – νερό που δεν έχει ακόμα εισρεύσει στον δρομέα - στα κατάντη της κυκλικής του ροής να αποκτά μεγαλύτερη στροφορμή. Επειδή η περιφερειακή ροή του νερού στη φωλιά ελαττώνεται λόγω εισροής του νερού στο δρομέα, ελαττώνεται παράλληλα και η διατομή του σπειροειδούς αγωγού της φωλιάς.

Τα **κινητά πτερύγια** (ενότητα 2.2.6) εκτρέπουν το νερό, δημιουργούν μια εφαπτομενική ταχύτητα στο νερό και κατά συνέπεια μια στροφορμή στο νερό. Το νερό μετά εισέρχεται στον δρομέα της τουρμπίνας και μεταφέρει την στροφορμή του σαν ροπή στον άξονα της τουρμπίνας. Η γεωμετρία των πτερυγίων είναι τέτοια ώστε να εξασκείται δύναμη στον τροχό και να τον θέτει σε **περιστροφή**. Το νερό αφού περάσει από τον δρομέα της τουρμπίνας παροχετεύεται σε κατάλληλο παρακείμενο αποδέκτη – ποταμό ή άλλη τεχνητή λίμνη. Σκοπός ενός βέλτιστου σχεδιασμού μιας τουρμπίνας *Francis* είναι το νερό να εξέρχεται χωρίς στροβιλισμό με την ελάχιστη δυνατή κινητική και δυναμική ενέργεια. Έτσι το νερό θα έχει αποδώσει σχεδόν όλο το μηχανικό ενεργειακό του περιεχόμενο/φορτίο στην Υδροτουρμπίνα.

**Οι υδροτουρμπίνες Francis** χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολύ μικρή διαφορά υψομετρικής στάθμης υδατόπτωσης ( $< 2 \text{ m}$ ), να κατασκευαστούν από μικρά έως πολύ μεγάλα μεγέθη ( $> 700 \text{ MW}$ ) και έχουν πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης ( $> 90\%$ ). Οι υδροτουρμπίνες *Francis* μπορούν ακόμα, να λειτουργήσουν και «ανάποδα», σαν αντλίες δηλαδή, και να αντλήσουν το νερό από ένα ρεζερβουάρ νερού χαμηλότερης υψομετρικής στάθμης σ' ένα ανώτερης στάθμης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου προς επαναχρησιμοποίησή του σε περιόδους υψηλής ζήτησης

--	--	--

## 2.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

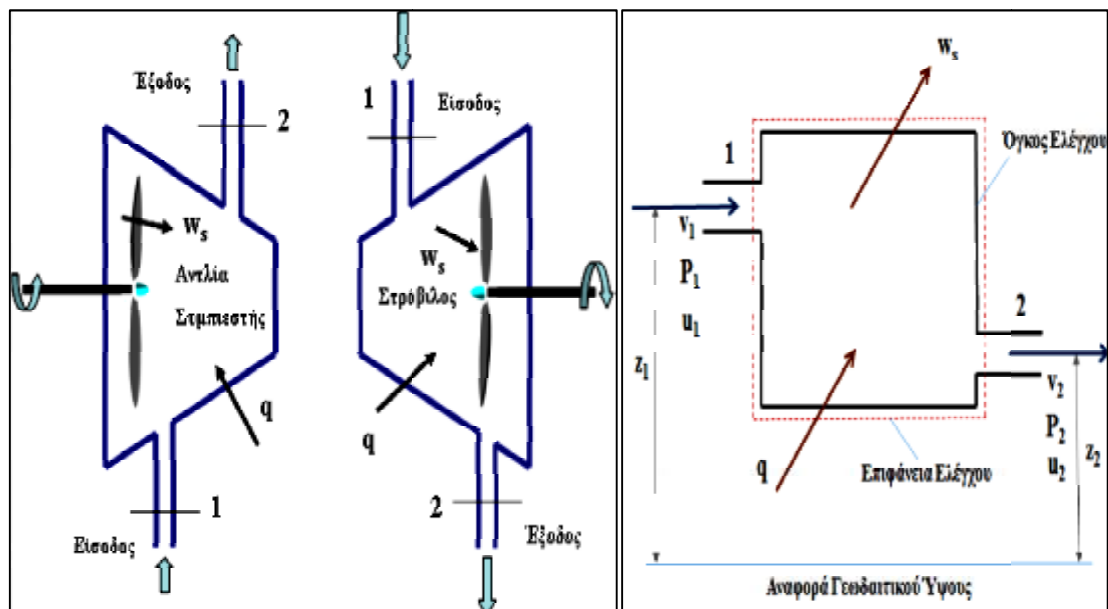
### Ø Εφαρμογή του νόμου διατήρησης της ενέργειας σε υδραυλικό σύστημα.

Ως υδραυλικό σύστημα ορίζεται ένα ανοικτό ροϊκό σύστημα, το οποίο λειτουργεί μέσα σε περιορισμένα στερεά όρια, τα οποία όμως διαθέτουν μία τουλάχιστον είσοδο και μία τουλάχιστον έξοδο. Για παράδειγμα, σε μία σωλήνωση, ή σε ένα δίκτυο αεραγωγών, μπορεί να ορισθεί ένα ανοικτό ροϊκό υδραυλικό σύστημα.

Στις πρακτικές εφαρμογές τα υδραυλικά συστήματα εξετάζονται σε **μόνιμη ροή**. Η ταχύτητα στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή του σωλήνα, και είναι σταθερή. Οι ταχύτητες στις συνήθεις εφαρμογές δεν είναι σημαντικά μεγάλες, δεν εμφανίζονται φαινόμενα συμπίεσότητας και για τα υγρά και αέρια συστήματα η πυκνότητα,  $\rho$ , του ρευστού έχει σταθερές τιμές στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος. Στα υγρά συστήματα (αλλά και στα αέρια χαμηλών ταχυτήτων) όταν δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας, η πυκνότητα του ρευστού είναι ίδια στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος. Όταν δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου της ροής, η εσωτερική ενυπάρχουσα ενέργεια  $u$ , του συστήματος παραμένει σταθερή.

Στις συνήθεις εφαρμογές δεν προσδίδεται θερμότητα στο ανοικτό σύστημα ούτε αποβάλλεται από αυτό, και τότε θεωρείται μονωμένο (αδιαβατικό).

Τα υδραυλικά συστήματα μπορεί να εμπεριέχουν Ρευστοδυναμικές μηχανές, δηλαδή αντλίες, συμπίεστες, ανεμιστήρες αλλά και στρόβιλους(υδροστρόβιλους, αεριοστρόβιλους). Όταν πρόκειται για αντλία, ανεμιστήρα ή συμπίεστη, ενέργεια ανά μονάδα μάζας, προσερχομένου ρευστού  $w_s$ , δίνεται στο σύστημα υπό μορφή ειδικού έργου από το στροφέιο της ρευστοδυναμικής μηχανής. Όταν πρόκειται για στρόβιλο, ενέργεια ανά μονάδα μάζας προσερχομένου ρευστού  $w_s$ , αποδίδεται από το σύστημα υπό μορφή ειδικού έργου στο στροφέιο της ρευστοδυναμικής μηχανής.



Εικόνα 25 Σχηματική αναπαράσταση Υδραυλικών συστημάτων που εμπεριέχουν Ρευστοδυναμικές μηχανές [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

Στην εικόνα 25, παριστάνεται σχηματικά ένα υδραυλικό σύστημα, το οποίο μπορεί να εμπεριέχει αντλία ή στρόβιλο. Όταν πρόκειται για ανοικτό σύστημα με στρόβιλο, με σταθερή



--	--	--

πυκνότητα  $\rho$  (υγρά, αέρια χαμηλών ταχυτήτων) και σταθερή θερμοκρασία, τότε δεν υπάρχει μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος (αφορά κυρίως υδροστροβίλους) η σχέση που ισχύει είναι:

$$\frac{R_1}{r} - \frac{R_2}{r} + \frac{n_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} + g z_1 - g z_2 = w_s \quad (2.1)$$

$$\frac{R_1}{r} + \frac{n_1^2}{2} + g z_1 = \frac{R_2}{r} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 + w_s \quad (2.2)$$

Ο νόμος της συνέχειας αν η πυκνότητα του ρευστού παραμένει σταθερή και η ίδια περίπου στην είσοδο και στην έξοδο της αντλίας, την του ανεμιστήρα ή του συμπιεστή, πράγμα που ισχύει για τα υγρά και τα αέρια σε χαμηλές ταχύτητες, τότε:

$$r_1 n_1 A_1 = r_2 n_2 A_2 = Q \quad (2.3)$$

$$n_1 A_1 = n_2 A_2 = Q \quad (2.4)$$

Όπου  $Q$ , είναι η παροχή όγκου του ρευστού, και αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη που διέπουν τη λειτουργία των ρευστοδυναμικών μηχανών.

Ο νόμος διατήρησης της ενέργειας, όταν στο υδραυλικό σύστημα εμπεριέχεται αντλία, ανεμιστήρας ή συμπιεστής, είναι:

$$\frac{R_1}{r} + \frac{n_1^2}{2} + g z_1 + u_1 = \frac{R_2}{r} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 + u_2 + w_s \quad (2.5)$$

$$\frac{R_1}{r} + \frac{n_1^2}{2} + g z_1 + u_1 = \frac{R_2}{r} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 - q \quad (2.6)$$

ή για αδιαβατικό σύστημα που περιλαμβάνει αντλία:

$$\frac{R_1}{r} + \frac{v_1^2}{2} + g z_1 + u_1 = \frac{R_2}{r} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 \quad (2.7)$$

Όπου  $h = u + \frac{p}{\rho}$  είναι εξ ορισμού η ενθαλπία ανά μονάδα μάζας του συστήματος.  $w_s$  και  $q$  είναι το έργο ανά μονάδα μάζας (ειδικό έργο) προσερχομένου ρευστού, που γίνεται στο στροφέιο του στροβίλου, και η προσφερόμενη θερμότητα ανά μονάδα μάζας αντίστοιχα.

Προφανώς, όταν στο υδραυλικό σύστημα δεν υπάρχει ρευστοδυναμική μηχανή, αυτό αποτελεί ένα υδραυλικό σωληνωτό σύστημα, με είσοδο και έξοδο, για το οποίο ισχύει:

$$\frac{R_1}{r} + \frac{n_1^2}{2} + g z_1 = \frac{R_2}{r} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 - q \quad (2.8)$$

Όταν πρόκειται για άτριβο ιδανικό ρευστό, και στο σύστημα δεν εμφανίζεται απώλεια ενέργειας ούτε συναλλαγή θερμότητας, προσομοιάζει με ροϊκή γραμμή. Τότε η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως εξίσωση Bernoulli:

$$\frac{R_1}{r} + \frac{n_1^2}{2} + g z_1 = \frac{R_2}{r} + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 \quad (2.9)$$

### 2.2.2.1 Η έννοια του μανομετρικού ύψους στις Ρευστοδυναμικές μηχανές.

Στις παραπάνω σχέσεις (2.8,2.9) όλοι οι όροι εκφράζουν διάφορες ενεργειακές μορφές ανά μονάδα μάζας του ρευστού. Αν διαιρεθούν όλοι οι όροι των σχέσεων αυτών με την επιτάχυνση της βαρύτητας, τότε θα εκφράζουν ενεργειακές μορφές ανά μονάδα βάρους του ρευστού συστήματος. Σημειώνεται ότι το μέγεθος αυτό έχει μονάδα μέτρησης μήκους, δηλαδή

--	--	--

$$\frac{\dot{E}N \times m \dot{u}}{\hat{E} N \dot{u}} = [m]$$

Επομένως για υδροστροβίλους, κυρίως, και για εφαρμογές που η συμπιεστότητα δε λαμβάνεται υπόψη:

$$\frac{R_1}{r \times g} + \frac{n_1^2}{2 \times g} + z_1 = \frac{R_2}{r \times g} + \frac{v_2^2}{2 \times g} + z_2 + \frac{w_s}{g} \quad (2.10)$$

Το έργο ανά μονάδα βάρους της ροής  $\frac{w_s}{g}$ , (σχέση 2.10), που αποδίδεται από τη ροή στο στρόβιλο περιλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση που ακολουθεί και ονομάζεται **θεωρητικό μανομετρικό ύψος στροβίλου** ( $H$  [m]) και ένα μικρότερο μέρος που χάνεται στο εσωτερικό του στροβίλου υπό μορφή απωλειών (τριβές, κρούσεις και αναντιστρεπτότητες) και ονομάζεται **ύψος απωλειών** ( $H_{απ}$ [m]). Συνεπώς η σχέση 2.10 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{R_1}{g} + \frac{n_1^2}{2 \times g} + z_1 = \frac{R_2}{g} + \frac{v_2^2}{2 \times g} + z_2 + H + H_{AP} \quad (2.11)$$

Η συνολική ενέργεια ανά μονάδα βάρους προσερχόμενου ρευστού που αποδίδεται από αυτό στο στρόβιλο είναι:

$$H_t = H + H_{AP} \quad (2.12)$$

Ο λόγος  $e_h = \frac{H}{H_t}$  ονομάζεται *υδραυλικός βαθμός απόδοσης στροβίλου*. (2.13)

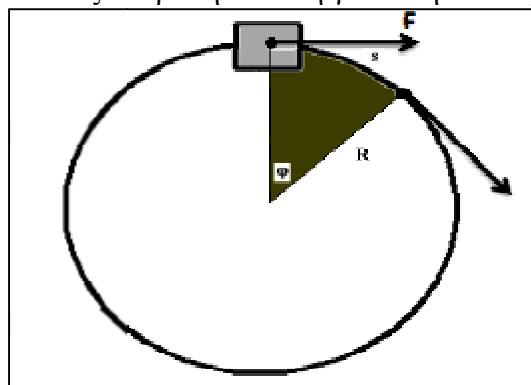
Το **μανομετρικό ύψος  $H_t$**  και η **παροχή  $Q$**  είναι βασικά μεγέθη, που χαρακτηρίζουν το στρόβιλο και καθορίζουν τη διατιθέμενη σε αυτόν (καταναλισκόμενη) ισχύ:

$$N_{KAT} = \frac{E_{\acute{\alpha}\rho\gamma\eta}}{Cr \acute{\alpha}\nu\upsilon} = \frac{E_{\acute{\alpha}\rho\gamma\eta}}{B\acute{\alpha}\rho\ \acute{\alpha}\nu\upsilon} \times \frac{B\acute{\alpha}\rho\ \acute{\alpha}\nu\upsilon}{Cr \acute{\alpha}\nu\upsilon} = H_t \times \frac{g \times V}{t} = g \times Q \times H_t \quad (2.14)$$

Η ωφέλιμη ισχύς του στροβίλου είναι αυτή που αποδίδει τελικά στον άξονά του:

$$N_{WF} = \frac{F \times s}{t} = \frac{F \times R \dot{\phi}}{t} = M \times \omega \quad (2.15)$$

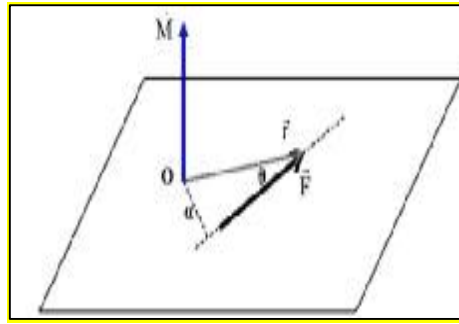
Όπου  $M$  η ασκούμενη από τον άξονα ροπή και  $\omega$  η γωνιακή του ταχύτητα



Εικόνα 26 Σχηματική αναπαράσταση της σχέσης 15. [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

$$M = r \times F \quad (2.16)$$

--	--	--



Εικόνα 27 Ροπή δύναμης ως προς σημείο[πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

Αν  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζουν τα δύο διανύσματα το μέτρο της ροπής, με βάση τον ορισμό του εξωτερικού γινομένου διανυσμάτων, είναι:

$$|\mathbf{M}| = |\mathbf{r} \times \mathbf{F}| \sin(\theta) = F r \sin(\theta) \quad (2.17)$$

Έτσι το μέτρο της ροπής μιας δύναμης ως προς ένα σημείο O, είναι το γινόμενο του μέτρου της δύναμης επί την απόσταση του σημείου O από τον φορέα ενέργειας της δύναμης. Η φορά του διανύσματος της ροπής ορίζεται ως εξής: Αν στη θέση του φορέα του διανύσματος της ροπής (κάθετος στο επίπεδο) υπήρχε ένας δεξιόστροφος κοχλίας και περιστρεφόταν με τη φορά που ορίζει η δύναμη ως προς το σημείο O, τότε αυτός θα προχωρούσε προς τη φορά του διανύσματος της ροπής. Για τον προσδιορισμό της φοράς της ροπής χρησιμοποιείται και ο πρακτικός κανόνας του δεξιού χεριού. Όταν η παλάμη στρέφεται με τη φορά που ορίζει η δύναμη ως προς το σημείο O, τότε ο αντίχειρας δείχνει τη φορά του διανύσματος της ροπής.

Θεωρείται ένας όγκος ελέγχου, ο οποίος δέχεται συνισταμένη εξωτερικών δυνάμεων. Τότε, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό του μεγέθους της ροπής, ως προς σημείο, ασκείται στο σύστημα που περιβάλλει ο όγκος ελέγχου, ροπή η οποία εκφράζεται με την παρακάτω γενική σχέση:

$$\mathbf{M} = \int_{\text{ό.ε}} \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \int_{\text{ό.ε}} \mathbf{r} \times (\rho \mathbf{v} \times \mathbf{v}) dV + \int_A \mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \mathbf{v}) \times \mathbf{v} dA \quad (2.18)$$

Η σχέση 2.18 προέκυψε από το εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος θέσης της δύναμης ως προς το σημείο και του διανύσματος της συνισταμένης δύναμης, όπως προκύπτει από το νόμο της ορμής. Αναφέρεται ως εξίσωση της ροπής της ορμής, ή της στροφορμής, και ο πρώτος όρος του τελευταίου μέρους της εξίσωσης είναι η ροπή του ρυθμού αύξησης της ορμής μέσα στον όγκο ελέγχου, ενώ ο δεύτερος είναι η ροπή της ορμής διαμέσου της επιφανείας ελέγχου.

### 2.2.2.2 Συμμετρικοί εκ περιστροφής όγκοι ελέγχου

Στις Ρευστοδυναμικές μηχανές (αντλίες, στρόβιλοι) το κύριο φυσικό μέγεθος, που κυριαρχεί και πρέπει να υπολογισθεί, είναι η ροπή περιστροφής των στροφειών (κινητές πτερυγώσεις) και όχι οι δυνάμεις. Η παραπάνω γενική σχέση 2.18 υπολογισμού της ροπής έχει σημαντικό ενδιαφέρον για τις Ρευστοδυναμικές μηχανές, όταν:

- Η επιφάνεια ελέγχου είναι εκ περιστροφής αξονοσυμμετρική.
- Η ροή του ρευστού είναι μόνιμη, που σημαίνει ότι, δεν υπάρχουν μεταβολές φυσικών μεγεθών ως προς το χρόνο και το κινητό σώμα (πτερωτή, στροφέας) που περιστρέφεται, έχει σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

--	--	--

Αν λοιπόν η σχέση (2.18) γραφεί για έναν όγκο ελέγχου μορφής δακτυλίου, που περιβάλλει τα συμμετρικά εκ περιστροφής στροφέα των στροβιλομηχανών, τα οποία διαθέτουν μια κυκλική λωρίδα εισόδου της ροής A1 και μια όμοια εξόδου A2, τότε, για μόνιμη ροή στο επίπεδο, θα εμφανισθεί μια χρήσιμη σχέση υπολογισμού του μέτρου της ροπής στρέψης ως προς το κέντρο συμμετρίας του στροφέου της στροβιλομηχανής:

$$M = \oint_A r \times v_{t1} \times v_{n1} \times dA = \oint_{A1} r \times v_{t1} \times v_{n1} \times dA_1 + \oint_{A2} r \times v_{t2} \times v_{n2} \times dA_2 \quad (2.19)$$

Εδώ σημειώνεται ότι οι ακτινικές συνιστώσες της απόλυτης ταχύτητας έχουν μηδενικό εξωτερικό γινόμενο με το διάνυσμα θέσης (ακτίνα της κυκλικής συμμετρίας), ενώ οι εφαπτομενικές συνιστώσες της απόλυτης ταχύτητας έχουν μηδενικό εσωτερικό γινόμενο με το διάνυσμα της στοιχειώδους επιφάνειας, όπως αυτό έχει οριστεί (κάθετο στην επιφάνεια προς τα έξω).

Για πλήρη κυκλική γεωμετρική και λειτουργική συμμετρία, όπου είναι σταθερά στην είσοδο και στην έξοδο της επιφάνειας ελέγχου, ισχύει:  $\rho, r, v_t, v_n$

$$M = r \times v_{t2} \times v_{n2} \times A_2 - r \times v_{t1} \times v_{n1} \times A_1 \quad (2.20)$$

Εύκολα κατανοείται η χρήση των όρων της εξ. 2.20 στην απεικόνιση του δακτυλιοειδή όγκου ελέγχου του σχήματος της εικόνας 28.

Αν το πάχος του όγκου ελέγχου στην είσοδο του ρευστού είναι b1 και στην έξοδο ομοίως είναι b2, τότε οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου του ρευστού στον όγκο ελέγχου, θα είναι, αντίστοιχα:

$$A_1 = 2\pi r_1 b_1 \quad (2.21)$$

και

$$A_2 = 2\pi r_2 b_2 \quad (2.22)$$

Ο νόμος της συνέχειας για το διερχόμενο από τον παραπάνω όγκο ελέγχου ρευστό απαιτεί για την παροχή μάζας και την παροχή όγκου:

$$\rho \times v_{n1} \times A_1 = \rho \times v_{n2} \times A_2 \quad \text{ⓐ} \quad \boxed{Q = v_{n1} \times A_1 = v_{n2} \times A_2} \quad (2.23)$$

Η σχέση 2.23, παίρνει τελικά τη μορφή:

$$\boxed{M = r \times Q \times (r_2 \times v_{t2} - r_1 \times v_{t1})} \quad (\text{σχέση Ροπής}) \quad (2.24)$$

### 2.2.2.3 Υδροστρόβιλοι, Τρίγωνα ταχύτητας

Οι υδροστρόβιλοι παίρνουν ενέργεια από το ρευστό και οι αντλίες, φουσητήρες και στροβιλοσυμπιεστές δίνουν ενέργεια στο ρευστό. Αυτό γίνεται μέσω του στροφέα που έχει περιφερειακά στερεωμένα περύγια. Αυτά είναι τα κινητά περύγια της στροβιλομηχανής. Η μόνη μετατόπιση των περυγίων είναι σε εφαπτομενική διεύθυνση. Έτσι μόνο από την μετατόπιση των εφαπτομενικών συνιστωσών της δύναμης στο στροφέα παράγεται έργο. Οι ακτινικές συνιστώσες δε μετατοπίζονται κατά τη διεύθυνσή τους και δεν παράγουν έργο.

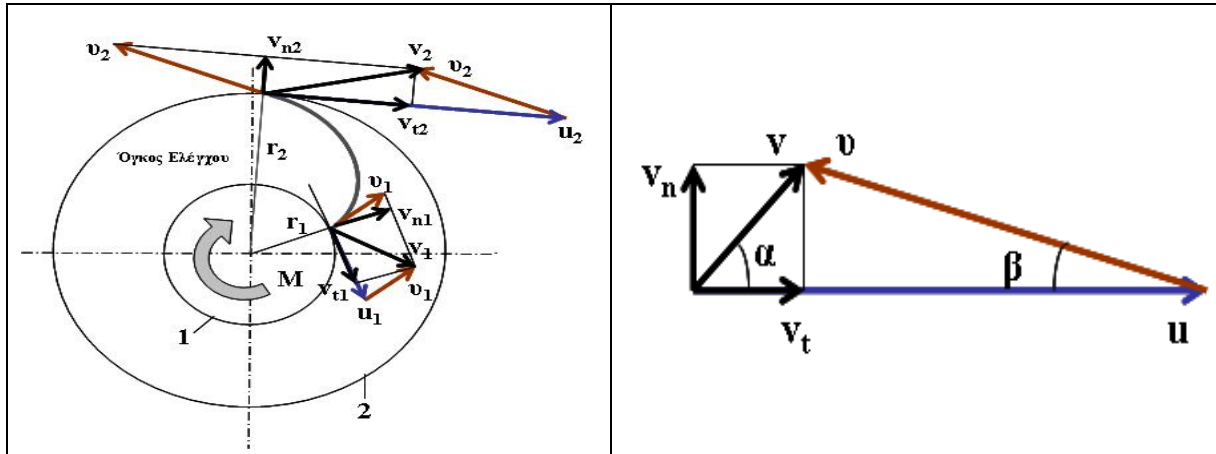
Θα θεωρηθεί ότι κατά τη ροή διαμέσου του δακτυλιοειδούς όγκου ελέγχου δεν υπάρχουν τριβές και ότι το ρευστό οδηγείται κατά τέλειο τρόπο μέσω της μηχανής, δηλαδή υπάρχουν άπειρα λεπτά περύγια, ώστε η σχετική ταχύτητα του ρευστού να είναι πάντα εφαπτομένη στο περύγιο.

Στις στροβιλομηχανές θεωρείται πάντα ένας δακτυλιοειδής όγκος ελέγχου, με απόλυτη κυκλική συμμετρία, για τον οποίο έχει υπολογισθεί η ροπή, όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως [Σχέση ροπής (2.24)].

Αν με  $v$  συμβολίζεται η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού, με  $u$  η περιφερειακή ταχύτητα του στροφέα, με την οποία μεταφέρεται και το ρευστό, και με  $v$  η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς τον στροφέα, στην είσοδο 1 και στην έξοδο 2 του ρευστού στον όγκο ελέγχου, τότε η γεωμετρική σύνθεση της περιφερειακής και της σχετικής ταχύτητας του

--	--	--

ρευστού είναι η απόλυτη ταχύτητά του. Η γεωμετρική αυτή σύνθεση δημιουργεί τα τρίγωνα ταχυτήτων του ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής, που εικονίζονται στο σχήμα της Εικόνας 28. Τονίζεται ότι η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς τον στροφέα είναι πάντοτε εφαπτόμενη στο περύγιο. Αυτός άλλωστε είναι και ο ρόλος των πτερυγίων, δηλαδή, να καθορίζουν τη διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας του ρευστού ως προς το περύγιο.



Εικόνα 28 Τρίγωνα ταχυτήτων [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

Έτσι, αν  $v_{t1}$  είναι η συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού στην εφαπτομενική διεύθυνση:

$$v_{t1} = v_1 \times \cos_{\alpha_1} \quad (2.25)$$

$$v_{t2} = v_2 \times \cos_{\alpha_2} \quad (2.26)$$

Ø Από τη Σχέση ροπής (2.24), που βρέθηκε για τη **στρεπτική ροπή**, προκύπτει:

$$M = r \times Q \times (r_2 \times v_2 \times \cos_{\alpha_2} - r_1 \times v_1 \times \cos_{\alpha_1}) \quad (2.27)$$

Όταν η ροπή  $M$  είναι θετική, η στροφορμή του ρευστού αυξάνει και πρόκειται για λειτουργία αντλίας, ανεμιστήρα ή συμπιεστή. Όταν η ροπή  $M$  είναι αρνητική, η στροφορμή του ρευστού μειώνεται και πρόκειται για λειτουργία στροβίλου. Τότε, κατά απόλυτη τιμή σε στροβίλο:

$$M = r \times Q \times (r_1 \times v_1 \times \cos_{\alpha_1} - r_2 \times v_2 \times \cos_{\alpha_2}) \quad \text{ή}$$

$$M = r \times Q \times (r_1 \times v_{t1} - r_2 \times v_{t2}) \quad (2.28)$$

Έστω  $\omega$  [rad/s] η σταθερή γωνιακή ταχύτητα του στροφέα. Η ισχύς που συναλλάσσεται στον όγκο ελέγχου που περιβάλλει το στροφέα της ρευστοδυναμικής μηχανής θα είναι:

$$M \times \omega = r \times Q \times (\omega \times r_2 \times v_2 \times \cos_{\alpha_2} - \omega \times r_1 \times v_1 \times \cos_{\alpha_1}) \quad \text{ή}$$

$$M \times \omega = r \times Q \times (u_2 \times v_2 \times \cos_{\alpha_2} - u_1 \times v_1 \times \cos_{\alpha_1}) \quad \text{ή}$$

$$M \times \omega = r \times Q \times (u_2 \times v_{t2} - u_1 \times v_{t1}) \quad (2.29)$$

Αν δεν υπάρχουν απώλειες, η διαθέσιμη ισχύς στο στροβίλο είναι, όπως ήδη έχει αναλυθεί, το γινόμενο του ειδικού βάρους ( $\gamma$ ) του ρευστού επί την παροχή όγκου ( $Q$ ), το οποίο εκφράζει το βάρος ανά μονάδα χρόνου του διερχομένου ρευστού, επί το θεωρητικό μανομετρικό ύψος του στροβίλου, που εκφράζει τη θεωρητική ενέργεια ανά μονάδα βάρους


που παίρνει ο στρόβιλος από το ρευστό. Δηλαδή, το γινόμενο  $\gamma \cdot Q \cdot H$  εκφράζει τη θεωρητική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου (ισχύς) που διατίθεται στο στρόβιλο.

Συνεπώς:

$$\eta \cdot \gamma \cdot Q \cdot H = M \cdot \omega \quad \text{ή} \quad \eta \cdot \gamma \cdot Q \cdot H = \gamma \cdot Q \cdot (u_2 \cdot v_{t2} - u_1 \cdot v_{t1})$$

--	--	--

$$H = \frac{u_2 \times v_{t2} - u_1 \times v_{t1}}{g} \quad (2.30)$$

Επομένως για στρόβιλο από την σχέση 2.30. το θεωρητικό μανομετρικό ύψος υπολογίζεται από τη σχέση (θετική τιμή):

$$H = \frac{u_1 \times v_{t1} - u_2 \times v_{t2}}{g} \quad (2.31)$$

Οι στρόβιλοι, για κατά το δυνατόν μέγιστο μανομετρικό, συνήθως σχεδιάζονται, έτσι ώστε η γωνία  $\alpha_2=90^\circ$ , οπότε:

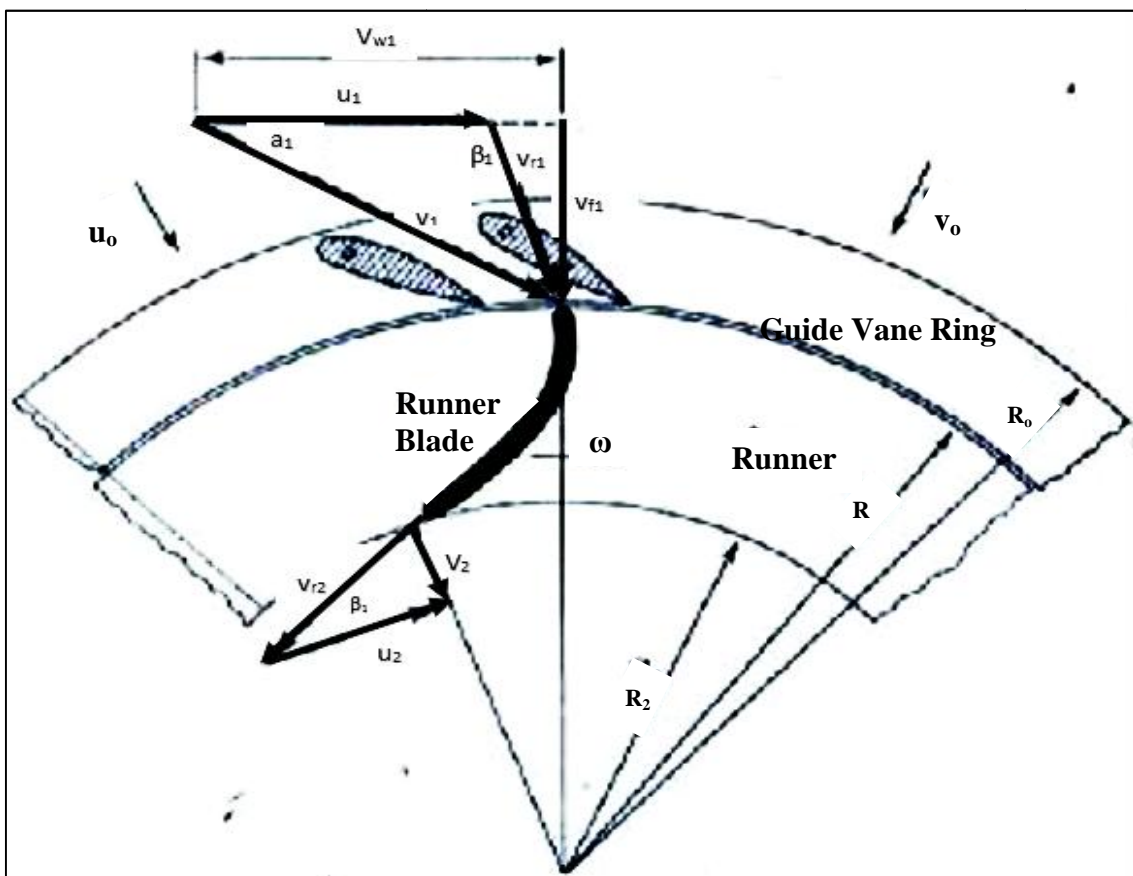
$$u_2 \times v_{t2} = 0 \quad (2.32)$$

Έτσι από την σχέση 2.32, το θεωρητικό μανομετρικό ύψος που υπολογίστηκε από την σχέση 2.31, για στρόβιλο διαμορφώνεται ως εξής:

$$H = \frac{u_1 \times v_{t1}}{g} \quad (2.33)$$

#### 2.2.2.4 Απόδοση δρομέα και βαθμός αντίδρασης συναρτήσει γωνιών $\alpha_1$ και $\beta_1$

Παρακάτω θα αναπτυχθεί σύμφωνα με την θεωρία τριγώνων ταχυτήτων ο υπολογισμός απόδοσης δρομέα (runner), και ο βαθμός αντίδρασης, συναρτήσει των γωνιών  $\alpha_1$  (γωνία που σχηματίζουν τα κινητά πτερύγια) και  $\beta_1$  (γωνία κλίσης πτερύγιου δρομέα),



Εικόνα 29 Τρίγωνα ταχυτήτων [πηγή: Τσιρίκογλου, Βλαχογιάννης\_Ρευστοδυναμικές μηχανές]

--	--	--

**Ονομασία διανυσμάτων ταχύτητας:**

$v_{f1}$  = σχετική ταχύτητα εισόδου στον δρομέα

$v_1$  = απόλυτη ταχύτητα εισόδου στον δρομέα

$u_1$  = περιφερειακή ταχύτητα

$v_{f1}$  = ταχύτητα ρευστού στον δρομέα

$\alpha_1$  = γωνία κινητών πτερυγίων

$\beta_1$  = γωνία που σχηματίζει το πτερύγιο δρομέα

ο δείκτης 2 αφορά την έξοδο του δρομέα.

Έτσι έχουμε:  $v_{f1} = v_{f2}$  = ταχύτητα ρευστού.

Η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού δίνεται από την εξίσωση του Euler:

$$\frac{E}{m} = v_{w1} \times u_1 \quad (2.34)$$

Όπου το  $v_{w1}$  ορίζεται ως:

$$v_{w1} = v_{f1} \times \cot(\alpha_1) \quad (2.35)$$

Και το

$$v_1 = v_{f1} \times \cot(\alpha_1) - v_{f1} \times (180 - \beta_1) = v_1 = v_{f1} \times \cot(\alpha_1) + \cot(\beta_1) \quad (2.36)$$

έτσι προκύπτει ότι :

$$\frac{E}{m} = v_{w1} \times u_1 = v_{f1}^2 \times \cot \alpha_1 (\cot \alpha_1 + \cot \beta_1) \quad (2.37)$$

Έχοντας υπολογίσει την Ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού από τη σχέση 2.37, υπολογίζουμε την **απόδοση του δρομέα** η οποία είναι:

$$h_h = \frac{\frac{E}{m}}{\frac{E}{m_{available}} + \frac{v_2^2}{2}} \quad (2.38)$$

Επειδή όμως ο όρος  $\frac{v_2^2}{2} = \frac{v_{f2}^2}{2}$  όπως επίσης το  $v_{f2}^2 = v_{f1}^2$  η σχέση 2.38 γράφεται:

$$h_h = \frac{\frac{E}{m}}{\frac{E}{m_{available}} + \frac{v_{f1}^2}{2}} \quad (2.39)$$

Αντικαθιστώντας τον όρο  $E/m$  από την σχέση 2.37, η σχέση 2.39 γίνεται:

$$h_h = \frac{2 \times \cot \alpha_1 (\cot \alpha_1 + \cot \beta_1)}{1 + 2 \times \cot \alpha_1 (\cot \alpha_1 + \cot \beta_1)} \textcircled{R}$$

$$h_h = 1 - \frac{1}{1 + 2 \times \cot \alpha_1 (\cot \alpha_1 + \cot \beta_1)} \quad (2.40)$$



--	--	--

Αντίστοιχα για τον **βαθμό αντίδρασης** ισχύει:

$$R = \frac{\frac{E}{m} - \frac{c_1^2 - v_2^2}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}}}{\frac{E}{m_{available}}} \quad R = 1 - \frac{\frac{c_1^2 - v_2^2}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}}}{\frac{E}{m_{available}}} \quad R = 1 - \frac{\frac{c_1^2 - v_2^2}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}}}{2v_{f1}^2 \cot a_1 (\cot a_1 + \cot b_1)} \quad (2.40)$$

επειδή το  $v_{f1} = v_{f2} = v_2$  τότε ο βαθμός Αντίδρασης παίρνει την τελική μορφή:

$$R = 1 - \frac{\cot a_1}{2(\cot a_1 + \cot b_1)} \quad (2.41)$$

### 2.2.2.5 Καθορισμός βασικών λειτουργικών παραμέτρων

Από τις διάφορες μελέτες που έχουν γίνει για τον καθορισμό των κύριων διαστάσεων υδροστροβίλων Francis μέσω συσχετίσεων, τα στοιχεία που δίνονται στην συνέχεια προέρχονται κυρίως από την μελέτη των F. De Siervo και F. De Leva (Water Power and Dam Construction, 1976), λόγω του ότι είναι η πλέον σύγχρονη και έχει λάβει υπόψη μεγάλο πλήθος υδροστροβίλων Francis.

Ο προσδιορισμός του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  (ή του  $n_q$ ) γίνεται βάσει της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H_K$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας, σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Στο επόμενο σχήμα δίνεται η συσχέτιση του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  (N σε KW) με την υδραυλική πτώση  $H_K$ : η συσχέτιση αυτή εκφράζεται από τρεις καμπύλες ανάλογα με την περίοδο κατασκευής του υδροστροβίλου. Για την ίδια τιμή του  $H_K$  γίνεται φανερή η τάση επιλογής όλο και υψηλότερης τιμής του  $n_s$ , που αντιστοιχεί σε υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής και άρα σε υδροστρόβιλο μικρότερων ολικών διαστάσεων και κόστους. Η τάση αυτή είναι αποτέλεσμα κυρίως της βελτίωσης της υδραυλικής χάραξης των μηχανών που συνεπάγεται την βελτίωση των συνθηκών της ροής και άρα βελτίωση της λειτουργίας όσον αφορά την ανάπτυξη της σπηλαιώσης (που αποτελεί και τον πλέον ανασταλτικό παράγοντα αύξησης της ταχύτητας περιστροφής και μείωσης των ολικών διαστάσεων). Για  $n_s$  υπολογισμένο με N σε KW, H σε mΣΥ και n σε RPM, η συσχέτιση  $n_s = f(H_K)$  και για την περίοδο 1970-1975 δίνεται από την σχέση:

$$n_s = 3.470,0 H^{-0,625} \quad (2.42)$$

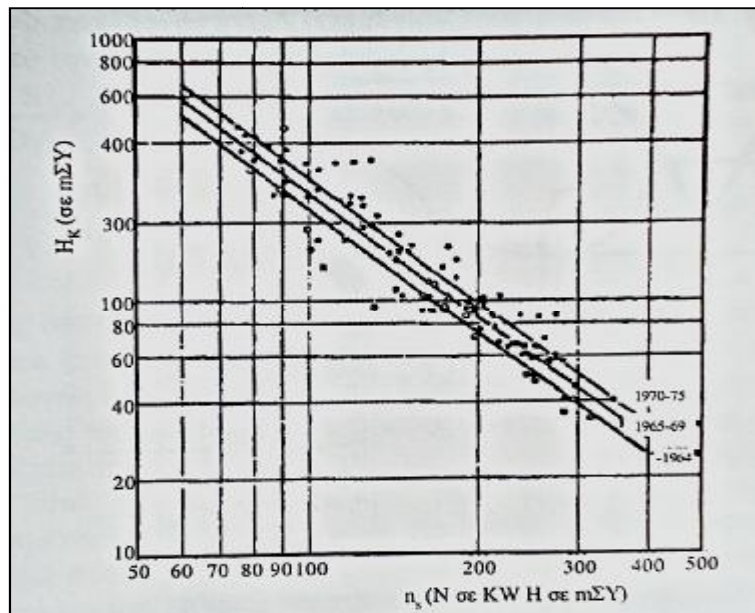
Υπολογίζεται στην συνέχεια μία αρχική-ενδεικτική τιμή της ταχύτητας περιστροφής n (RPM), η τελική τιμή της οποίας επιλέγεται έτσι ώστε να είναι σύγχρονη. Μετά την επιλογή της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής υπολογίζεται η τελική τιμή του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$ .

Η ταχύτητα φυγής  $n_e$  των υδροστροβίλων Francis εκφράζεται συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών από την σχέση:

$$\frac{n_e}{n} = 1,52 + 1,52 \times 10^{-3} \times n_s \quad (2.43)$$

Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση, η τιμή του λόγου  $n_e/n$  αυξάνεται σχετικά έντονα με την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$ . Το γεγονός αυτό εξηγείται από το ότι η αύξηση της τιμής του  $n_s$  αντιστοιχεί σε γρήγορο μετασχηματισμό της μεσημβρινής τομής του δρομέα από ακτινικής σε μεικτής ροής, δηλ. σταδιακή μείωση της επίδρασης των φυγόκεντρων δυνάμεων.

--	--	--



Εικόνα 30 Συσχέτιση  $n_s = f(H_K)$  υδροστροβίλων Francis με την ονομαστική διαθέσιμη υδραυλική πτώση [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

Η επιτρεπόμενη τιμή της παραμέτρου σπηλαιώσης  $s_{kr}$ , στο κανονικό σημείο λειτουργίας, δίνεται από την σχέση:

$$s_{kr} = 7,54 \times 10^{-5} n_s^{1,41} \quad (2.44)$$

### 2.2.2.6 Ειδικός αριθμός στροφών

Ο ειδικός αριθμός στροφών  $n_q$  (ως προς την παροχή) των υδροστροβίλων ορίζεται στο κανονικό σημείο λειτουργίας (δείκτης K)

$$n_q = n \frac{Q_K^{1/2}}{H_K^{3/4}} \quad (2.45)$$

που εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου του οποίου το κανονικό σημείο λειτουργίας είναι το ακόλουθο :  $Q = 1$  (μονάδα της παροχής) και  $H = 1$  (μονάδα της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης). Η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών δεν είναι ανεξάρτητη των χρησιμοποιούμενων μονάδων οι οποίες θα πρέπει πάντα να αναφέρονται. Για την περίπτωση υδροστροβίλων χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μονάδες:  $n$  σε RPM,  $Q$  σε  $m^3/sec$  και  $H$  σε mΣΥ. Με σκοπό την εισαγωγή ενός αδιάστατου αριθμού χρησιμοποιείται επίσης και ο ειδικός αριθμός περιστροφής  $w$  που ορίζεται από τη σχέση:

$$w = \frac{(Q/p)^{1/2}}{(2gH)^{3/4}} \quad (2.46)$$

Του οποίου όμως η εφαρμογή δεν είναι γενικευμένη. Στην σχέση 2.46 με  $\omega$  συμβολίζουμε την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε rad/sec και τιμή  $w = (2\pi n) / 60$

Ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ  $n_s$  και ο οποίος εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου, διαμέτρου  $D_s$ , του οποίου το κανονικό σημείο λειτουργίας είναι:

--	--	--

$$n_s = n \frac{N_K^{1/2}}{H_K^{5/4}} \quad (2.47)$$

Όπως και για τον ειδικό αριθμό στροφών  $n_q$  (ως προς την παροχή) η τιμή του  $n_s$  δεν είναι ανεξάρτητη των χρησιμοποιούμενων μονάδων. Συνήθεις μονάδες είναι KW και H σε mΣY. Ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ  $n_s$  παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκρινόμενος με τον  $n_q$  επειδή σε αυτόν υπεισέρχεται μια αρχικά άγνωστη παράμετρος, η τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης  $\eta$ , μέσω του οποίου υπολογίζεται η ισχύς  $N$  και η πυκνότητα του διακινούμενου υγρού. Θεωρώντας ολικό βαθμό απόδοσης  $\eta = 0,90$  μεταξύ του  $n_q$  ( $Q$  σε  $m^3/sec$  και  $H$  σε mΣY) και του  $n_s$  ( $N$  σε KW,  $H$  σε mΣY) ισχύει η σχέση (ως διακινούμενο υγρό θεωρείται τα νερό με πυκνότητα  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ )

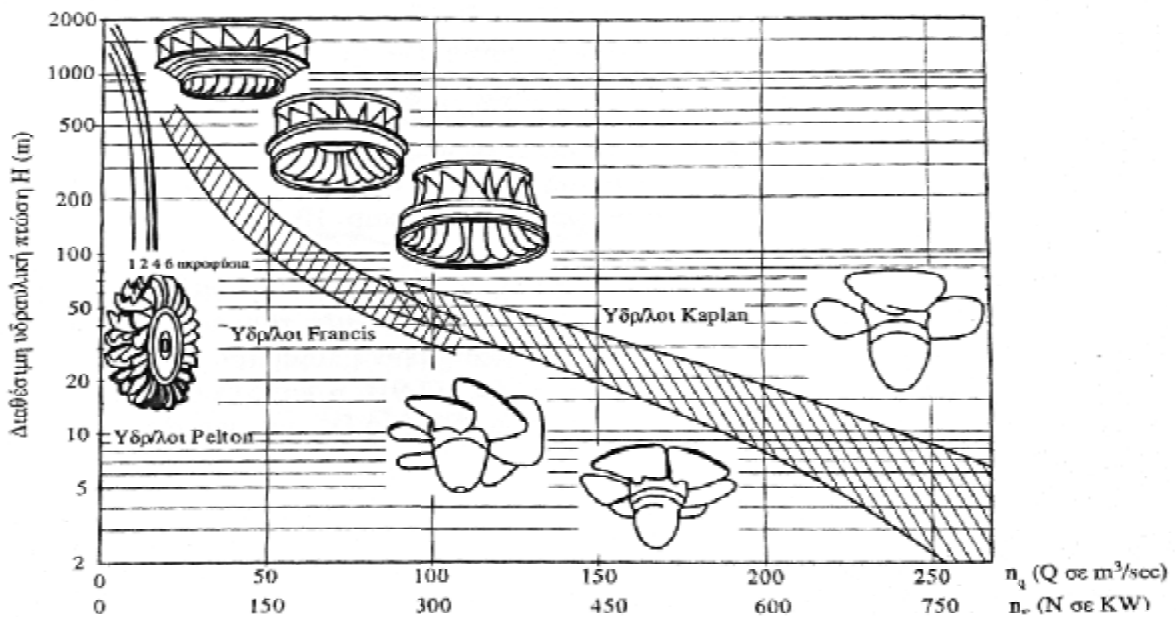
$$n_s \approx 2.97 n_q \quad (2.48)$$

Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει περιοχές χρησιμοποίησης των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων συναρτήσει ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  καθώς και ενδεικτικές τιμές του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης  $\eta_K$ . Οι μεγαλύτερες τιμές του ολικού βαθμού απόδοσης αντιστοιχούν σε υδροστροβίλους μεγάλου μεγέθους (ισχύ μεγαλύτερη από 50 MW).

Πίνακας 1. Επιλογή βαθμού απόδοσης βάση του ειδικού αριθμού στροφών και για κάθε τύπο υδροστροβίλου

$$\begin{aligned} \text{Francis} : n_s &= 1304 \times H^{-0.654} \\ \text{Kaplan} : n_s &= 791 \times H^{-0.486} \\ \text{Pelton} : n_s &= 196 \times H^{-0.50} \end{aligned}$$

Τύπος Υδροστροβίλου	$n_s$ (N σε KW)	$\eta_K$
Pelton	9-82	0.888-0.920
Francis	68-300	0.930-0.945
Kaplan	290-860	0.930-0.945



Εικόνα 31 Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου συναρτήσει του  $n_q$  και  $n_s$   
[πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

--	--	--

### 2.2.2.7 Επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών.

Όπως έγινε φανερό από τις προηγούμενες παραγράφους, η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών για τους υδροστροβίλους όλων των τύπων συσχετίζεται με την τιμή της ονομαστικής διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H_K$ . Οι τιμές του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  ή  $n_q$  ως συνάρτηση του  $H_K$ , για όλους σχεδόν τους σύγχρονους υδροστροβίλους που έχουν κατασκευασθεί σε μεγάλο πλήθος ΥΗΕ, παρουσιάζει μια διασπορά. Από το νέφος των σημείων (εικόνα 30) και την εφαρμογή μίας αναλυτικής μεθόδου, έστω την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτει μία συσχέτιση της μορφής  $n_s = f(H_K)$ , για κάθε τύπο υδροστροβίλου, που εκφράζει την βέλτιστη επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών για την συγκεκριμένη τιμή της υδραυλικής πτώσης. Έγινε όμως φανερό ότι η τελική επιλογή της τιμής του  $n_s$  (ή του  $n_q$ ) δεν μπορεί να ικανοποιεί απόλυτα τη συσχέτιση αυτή λόγω των διακριτών τιμών των σύγχρονων ταχυτήτων περιστροφής. Στην συνέχεια από την στατιστική επεξεργασία και για κάθε τύπο υδροστροβίλου προκύπτει η αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας του δρομέα (συναρτήσει της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών) και από αυτή η εξωτερική διάμετρος του δρομέα, ως προς την οποία αδιαστατοποιούνται όλες οι άλλες διαστάσεις. Για κάθε ΥΗΕ οι ακριβείς διαστάσεις των υδροστροβίλων προκύπτουν ως αποτέλεσμα οικονομοτεχνικής μελέτης στην οποία έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι ιδιαιτερότητες στην κατασκευή και εκμετάλλευση του συγκεκριμένου ΥΗΕ (π.χ. σε ένα ΥΗΕ είναι επιθυμητή η λειτουργία με έντονες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου, ενώ σε άλλο η μεταβολή της ανάντι ή κατάντι στάθμης των ταμιευτήρων είναι έντονες). Έτσι εξηγείται η όποια διασπορά των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων και διαστάσεων με τον ειδικό αριθμό στροφών. Η συνεχής τάση αύξησης της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών, που αντανάκλα την βελτίωση των συνθηκών της ροής, έχει ένα όριο που αναφέρεται στην ανάπτυξη της σπηλαιώσης.

Στην συνέχεια αναφέρεται συνοπτικά η επίδραση της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών στα διάφορα χαρακτηριστικά του υδροστροβίλου. Οι παρατηρήσεις αυτές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την τελική επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή.

α) Επίδραση στις διαστάσεις του υδροστροβίλου Για όλων των τύπων τους υδροστροβίλους η αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας  $U$  του δρομέα εξαρτάται πολύ λίγο από την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών. Άρα, σε μία δεδομένη εφαρμογή ( $H_K = \text{σταθ.}$ ) η περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα είναι σε πρώτη προσέγγιση σταθερή, δηλ. η διάμετρος του δρομέα είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την ταχύτητα περιστροφής  $n$  (και η οποία είναι ανάλογη της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών). Μικρότερη διάμετρος του δρομέα σημαίνει μικρότερες διαστάσεις του υδροστροβίλου, των έργων πολιτικού μηχανικού, του μεγέθους του ΥΗΣ, μικρότερη γερανογέφυρα και συνολικά μικρότερο κόστος.

β) Επίδραση στον βαθμό απόδοσης Η επίδραση του ειδικού αριθμού στροφών στον βαθμό απόδοσης δεν είναι μονότονη, για την περίπτωση υδροστροβίλου Francis: ο ολικός βαθμός απόδοσης αυξάνει με τον  $n_s$  μέχρι της τιμής του  $n_s \approx 180$  ( $n_q \approx 60$ ) περίπου και στην συνέχεια μειώνεται σταδιακά. Για τις μικρές τιμές του  $n_s$  οι αυξημένες απώλειες οφείλονται κυρίως στις απώλειες στρεφόμενου δίσκου (λόγω της αναλογικά μεγάλης διαμέτρου του δρομέα) και στις ογκομετρικές απώλειες μέσω των λαβυρίνθων (λόγω της σημαντικής υδραυλικής πτώσης). Αντίθετα, στις υψηλές τιμές του  $n_s$  οι πιο σημαντικές απώλειες είναι οι απώλειες στον ίδιο τον δρομέα και στον αγωγό απαγωγής (λόγω των μεγάλων παροχών που αντιστοιχούν στην ίδια ονομαστική ισχύ).

γ) Επίδραση στην σπηλαιώση και στην στάθμη τοποθέτησης Για όλων των τύπων τους υδροστροβίλους αντιδράσεως η επίδραση του ειδικού αριθμού στροφών στην μέγιστη

--	--	--

επιτρεπόμενη στάθμη τοποθέτησης είναι μονότονη: αύξηση του  $n_s$  έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους τοποθέτησης του υδροστροβίλου για ασφαλή λειτουργία έναντι σπηλαιώσης. Η διασπορά στις συσχετίσεις  $\sigma_{kr} = f(n_s)$  οφείλεται στην βελτιωμένη ή μη χάραξη του δρομέα και στην ενδεχόμενη πρόβλεψη για λειτουργία με μικρή ή μεγάλη διακύμανση της υδραυλικής πτώσης.

δ) Επίδραση στην ταχύτητα φυγής Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως η επίδραση του ειδικού αριθμού στροφών στην ταχύτητα φυγής  $n_e$  είναι μονότονη και πολύ πιο έντονη στους Francis παρά στους Kaplan και βολβοειδείς. Η σημαντική αύξηση της ταχύτητας φυγής  $n_e$  με τον ειδικό αριθμό στροφών στους υδροστροβίλους Francis οφείλεται στην μείωση του φυγόκεντρου χαρακτήρα της ροής (όσο αυξάνεται ο  $n_s$ ). Η σημαντική διασπορά της συσχέτισης  $n_e = f(n_s)$  για τους υδροστροβίλους αξονικής ροής (της τάξεως του 20%) οφείλεται στην διπλή ρύθμιση και στον χειρότερο συνδυασμό της κλίσης των ρυθμιστικών πτερυγίων και των πτερυγίων του δρομέα στον οποίο αντιστοιχεί η μέγιστη ταχύτητα φυγής. Σημειώνεται ότι ο λόγος  $n_e/n$  στους υδροστροβίλους Francis κυμαίνεται μεταξύ 1,5 – 2,0 ενώ στους υδροστροβίλους αξονικής ροής είναι της τάξεως του 2 -3. Η αύξηση της ταχύτητας φυγής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων που αναπτύσσονται στον ρότορα της γεννήτριας και κατά συνέπεια στην αύξηση του κόστους της ώστε να εξασφαλίζεται η μηχανική αντοχή τους στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

ε) Επίδραση στο εύρος της περιοχής λειτουργίας Αναφορά στην επίδραση του ειδικού αριθμού στροφών στην δυνατότητα προσαρμογής του υδροστροβίλου υπό μεταβαλλόμενη παροχή ή υδραυλική πτώση έγινε σε προηγούμενες παραγράφους. Θα πρέπει όμως να τονισθεί ότι οι επιδράσεις αυτές είναι δευτερεύουσας σημασίας συγκρινόμενες με την επίδραση των συνθηκών λειτουργίας (μεταβαλλόμενη παροχή ή/και υδραυλική πτώση) στην επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου.

Στην εικόνα 31, για μία τιμή του  $H_K$  φαίνεται ότι είναι δυνατή η επιλογή του  $n_q$  σε μία περιοχή τιμών. Επιδίωξη φυσικά είναι η επιλογή της υψηλότερης δυνατής τιμής του  $n_q$  που αντιστοιχεί σε υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής  $n$  (RPM) και άρα στο μικρότερο μέγεθος (για σταθερό  $u_1$ ) και κόστος της μηχανής. Όμως η επιδίωξη αυτή μπορεί να έχει παρενέργειες όπως χαμηλό βαθμό απόδοσης, αστάθεια λειτουργίας, υπερβολικές εκσκαφές για ασφαλή λειτουργία έναντι σπηλαιώσης.

Ο καθορισμός της ταχύτητας περιστροφής υδροστροβίλου με δεδομένα τα  $H$  και  $Q$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας γίνεται ως εξής, κάνοντας κατ' αρχήν χρήση των τιμών του παραπάνω διαγράμματος: από την τιμή του  $H_K$  επιλέγεται μία ενδεικτική τιμή του  $n_q$ . Από την εξίσωση ορισμού του  $n_q$ , με γνωστά τα  $H$ ,  $Q$  και  $n_q$ , προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής  $n$  (RPM) που θα πρέπει να επιλεγεί. Όπως, όμως έχει προαναφερθεί, η ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι σύγχρονη. Το πιο πιθανό είναι ότι η τιμή του  $n$  (RPM) που θα προκύψει από τις ανάλογες εξισώσεις θα βρίσκεται μεταξύ δύο σύγχρονων τιμών οπότε ο μελετητής θα έχει να επιλέξει είτε την υψηλότερη είτε την χαμηλότερη και με αυτή θα υπολογίσει την τελική τιμή του  $n_q$ . Είναι προφανές ότι η υψηλότερη αντιστοιχεί σε υδροστρόβιλο και γεννήτρια μικρότερου μεγέθους και κόστους και σε μικρότερα έργα πολιτικού μηχανικού. Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση του ειδικού αριθμού στροφών η λειτουργία του υδροστροβίλου γίνεται περισσότερο ευαίσθητη στην σπηλαιώση οπότε για να εξασφαλισθεί η ομαλή λειτουργία θα πρέπει ο υδροστρόβιλος να τοποθετηθεί σε χαμηλότερη στάθμη, δηλ. να γίνει υπόγειος με αποτέλεσμα την αύξηση των εκσκαφών. Τελικά η επιλογή μεταξύ των δύο ταχυτήτων περιστροφής γίνεται με καθαρά οικονομοτεχνικά κριτήρια λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται.

Στην εικόνα 32 δίνεται σχηματικά η μεταβολή της μεσημβρινής τομής του δρομέα και του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου για διάφορες τιμές του  $n_s$ . Η συσχέτιση μεταξύ της τιμής του  $n_s$  (ή του  $n_q$ ) με την μεσημβρινή τομή του δρομέα γίνεται φανερή εάν, στην εξίσωση

--	--	--

ορισμού του  $n_s$  (σχέση 2.47) η παροχή  $Q_K$  εκφρασθεί μέσω της εξίσωσης της συνέχειας στην διατομή εξόδου  $D_{2e}$  του δρομέα:

$$Q_K = \frac{\pi}{4} \times D_{2e}^2 \times c_{2K} = \frac{\pi}{4} \times D_1^2 \times \frac{D_{2e}^2}{D_1^2} \times c_{2K} \times \sqrt{2gH_K} \quad (2.49)$$

Ενώ η περιφερειακή ταχύτητα  $u_1$  εκφράζεται ως:

$$u_1 = \frac{\pi \times D_1 \times n}{60} = U_1 \times \sqrt{2gH_K} \quad (2.50)$$

από την οποία:  $D_1 = 60 \times U_1 \times \frac{\sqrt{2gH_K}}{\pi \times n} \quad (2.51)$

Μέσω της οποίας η σχέση 2.49 γράφεται:

$$Q_K = \frac{\pi}{4} \times \frac{60 \times U_1 \times 2 \times g \times H_K}{\pi \times n} \times \frac{D_{2e}^2}{D_1^2} \times c_{2K} \times \sqrt{2gH} \quad (2.52)$$

Εισάγοντας την έκφραση αυτή της παροχής μέσω της σχέσης 2.52 στην σχέση που δίνει την ισχύ  $N_K$ :

$$N_K = \gamma \times H_K \times Q_K \times \eta_K \quad (2.53)$$

Και την έκφραση που προκύπτει στην σχέση ορισμού του  $n_s$ , εκφράζεται ως:

$$n_s = 576 \times U_1 \times \frac{D_{2e}}{D_1} \times c_{2K} \times \eta_K \quad (2.54)$$

Από την σχέση 2.54 γίνεται φανερό ότι η μείωση του  $n_s$  (ή του  $n_q$ ) πρέπει να συνοδεύεται με μείωση των τιμών των παραμέτρων ταχυτήτων  $U_1$  και  $c_{2K}$  και με μείωση του λόγου  $(D_{2e}/D_1)$ , δηλαδή ο δρομέας γίνεται όλο και περισσότερο ακτινικής ροής. Αντίθετα, με την αύξηση του  $n_s$  αυξάνεται η τιμή του λόγου  $(D_{2e}/D_1)$ , οριακά μέχρι την μονάδα που αντιστοιχεί σε δρομέα αξονικής ροής, και παράλληλα πρέπει να αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων:

$$U_1 = \frac{u_1}{\sqrt{2gH_K}} \quad (2.55)$$

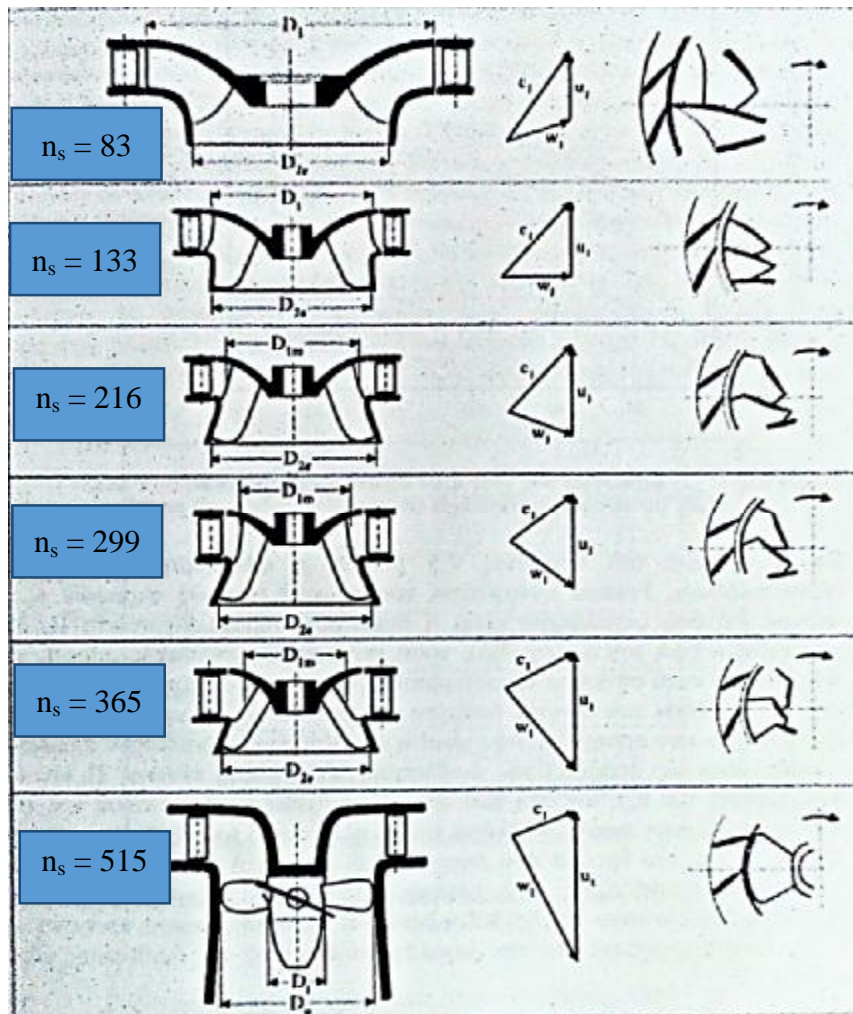
$$c_{2K} = \frac{c_{2K}}{\sqrt{2gH_K}} \quad (2.56)$$

Οι κύριες διαστάσεις που καθορίζουν την γεωμετρία του υδροστροβίλου αδιαστατοποιούνται θεωρώντας ως διάσταση αναφοράς την διάμετρο της στεφάνης του δρομέα στην διατομή εξόδου, την  $D_{2e}$ . Για τον καθορισμό των υπόλοιπων κύριων διαστάσεων απαιτείται ο υπολογισμός της διαμέτρου  $D_{2e}$  ο οποίος γίνεται είτε μέσω της αντίστοιχης τιμής της παραμέτρου παροχής  $\Phi$  είτε από την τιμή της αδιάστατης παραμέτρου της περιφερειακής ταχύτητας  $U_{2e}$ :

$$U_{2e} = \frac{u_{2e}}{\sqrt{2gH}} = \frac{\pi D_{2e} n}{60 \sqrt{2gH}} \quad (2.57)$$

Η ταχύτητα  $U_{2e}$  χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια να υπολογιστεί το απαιτούμενο θετικό ύψος αναρρόφησης  $NPSH_R$  στο Κεφάλαιο. 5.3.6 «Υπολογισμός σπηλαίωσης και NPSH»

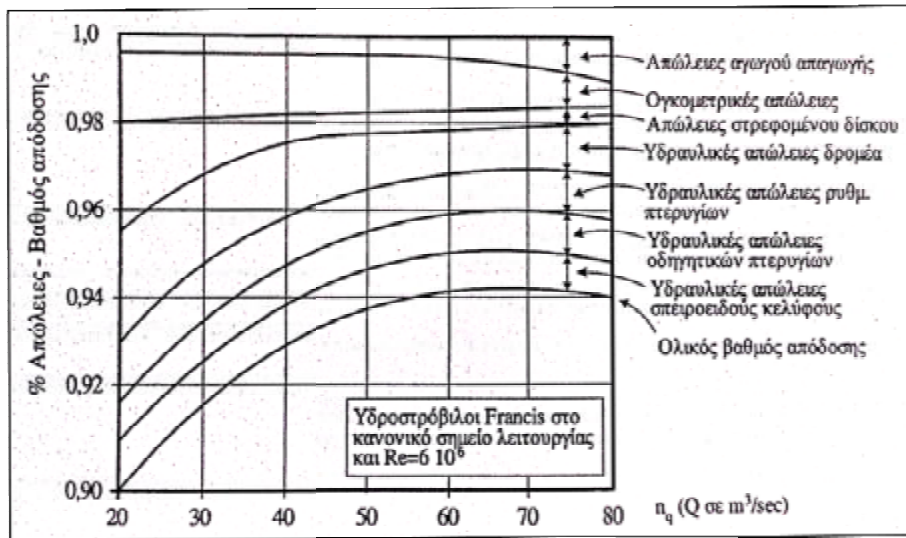
--	--	--



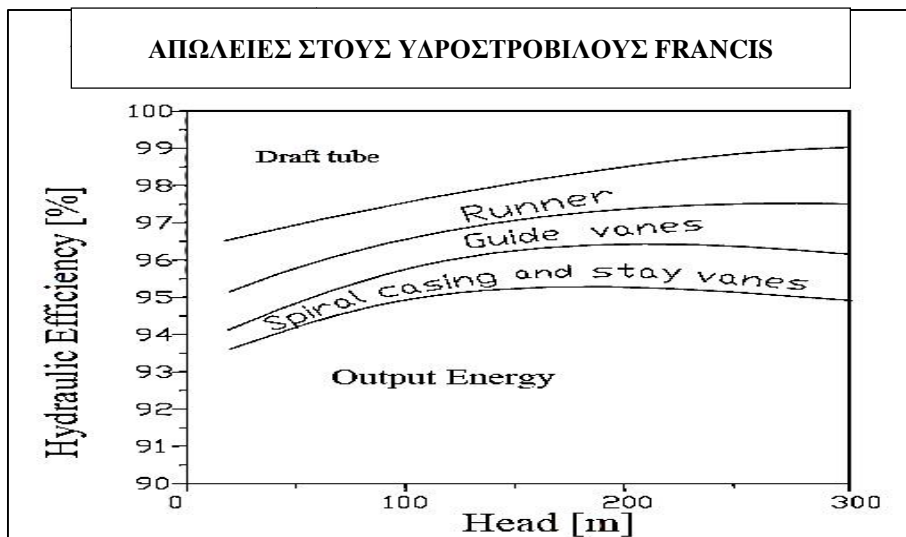
Εικόνα 32 Μεσημβρινή τομή δρομέα και τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου για ενδεικτικές τιμές του ειδικού αριθμού στροφών [πηγή: Α.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

Στο διάγραμμα της Εικόνας 33 δίνεται η κατανομή των απωλειών σε υδροστροβίλους Francis συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$ . Γίνεται φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$ , δηλ. όσο μειώνεται η τιμή του  $n_q$ , τόσο περισσότερο ακτινικής μορφής γίνεται ο δρομέας και κατά συνέπεια τόσο περισσότερο αυξάνει το μήκος της διαδρομής του υγρού διά μέσω του δρομέα (αύξηση της διαμέτρου  $D_1$  και του λόγου  $D_1/D_{2e}$ ). Αποτέλεσμα των προηγούμενων είναι η αύξηση των υδραυλικών απωλειών στον δρομέα (ενώ ως ποσοστό της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  είναι σχεδόν ανεξάρτητες του  $n_q$ ), αύξηση των απωλειών στρεφόμενου δίσκου και η αύξηση των ογκομετρικών απωλειών (λόγω της υψηλής τιμής του  $H$ , άρα και της στατικής πίεσης ανάντι του δρομέα που συνεπάγεται η χαμηλή τιμή του  $n_q$ ). Αντίστοιχα, όσο αυξάνει η τιμή του  $n_q$ , δηλ. μειώνεται το  $H$ , τόσο περισσότερο αυξάνονται οι απώλειες στον αγωγό φυγής δεδομένου ότι η παραμένουσα κινητική ενέργεια  $c_a^2/2g$ , αντιπροσωπεύει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ .

--	--	--



Εικόνα 33 Διάγραμμα Απολειών συναρτήσει του ογκομετρικού αριθμού στροφών ( $n_s$ ).  
[πηγή: Δ.Παπαντόνης Υδροδυναμικές μηχανές]



Εικόνα 34 Διάγραμμα απωλειών διαφόρων τμημάτων υδροστρόβιλου Francis συναρτήσει του ύψους πτώσης. [πηγή: [web.iitd.ac.in/.../mel346/mel346-21&22.p](http://web.iitd.ac.in/.../mel346/mel346-21&22.p)]

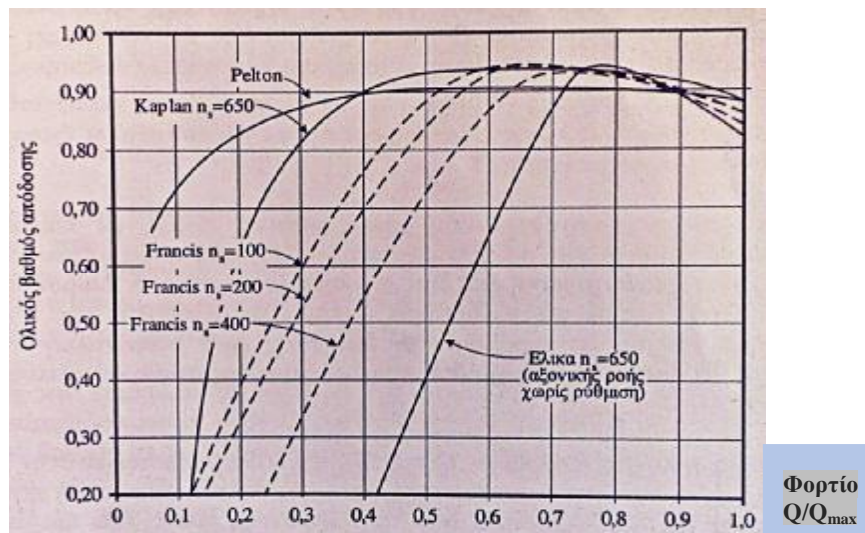
Στην Εικόνα 35 δίνεται ενδεικτικά η μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστρόβιλων διαφόρων τύπων και τιμών του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  συναρτήσει του φορτίου, δηλ. της παροχής  $Q$  ως προς την μέγιστη παροχή λειτουργίας. Σημειώνεται ότι η μεταβολή της παροχής και του βαθμού απόδοσης είναι ενδεικτική της ισχύος εξόδου για  $H=\text{σταθ}$ . Από το διάγραμμα του σχήματος προκύπτει ότι οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton και Kaplan παρουσιάζουν το πλεονέκτημα, σε σύγκριση με τον Francis, ότι διατηρούν υψηλό βαθμό απόδοσης ακόμη και σε μερικά φορτία, δηλ. η καμπύλη  $(\eta, Q)$  είναι πλατιά και άρα έχουν ευρεία περιοχή λειτουργίας. Οι υδροστρόβιλοι Kaplan οφείλουν το πλεονέκτημα αυτό στην δυνατότητα περιστροφής των πτερυγίων του δρομέα των έτσι ώστε να επιλέγεται κάθε φορά ο βέλτιστος συνδυασμός της κλίσης των πτερυγίων του δρομέα και των ρυθμιστικών πτερυγίων.

Το πλεονέκτημα των υδροστρόβιλων διπλής ρύθμισης γίνεται φανερό στην Εικόνα 35 από την σύγκριση της μεταβολής  $\eta=f(Q/Q_{\max})$  για υδροστρόβιλο Kaplan και για



--	--	--

υδροστρόβιλο τύπου έλικας (δηλ. αξονικής ροής με σταθερά τα πτερύγια του δρομέα): η καμπύλη μεταβολής του ολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου είναι πολύ μυτερή για τον υδροστρόβιλο τύπου έλικας, δηλ. ο υδροστρόβιλος αυτός είναι κατάλληλος για λειτουργία μόνο σε στενή περιοχή μεταβολής της παροχής και της ισχύος εξόδου. Αντίθετα, ο υδροστρόβιλος Pelton είναι ευαίσθητος στις μεταβολές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ , δηλ. ο ολικός βαθμός μειώνεται έντονα για τιμές μικρότερες ή μεγαλύτερες της κανονικής τιμής  $H_K$ .



Εικόνα 35 Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων συναρτήσει των φορτίων [πηγή: Δ.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

### 2.2.2.8 Σημείο λειτουργίας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης

Για υδροηλεκτρική εγκατάσταση με δεδομένη υδραυλική πτώση:

$$H = St \alpha q_{πη} T_{αμ} i_{επ} u \eta \eta V - St \alpha q_{πη} A_{αγ} \omega \rho \eta F u g \eta V$$

και αγωγό προσαγωγής με γνωστά χαρακτηριστικά (όπως το μήκος, η διάμετρος, η τραχύτητα των τοιχωμάτων, το είδος και το πλήθος των εξαρτημάτων) είναι δυνατή η χάραξη της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης ( $H_S, Q$ ) στο διάγραμμα ( $H, Q$ ):

$$H_S = H - D h_f = H - k \times Q^2 \quad (2.58)$$

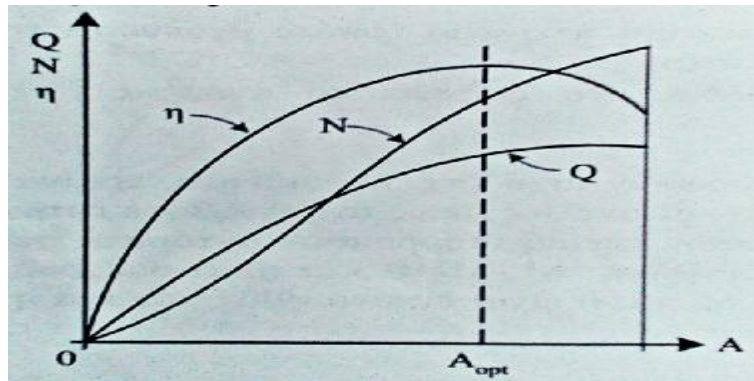
Η χαρακτηριστική της σωλήνωσης εκφράζει την διαθέσιμη στον υδροστρόβιλο υδραυλική πτώση  $H$  (την διαθέσιμη από την εγκατάσταση ενέργεια ανά μονάδα μάζας του υγρού) συναρτήσει της παροχής και άρα είναι ο γεωμετρικός τόπος των δυνατών σημείων μόνιμης λειτουργίας του υδροστροβίλου. Με την χάραξη της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης  $H_S$  στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου στον οποίο έχουν χαραχθεί και οι καμπύλες ίσης ισχύος εξόδου και τα σημεία σταθερού ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός:

- i) του σημείου λειτουργίας ( $H, Q, \eta$  και  $N$ ) για κάθε τιμή  $A$  του ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων και
- ii) του κατάλληλου ανοίγματος  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων για την επίτευξη της ζητούμενης κάθε φορά ισχύος  $N$  που πρέπει να αποδίδει ο υδροστρόβιλος.

Στα συνήθη ΥΗΕ η υδραυλική πτώση  $H = \text{Στάθμη Ταμιευτήρα} - \text{Στάθμη Αγωγού Φυγής}$  είναι περίπου σταθερή λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη χωρητικότητα και επιφάνεια του άνω ταμιευτήρα όποτε η ανάντι στάθμη αγωγού φυγής είναι σχεδόν σταθερή και οι

--	--	--

μεταβολές της είναι αργές και εποχιακές. Στην Ελλάδα όπου το νερό των ταμιευτήρων προέρχεται από τις βροχοπτώσεις και το λιώσιμο του χιονιού η χαμηλότερη στάθμη των ταμιευτήρων συμβαίνει στο τέλος κάθε υδρολογικού έτους, δηλ. τον Σεπτέμβριο. Το αντίθετο σχεδόν συμβαίνει σε ΥΗΕ που λειτουργούν κυρίως με το νερό που προέρχεται από παγετώνες.



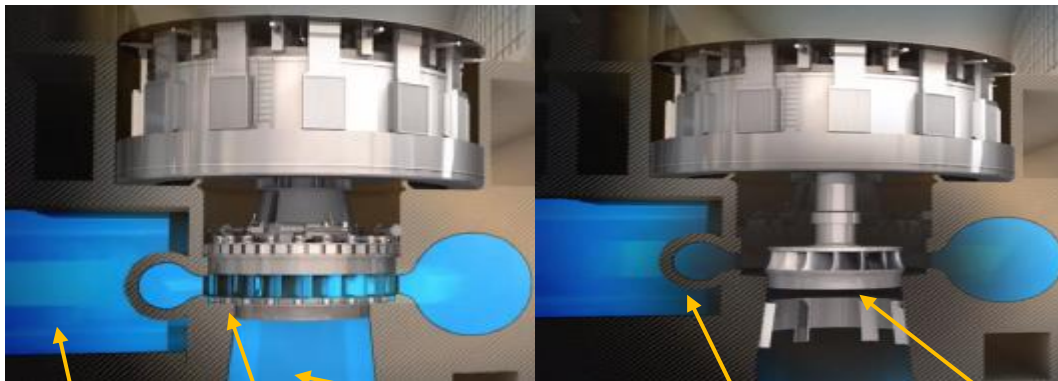
*Εικόνα 36. Χαρακτηριστικές λειτουργίας υδροστροβίλου συναρτήσει του ανοίγματος  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων για σταθερή υδραυλική πτώση  $H$  [πηγή: Α.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]*

Με την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροστροβίλου εισάγονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή υπό μορφή πινάκων ενώ μετρώνται και εισάγονται συνεχών σε αυτόν οι στάθμες ταμιευτήρα και αγωγού φυγής. Το κέντρο διαχείρισης του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού δικτύου καθορίζει την ισχύ που πρέπει να προσδώσει η κάθε μονάδα οπότε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής καθορίζει το αναγκαίο άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων και δίνει την αντίστοιχη εντολή στον ρυθμιστή της μονάδας. Η όλη διαδικασία γίνεται αυτόματα με μόνο την επίβλεψη του χειριστού.

### 2.2.3 ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΣ ΚΕΛΥΦΟΣ

Για τους παραπάνω λόγους επιλέγεται σπειροειδούς μορφής αγωγός τροφοδοσίας των υδροστροβίλων αντίδρασης, ο οποίος δίνει και αρχική συστροφή στο νερό, αλλά και τροφοδοτεί ομοιόμορφα την οδηγό πτερυγύωση προς την πτερωτή. Οι επίπεδες τομές του σπειροειδούς κελύφους που εμπεριέχουν τον άξονα της ρευστοδυναμικής μηχανής είναι κυκλικής διατομής η οποία μειώνεται κατά την περιφερειακή διεύθυνση έτσι ώστε να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή η ταχύτητα του νερού όπως φαίνεται στην Εικόνα 37. Το σπειροειδές περίβλημα είναι η πιο ογκώδης και στιβαρή κατασκευή της εγκατάστασης του υδροστροβίλου διότι δέχεται τη μεγαλύτερη στατική πίεση.

--	--	--



Αγωγός Προσφοράς	Κινητά πτερύγια	Αγωγός φυγής	Σπειροειδές κέλυφος	Δρομέας
------------------	-----------------	--------------	---------------------	---------

Εικόνα 37. Τομή πλήρους σχεδιασμού υδροστροβίλου Francis. [πηγή: Υροκου αβαριου CSHΓЭС]

### Ø Καθορισμός των κύριων διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους

Οι κύριες διαστάσεις του σπειροειδούς κελύφους εξαρτώνται από την τιμή της μέσης ταχύτητας  $c_e$  στην διατομή εισόδου, διαμέτρου  $D_e$ . Προφανώς, η  $c_e$  συνδέεται με την διάμετρο  $D_e$  μέσω της αρχής της συνέχειας. Ο υπολογισμός του σπειροειδούς κελύφους γίνεται στο κανονικό σημείο λειτουργίας και βασίζεται στην αρχή της συνέχειας, θεωρώντας ομοιόμορφη τροφοδοσία του δρομέα κατά την περιφέρεια, και στην αρχή διατήρησης της συστροφής. Συγκεκριμένα, συμβολίζοντας με  $\theta$  την γωνία κατά την περίμετρο ( η τιμή  $\theta=0$  αντιστοιχεί στην αρχή του σπειροειδούς κελύφους στην θέση της γλωττίδας ), η αντίστοιχη παροχή θα είναι ίση προς:

$$Q_q = Q \times (1 - q / 2p) \quad (2.59)$$

όπου  $Q$  η εισερχόμενη παροχή. Από την διατομή εισόδου και μέχρι την είσοδο στην στεφάνη των οδηγητικών πτερυγίων, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της συστροφής, θα ισχύει:

$$c_u \times r = \text{σταθ.} \quad (2.60)$$

Η τιμή της  $c_e$  σε m/sec λαμβάνεται από την ακόλουθη συσχέτιση συναρτήσεως του  $n_s$ :

$$c_e = 84,4 \times n_s^{-0,44} \quad (2.61)$$

οπότε η διάμετρος εισόδου  $D_e$  προκύπτει από την σχέση:

$$\frac{D_e}{D_{2e}} = 1,2 - \frac{19,56}{n_s} \quad (2.62)$$

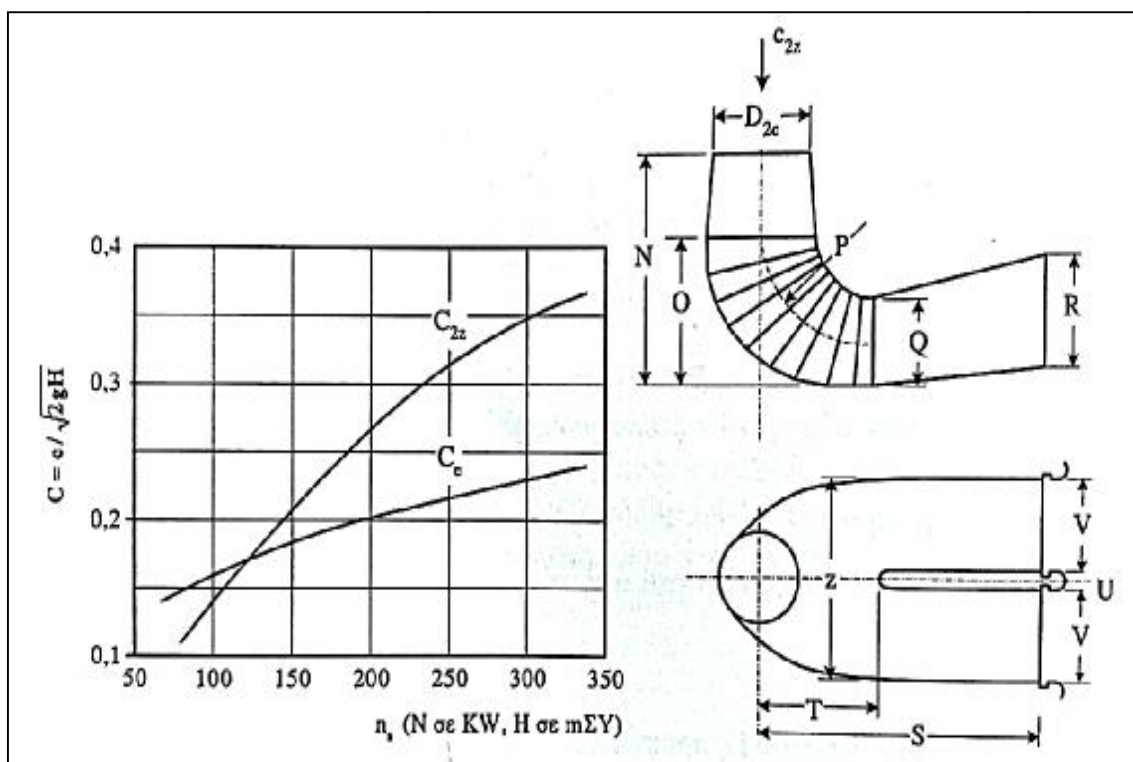
Η επιλογή της ταχύτητας εισόδου  $c_e$  είναι καθοριστική για το μέγεθος του σπειροειδούς κελύφους. Δεδομένου ότι πρόκειται για το ογκωδέστερο τμήμα του υδροστροβίλου, καθώς περιβάλλει όλα τα άλλα, προσδιορίζει κατά κύριο λόγο τον όγκο που καταλαμβάνει ο υδροστροβίλος και έχει σημαντική συνεισφορά στην διαμόρφωση του κόστους της μονάδας. Η αδιάστατη παράμετρος:

$$C_e = c_e / \sqrt{2gH} \quad (2.63)$$

όταν η  $c_e$  λαμβάνεται από την σχέση  $c_e = 84,4 \times n_s^{-0,44}$ , μεταβάλλεται ανάλογα προς το ( $H^{0,17}$ ), δηλ. αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση του  $n_s$ . Το γεγονός αυτό αποτελεί συμβιβαστική λύση μεταξύ δύο αντίθετων επιδιώξεων, την διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης (χαμηλές ταχύτητες, μεγάλος όγκος) και χαμηλού κόστους και χαμηλού κόστους (μικρός όγκος, υψηλές ταχύτητες). Συγκεκριμένα, διατήρηση του  $C_e$  σταθερού (ανεξάρτητα της τιμής του  $n_s$ ) σημαίνει ότι οι υδραυλικές απώλειες στο κέλυφος (ανάλογες του  $c_e^2$ ) είναι σταθερό ποσοστό του  $H_K$  και άρα διατηρείται σταθερή η αντίστοιχη συνεισφορά τους στον υδραυλικό βαθμό απόδοσης της μονάδας. Στις υψηλές όμως τιμές του  $n_s$  (δηλ. για αναλογικά μεγάλες παροχές) η σταθερή τιμή του  $C_e$  αντιστοιχεί σε μεγάλο όγκο της μονάδας γεγονός που επιβαρύνει το


κόστος της. Διατήρηση σταθερής της  $c_e$  (m/sec) θα σήμαινε, με σταθερές τις άλλες παραμέτρους, σημαντική αύξηση του ποσοστού της αδιάστατης παραμέτρου  $C_e$  αυξανομένου του  $\eta_s$  και άρα αύξηση του ποσοστού των υδραυλικών απωλειών. Η συσχέτιση εκφράζει λοιπόν τον συμβιβασμό των δύο αυτών αντίθετων επιδιώξεων (βαθμός απόδοσης και κόστος).

--	--	--



Εικόνα 38 α) Μεταβολή των αδιάστατων παραμέτρων  $C_e$  και  $C_z$  συναρτήσει του  $n_s$ , β) Κύριες διαστάσεις αγωγού απαγωγής υδροστρόβιλου Francis [πηγή: Δ. Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

Οι υπόλοιπες κύριες διαστάσεις του σπειροειδούς κελύφους δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις συναρτήσει του  $n_s$ , όταν η ταχύτητα εισόδου υπολογίζεται από την σχέση

$$c_e = 84,4 \lambda_s^{-0,44} : \quad (2.64)$$

$$\frac{B}{D_{2e}} = 1,1 + \frac{54,8}{n_s} \quad (2.64_a)$$

$$\frac{C}{D_{2e}} = 1,32 + \frac{49,25}{n_s} \quad (2.64_β)$$

$$\frac{D_d}{D_{2e}} = 0,79 + \frac{81,75}{n_s} \quad (2.64_γ)$$

$$\frac{I}{D_{2e}} = 0,10 + 6,5 \times 10^{-4} \times n_s \quad (2.64_δ)$$

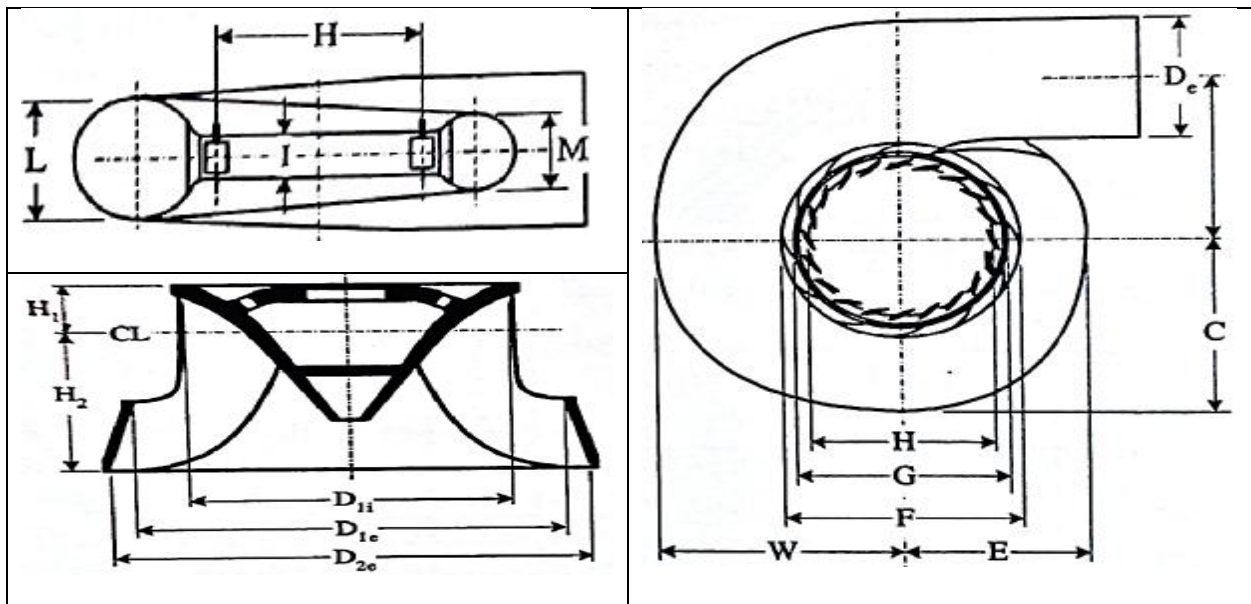
$$\frac{W}{D_{2e}} = 1,50 + \frac{48,8}{n_s} \quad (2.64_ε)$$

$$\frac{E}{D_{2e}} = 0,98 + \frac{63,6}{n_s} \quad (2.64_στ)$$

$$\frac{L}{D_{2e}} = 0,88 + 4,9 \times 10^{-4} \times n_s \quad (2.64_ζ)$$

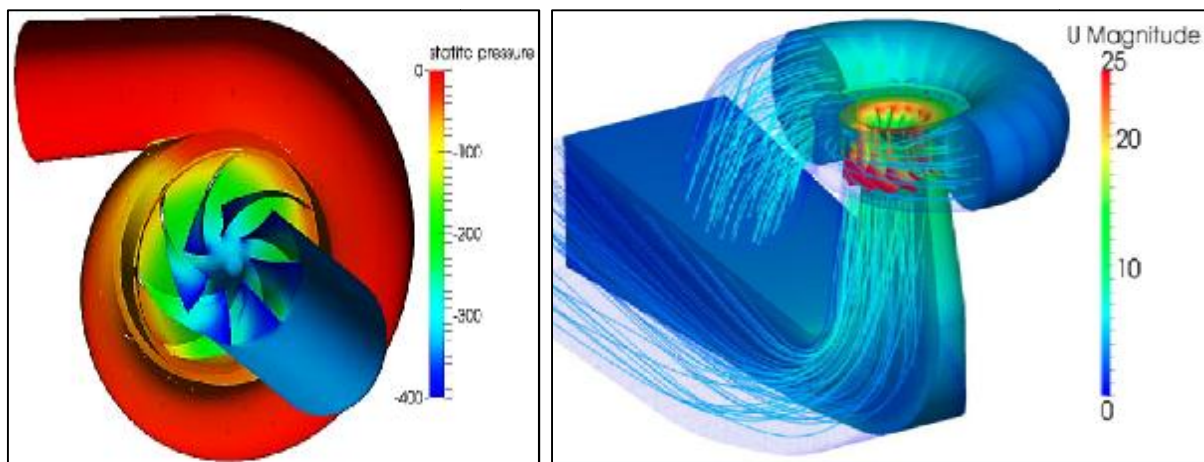
$$\frac{M}{D_{2e}} = 0,60 + 1,5 \times 10^{-5} \times n_s \quad (2.64_η)$$

--	--	--



Εικόνα 39 α) Μεσημβρινή τομή και κύριες διαστάσεις δρομέα β) Κύριες διαστάσεις του σπειροειδούς κελύφους υδροστρόβιλου Francis [πηγή: Δ. Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

Στην Εικόνα 40 μέσω της ανάλυσης CFD φαίνεται ότι το νερό χάνει ένα μέρος της πίεσης του στο σπειροειδές (σπείρα του περιβλήματος) για να διατηρηθεί η ταχύτητά του. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ενέργειας στο δρομέα (περωτή) υπάρχει μια πτώση στατικής πίεσης και μία πτώση στο ύψος ταχύτητας. Μόνο ένα μέρος του συνολικού ύψους που παρουσιάζεται στη μηχανή μετατρέπεται σε ύψος ταχύτητας πριν την είσοδο του δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται από τα οδηγά αλλά και από τα ρυθμιζόμενα κινητά περύγια. Μετά το νερό περνά μέσω οδηγών περυγίων όπου κατευθύνεται να χτυπήσει τις λεπίδες στο δρομέα στις βέλτιστες γωνίες. Καθώς το νερό ρέει μέσω του δρομέα η πίεση και η στροφορμή του μειώνεται. Εκτενής αναφορά γίνεται στην ενότητα 2.2.7.

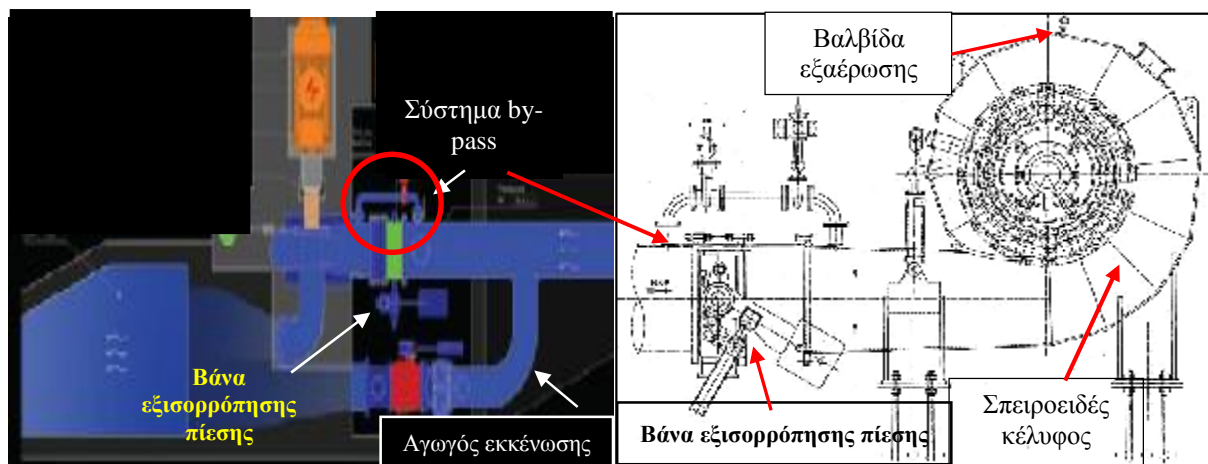


Εικόνα 40 διαβάθμιση στατικής πίεσης και ταχύτητας στον Υδροστρόβιλο Francis με την μέθοδο CFD [πηγή: en.wikipedia.org/.../Foreign\_direct\_i.]

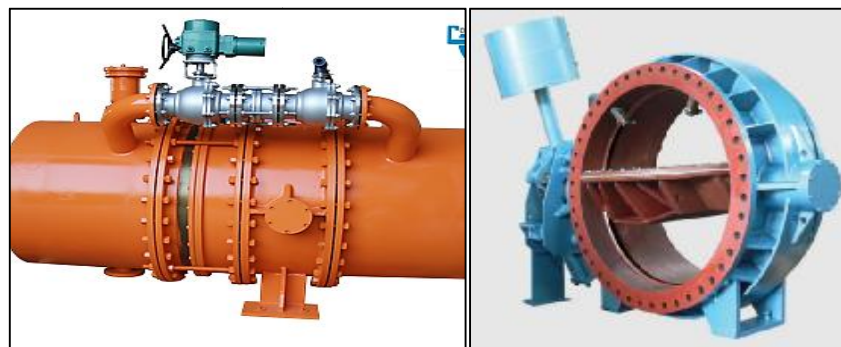
--	--	--

## 2.2.4 ΒΑΝΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η βάνα εξισορρόπησης πίεσης (βάνα δικλείδα πεταλούδα) είναι τοποθετημένη στο σημείο που συνδέεται ο αγωγός προσαγωγής με το σπειροειδές κέλυφος. Ο αγωγός πρέπει να είναι πάντα γεμάτος, εκτός λειτουργίας μονάδας, αυτό γίνεται για να αποφευχθεί το φαινόμενο οξείδωσης στο εσωτερικό του και εν λειτουργία μονάδας για να διατηρείται σταθερή η πίεση. Έτσι λοιπόν κατά την διακοπή της λειτουργίας του υδροστροβίλου κλείνει η βάνα εξισορρόπησης πίεσης, για να μείνει ο αγωγός γεμάτος. Όταν ξανατεθεί σε λειτουργία ο υδροστρόβιλος θα ανοίξει πρώτα η βάνα του by-pass, αυτό γίνεται γιατί πριν την βάνα εξισορρόπησης πίεσης η πίεση θα είναι κατά πολύ υψηλότερη από ότι μετά από αυτή. Η πίεση πριν θα είναι  $\rho gh$ , πχ. Αν το διαθέσιμο ύψος πτώσης είναι 75m, η πίεση θα είναι 7,35 atm, ενώ μετά από την βάνα θα είναι ίση με την ατμοσφαιρική δηλαδή 1 atm. Αυτή η διαφορά πίεσης με το άνοιγμα της βάνας εξισορρόπησης πίεσης θα έχει ως επακόλουθο την καταστροφή τόσο της ίδιας όσο και των υπόλοιπων στοιχείων που βρίσκονται στην συνέχεια (οδηγιά και κινητά περύγια, δρομέας). Με το άνοιγμα της βάνας του by-pass το νερό εισέρχεται σε μικρότερη διατομή με μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη πίεση (εξ. Συνέχειας, εξ. Bernoulli) έτσι πετυχαίνουμε να δημιουργήσουμε την ίδια πίεση και στις δύο πλευρές της βάνας εξισορρόπησης πίεσης, έπειτα κλείνει η βάνα by-pass και ανοίγει η βάνα εξισορρόπησης πίεσης



Εικόνα 41. Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας υδροστροβίλου. [πηγή: Francis Turbine\_Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, CallenHecker]

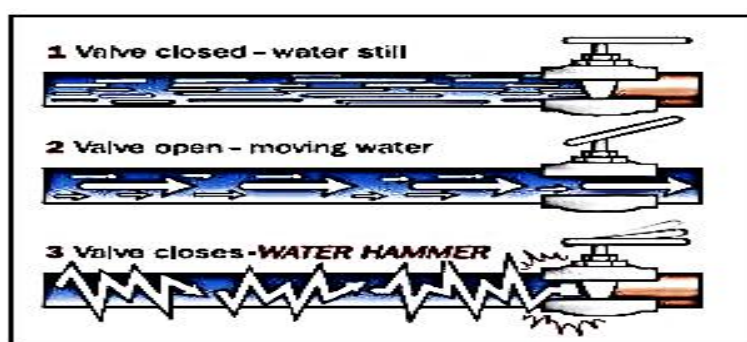


Εικόνα 42.α) Σύστημα by-pass β) βάνα εξισορρόπησης πίεσης [πηγή: valves typeconstr/hrpe]

--	--	--

Καθώς γεμίζει το σπειροειδές κέλυφος μέσω της βαλβίδα εξαέρωσης απομακρύνεται όλος ο αέρας που υπάρχει μέσα στο κέλυφος για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ανάπτυξης σπηλαιώσης.

**Το υδραυλικό πλήγμα** γίνεται όταν κλείσει η βάνα εξισορρόπησης πίεσης. Αυτό ανακόπτει την ροή του νερού βίαια με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν κρουστικές δυνάμεις αντίθετης φοράς από την ροή του νερού. Η εκτόνωση αυτών των δυνάμεων γίνεται εγκάρσια στα τοιχώματα του αγωγού καθώς και κατά το μήκος του αγωγού. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο σχεδιάζουμε κατάλληλα τόσο την εγκατάσταση του αγωγού όσο και το τύπο του αγωγού (φλαντζωτός, ελικοειδής). Στους υδροστρόβιλους Pelton ο αγωγός πτώσεως είναι μεγάλου μήκους και για αυτό τον λόγω η απόσβεση των κατά μήκος κρουστικών δυνάμεων γίνεται σε πύργο εκτόνωσης, αντίθετα με τους υδροστρόβιλους Francis όπου ο αγωγός πτώσεως είναι μικρότερου μήκους και η εκτόνωση γίνεται στην λίμνη.



Εικόνα 43 Υδραυλικό πλήγμα. [πηγή: Francis Turbines-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker]

## 2.2.5 ΣΕΡΒΟΜΟΤΕΡ

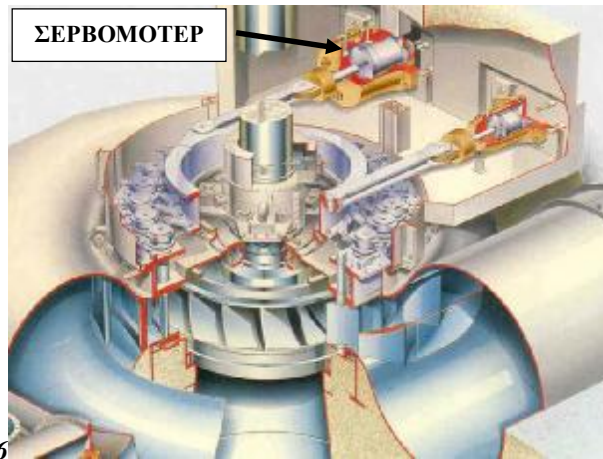
**Σερβομοτέρ** είναι ο χειροκίνητος μηχανισμός ρύθμισης ανοίγματος κινητών πτερυγίων ρυθμιζόμενης από 0-100% εύρους ανοίγματος, παρέχεται για την αποφυγή να υπερβεί το άνοιγμα των κινητών πτερυγίων μια προκαθορισμένη ρύθμιση που αναφέρεται παρακάτω. Αυτός ο μηχανισμός αποτελείται από μια χειροκίνητη κεφαλή φρεναρίσματος τοποθετημένη στο δεξί Σερβομοτέρ, οι οποία θα πρέπει να ρυθμίζεται στο άνοιγμα των κινητών πτερυγίων ανταποκρινόμενη στην μέγιστη στη υποδύναμη που επιτρέπεται για το ενεργό ύψος υδατόπτωσης την στιγμή αυτή. Η χρήση της κεφαλής σταματημού θα εμποδίσει τις υπερβολικές πιέσεις στον στρόβιλο και στη γεννήτρια εξαιτίας της υπερφόρτωσης και θα συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση των επιδράσεων της σπηλαιώσης.



Εικόνα 44 Σύστημα Σερβομοτέρ με τα κινητά πτερύγια. [πηγή: αρχείο ΥΗΣ Καστρακίου]



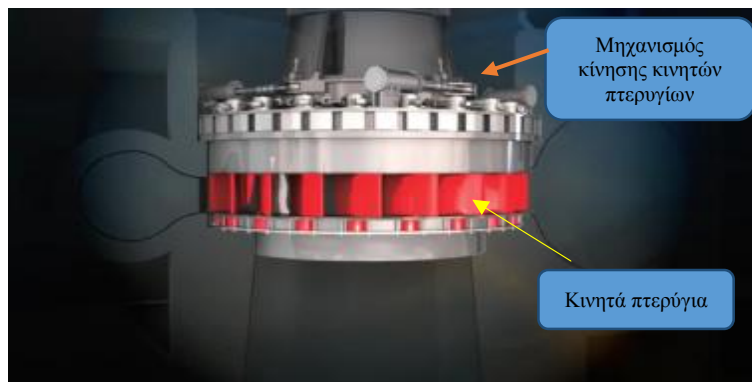
--	--	--



Εικόνα 45 Αναλυτικό σχέδιο Υδροστροβίλου Francis περιλαμβανομένου των βασικών στοιχείων [πηγή: [slideshare.net/jaypatel581/hydraulic-turbine](http://slideshare.net/jaypatel581/hydraulic-turbine)]

### 2.2.6 ΟΔΗΓΑ ΚΙΝΗΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

Μέσα στο σπειροειδές κέλυφος το νερό είναι υποχρεωμένο να περάσει μέσα από τα ρυθμιστικά κινητά οδηγία πτερύγια τα οποία είναι προσαρμοσμένα στην περιφέρεια του δρομέα. Κάθε πτερύγιο μπορεί να περιστρέφεται περί του άξονά του. Σκοπός αυτής της περιστροφής είναι ο έλεγχος της εισερχόμενης παροχής εντός των πτερυγίων του δρομέα και συνεπώς ο έλεγχος της παρεχόμενης ισχύος.



Εικόνα 46 Μηχανισμός κίνησης κινητών πτερυγίων (Σερβομοτέρ) [πηγή: Ένεργο-24]

Ο ρόλος των ρυθμιστικών οδηγών πτερυγίων είναι διπλός. Δίνουν στη ροή την τελική διεύθυνση της απόλυτης ταχύτητας εισόδου στα πτερύγια του στροφείου και ρυθμίζουν την παροχή του νερού. Οδηγούν τη ροή αποκλειστικά επάνω σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του στροβίλου (ακτινική ροή), αποκλείοντας κάθε αξονική συνιστώσα της ταχύτητας του νερού.

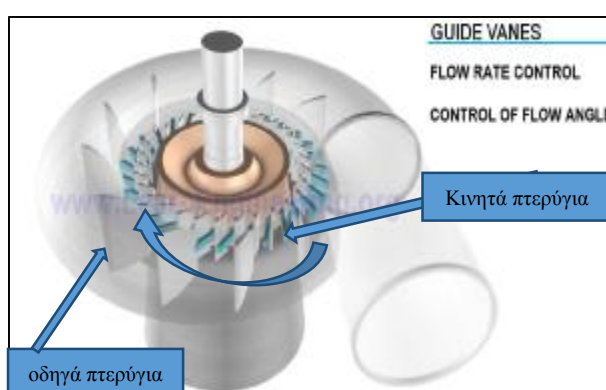
Τα ρυθμιστικά αυτά πτερύγια έχουν δυνατότητα σύγχρονης περιστροφής περί άξονα παράλληλο με τον άξονα του στροβίλου, μέσω κατάλληλου μηχανισμού, έτσι ώστε να δημιουργούνται ομοιόμορφοι συγκλίνοντες δίοδοι του ρευστού. Είναι μεγάλης αντοχής καμπυλωμένα μεταλλικά ορθογωνικά στοιχεία με μέση γραμμή διατομής απλού κυκλικού τόξου και αεροδυναμική διατομή. Το μήκος της χορδής των κυκλικών τόξων επιλέγεται σχετικά μικρό, έτσι ώστε οι καταπονήσεις των πτερυγίων να είναι στα επιτρεπτά πλαίσια.

Στα μεγάλα συγκροτήματα με βάση τον υπολογισμό της αντοχής προκύπτει μεγάλος αριθμός πτερυγίων. Όλες οι γενέτειρές τους είναι παράλληλες με τον άξονα του στροφείου.

--	--	--

Όταν μεταβληθεί το φορτίο στον άξονα ενός υδροστροβίλου, για να κρατηθούν σταθερές οι στροφές ανά μονάδα χρόνου, δεδομένου ότι το μανομετρικό ύψος του υδροστροβίλου είναι σταθερό, πρέπει να μεταβληθεί η παροχή του νερού. Αύξηση, δηλαδή, του φορτίου απαιτεί και αύξηση της παροχής του νερού. Αυτό γίνεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την κατάλληλη περιστροφή των ρυθμιστικών πτερυγίων.

Όταν σε μια εγκατάσταση υδροστροβίλου είναι γνωστό το φορτίο, δηλαδή η ροπή που πρέπει να έχει στον άξονά του και οι στροφές ανά μονάδα χρόνου με τις οποίες πρέπει να στρέφεται το φορτίο, δεδομένου ότι το μανομετρικό ύψος είναι γνωστό από την υδατόπτωση, με τη ρύθμιση της παροχής προσδιορίζεται το κανονικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου. Με το σύστημα των ρυθμιστικών πτερυγίων ρυθμίζεται το κανονικό σημείο λειτουργίας, επιτυγχάνεται δηλαδή η κατάλληλη παροχή, έτσι ώστε η απόδοση του υδροστροβίλου να είναι μέγιστη.



**Εικόνα 47 Έλεγχος ροής μέσω τις γωνίας ανοίγματος των κινητών πτερυγίων [πηγή: learn engineering, [www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo](http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo)]**

Στην Εικόνα 48 φαίνονται δύο θέσεις ρύθμισης της οδηγού πτερύγωσης. Στην πρώτη θέση η πτερύγωση τροφοδοτεί την πτερωτή με νερό, ενώ στη δεύτερη η πτερύγωση φράσσει τη δίοδο και αποκόπτει την παροχή του νερού, που έχει ως συνέπεια να τεθεί η μονάδα εκτός λειτουργίας. Στη θέση αυτή ασκούνται στα οδηγητικά πτερύγια πολύ μεγάλες δυνάμεις και, για το λόγο αυτό, απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή των υλικών και στιβαρότητα στην κατασκευή.

Τα ρυθμιστικά πτερύγια και οι στροφείς τους κατασκευάζονται συνήθως από ανθρακούχους χάλυβες, υψηλής αντοχής μικροκράμματα (HSMA), ανοξείδωτους χάλυβες και θερμικά επεξεργασμένους χάλυβες. Πρέπει, επίσης, να προβλέπεται η ασφαλής αντιμετώπιση αστοχιών θραύσης ή κινητικού ελέγχου των πτερυγίων. Σε περίπτωση καταστροφής του μηχανισμού οδήγησης των πτερυγίων, αυτά είναι σχεδιασμένα, έτσι ώστε να κλείνουν με την επενέργεια της διερχόμενης ροής.



**Εικόνα 48 Ομοίωμα οδηγού πτερύγωσης σε στρόβιλο Francis(ανοικτή- κλειστή θέση) [πηγή: Ένεργο-24]**

--	--	--

Οι αξονικοί υδροστροβίλοι με πτερύγια ρυθμιζόμενης κλίσης παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος και αυξημένη κατασκευαστική δυσκολία αλλά έχουν μεγαλύτερο πεδίο τιμών λειτουργικών συνθηκών παροχής και μανομετρικού ύψους με υψηλό βαθμό απόδοσης. Ένας αξονικός στροβίλος με συγκεκριμένη κλίση πτερυγίων για κάποιες συνθήκες παροχής και μανομετρικού ύψους παρουσιάζει μέγιστο βαθμό απόδοσης (σημείο λειτουργίας). Για να υπάρχει δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας του στροβίλου με διαφοροποιημένη παροχή ή με κυμαινόμενο μανομετρικό ύψος, πρέπει να είναι δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων του ως προς την επερχόμενη ροή.

Ο αριθμός των πτερυγίων στους υδροστροβίλους Francis, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και την εμπειρία, επιλέγεται περιττός (11, 13, 15 συνήθως) για λόγους αποφυγής δονήσεων και συντονισμού από υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις πίεσης, που προκαλούνται από το πέρασμα των κινητών πτερυγίων διαμέσου των απορρεμάτων και της στροβιλότητας, που δημιουργείται στην ακμή φυγής της ροής από τα οδηγητικά πτερύγια των οποίων ο αριθμός είναι πάντα άρτιος (πχ.24 για ΥΗΣ Καστρακίου), για κατασκευαστικούς λόγους, που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Όταν μεταβληθεί το φορτίο στον άξονα ενός υδροστροβίλου, για να κρατηθούν σταθερές οι στροφές ανά μονάδα χρόνου, δεδομένου ότι το μανομετρικό ύψος του υδροστροβίλου είναι σταθερό, πρέπει να μεταβληθεί η παροχή του νερού. Αύξηση, δηλαδή, του φορτίου απαιτεί και αύξηση της παροχής του νερού. Αυτό γίνεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την κατάλληλη περιστροφή των ρυθμιστικών πτερυγίων. Όταν σε μια εγκατάσταση υδροστροβίλου είναι γνωστό το φορτίο, δηλαδή η ροπή που πρέπει να έχει στον άξονά του και οι στροφές ανά μονάδα χρόνου με τις οποίες πρέπει να στρέφεται το φορτίο, δεδομένου ότι το μανομετρικό ύψος είναι γνωστό από την υδατόπτωση, με τη ρύθμιση της παροχής προσδιορίζεται το κανονικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου. Με το σύστημα των ρυθμιστικών πτερυγίων ρυθμίζεται το κανονικό σημείο λειτουργίας, επιτυγχάνεται δηλαδή η κατάλληλη παροχή, έτσι ώστε η απόδοση του υδροστροβίλου να είναι μέγιστη. Υπάρχουν δύο θέσεις ρύθμισης της οδηγού πτερύγωσης. Στην πρώτη θέση η πτερύγωση τροφοδοτεί την πτερωτή με νερό, ενώ στη δεύτερη η πτερύγωση φράσσει τη δίοδο και αποκόπτει την παροχή του νερού, που έχει ως συνέπεια να τεθεί η μονάδα εκτός λειτουργίας. Στη θέση αυτή ασκούνται στα οδηγητικά πτερύγια πολύ μεγάλες δυνάμεις και, για το λόγο αυτό, απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή των υλικών και στιβαρότητα στην κατασκευή.



**Εικόνα 49.** α) Σύστημα κίνησης κινητών πτερυγίων, β) τοποθέτηση κινητών πτερυγίων σε ΥΗΣ [πηγή: *Θαέρσο-24*, , *Steam Turbine Impulse and Reaction*]

--	--	--



Εικόνα 50 α) Τοποθέτηση δρομέα β) Κατασκευή τμημάτων Υδροστροβίλου Francis  
[πηγή: Steam Turbine Impulse and Reaction]

**Ø Πως επιλέγουμε μέγιστη γωνία ανοίγματος σε μέγιστο φορτίο**

Πίνακας 2. Σχέσεις υπολογισμού γωνίας ανοίγματος κινητών πτερυγίων

$$\alpha_{go} = 4 \cdot (-4 \cdot \Omega^2 + 13 \cdot \Omega + 1)$$

$$\Omega = \underline{\omega} \sqrt{\underline{Q}}$$

$$\underline{\omega} = \omega / \sqrt{2gH}$$

$$\underline{Q} = Q / \sqrt{2gH}$$

[πηγή: Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker]

**2.2.7 ΔΡΟΜΕΑΣ**

Αποτελείται από μια σειρά καμπυλωμένων πτερυγίων, τα οποία είναι συμμετρικά κατανεμημένα και προσαρμοσμένα επί της περιφέρειας. Εκτείνονται μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης στην οποία είναι πακτωμένα. Αυξάνεται έτσι η μηχανική στιβαρότητα της κατασκευής και η αντοχή στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια από τη διερχόμενη ροή. Τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα ούτως ώστε το νερό να εισέρχεται στο δρομέα ακτινικά και στο ύψος της εξωτερικής περιφέρειας και να εξέρχεται απ' αυτόν κατά την αξονική διεύθυνση και στο ύψος της εσωτερικής περιφέρειας. ο στρεφόμενος δρομέας αποτελεί το τμήμα του υδροστροβίλου που μετατρέπει την ενέργεια του υγρού σε μηχανική, δηλαδή το τμήμα στο οποίο αναπτύσσεται μηχανική κινητήρια ροπή.

**Ø Καθορισμός των κύριων διαστάσεων του δρομέα**

Οι υπόλοιπες κύριες διαστάσεις που καθορίζουν την γεωμετρία της μεσημβρινής τομής του δρομέα (υδραυλικό προφίλ) δίνονται συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$ , αδιαστατοποιημένες ως προς την  $D_{2e}$ , από τις ακόλουθες σχέσεις:

--	--	--

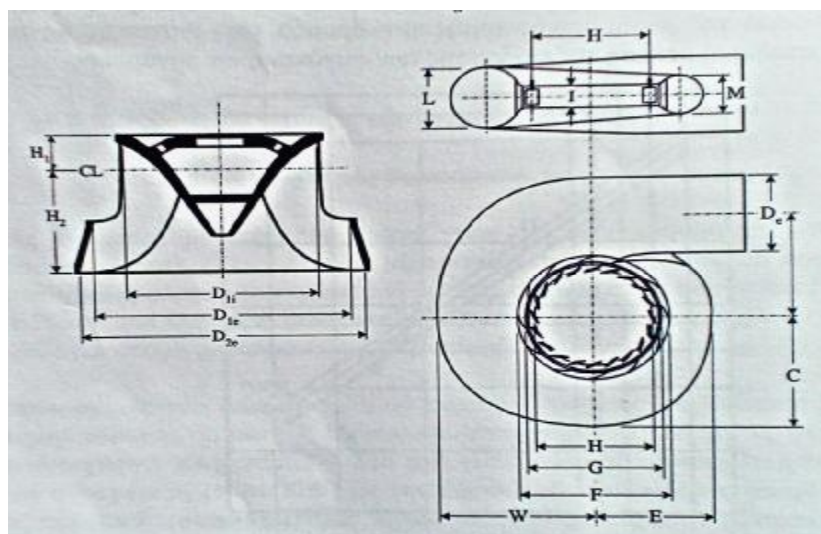
$$\frac{D_{li}}{D_{2e}} = 0,40 + \frac{94,5}{n_s} \quad (2.65_a)$$

$$\frac{D_{le}}{D_{2e}} = \frac{1}{0,96 + 0,38 \times 10^{-3} \times n_s} \quad (2.65_\beta)$$

$$\frac{H_1}{D_{2e}} = 0,094 + 0,25 \times 10^{-3} \times n_s \quad (2.65_\gamma)$$

$$\frac{H_2}{D_{2e}} = -0,05 + \frac{42}{n_s} \quad \text{για } 50 < n_s < 110 \quad (2.65_\delta)$$

$$\text{ή } \frac{H_2}{D_{2e}} = \frac{1}{3,16 - 1,3 \times 10^{-3} \times n_s} \quad \text{για } 110 < n_s < 350 \quad (2.65_\epsilon)$$



Εικόνα 51 Μεσημβρινή τομή και κύριες διαστάσεις δρομέα  
[πηγή: Α.Παπαντώνης 'Υδροδυναμικές Μηχανές']

Οι μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης των συσχετίσεων αυτών επιβεβαιώνει ότι ο ειδικός αριθμός στροφών  $n_s$  (ή ο  $n_q$ ) χαρακτηρίζει την μορφή της μεσημβρινής τομής του δρομέα και επιβεβαιώνει την ισχύ των νόμων ομοιότητας.

Το ύψος  $b$  των ρυθμιστικών πτερυγίων, όπως προτείνεται από τον Th. Bovet, δίνεται από την σχέση:

$$\frac{b}{D_{2e}} = 7,28 \times 10^{-4} n_s (2 - 1,82 \times 10^{-3} \times n_s) \quad (2.66)$$

### Ø Πάχος πτερυγίων δρομέα

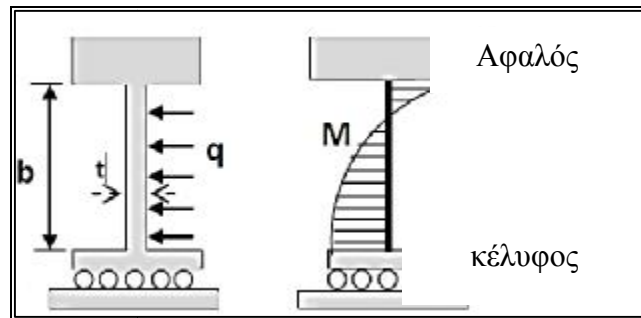
Αφού καθοριστεί ο αριθμός των πτερυγίων, επιλέγεται το πάχος τους. Για τους υπολογισμούς, το πάχος πτερυγίων έχει υποθεθεί από τον τελευταίο τους σχεδιασμό. Επιπλέον, η κατανομή του πάχους μπορεί να αλλάξει. Το πάχος πτερυγίων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να αντέχει τις υδραυλικές δυνάμεις στις οποίες αυτά εκτίθενται.

Οι υδραυλικές δυνάμεις είναι η στατική πίεση μεταξύ της πλευράς πίεσης και υποπίεσης του πτερυγίου και η δυναμική πίεση παλμού, όπου η στατική δύναμη είναι η μεγαλύτερη. Λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας δρομέα, μια απλοποιημένη ανάλυση τάσης έχει διεξαχθεί για την εκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου πάχους.

Το πτερύγιο έχει μοντελοποιηθεί ως μια ακτίνα μεταξύ αφαλού και καλύμματος, όπου ο αφαλός θεωρείται άκαμπτος, ενώ το κάλυμμα να είναι ελεύθερο σε έλξη. Ο αφαλός είναι τότε

--	--	--

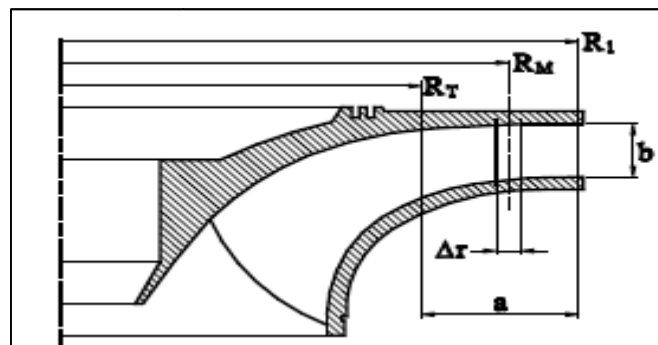
ελαστικός σε στρέψη και το πτερύγιο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια δέσμη που ασκεί πίεση στον αφαλό και οδηγείται στο κάλυφο, όπως φαίνεται στην εικόνα 52.



Εικόνα 52 Κατανομή δυνάμεων στο στροφείο. [πηγή: Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker]

Υποθέτουμε ισοκατανεμημένο φορτίο,  $q = Dr' Dp$ , η στιγμιαία κάμψη,  $M$ , δίνεται από τη σχέση

$$M = q' \frac{b^2}{3} \quad (Nm) \quad (2.67)$$



Εικόνα 53 Διαστασιολόγηση κελύφους δρομέα. [πηγή: Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker]

Η μέγιστη καμπτική τάση,  $\sigma_{\max}$ , είναι:

$$s_{\max} = \frac{M}{I} \times \frac{t}{2} [Pa] \quad (2.68)$$

Η στιγμιαία ροπή αδράνειας,  $I$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση, όπου  $t$  το πάχος πτερυγίου

$$I = \frac{Drt^3}{12} \int n^4 \dot{\theta} \quad (2.69)$$

Το ελάχιστο πάχος πτερυγίου στην είσοδο είναι:

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{2b^2 Dp}{s_{\max}}} [Pa] \quad (2.70)$$

Η διαφορά πίεσης υπολογίζεται από τη ροπή στο δρομέα. Υποθέτουμε ότι η συνολική ροπή μεταδίδεται από τη ροή στο πτερύγιο, όπου το μήκος  $a$  ορίζεται στο σχήμα της Εικόνας 53.

$$M_{\text{runner}} = Z_r ab R_M Dp = \frac{P}{w} \otimes Dp = \frac{P}{Z_r ab R_M w} [Pa] \quad (2.71)$$

Διάφορες προσομοιώσεις για Francis τουρμπίνες με ύψη υδατόπτωσης των 51m, 68m και 79m δείχνουν στατικές τάσεις από 95-125 Mpa στην οδηγό άκρη και 75-155 Mpa στην καταληκτική.

--	--	--

Ο Xiao υποστηρίζει μια γραμμική σχέση μεταξύ ισχύος και στατικών τάσεων σε υψηλότερα ύψη υδατόπτωσης. Οι δυναμικές καταπονήσεις έχουν ένα πολύ υψηλό εύρος των 15 Mpa. Αυτό έδωσε μια μέγιστη τάση των 196 Mpa, με περίπου το 1/4 της τελικής αστοχίας αντοχής του υλικού που χρησιμοποιείται. Ο Saeed έχει κάνει επίσης παρόμοια μοντέλα τάσεων που δείχνουν μέγιστη καταπόνηση από 123,5 Mpa. Και στις δύο περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις εκτελούνται για τουρμπίνες που δουλεύουν σε χαμηλότερα ύψη ωστόσο, οι υψηλότερες τιμές των τάσεων είναι μεγαλύτερες από τα φορτία.

Από παραδείγματα που έχουν πραγματοποιηθεί οι μετρήσεις της πίεσης σε ένα υψηλό μανομετρικό ύψος και σε ένα χαμηλό μανομετρικό ύψος στο δρομέα, η peak - to - peak παραλλαγή τάσης στο χαμηλό ύψος δρομέα είχε μια μέγιστη τιμή 229 Mpa. Οι υψηλές μετρήσεις ύψους παρουσιάζονται ως σχετικές, αλλά δηλώνει ότι στο υψηλό ύψος στις Francis τουρμπίνες δεν υπόκεινται στις ίδιες αυξημένες καταπονήσεις με το χαμηλό φορτίο. Στην υπερφόρτωση η μέση τάση και το δυναμικό εύρος της τάσης θα έχουν αρνητικό αντίκτυπο στη διάρκεια ζωής του δρομέα λόγω κόπωσης.

Μια σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και FEM-ανάλυση της X-blade Francis τουρμπίνας δείχνει καλή συμφωνία μεταξύ προσομοιώσεων και μετρήσεων. Οι μέγιστες τάσεις που βρέθηκαν από όργανα μέτρησης της καταπόνησης ήταν περίπου 65MPa, ενώ οι προσομοιώσεις έδειξαν μια μέγιστη τάση των 62 Mpa

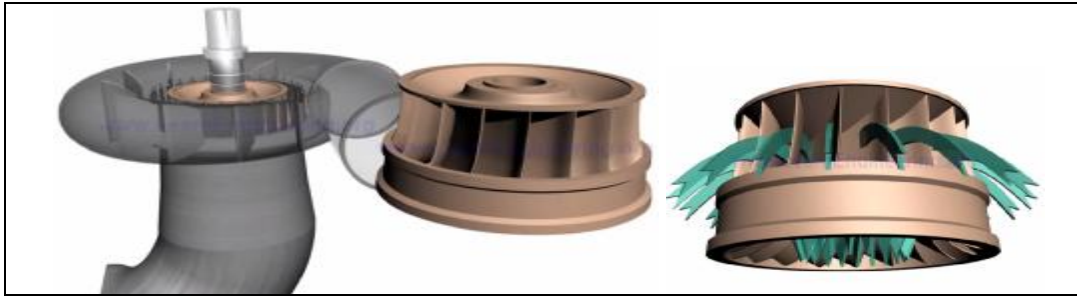
#### Ø Περιγραφή της διαμόρφωσης του δρομέα

Ο υδροστρόβιλος Francis είναι μια μηχανή αντίδρασης, πράγμα που σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ενέργειας στο δρομέα (περωτή) υπάρχει μια πτώση στατικής πίεσης και μία πτώση στο ύψος ταχύτητας. Μόνο ένα μέρος του συνολικού ύψους που παρουσιάζεται στη μηχανή μετατρέπεται σε ύψος ταχύτητας πριν την είσοδο του δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται από τα σταθερά αλλά και από τα ρυθμιζόμενα οδηγία πτερύγια. Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι ο Υδροστρόβιλος βρίσκεται σε λειτουργία γεμάτος με νερό, το οποίο εισέρχεται η στροφέο επί ολόκληρης της περιφέρειάς του. Ο δακτύλιος οδηγός πτερυγίων περιβάλλει το δρομέα στην εξωτερική του περιφέρεια, όπου η ροή του ρευστού είναι προς το κέντρο δρομέα.

Το νερό χάνει ένα μέρος της πίεσης του στο σπειροειδές (σπείρα του περιβλήματος) για να διατηρηθεί η ταχύτητά του. Μετά το νερό περνά μέσω οδηγών πτερυγίων όπου κατευθύνεται να χτυπήσει τις λεπίδες στο δρομέα στις βέλτιστες γωνίες. Καθώς το νερό ρέει μέσω του δρομέα η πίεση και η στροφορμή του μειώνεται. Η μείωση αυτή προσδίδει αντίδραση στο δρομέα και ισχύς μεταφέρεται στον άξονα του στρόβιλου. Αν ο στρόβιλος λειτουργεί υπό τις συνθήκες σχεδιασμού το νερό αφήνει το δρομέα κατά την αξονική διεύθυνση. Το νερό εξέρχεται από το στρόβιλο μέσω του σωλήνα αντλήσεως, το οποίο δρα ως διαχύτης και μειώνει την ταχύτητα εξόδου της ροής για την ανάκτηση μέγιστη ενέργεια από το νερό που ρέει

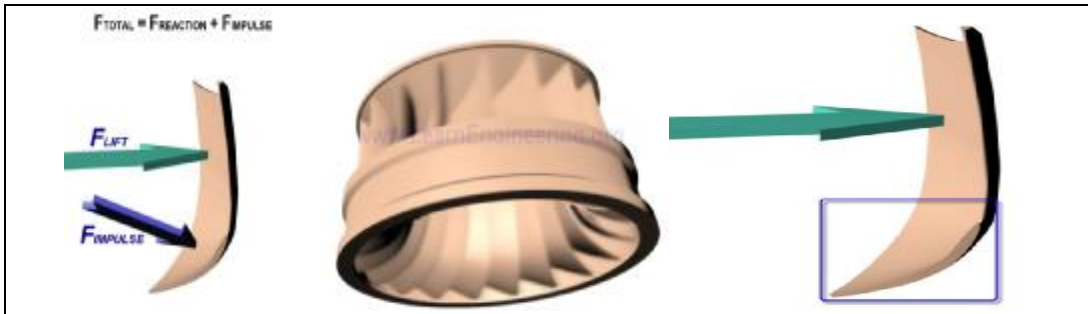
Η σχετική, ως προς την περωτή, ροή του ρευστού ακολουθεί την καμπυλότητα των πτερυγίων. Η εκτροπή αυτή της σχετικής ταχύτητας της ροής έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση δύναμης συνεχώς επάνω στα πτερύγια του στρόβιλου σύμφωνα με το νόμο της ορμής. Η δύναμη δημιουργεί ροπή ως προς το κέντρο του στροφέου και το περιστρέφει. Η αναπτυσσόμενη δύναμη, είναι ευθέως ανάλογη της παροχής του νερού και της απόλυτης ταχύτητας με την οποία το νερό προσβάλλει τα πτερύγια.

--	--	--



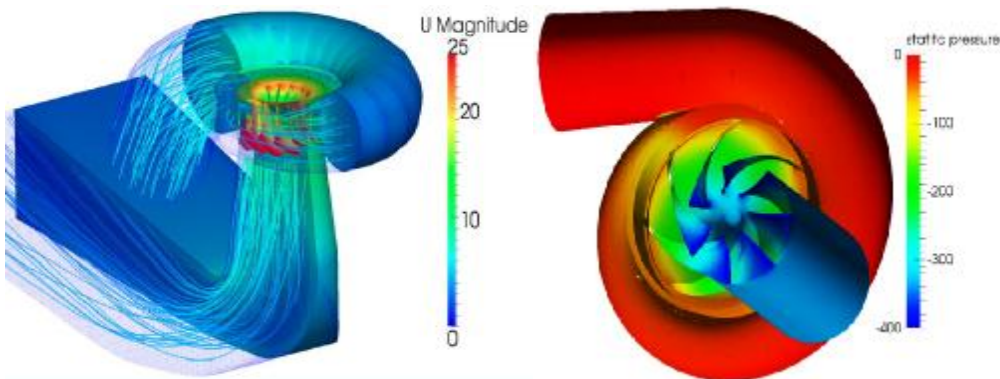
**Εικόνα 54** Στροφέιο – πτερωτή υδροστροβίλου Francis, εισαγωγή νερού ακτινικά και εξαγωγή του αξονικά [πηγή: learn engineering, [www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo](http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo)]

Σύμφωνα λοιπόν με τα προαναφερθέντα καθώς το νερό εισέρχεται στο στροφέιο μέρος της ακτινικής ροής προσκρούει επάνω στα πτερύγια του δρομέα με δύναμη που ωθεί το δρομέα σε περιστροφή ( $F_{impulse}$ ), και άλλη μια δύναμη εμφανίζεται, που οφείλεται στο βάρος του νερού, η οποία εκμεταλλεύεται την καμπυλότητα του πτερυγίου και καθώς κινείται προς τον αγωγό φυγής περιστρέφει το δρομέα ( $F_{reaction}$ ), (Εικόνα 55)



**Εικόνα 55** α) Ασκούμενες δυνάμεις επάνω στα πτερύγια. β) μορφή πτερύγιου [πηγή: learn engineering, [www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo](http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo)]

Στην εικόνα 56 φαίνεται από την ανάλυση CFD η μεταβολή της ταχύτητας και της πίεσης κατά την πορεία της ροής. Το κρίσιμο σημείο είναι τα άκρα των πτερυγίων του δρομέα. Το σημείο είναι κρίσιμο γιατί εκεί η πτώση πίεσης είναι απότομη και αν δεν υπολογισθεί σωστά κατά τον σχεδιασμό, το φαινόμενο της σπηλαιώσης θα είναι έντονο.



**Εικόνα 56** Διαβάθμιση ταχυτήτων, (α) και πίεσης (β) ρευστού που αναπτύσσονται στο από το σημείο εισόδου στον δρομέα έως την έξοδό του στον αγωγό φυγής μέσω ανάλυσης CFD. [πηγή: [cfdsupport.com/water-turbine-](http://cfdsupport.com/water-turbine-)]



--	--	--

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για να εξισορροπηθεί η πίεση στα πτερύγια του δρομέα είναι το πτερύγιο να κλίνει. Η γωνία που κλίνει το πτερύγιο δίνεται ως η γωνία που είναι προς την κατεύθυνση της ροής, που σημαίνει ότι προσκλίνοντας την κάθετη είσοδο εμφανίζεται η κλίση στο πτερύγιο. Μπορεί επίσης να εκφραστεί ως μια γωνιακή μετατόπιση της κάθε ρευματογραμμής στην είσοδο. Με την κλίση του πτερυγίου, η κατανομή της πίεσης από τον αφαλό ως το κάλυμμα μπορεί να ρυθμιστεί. Ως εκ τούτου οι ζώνες χαμηλής πίεσης στον αφαλό ή το κάλυμμα μπορούν να αφαιρεθούν κι επομένως να μειωθεί η εγκάρσια ροή στο πτερύγιο.

Η εικόνα 57(α) δείχνει την παλιά τουρμπίνα τύπου Tokke σχεδιασμένη χωρίς επιφανειακή κλίση στα πτερύγια. Η οδηγός ακμή τότε θα είναι κάθετη προς την κατεύθυνση περιστροφής.

Η εικόνα 57(α) δείχνει παραδοσιακή επικλινή πτερύγωση όπου η οδηγός ακμή στο κάλυμμα έχει μετακινηθεί στην αντίθετη κατεύθυνση από της περιστροφής. Ο σχεδιασμός X-Blade, που απεικονίζεται στην εικόνα 57(β), χρησιμοποιείται περισσότερο τα τελευταία χρόνια.

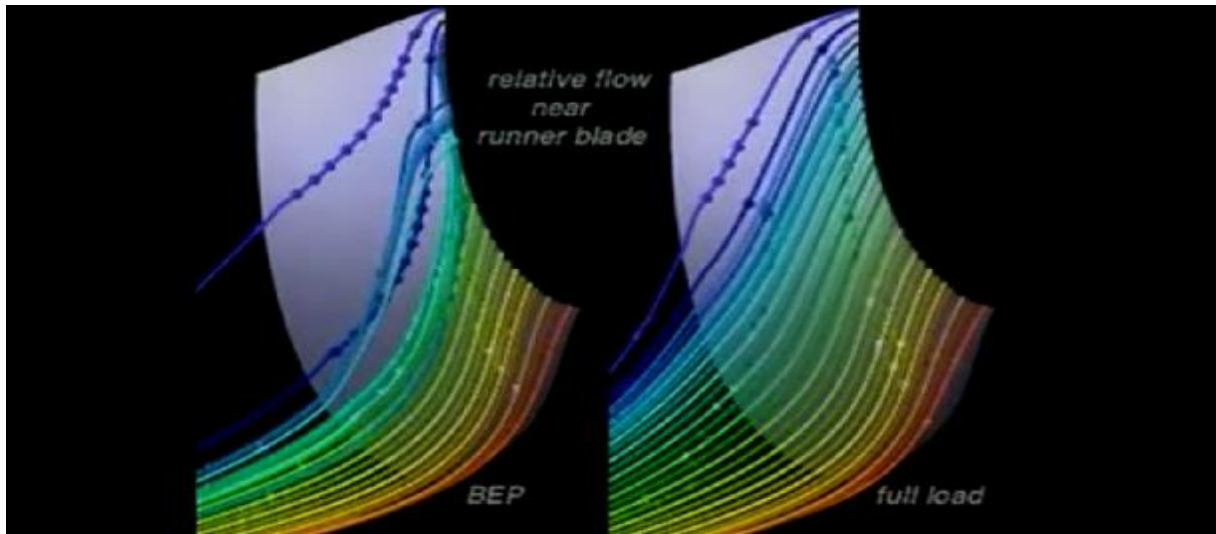


Εικόνα 57 (α) παραδοσιακό στροφέιο (β) x-blade  
[πηγή: [cgyunhe.com/Products/tabid/135](http://cgyunhe.com/Products/tabid/135)]

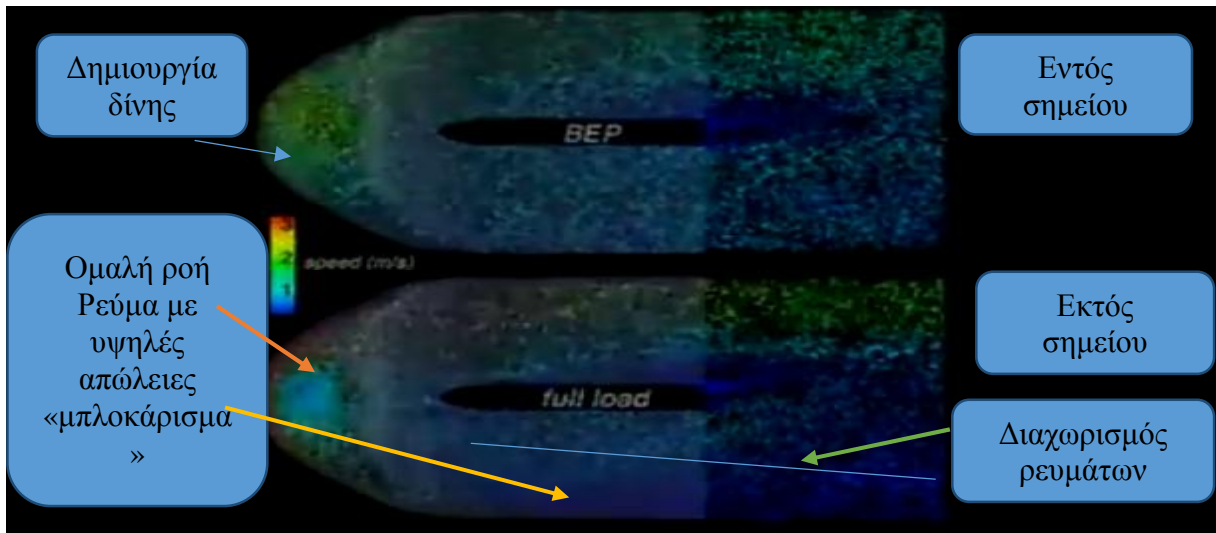
Ο σχεδιασμός X-Blade προσαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα ύψους υδατόπτωσης με σταθερή λειτουργία και εξαιρετική απόδοση όσον αφορά τη σπηλαιώση.

Στην Εικόνα 58 φαίνεται η σχετική ροή στην επιφάνεια των σταθερών πτερυγίων. Αριστερά έχουμε το σημείο σχεδιασμού (καλύτερο σημείο λειτουργίας), ενώ δεξιά είναι εκτός σημείου σχεδιασμού. Παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση η ροή είναι λιγότερο ομαλή από ότι στην δεύτερη που είναι εκτός σημείου σχεδιασμού.

Αυτό εξηγείται παρατηρώντας τι γίνεται στην έξοδο του ρευστού από την περωτή, κατευθυνόμενο προς στον αγωγό εξαγωγής (Εικόνα 59). Στην περίπτωση που είναι σχεδιασμένο στο σημείο λειτουργίας θα προκληθεί μια δίνη η οποία θα είναι υπεύθυνη για την ομαλή έξοδο του νερού στον αγωγό. Στην περίπτωση που είναι εκτός σημείου σχεδιασμού η ομαλή ροή με την οποία εξέρχεται το ρευστό από το στροφέιο θα δημιουργήσει 2 ρεύματα. Το ένα από αυτά θα είναι ρεύμα με υψηλές απώλειες και θα προκαλέσει «μπλοκάρισμα» της ροής

Εικόνα 58 Σημείο σχεδιασμού Εκτός σημείου σχεδιασμού  
 [πηγή: youtube.com/watch?v=dghmoudZiWw]



Εικόνα 59 Ροή ρευστού κατά την πορεία του στον αγωγό εξαγωγής  
 [πηγή: youtube.com/watch?v=dghmoudZiWw]

Τα στροφεία τύπου Francis χρησιμοποιούνται στις μέσου ύψους υδατοπτώσεις και τα περύγιά τους καταπονούνται από ισχυρές δυνάμεις. Για την αντιμετώπιση αυτών των δυνάμεων, που προέρχονται από τη ροή και τη δημιουργία μιας στιβαρής κατασκευής, τα καμπύλα περύγια πακτώνονται αμφίπλευρα την πλήμνη και στη στεφάνη του στροφείου. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των συγκολλήσεων, σήμερα η πάκτωση των περυγίων στην πλήμνη και στη στεφάνη των υδροστροβίλων Francis γίνεται με υψηλής αντοχής ηλεκτροσυγκολλήσεις. Τα περύγια των στροφείων των υδροστροβίλων αντίδρασης κατασκευάζονται από υψηλής αντοχής ανοξείδωτους χρωμιοκελιούχους χάλυβες.

Η πλήμνη και η στεφάνη της περωτής του υδροστροβίλου Francis κατασκευάζεται, επίσης, από ανοξείδωτο χάλυβα (Cr-Ni). Οι άξονες των περωτών των υδροστροβίλων κατασκευάζονται από υψηλής αντοχής μικροκράμματα και από χάλυβες με θερμική επεξεργασία.

--	--	--

## 2.2.8 ΑΓΩΓΟΣ ΦΥΓΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΕΞΟΔΟΥ

Το νερό βγαίνει μέσα από τον δρομέα κατά την αξονική κατεύθυνση και αποχωρεί από τον υδροστρόβιλο διαμέσου του αγωγού φυγής. Ο αγωγός φυγής μπορεί να έχει δύο μορφές: α) σχήμα κόλουρου κώνου, β) σχήμα αγκώνα, ο οποίος ξεκινάει με κυκλική διατομή από τον δρομέα και καταλήγει σε ορθογωνική στην έξοδο.

Στην πράξη η πλειοψηφία των υδροστροβίλων Francis έχουν την άτρακτο σε κατακόρυφη θέση. Σε οριζόντια θέση μπορεί να τοποθετηθεί η άτρακτος όταν τα υπόλοιπα μεγέθη σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ είναι μικρά.

Το **τμήμα εξόδου** αποτελεί ένα ιδιαίτερο τμήμα των υδροστροβίλων αντίδρασης και χρήζει ιδιαίτερου σχεδιασμού. Έχει σωληνωτή μορφή με βαθμιαία αυξανόμενη διατομή από την είσοδο προς την έξοδο. Συνδέει την έξοδο του στροφείου με την κατώτερη στάθμη της απορροής του νερού. Η βασική λειτουργία του τμήματος αυτού είναι η απόδοση της ικανότητας στον υδροστρόβιλο να εκμεταλλευθεί το συνολικό ύψος της υδατόπτωσης, αποκαθιστώντας τη συνέχεια της σωλήνωσης από την ανώτερη επιφάνεια του νερού μέχρι την κατώτερη. Επιπροσθέτως με τη μορφοποίησή του επιτρέπει τη μετατροπή σημαντικού μέρους της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα βάρους του νερού,  $u^2/2g$ , που θα αποβαλλόταν αχρησιμοποίητη, σε δυναμική ενέργεια, αυξάνοντας την πίεση που επικρατεί στην έξοδο του στροβίλου από υποπίεση (κάτω της ατμοσφαιρικής) σε ατμοσφαιρική. Η ταχύτητα του νερού στην έξοδο της πτερωτής είναι 6-10 m/s

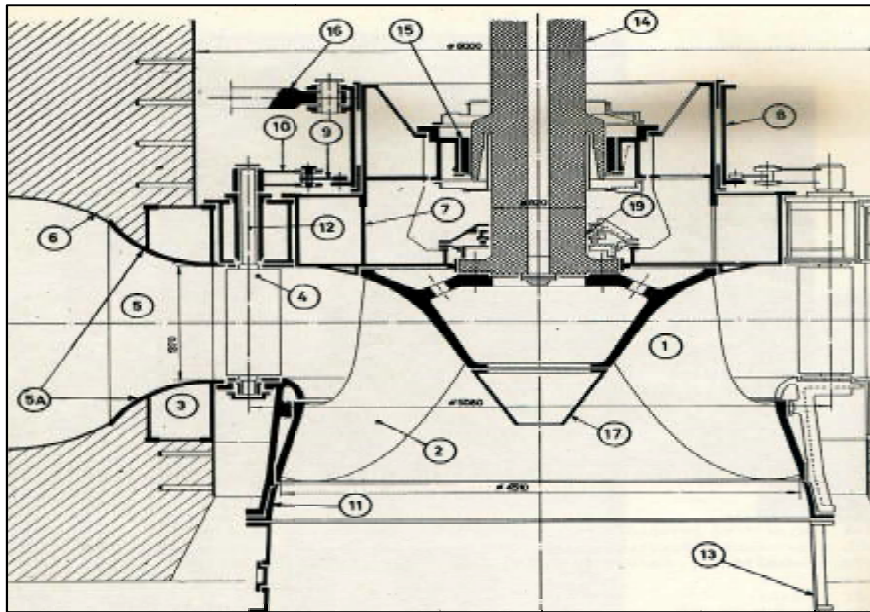


*Εικόνα 60 Αγωγός εξαγωγής [πηγή: learn engineering, [www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo](http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo)]*

Στους υδροστρόβιλους μεγάλου μεγέθους το τμήμα εξόδου κατασκευάζεται από ελάσματα ανθρακούχου χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα ή χάλυβα θερμικής επεξεργασίας, και εγκιβωτίζεται σε οπλισμένο σκυρόδεμα. Το ακραίο τμήμα του τμήματος εξόδου κατασκευάζεται, συνήθως, από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στους μικρού μεγέθους υδροστρόβιλους Francis, ο αγωγός απαγωγής καμπυλώνεται κατά 90° μέχρι την κατώτερη στάθμη του νερού και κατασκευάζεται από ελάσματα ανθρακούχου χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, υψηλής αντοχής μικροκράμματα και θερμικά επεξεργασμένο χάλυβα. Στους σωληνωτούς και βολβοειδείς υδροστροβίλους το τμήμα εξόδου είναι ευθύγραμμο, κωνικό και κατασκευάζεται μέχρι την έξοδό του από σκυρόδεμα.

Επειδή ακριβώς το τμήμα εξόδου και το τμήμα εισόδου έχουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία, στην ενεργειακή μετατροπή και στο βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου σχεδιάζονται με προσοχή και αποτελούν μαζί με το στροφείο τα κύρια τμήματα ενός υδροηλεκτρικού έργου.

--	--	--



ΥΠΟΜΝΗΜΑ			
1	Δρομέας – Πτερωτή	9	Διωστήρας θραύσεως
2	Πτερύγιο δρομέα	10	Στρόφαλος ρυθμιστικών πτερυγίων
3	Κάτω δακτύλιος	11	Περίβλημα δρομέως
4	Ρυθμιστικό πτερύγιο	12	Στροφέας ρυθμιστικού πτερυγίου
5	Οδηγό πτερύγιο	13	Χαλύβδινος αγωγός εξόδου
5	Δακτύλιος (στεφάνη) οδηγών πτερυγίων	14	Άτρακτος
6	Σπειροειδής κέλυφος	15	Οδηγά έδρανα
7	Κύριο σώμα στροβίλου	16	Σερβομηχανισμός
8	Στεφάνη ρυθμίσεως	17	Κώνος δρομέως

Εικόνα 61. Μηχανολογικό σχέδιο Υδροστροβίλου Francis [πηγή: αρχείο ΥΗΣ Καστρακίου]

### Ø Καθορισμός των κύριων διαστάσεων του αγωγού φυγής

Οι κύριες διαστάσεις του αγωγού φυγής δίνονται στο σχέδιο της προηγούμενης εικόνας. Στην αρχή του αγωγού φυγής, ακριβώς κατάντι του δρομέα, η διάμετρος είναι ίση προς  $D_{2z}$  η οποία υπολογίζεται από την αντίστοιχη μέση αξονική ταχύτητα  $c_{2z}$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Ο αγωγός φυγής έχει και αυτός μεγάλες διαστάσεις (σε σύγκριση με τον δρομέα) και επιβαρύνει σημαντικά τα έργα πολιτικού μηχανικού. Για τον λόγο αυτό η τιμή της  $c_{2z}$  προκύπτει ως αποτέλεσμα συμβιβασμού μεταξύ οικονομικής κατασκευής και καλού βαθμού απόδοσης, όπως και στην περίπτωση του σπειροειδούς κελύφους. Έτσι η τιμή της  $c_{2z}$  (σε m/sec) λαμβάνεται από την σχέση:

$$c_{2z} = 8,74 + \frac{248}{n_s} \quad (2.71)$$

Η αντίστοιχη τιμή της αδιάστατης παραμέτρου

$$C_{2z} = c_{2z} / \sqrt{2gH} \quad (2.72)$$

Η διαμόρφωση του αγωγού φυγής της μορφής που δίνεται σχηματικά στο προηγούμενο σχήμα αφορά τους υδροστροβίλους Francis μεγάλου μεγέθους κατακόρυφου άξονα και σκοπό έχει την μείωση των εκσκαφών. Στους πολύ μικρούς υδροστροβίλους οριζόντιου άξονα (ον. ισχύος μικρότερης του 1 MW) ο αγωγός φυγής είναι κωνικός και καταλήγει σε διατομή διπλάσια περίπου της διατομής εισόδου διαμέτρου  $D_{2z}$ .

--	--	--

$$\frac{N}{D_{2e}} = 1,54 + \frac{2,03}{n_s} \quad (2.73_a)$$

$$\frac{O}{D_{2e}} = 0,83 + \frac{140,7}{n_s} \quad (2.73_\beta)$$

$$\frac{P}{D_{2e}} = 1,37 - 5,60 \times 10^{-4} \times n_s \quad (2.73_\gamma)$$

$$\frac{Q}{D_{2e}} = 0,58 + \frac{22,6}{n_s} \quad (2.73_\delta)$$

$$\frac{R}{D_{2e}} = 1,60 - 1,3 \times 10^{-4} \times n_s \quad (2.73_\epsilon)$$

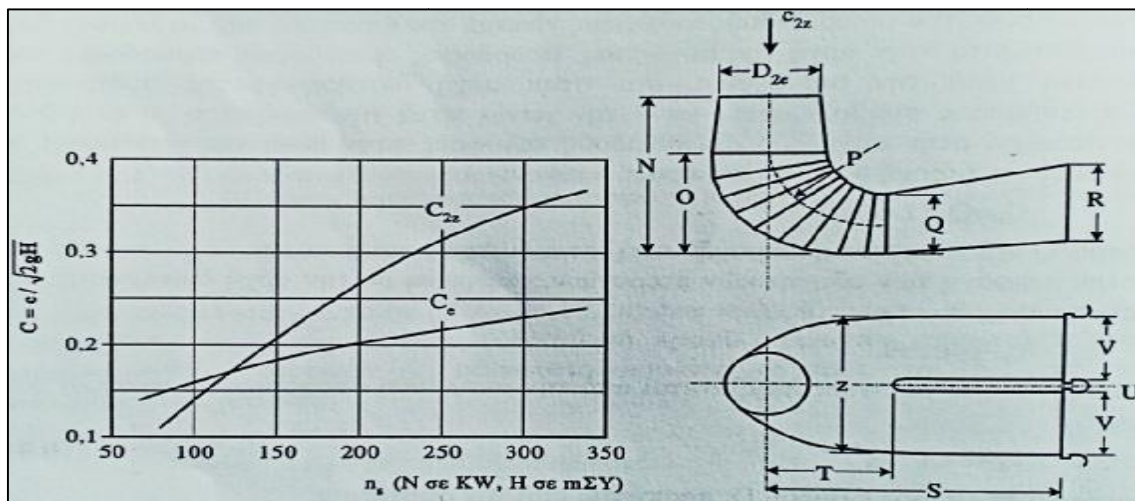
$$\frac{S}{D_{2e}} = \frac{n_s}{-9,28 + 0,25 \times n_s} \quad (2.73_{\sigma\tau})$$

$$\frac{T}{D_{2e}} = 1,50 + 1,90 \times 10^{-4} \times n_s \quad (2.73_\eta)$$

$$\frac{U}{D_{2e}} = 0,51 - 0,0007 \times n_s \quad (2.73_\theta)$$

$$\frac{V}{D_{2e}} = 1,10 + \frac{53,7}{n_s} \quad (2.73_\iota)$$

$$\frac{Z}{D_{2e}} = 2,63 + \frac{33,8}{n_s} \quad (2.73_\kappa)$$



Εικόνα 62. α) Μεταβολή των αδιάστατων παραμέτρων  $C_e$  και  $C_z$  συναρτήσει του  $n_s$ . β) Κύριες διαστάσεις αγωγού απαγωγής υδροστροβίλου Francis [πηγή: Δ. Παπαντώνης 'Υδροδυναμικές Μηχανές']

## 2.2.9 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΛΗΘΟΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΥΗΕ

Η επιλογή του πλήθους των μονάδων ενός ΥΗΕ δεν είναι ανεξάρτητη της επιλογής του ειδικού αριθμού στροφών, όπως φαίνεται εκ πρώτης όψεως, και γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μεγάλο πλήθος κριτηρίων τόσο τεχνικών όσο και οικονομικών. Έστω  $Q^*$  και  $N^*$  η ονομαστική παροχή και ισχύς ενός υπό μελέτη ΥΗΕ και  $H$ , η διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Εάν με  $z_g$  συμβολισθεί το πλήθος των ταυτόσημων μονάδων τότε η ονομαστική παροχή και ισχύς κάθε μίας θα είναι ίση προς:

$$Q = Q^* / z_g \quad \text{και} \quad N = N^* / z_g$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι επιλέξιμες τιμές της ταχύτητας περιστροφής είναι διακριτές (πρόκειται για τις σύγχρονες ταχύτητες περιστροφής) δεν είναι δυνατόν να βρεθούν δύο τιμές του πλήθους  $z_g$  των μονάδων που να οδηγούν στην ίδια τιμή του ειδικού αριθμού στροφών (όπως θα έπρεπε δεδομένου ότι ο  $n_s$  εξαρτάται κύρια από την τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ ). Υπενθυμίζεται ότι η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών μίας μονάδας θα είναι ίση προς:

$$n_s = n \frac{(N^* / z_g)^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (2.74)$$

--	--	--

Η επιλογή του πλήθους των μονάδων ενός ΥΗΕ προκύπτει ως αποτέλεσμα τεχνικοοικονομικής μελέτης που λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα:

- επιδράσεις από την επιλογή του  $n_s$  των μονάδων
- επιδράσεις από την ταχύτητα περιστροφής, κυρίως στο μέγεθος, βάρος, και κόστος του εξοπλισμού και έργων πολιτικού μηχανικού καθώς επίσης από την γεωλογία της περιοχής, την συσχέτιση με το πλήθος των αγωγών προσαγωγής, την διάταξη του ΥΗΣ (χώρος των βανών, χώρος συναρμολόγησης, βοηθητικοί χώροι κτλ.), κατασκευή του ΥΗΕ σε περισσότερες από μία φάσεις, συνθήκες εκμετάλλευσης του έργου, συντήρηση, κτλ.
- χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα, καμπύλη διάρκειας της παροχής κτλ.

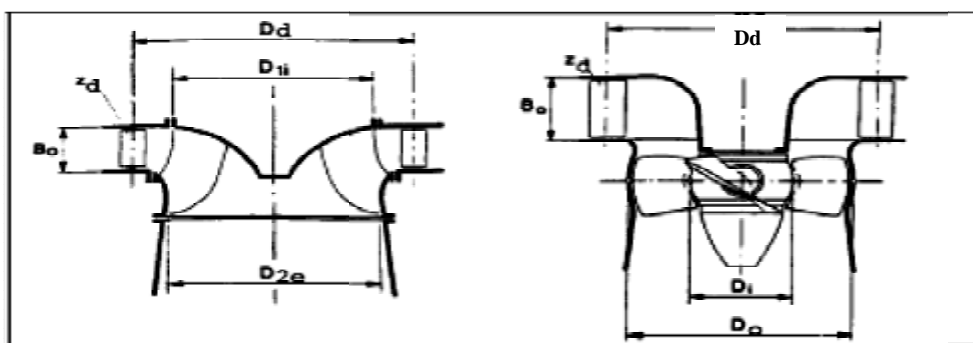
## 2.3 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ (ΚΑΡΛΑΝ)

Ο εφευρέτης αυτού του υδροστροβίλου θεωρείται ότι είναι ο Αυστρο-Ουγγαρός μηχανικός Viktor Karlan (1876-1934). Η απόδοση της λειτουργίας του μπορεί να φθάσει και το 90%.

Τα κύρια μέρη ενός υδροστροβίλου **Karlan** είναι:

- Σπειροειδές κέλυφος
- Οδηγία πτερύγια
- Δρομέας
- Αγωγός φυγής

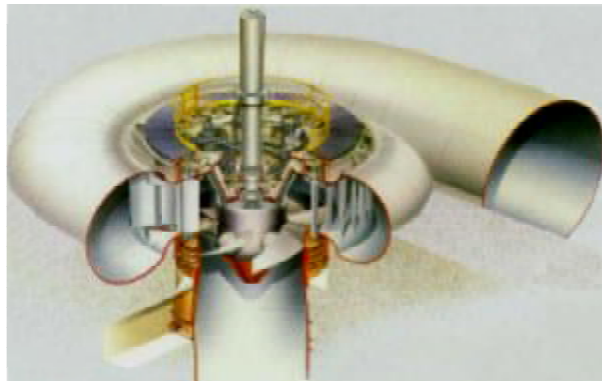
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται υδροστροβίλος Karlan αξονικής ροής:



Εικόνα 63 Διατομή υδροστροβίλου Karlan [πηγή: Δ.Παπαντώνης 'Υδροδυναμικές Μηχανές']

Όλα τα παραπάνω κύρια μέρη του υδροστροβίλου αυτού είναι ίδια με τα αντίστοιχα των υδροστροβίλων μικτής ροής που αναφέρθηκαν παραπάνω, εκτός από πτερυγίων και της διευθέτησής τους πάνω στον δρομέα

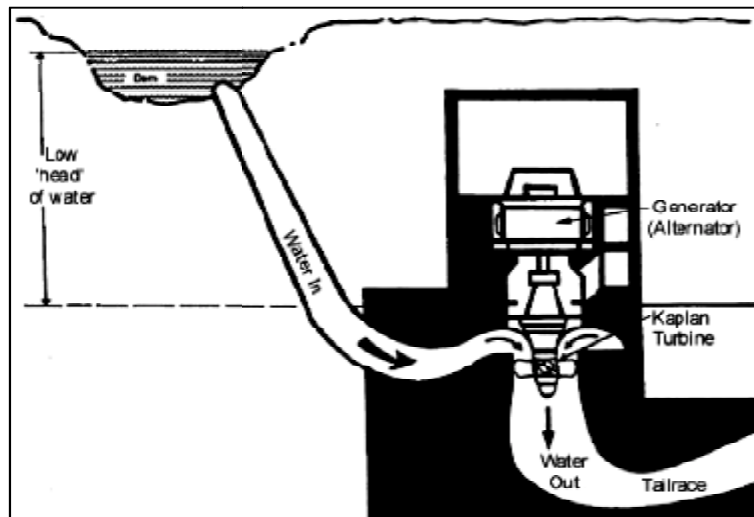
--	--	--



**Εικόνα 83. Υδροστρόβιλος Kaplan. [πηγή: slideshare.net/jaypatel581/hydraulic-turbine]**

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ του δρομέα Kaplan και του δρομέα Francis είναι:

- a) ο δρομέας Kaplan αποτελείται από 4 έως 10 πτερύγια τα οποία τοποθετούνται συμμετρικά στην περιφέρεια της ατράκτου, ενώ ο δρομέας Francis αποτελείται από 16 έως 24 πτερύγια.
- b) τα πτερύγια του δρομέα Kaplan μπορούν να μεταβάλλουν την σχετική τους γωνία ως προς την κύρια ροή για να ελέγχουν την διατομή του χώρου ροής (το ύψος και η παροχή κυμαίνονται), ενώ τα πτερύγια του δρομέα Francis παραμένουν ακίνητα.



**Εικόνα 64 Υδροηλεκτρικό έργο με υδροστρόβιλο τύπου Kaplan. [πηγή: Water Turbine / yokealjausa]**

Τέλος, το τμήμα εξόδου (ή αγωγός απαγωγής) έχει ως σκοπό την επιβράδυνση του υγρού και την οδήγησή του προς την έξοδο. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αγωγός απαγωγής έχει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία και το βαθμό απόδοσης του υδροστρόβιλου.

Τα τμήματα εισόδου, εξόδου και ο δρομέας είναι τα τμήματα της μηχανής που συμμετέχουν στην ενεργειακή μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Όμως, όπως και στις αντλίες, ένας πλήρης υδροστρόβιλος αποτελείται και από άλλα τμήματα τα οποία εξασφαλίζουν τη στεγανότητα με το περιβάλλον (εξωτερικό κέλυφος, στυπιοθλίπτες), τη μεταφορά της μηχανικής ισχύος (άτρακτος, συμπλέκτες, έδρανα), την παραλαβή των αναπτυσσόμενων δυνάμεων (ωστικό έδρανο) και άλλα.


## 2.4 ΦΘΟΡΕΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΑΩΝ

Οι ζημιές σε στροβίλους υδροηλεκτρικής ενέργειας προκαλούνται κυρίως από τα προβλήματα σπηλαιώσης, αμμοδιάβρωσης, ελαττώματα υλικού και κόπωση. Το κεφάλαιο αυτό θα δώσει μια γενική εικόνα του μηχανισμού φθοράς που περιλαμβάνει την σπηλαιώση και την αμμοδιάβρωση. Τα ελαττώματα υλικού θα αναφερθούν εν συντομία ως αίτια μηχανισμού φθοράς.

### 2.4.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ - ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ

Στην επιστήμη των υλικών, φθορά είναι ένας συλλογικός όρος για τους διάφορους μηχανισμούς που προκαλούν παραμόρφωση ή μετατόπιση των στερεών. Σε γενικές γραμμές, οι μηχανισμοί φθοράς μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες

- μηχανικές,
- χημικές και
- θερμικές δράσεις .

Η Μηχανική φθορά θα είναι το επίκεντρο για το κεφάλαιο αυτό, όπως είναι η μηχανική φθορά όπου επηρεάζεται από τον όγκο ροής μέσω του στροβίλου.

Επιπλέον, ο Stachowiak και ο Batchelor κατατάσσουν την μηχανική φθορά σε τρεις τύπους

- Φθορά τριβής
- Διαβρωτική και
- Φθορά σπηλαιώσης.

Η Φθορά τριβής και η Διαβρωτική οφείλονται σε σωματίδια στη ροή του ρευστού, ενώ σπηλαιώση προκαλείται από την κατάρρευση των φυσαλίδων στην επιφάνεια. Φθορά τριβής ορίζεται ως η απώλεια υλικού από το πέρασμα σκληρών σωματιδίων πάνω από μια επιφάνεια. Διαβρωτική φθορά προκαλείται από την επίδραση των σωματιδίων έναντι μιας στερεής επιφάνειας.

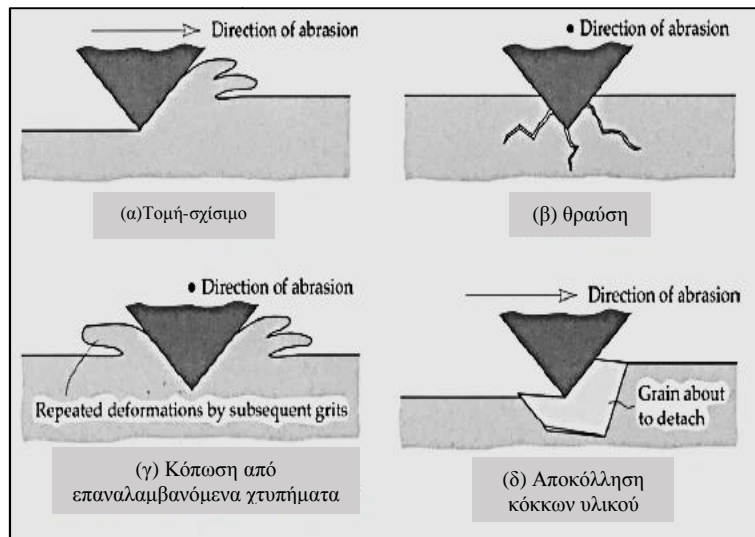
#### Ø Φθορά τριβής

Η φθορά τριβής συμβαίνει όταν σωματίδια ενός υλικού με ίση ή μεγαλύτερη σκληρότητα αλληλοεπιδρούν με μια άλλη στερεά επιφάνεια. Τομή – σχίσμο (α) μπορεί να συμβαίνει όταν ένα κοφτερό χαλίκι πετυχαίνει μια πιο μαλακή επιφάνεια και υλικό μπορεί να αφαιρεθεί.

Η συσσώρευση των ρωγμών την πάροδο του χρόνου μπορεί να προκαλέσουν αποκόλληση μεγάλων θραυσμάτων. Για όλκιμα υλικά που εκτίθενται σε αμβλύ χαλίκι, η φθορά τύπου τομής – σχισίματος Εικόνα 65(α) είναι απίθανο, αλλά επαναλαμβάνεται ξύσιμο που θα προκαλέσει παραμόρφωση της επιφάνειας όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 65(γ) . Σε αυτή την περίπτωση, η απομάκρυνση των θραυσμάτων είναι το αποτέλεσμα της κόπωσης του μετάλλου. Αποκόλληση των κόκκων απεικονίζεται στην Εικόνα 65(δ). Αυτή η μορφή της φθοράς από τριβή εφαρμόζεται κυρίως σε ψαθυρά υλικά όπως κεραμικά και οφείλεται σε σχετικά ασθενή ενώσεις μεταξύ των κόκκων.



--	--	--



Εικόνα 65 Τύποι φθορών τριβής. [πηγή: Norwegian University of Science and Technology]

### Ø Φθορά Διάβρωσης

Η Διαβρωτική φθορά επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που διαφοροποιούν τον μηχανισμό διάβρωσης και τον ρυθμό διάβρωσης. Οι παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν:

- Ø Συνθήκες λειτουργίας - ταχύτητα, επιτάχυνση, πρόσκρουση γωνία, ρυθμός ροής ή συγκέντρωση, μέση ροή και θερμοκρασία
- Ø Ιδιότητες διαβρωτικών σωματιδίων όπως το μέγεθος, το σχήμα και τη σκληρότητα τους
- Ø Στοχευμένες ιδιότητες υλικού – χημεία, ελαστική ιδιότητα, σκληρότητα και επιφανειακή μορφολογία

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες θα είναι η ταχύτητα, η γωνία πρόσκρουσης και η συγκέντρωση σωματιδίων, αυτοί οι παράγοντες εμφανίζονται σχεδόν σε κάθε μοντέλο της διάβρωσης.

### Ø Γωνία πρόσκρουσης

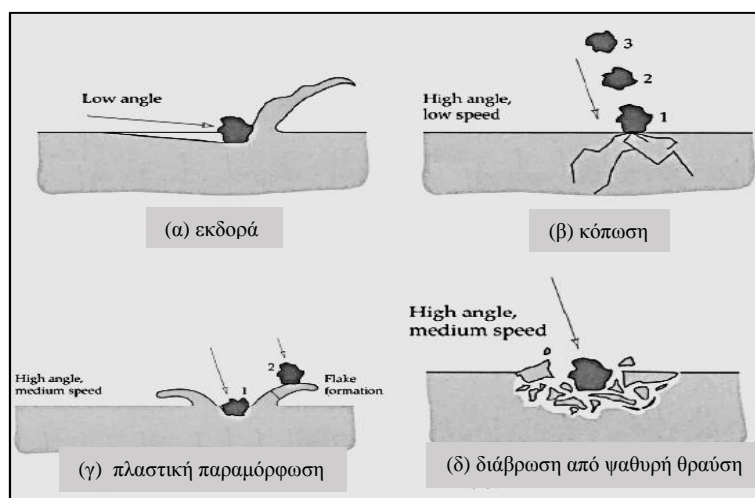
Η γωνία πρόσκρουσης ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της επιφάνειας διάβρωσης και της τροχιάς του σωματιδίου λίγο πριν από την πρόσκρουση. Ο ρυθμός φθοράς διάβρωσης εξαρτάται επίσης από τη γωνία πρόσκρουσης για διαφορετικά υλικά. Τα όλκιμα υλικά θα έχουν το υψηλότερο ποσοστό φθοράς για τη γωνία πρόσκρουσης περίπου  $30^\circ$  ενώ εύθραυστα υλικά έχουν συνήθως ένα υψηλότερο ποσοστό φθοράς σε υψηλές γωνίες πρόσκρουσης όπως  $80-90^\circ$

Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς απεικονίζονται στην Εικόνα 66. Μια χαμηλή γωνία πρόσκρουσης και το υλικό απομακρύνεται με μια δράση εκδοράς, παρόμοιο με αποξεστική φθορά, που απεικονίζεται στην Εικόνα 66 (α). Για σωματίδια με υψηλή γωνία πρόσκρουσης, αλλά με χαμηλή ταχύτητα, η κινητική ενέργεια του σωματιδίου δεν είναι αρκετή για να παραμορφώσει το υλικό της επιφάνειας. Ωστόσο, επαναλαμβανόμενα χτυπήματα θα μπορούσαν να προκαλέσουν κόπωση στην επιφάνεια η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 66 (β).

Για σωματίδια με μέση ταχύτητα και υψηλή γωνία πρόσκρουσης, η ιδιότητα υλικού είναι καθοριστική. Για όλκιμα υλικά, τα δρώντα σωματίδια θα προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 66 (γ) και θραύσματα θα προκληθούν από σωματίδια χτυπώντας την περιοχή γύρω από το αρχικό σημείο. Τα εύθραυστα υλικά εκτίθενται περισσότερο σε θραύση. Θραύσεις είναι πιο πιθανό να συμβούν όταν η επιφάνεια

--	--	--

έχει πληγεί από αιχμηρά σωματίδια και τα θραύσματα θα αποκολληθούν εξαιτίας επιφανειακών ρωγμών όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 66 (δ).



Εικόνα 66 Μηχανισμοί φθοράς [πηγή: Norwegian University of Science and Technology]

Στην πράξη, τόσο πλαστική παραμόρφωση όσο και η τομή - σχίσιμο συμβαίνουν ταυτόχρονα. Αυτό είναι έγκυρο πάνω από μια ορισμένη ταχύτητα γνωστή ως κρίσιμη ταχύτητα. Η κρίσιμη ταχύτητα εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες της επιφάνειας όσο και από τις ιδιότητες των σωματιδίων. Κάτω από την κρίσιμη ταχύτητα, το σωματίδιο δεν θα έχει αρκετή ενέργεια για να κόψει την επιφάνεια

### Ø Σηλαιώση

Το φαινόμενο της σηλαιώσης αναπτύσσεται στους υδροστροβίλους με τρόπο ανάλογο με την περίπτωση των αντλιών πρόκειται για το φαινόμενο ατμοποίησης του υγρού που αναπτύσσεται όταν και όπου η στατική πίεση του υγρού τείνει να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησής του για τη θερμοκρασία του υγρού. Για το λόγο αυτό στην περίπτωση των υδροστροβίλων το πιο κατάλληλο μέρος να εμφανιστεί σηλαιώση είναι οι πίσω πλευρές των πτερυγίων του δρομέα κοντά στα άκρα όπου το νερό εγκαταλείπει τα πτερύγια όπου η μέση στατική πίεση είναι χαμηλή.

Η ανάπτυξη σηλαιώσης προκαλεί σημαντική διάβρωση στις επιφάνειες των πτερυγίων λόγω των πολύ υψηλών κρουστικής φύσεως υπερπίεσεων που αναπτύσσονται κατά τη φάση επανυγροποίηση των φυσαλίδων ατμού. Η διάβρωση είναι τόσο περισσότερη έντονη όσο περισσότερο ανομοιόμορφη είναι η δομή του κράματος από το οποίο έχουν κατασκευαστεί τα πτερύγια ,ως περισσότερο ανθεκτικά κράματα αποδεικνύονται οι ανοξείδωτοι χάλυβες.

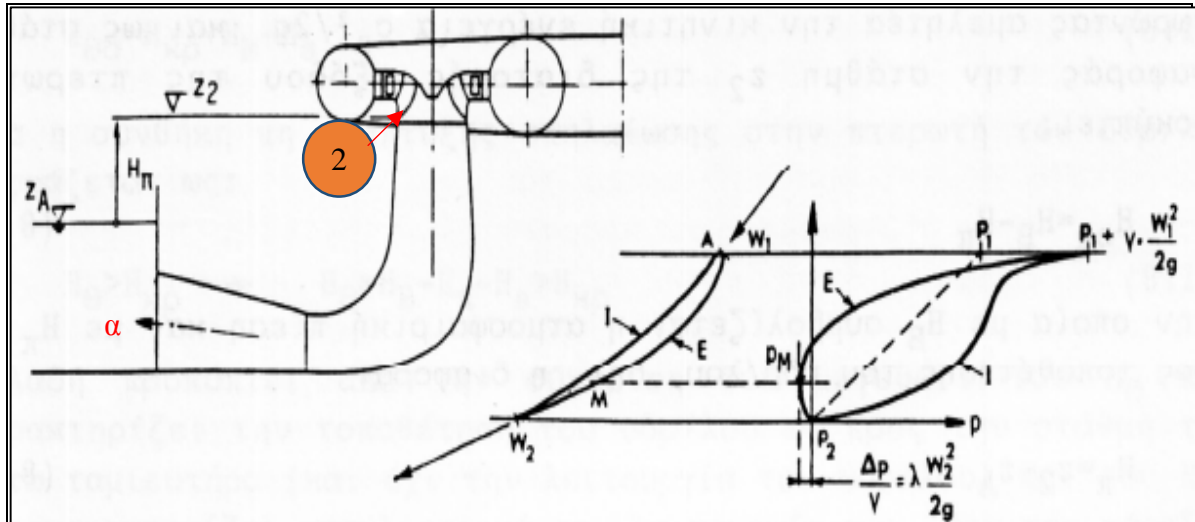


Εικόνα 67 Σηλαιώση σε πτερύγια στροφέιου Francis. [πηγή: youtube.com/watch?v]

--	--	--

Στην Εικόνα 68 (αριστερά) παριστάνεται η εγκατάσταση υδροστροβίλου ως προς τη στάθμη της διώρυγας απαγωγής ή του κάτω ταμιευτήρα.

Σε κάθε πτερύγιο του δρομέα Εικόνα 68 (δεξιά) διακρίνεται η πλευρά υπερπίεσης I και η πλευρά υποπίεσης E. Η διανομή της στατικής πίεσης στις πλευρές I και E είναι αποτέλεσμα του πεδίου της σχετικής ροής που αποκαθίσταται γύρω από κάθε πτερύγιο του δρομέα.



Εικόνα 68.(α). εγκατάσταση υδροστροβίλου ως προς την διώρυγα απαγωγής (β) δυνάμεις πίεσης επάνω στο πτερύγιο του δρομέα. [πηγή: Α.Παπαντώνης Υδροδυναμικές Μηχανές]

Η διαφορά  $(p_I - p_E)$  δημιουργεί την κινητήρια ροπή  $M_v$  στο δρομέα, της ίδιας φοράς με την ταχύτητα περιστροφής του. Έστω M το σημείο της πλευράς υποπίεσης E του πτερυγίου που αναπτύσσεται η ελάχιστη τιμή της στατικής πίεσης  $p_M$ , η οποία διαφέρει από τη μέση στατική πίεση  $p_2$  στη διατομή εξόδου κατά:  $\Delta p_M = p_2 - p_M > 0$ .

Η τιμή της στατικής πίεσης  $p_2$  στην διατομή εξόδου (2) του δρομέα διαμορφώνεται κύρια από το ύψος τοποθέτησης του υδροστροβίλου ως προς την στάθμη της διώρυγας απαγωγής και τα χαρακτηριστικά του αγωγού απαγωγής.

Γράφουμε τη διαφορά  $p_2 - p_M$  ως ποσοστό της μέσης κινητικής ενέργειας του ρευστού στη διατομή 2

$$\Delta p_M = p_2 - p_M = \lambda \rho \frac{w_2^2}{2} \quad (2.75)$$

$$\frac{\Delta p_M}{\rho \times g} = \frac{p_2}{\rho \times g} - \frac{p_M}{\rho \times g} = H_2 - H_M = \lambda \frac{w_2^2}{2 \times g} \ll \quad (2.76)$$

Από την οποία προκύπτει η διατύπωση:

$$H_2 = H_M + \lambda \frac{w_2^2}{2 \times g} \quad \text{όπου } \lambda = \text{συντελεστής γραμμικών απωλειών} \quad (2.77)$$

Για να μην αναπτύσσεται συστηματική σπηλαιώση στο δρομέα θα πρέπει η μέση ελάχιστη στατική πίεση  $p_M$  (λαμβάνοντας υπόψη τον τυρβώδη χαρακτήρα της ροής) να είναι μεγαλύτερη από την πίεση ατμοποίησης  $p_s$  του υγρού στη θερμοκρασία λειτουργίας:

$$p_M > p_s$$

$$\text{ή } \frac{p_M}{\rho \times g} > \frac{p_s}{\rho \times g} \quad (2.78)$$

--	--	--

Συμβολίζουμε με  $H_{\Theta}$  την διαφορά ολικής πίεσης  $H_{oa}$  στη διατομή εξόδου α του υδροστροβίλου ως προς την τάση των ατμών υγρού  $H_s$ , δηλαδή:  $H_Q = H_{oa} - H_s$

Από την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ της διατομής εξόδου (α) του υδροστροβίλου και της ελεύθερης επιφάνειας της διώρυγας απαγωγής του ή του κάτω ταμιευτήρα (όπου η ταχύτητα του νερού είναι σχεδόν μηδενική και η πίεση ίση προς την ατμοσφαιρική  $H_B$ ) θεωρώντας αμελητέα την κινητική ενέργεια  $u^2/2g$  και θεωρώντας ως στάθμη αναφοράς την στάθμη  $z_2$  της διατομής εξόδου του δρομέα προκύπτει:

$$H_{oa} = H_B - H_p \quad (2.79)$$

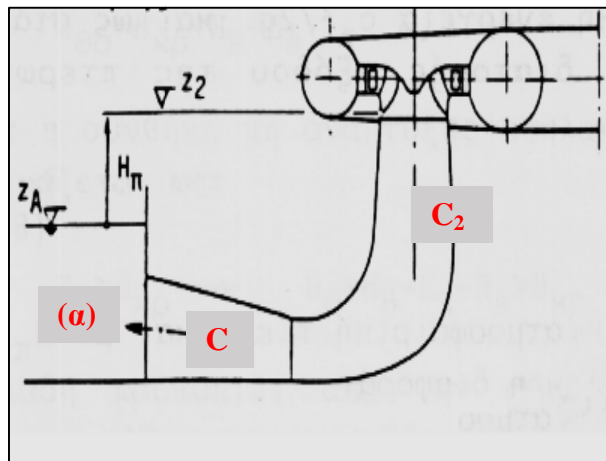
Όπου  $H_B$  η ατμοσφαιρική πίεση στο υψόμετρο εγκατάστασης του ΥΗΣ και

$$H_p = z_2 - z_a \quad (2.80)$$

Όπου  $H_{\pi}$  το ύψος τοποθέτησης του στροβίλου άνωθεν της στάθμης της διώρυγας απαγωγής, μέσω της οποίας καθορίζεται η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου ως προς την στάθμη  $z_a$  της διώρυγας απαγωγής ή κάτω ταμιευτήρα, θεωρούμενης σταθερής.

Άρα τελικά το  $H_{\Theta}$  γράφεται :

$$H_Q = H_B - H_p - H_s \quad (2.81)$$



Εικόνα 69 εγκατάσταση υδροστροβίλου ως προς την διώρυγα απαγωγής. [πηγή: Α.Παπαντώνης Υδροδυναμικές μηχανές]

Η τιμή του καθαρού ύψους  $H_{\Theta}$  όπως ορίστηκε στην εξίσωση 2.81, χαρακτηρίζει αποκλειστικά την τοποθέτηση του υδροστροβίλου και όχι το σημείο λειτουργίας του.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli μεταξύ των διατομών 2 και α, θα είναι:

$$H_{oa} = H_{o2} - \delta h_{f2a} \quad (2.82)$$

στην οποία με  $\delta h_{f2a}$  είναι οι υδραυλικές απώλειες της ροής μεταξύ των διατομών 2 και α. επομένως το καθαρό ύψος  $H_{\Theta}$  θα εκφράζεται ως εξής:

$$H_Q = H_{oa} - H_s = H_2 - dh_{f2a} - H_s \quad \text{®} \quad H_{\Theta} = H_2 + \frac{c_2^2}{2 \times g} - dh_{f2a} - H_s \quad \ll$$

$$H_Q = H_M + l \frac{w_2^2 + c_2^2}{2 \times g} - dh_{f2a} - H_s \quad (2.83)$$

στην οποία με  $H_M$  συμβολίζεται η ελάχιστη μέση πίεση στο σημείο Μ εκφρασμένη σε mΣΥ. Στην κρίσιμη κατάσταση λειτουργίας αναφορικά με την ανάπτυξη σπηλαίωσης στη πλευρά υποπίεσης του περυγίου θα είναι:  $H_M = H_s$ , οπότε η αντίστοιχη τιμή του  $H_{\Theta}$  χαρακτηρίζεται ως κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης  $H_{kp}$  και χαρακτηρίζει αποκλειστικά την λειτουργία του υδροστροβίλου. Θέτοντας λοιπόν  $H_M = H_s$  προκύπτει:

--	--	--

$$H_{kr} = \frac{1}{2} \frac{w_2^2 + c_2^2}{g} - dh_{f2a} \quad (2.84)$$

Συνδυάζοντας τις τελευταίες σχέσεις προκύπτει:  $H_Q = H_{kr} + H_M - H_S$  (2.85)

Συνεπώς η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαιώσης στο δρομέα του υδροστροβίλου εκφράζεται από τη σχέση:

$$H_Q > H_{kr} \text{ ® } H_Q = H_B - H_p - H_S > H_{kr} \quad (2.86)$$

· Η ανωτέρω συνθήκη συσχετίζει 2 μεγέθη, το  $H_\Theta$  που έχει να κάνει με την στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου ως προς την στάθμη της διώρυγας απαγωγής, και το  $H_{kr}$  που χαρακτηρίζει αποκλειστικά τη λειτουργία του υδροστροβίλου.

Ο λόγος:

$$\sigma = \frac{H_Q}{H} = \frac{H_B - H_p - H_S}{H} \quad (\text{παράμετρος Thomas}) \quad (2.87)$$

που ονομάζεται παράμετρος Thomas ή παράμετρος σπηλαιώσης, όπου  $H$ , η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, και χαρακτηρίζει αποκλειστικά την εγκατάσταση του υδροστροβίλου.

Άρα η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαιώσης εκφράζεται ως

$$\sigma = \frac{H_Q}{H} > s_{kr} = \frac{H_{kr}}{H} \quad (2.88)$$

στη οποία  $s_{kr}$  συμβολίζεται η παράμετρος σπηλαιώσης

$$s_{kr} = \frac{H_{kr}}{H} \quad (2.89)$$

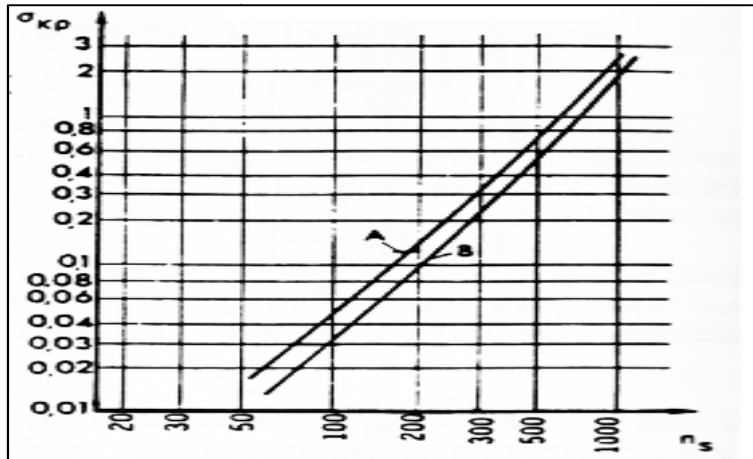
Η λειτουργία του υδροστροβίλου θα είναι επισφαλής από πλευράς σπηλαιώσης όταν  $H_Q \gg H_{kr}$  ή αντίστοιχα  $s \gg s_{kr}$  ενώ για  $H_Q < H_{kr}$ , αντίστοιχα  $s < s_{kr}$  η λειτουργία του υδροστροβίλου θα γίνεται με συστηματική ανάπτυξη σπηλαιώσης.

Η παράμετρος σπηλαιώσης  $s_{kr}$  χαρακτηρίζει την εμφάνιση της κυριότερης μορφής σπηλαιώσης στους υδροστροβίλους αντιδράσεως, αυτής δηλαδή που έχει την μορφή φυσαλίδων που αναπτύσσονται στην κυρτή επιφάνεια των πτερυγίων (πλευρά υποπίεσης) και κοντά στην ακμή εκφυγής. Όπως θα αναπτυχθεί και στην συνέχεια υπάρχουν μορφές σπηλαιώσης των οποίων η εμφάνιση είναι σχεδόν ανεξάρτητη της τιμής της παραμέτρου της σπηλαιώσης  $s$  και εξαρτάται κύρια από το σημείο λειτουργίας, δηλ. για καλά σχεδιασμένο υδροστροβίλο αυτές οι μορφές σπηλαιώσης δεν αναπτύσσονται στην περιοχή του κανονικού σημείου λειτουργίας. Εν τούτοις προκειμένου για υδροστροβίλους που θα λειτουργούν χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις του σημείου λειτουργίας τους, η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του  $s$ , δηλ. η  $s_{kr}$  είναι αυτή μέσω της οποίας καθορίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου.

Η τιμή της παραμέτρου σπηλαιώσης  $s_{kr}$  για καλά σχεδιασμένους υδροστροβίλους συσχετίζεται με την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών ( $n_s$  ή  $n_{sp}$ ) Στο διάγραμμα δίνεται η συσχέτιση αυτή όπως προκύπτει από δεδομένα μεγάλου πλήθους υδροστροβίλων.

Η συσχέτιση αυτή του  $s_{kr}$  με τον ειδικό αριθμό στροφών ( $n_s$  ή  $n_{sp}$ ) όπως αυτή δίνεται από την Εικόνα 70, αντιστοιχεί σε μια περιοχή που περιορίζεται στην καμπύλη Α και Β. Η καμπύλη Α με τις υψηλότερες τιμές του  $s_{kr}$  αντιστοιχεί σε κανονική κατασκευή δρομέα υδροστροβίλου από ορείχαλκο ή ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ η καμπύλη Β πρέπει να θεωρείται ως ένα όριο που είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο με ειδική σχεδίαση και κατασκευή του δρομέα.

--	--	--



Εικόνα 70. Σχέση της παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma_{kr}$  υδροστροβίλων συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών εξαρτωμένου του υλικού κατασκευής του δρομέα [πηγή: Δ.Παπαντώνης 'Υδροδυναμικές Μηχανές']

Επίσης μέσω των δεδομένων αυτών αναπτύσσονται οι ακόλουθες σχέσεις:

Πίνακας 3. Υπολογισμός  $\sigma_{kr}$  συναρτήσει του  $n_s$  για υδροστρόβιλους αντίδρασης

<p><b>Francis</b> : <math>\sigma_{kr} = 7,54 \times 10^{-5} \cdot n_s^{1.41}</math></p> <p><b>Kaplan</b> : <math>\sigma_{kr} = 6.40 \times 10^{-5} \cdot n_s^{1.46}</math></p>
--

Είναι προφανές ότι η αύξηση της ειδικής ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση της παραμέτρου σπηλαιώσης. Η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου  $H_p$  από την στάθμη της διώρυγας παραγωγής θα πρέπει να γίνει ώστε να προβλεφθεί η ανάπτυξη σπηλαιώσης. Με γνωστή τη παράμετρο σπηλαιώσης  $\sigma_{kr}$  του υδροστροβίλου, το ύψος  $H_p$  και η στάθμη  $Z_2$  υπολογίζονται:

$$H_Q > H_{kr} = s_{kr} \times H \ll H_B - H_p - H_S > s_{kr} \times H \ll$$

$$H_p = z_2 - z_A < H_B - H_S - s_{kr} \times H \text{ ® και καταλήγουμε:}$$

$$z_2 < H_B + z_A - H_S - s_{kr} \times H \quad (2.90)$$

Όσο αυξάνει η τιμή της  $\sigma_{kr}$  (αύξηση ειδικής ταχύτητας  $n_s$ ), τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η στάθμη  $Z_2$ .

Είναι γνωστό ότι η αύξηση της ειδικής ταχύτητας  $n_s$  οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του υδροστροβίλου και άρα μείωση του κόστους. Από την άλλη μεριά η αύξηση της ειδικής ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση της παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma_{kr}$ , οπότε ο στρόβιλος πρέπει να τοποθετείται σε χαμηλότερες στάθμες για να αποφευχθεί η σπηλαιώση. Τούτο συνεπάγεται αυξημένο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης.

Οι παρακάτω συσχετίσεις μεταξύ ειδικής ταχύτητας και διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης για διάφορους τύπους υδροστροβίλων, εκφράζουν αυτό τον συμβιβασμό μεταξύ κόστος υδροστροβίλου, κόστος εγκατάστασης και λειτουργικών χαρακτηριστικών:

Πίνακας 4. Υπολογισμός  $n_s$  συναρτήσει του  $H$  για υδροστρόβιλους δράσης/αντίδρασης

<p><b>Francis</b> : <math>n_s = 1304 \times H^{-0.654}</math></p> <p><b>Kaplan</b> : <math>n_s = 791 \times H^{-0.486}</math></p> <p><b>Pelton</b> : <math>n_s = 196 \times H^{-0.50}</math></p>
--

--	--	--



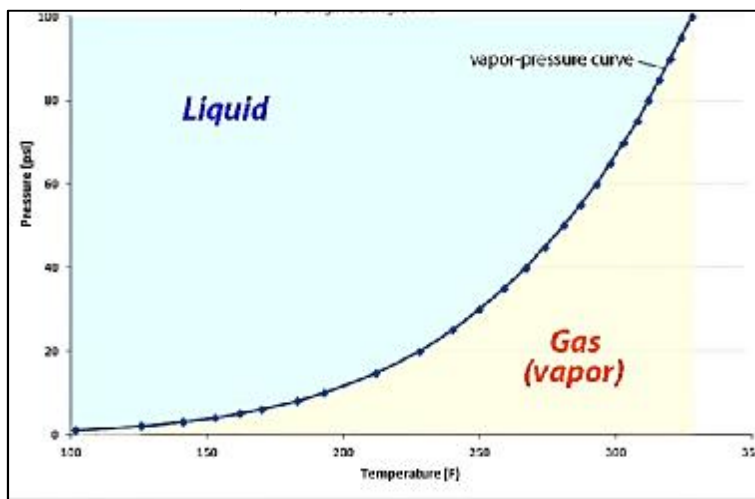
*Εικόνα 71 (α).Ρωγμή σταθερού περηνγίου στην βάση του (β).σηηλαίωση στο τελείωμα του περηνγίου[πηγή: youtube.com/watch?v]*

Από τις δυο παραπάνω εικόνες με εμφανή τα σκασίματα από την σηηλαίωση (pilling by cavitation), παρατηρούμε ότι εμφανίζονται στην οπίσθια πλευρά του περηνγίου (turbine blade). Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτήν την επιφάνεια εμφανίζεται χαμηλή πίεση (low pressure).



*Εικόνα 72 Η διαφορά πίεσης είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό μιας δύναμης (F) και κατά συνέπεια περιστροφή του στροφείου, όπως και η διαφορά πίεσης για την ανάπτυξη σηηλαίωσης. [πηγή: learn engineering, www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo]*

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την σχέση πίεσης ρευστού και θερμοκρασίας.



*Εικόνα 73 Διάγραμμα ανάπτυξης Τάσης ατμών συναρτήσει θερμοκρασίας και πίεσης [πηγή:youtube.com/watch?v=oRYYP4F8LTU]*

--	--	--

Η καμπύλη πίεσης ατμών (vapor pressure curve) δείχνει την το σημείο αλλαγής φάσης του υγρού σε αέρια κατάσταση εξαρτώμενο από την πίεση και την θερμοκρασία του ρευστού.

## 2.4.2 ΜΟΡΦΕΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Η μορφή της σπηλαιώσης που αναπτύχθηκε στην υποενότητα «σπηλαιώση» του κεφαλαίου 2.4.1 μπορεί να χαρακτηριστεί ως σπηλαιώση εξόδου ή σπηλαιώση της υδροτομής και εκφράζεται μέσω της παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma$ . Όμως στους υδροστρόβιλους αναπτύσσονται και άλλες μορφές σπηλαιώσης, η ανάπτυξη των οποίων εξαρτάται κυρίως από το σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου και λίγο ή καθόλου από την τιμή της παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma$ , έτσι ο εργαστηριακός προσδιορισμός των μορφών αυτών σπηλαιώσης γίνεται μεταβάλλοντας το σημείο λειτουργίας υπό σταθερή τιμή του  $\sigma$ . Οι κυριότερες μορφές σπηλαιώσης (Εικόνα 74) εκτός από την σπηλαιώση εξόδου είναι:

### 2.4.2.1 Σπηλαιώση εισόδου εξωτερικής επιφάνειας (extrados)

Η μορφή αυτή αναπτύσσεται κοντά στη διατομή εισόδου των πτερύγια, στην εξωτερική επιφάνεια (extrados) και προς το μέρος της στεφάνης. Η σπηλαιώση εισόδου εμφανίζεται συνήθως στους ταχύστροφους Francis λόγω της μεγάλης καμπυλότητας της μεσημβρινής τομής της στεφάνης και οφείλεται στην περιογή της ακμής εισόδου σε υψηλές τιμές της παραμέτρου του ύψους  $\Psi$ , δηλαδή σε υψηλές τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης. Η ανάπτυξη αυτής της μορφής σπηλαιώσης είναι πολύ ευαίσθητη όσον αφορά τη διαμόρφωση της ακμής πρόσπτωσης των πτερυγίων. Έτσι εξηγείται η σημαντική ανομοιομορφία στην φθορά που παρατηρείται συχνά μεταξύ των πτερυγίων του ίδιου δρομέα. Για τον ίδιο λόγο είναι δύσκολη η μεταφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ μοντέλου και πραγματικού, ακόμη και όταν πραγματοποιούνται πολύ αυστηρά κριτήρια στη γεωμετρική ομοιότητα του μοντέλου. Η οπτική παρατήρηση της σπηλαιώσης εισόδου στο μοντέλο είναι τόσο περισσότερο δύσκολη όσο μικρότερη είναι η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών του δρομέα (μεσημβρινή τομή περισσότερο ακτινικής ροής). Η σπηλαιώση εισόδου εξωτερικής επιφάνειας προκαλεί σημαντικές φθορές στο δρομέα.

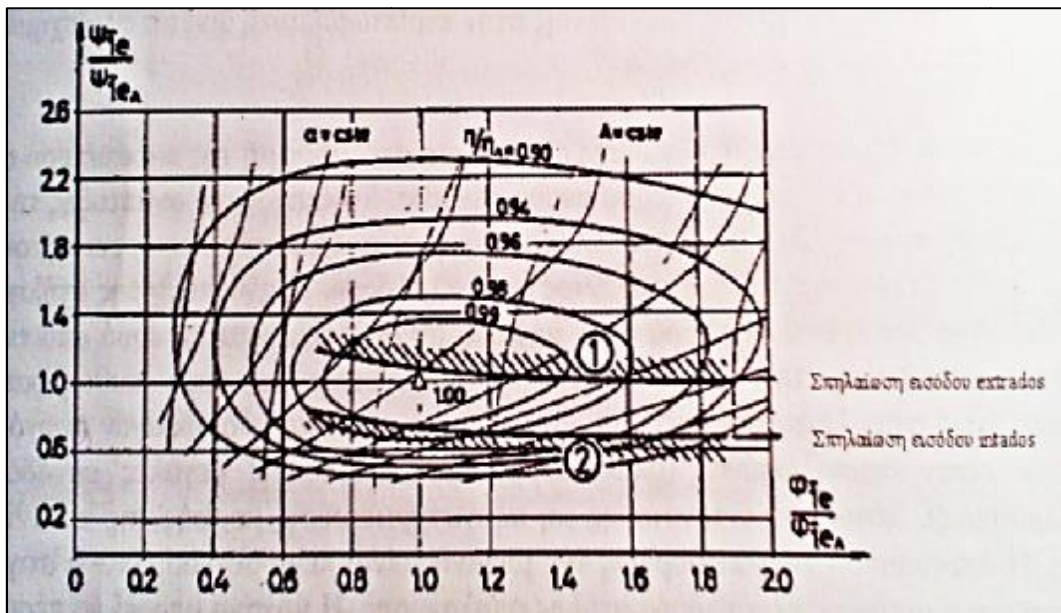
### 2.4.2.2 Σπηλαιώση εισόδου εσωτερικής επιφάνειας (intrados)

Η μορφή αυτή σπηλαιώσης χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση φυσαλίδων ατμού μεγάλου μεγέθους στην εσωτερική επιφάνεια (intrados) του πτερυγίου και στην περιοχή της ακμής εισόδου. Το φαινόμενο συνοδεύεται από σημαντικό θόρυβο, όμως δεν είναι επικίνδυνο από πλευράς μηχανικής διάβρωσης επειδή οι φυσαλίδες σχηματίζονται και επαναυδροποιούνται μακριά από τα τοιχώματα των πτερυγίων. Η μορφή αυτή της σπηλαιώσης εμφανίζεται σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου ύψους  $\Psi$  και οφείλεται στην περιογή της ακμής εισόδου προς την εσωτερική επιφάνεια του πτερυγίου.

Στο διάγραμμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας υδροστροβίλου Francis σε αδιάστατα μεγέθη  $\Phi$  και  $\Psi$  αδιαστατοποιημένα ως προς τα αντίστοιχα μεγέθη του κανονικού σημείου λειτουργίας ( $\Phi_k$  και  $\Psi_k$ ), στην Εικόνα 74 η καμπύλη 1 καθορίζει το επιτρεπόμενο όριο λειτουργίας του υδροστροβίλου Francis λόγω ανάπτυξης σπηλαιώσης εισόδου εξωτερικής επιφάνειας (extrados), ενώ η καμπύλη 2 καθορίζει το επιτρεπόμενο όριο λειτουργίας λόγω ανάπτυξης σπηλαιώσης εισόδου εσωτερικής επιφάνειας (intrados).



--	--	--



Εικόνα 74 Διάγραμμα σπηλαιώσης extrados - intrados [πηγή: Δ.Παπαντώνης 'Υδροδυναμικές Μηχανές']

### 2.4.2.3 Σχηματισμός στροβίλων Karman

Ανάλογα με την ακμή εκφυγής των πτερυγίων σχηματίζονται στρόβιλοι τύπου Karman κατάντι του δρομέα που συχνά σπηλαιώνουν σε χαμηλές τιμές τις παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma$ . Η μορφή αυτή δεν προκαλεί φθορά στη μηχανή αλλά μόνο ταλαντώσεις στην λειτουργία της.

### 2.4.2.4 Στήλη σπηλαιώσης

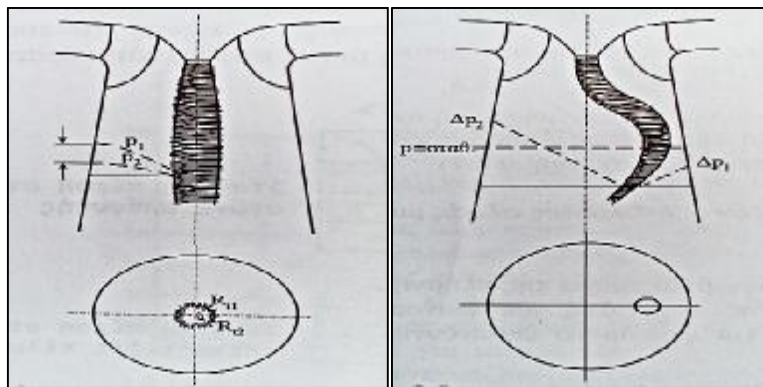
Σε σημεία λειτουργίας εκτός του κανονικού η ροή εξέρχεται του δρομέα με μη μηδενική συστροφή, δηλ. με  $c_{u2} \neq 0$ . Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της συστροφής που ισχύει κατάντι του δρομέα, δηλ.  $(r \times c_u) = \text{σταθ.}$ , όσο μειώνεται η ακτίνα  $r$  αυξάνεται το μέτρο της ταχύτητας και μειώνεται αντίστοιχα η στατική πίεση. Άρα κοντά στον άξονα περιστροφής δηλ., για  $r \rightarrow 0$  θα είναι  $c_u \rightarrow \infty$  και  $p \rightarrow 0$ , θα αναπτύσσεται σπηλαιώση. Έτσι για χαμηλές τιμές της παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma$ , κάτω από τον κώνο της πλήμνης σχηματίζεται μια στήλη σπηλαιώσης και της οποίας η φορά περιστροφής είναι ίδια με την φορά της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο του δρομέα, δηλ., ομόρροπη προς την φορά περιστροφής του δρομέα για παροχές μικρότερες της κανονικής και αντίθετη με αυτή για παροχές μεγαλύτερες της κανονικής.

Για παροχή μεγαλύτερη της κανονικής η στήλη σπηλαιώσης έχει την μορφή που φαίνεται στο αριστερό σχήμα της Εικόνας 75 πρόκειται για μία μάλλον κανονική μορφή δίνης που περιστρέφεται με ταχύτητα περιστροφής περίπου ίσης με  $n$  (RPM). Αντίθετα, για παροχή μικρότερη της κανονικής η στήλη σπηλαιώσης έχει ελικοειδή μορφή και περιστρέφεται με τη φορά περιστροφής του δρομέα και με ταχύτητα της τάξεως του 0,2-0,3 της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Η μορφή της στήλης σπηλαιώσης στην περίπτωση αυτή δίνεται στο δεξιό σχήμα της Εικόνας 75.

Οι διαστάσεις της στήλης σπηλαιώσης εξαρτώνται από την τιμή της παραμέτρου  $\sigma$  της εγκατάστασης και αυξάνουν όσο μειώνεται το  $\sigma$ . Το φαινόμενο ανάπτυξης της στήλης σπηλαιώσης είναι πολύ πολύπλοκο και εξαρτάται από τη διαμόρφωση του δρομέα και τη μορφή του αποκλίνοντος αγωγού εξόδου.


--	--	--

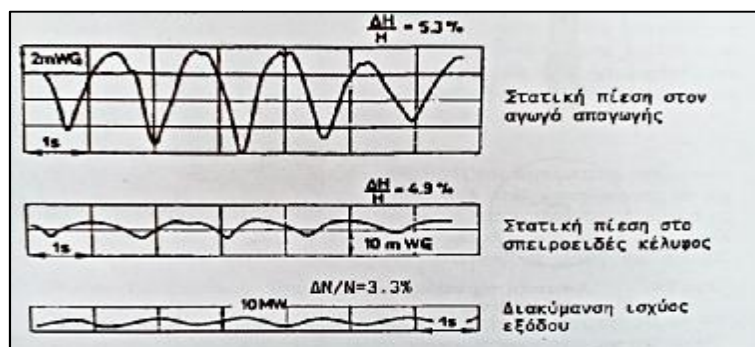
Οι διαστάσεις της στήλης σπηλαιώσης εξαρτώνται από την τιμή της παραμέτρου  $\sigma$  της εγκατάστασης και αυξάνουν όσο μειώνεται το  $\sigma$ . Το φαινόμενο ανάπτυξης της στήλης σπηλαιώσης είναι πολύ πολύπλοκο και εξαρτάται από τη διαμόρφωση του δρομέα και τη μορφή του αποκλίνοντος αγωγού εξόδου. Η ανάπτυξη της στήλης σπηλαιώσης δεν προκαλεί φθορά στη μηχανή, αφού εξελίσσεται μακριά από τις στερεές επιφάνειές της, αλλά μηχανικές ταλαντώσεις σε αυτή καθώς και ταλαντώσεις στη λειτουργία της που είναι πιο έντονες όταν ο αποκλίνον αγωγός εξόδου είναι καμπυλωμένος (όπως συμβαίνει σε όλες τις μεγάλες μονάδες αντιδράσεως), λόγω της εντονότερης μη αξονοσυμμετρικής μορφής της κατάντι ροής. Η διακύμανση της λειτουργίας της μηχανής είναι περισσότερο έντονη στην περίπτωση ανάπτυξης ελικοειδούς στήλης σπηλαιώσης. Η μηχανή μπορεί να πέσει σε κατάσταση αστάθειας όταν οι ταλαντώσεις της ροής έχουν ως αποτέλεσμα την ταλάντωση της διερχόμενης παροχής και άρα και της ισχύος εξόδου.



Εικόνα 75 Μορφή στήλη σπηλαιώσης. [πηγή: Δ.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’]

Στα διαγράμματα της Εικόνας 76. δίνεται η διακύμανση της στατικής πίεσης στον αγωγό φυγής και στο σπειροειδές κέλυφος εισόδου καθώς και της ισχύος εξόδου υδροστροβίλου Francis στην περίπτωση ανάπτυξης ισχυρής στήλης σπηλαιώσης.

Η μεταβολή της στατικής πίεσης στον αγωγό φυγής ( $\Delta H/H=5,3\%$  για την περίπτωση του σχήματος) γίνεται αισθητή και στο σπειροειδές κέλυφος με κάποια διαφορά φάσεως και μικρότερο πλάτος ( $\Delta H/H=4,9\%$ ). Η διακύμανση της στατικής πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος, και άρα και στο άκρο του αγωγού προσαγωγής, έχει ως αποτέλεσμα την διακύμανση της παροχής του αγωγού προσαγωγής, έχει ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της παροχής του αγωγού και άρα της ισχύος εξόδου της μονάδας ( $\Delta N/N=3,3\%$ , για την περίπτωση του σχήματος). Επίσης, ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η διακύμανση της πίεσης στο άκρο του αγωγού προσαγωγής στην περίπτωση συντονισμού με τις ιδιοσυχνότητες του ίδιου του αγωγού προσαγωγής.



--	--	--

*Εικόνα 76 Ταλαντώσεις σε διάφορα τμήματα του στροβίλου. [πηγή: Α.Παπαντώνης ‘Υδροδυναμικές Μηχανές’]*

Οι μηχανικές ταλαντώσεις μπορεί να γίνουν επικίνδυνες για την μηχανική αντοχή της μονάδας και γι’ αυτό η επιτρεπόμενη περιοχή λειτουργίας όσον αφορά την ανάπτυξη της στήλης σπηλαίωσης προσδιορίζεται πειραματικά μέσω διαγραμμάτων

Στους υδροστροβίλους Kaplan εμφανίζονται επιπλέον οι ακόλουθες ειδικές μορφές σπηλαίωσης:

#### **2.4.2.5 Σπηλαίωση πλήμνης**

Αναπτύσσεται κοντά στο σφαιρικό τμήμα της πλήμνης και προκαλεί σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης. Η έκταση του φαινομένου εξαρτάται από την τιμή του  $\sigma$ . Δεν πρόκειται για φαινόμενο επικίνδυνο από πλευράς φθοράς.

#### **2.4.2.6 Σπηλαίωση της στεφάνης (ή ακροπτερυγίων)**

Πρόκειται για φαινόμενο που χαρακτηρίζει τους δρομείς που δεν έχουν εξωτερική στεφάνη (τα πτερύγια είναι πρόβολοι που στηρίζονται στην πλήμνη), όπως οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής και Deriaz (πολύ σπάνια σε “ταχύστροφους” Francis). Η ανάπτυξη αυτής της μορφής σπηλαίωσης οφείλεται στις σημαντικές ταχύτητες της ροής που αναπτύσσονται μεταξύ των ακροπτερυγίων και του εξωτερικού κελύφους (περιρροή του ακροπτερυγίου από την πλευρά υπερπίεσης προς την πλευρά υποπίεσης). Για χαμηλές τιμές της παραμέτρου  $\sigma$  η περιρροή αυτή συνοδεύεται με την ανάπτυξη σπηλαίωσης που προκαλεί σημαντικές φθορές, αν και δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της μηχανής.

#### **2.4.2.7 Στάθμη τοποθέτησης Υδροστροβίλου**

Κατά τη φάση σχεδίασης ενός υδροηλεκτρικού έργου, για το καθορισμό της στάθμης τοποθέτησης του υδροστροβίλου  $z_2$  θα πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ύψους τοποθέτησης  $H_\pi$ . Το ύψος τοποθέτησης  $H_\pi$  και η στάθμη τοποθέτησης  $z_2$  του υδροστροβίλου με γνωστή την τιμή του  $\sigma_{kp}$  όπως έχει καθοριστεί από την σχέση 2.89.

Από την μορφή συσχέτισης  $\sigma_{kp} = f(ns \text{ ή } nq)$  προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών και όσο αυξάνεται και η τιμή της παραμέτρου σπηλαίωσης  $\sigma_{kp}$  τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η στάθμη  $z_2$  τοποθέτησης του υδροστροβίλου.

Για  $H_\pi < 0$  δηλ. για  $z_2 < z_a$  ο υδροηλεκτρικός σταθμός είναι υπόγειος. Άρα η αύξηση του ειδικού αριθμού στροφών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκσκαφών για την κατασκευή το ΥΗΣ. Όμως, αύξηση του  $ns, (nq)$  σημαίνει την αύξηση περιστροφής  $n$  (RPM) του υδροστροβίλου (για το ίδιο κανονικό σημείο λειτουργίας) και άρα ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό μικρότερων διαστάσεων, μικρότερου κόστους και λιγότερες σε όγκο εκσκαφές. Το τελικό κριτήριο επιλογής της τιμής της ταχύτητας περιστροφής είναι καθαρά οικονομοτεχνικό, οπότε η βέλτιστη επιλογή προκύπτει από την εξέταση εναλλακτικών λύσεων.

Η τιμή του  $\sigma_{kp}$  που δίνεται από την συσχέτιση  $\sigma_{kp} = f(ns \text{ ή } nq)$  και η οποία παριστάνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 70, πρέπει να θεωρείται ως ενδεικτική και κατάλληλη για το στάδιο της προμελέτης της μονάδας. Στους υδροστροβίλους μεγάλου μεγέθους η ακριβής τιμή του  $\sigma_{kp}$  προσδιορίζεται εργαστηριακά, σε γεωμετρικά όμοιο μοντέλο επειδή ακόμη και μικρές διαφορές στη χάραξη του δρομέα μπορεί να προκαλούν σημαντικές μεταβολές στην τιμή του  $\sigma_{kp}$ .

--	--	--

### 2.4.3 ΦΘΟΡΕΣ ΑΠΟ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

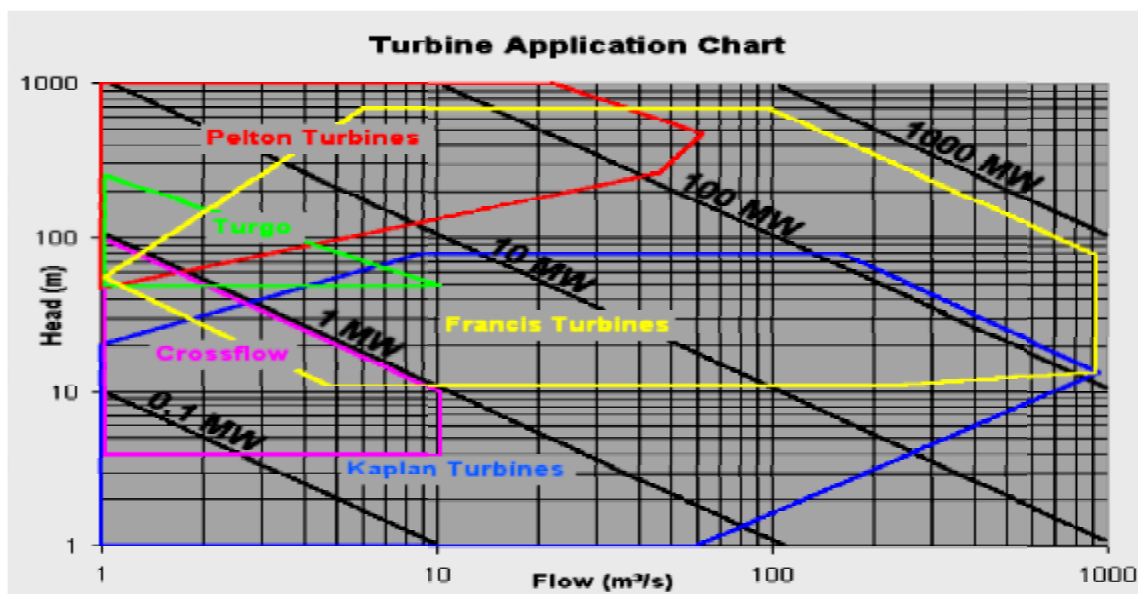
Η φθορά που προκαλείται σε ένα δρομέα λόγω της σπηλαιώσης μετράτε από την ποσοστιαία απώλεια μάζας μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας (της τάξεων των 5.000 έως 10.000 ωρών λειτουργίας).

Στους υδροστροβίλους Francis περισσότερο επικίνδυνη από πλευράς φθοράς είναι η σπηλαιώση εισόδου στην εξωτερική επιφάνεια του περυγίου που προκαλεί ζώνες φθοράς μικρής έκτασης αλλά σημαντικού βάθους. Η σπηλαιώση εξόδου είναι λιγότερο επικίνδυνη από πλευράς μηχανικής διάβρωσης και μάλιστα ο ρυθμός της φθοράς μειώνεται όσο ελαττώνεται η υδραυλική πτώση. Για τον λόγο αυτό για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ο δρομέας δεν είναι ανάγκη να κατασκευάζεται από υλικά μηχανικής αντοχής.

Στους υδροστροβίλους Kaplan περισσότερο επικίνδυνη από πλευράς φθοράς είναι η σπηλαιώση στεφάνης η οποία προκαλεί φθορές τόσο στα ακροπερύγια όσο και στο κέλυφος. Η μείωση των φθορών γίνεται με επικάλυψη των ευαίσθητων ζωνών (που έχουν εντοπιστεί από τις εργαστηριακές δοκιμές στο γεωμετρικά όμοιο μοντέλο) με κράμματα μεγάλης αντοχής. Για την αντιμετώπιση της σπηλαιώσης στεφάνης υδροστροβίλου Kaplan είναι δυνατή η πρόβλεψη αφαιρετών δακτυλίων φθοράς στην στεφάνη και η διαμόρφωση μικρών περιφερειακών διαπλατυνσεων στα άκρα των περυγίων που μειώνουν δραστικά το φαινόμενο της περιρροής.

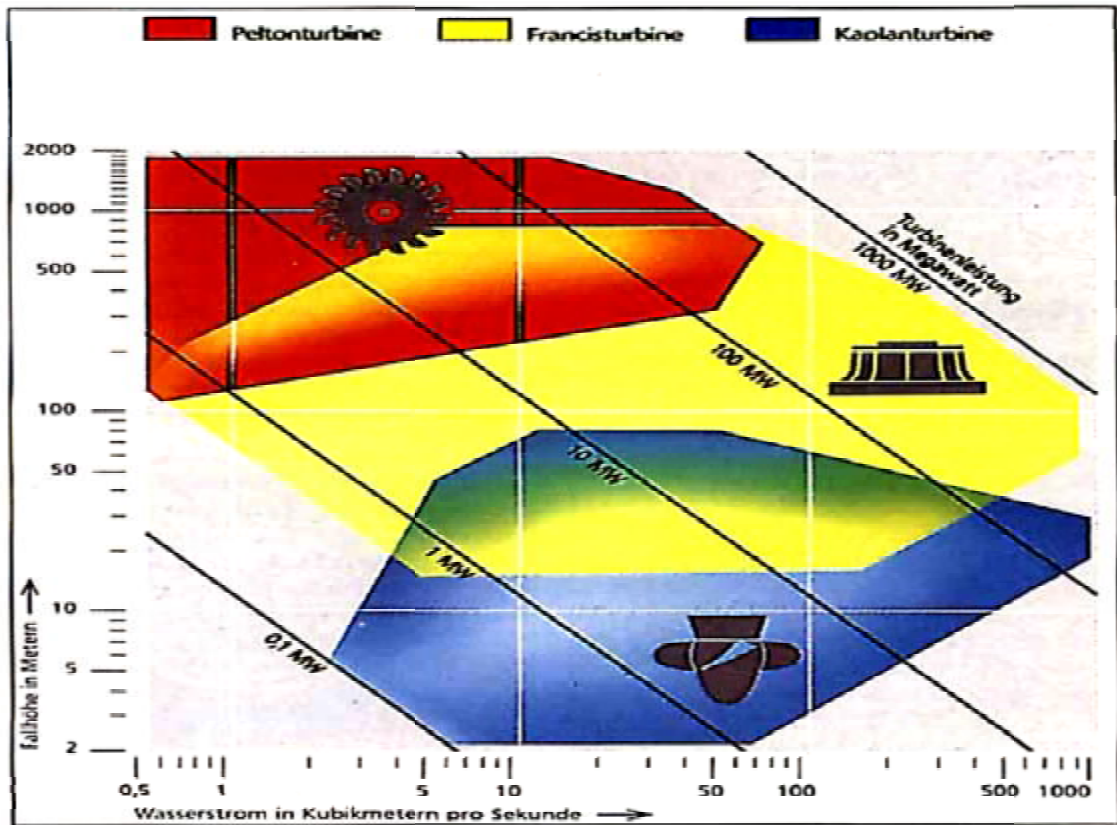
Η εμφάνιση της στήλης σπηλαιώσης προκαλεί ταλαντώσεις σε ολόκληρη τη μονάδα. Η μείωση του όγκου της στήλης και ο περιορισμός των επιπτώσεων στη λειτουργία της μονάδας μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση διαμορφώσεων (περυγίων ή πρισμάτων) στον κώνο εξόδου του αγωγού απαγωγής και με τον τεχνητό εξαερισμό του κώνου της πλήμνης παρέχοντας πεπιεσμένο αέρα μέσα από ειδικά διαμορφωμένες οπές ή επιτρέποντας την αναρρόφηση αέρα από την ατμόσφαιρα μέσω της κοίλης ατράκτου (η αναρροφούμενη παροχή αέρα κατ' όγκο είναι της τάξεως του 2% της παροχής του υδροστροβίλου). Κύριο αποτέλεσμα της παροχής αέρα είναι η μείωση των ταλαντώσεων που προκαλούνται στη μονάδα, όμως παράλληλα μειώνεται ο ολικός βαθμός απόδοσης.

## 2.5 ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΥΠΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΑΩΝ

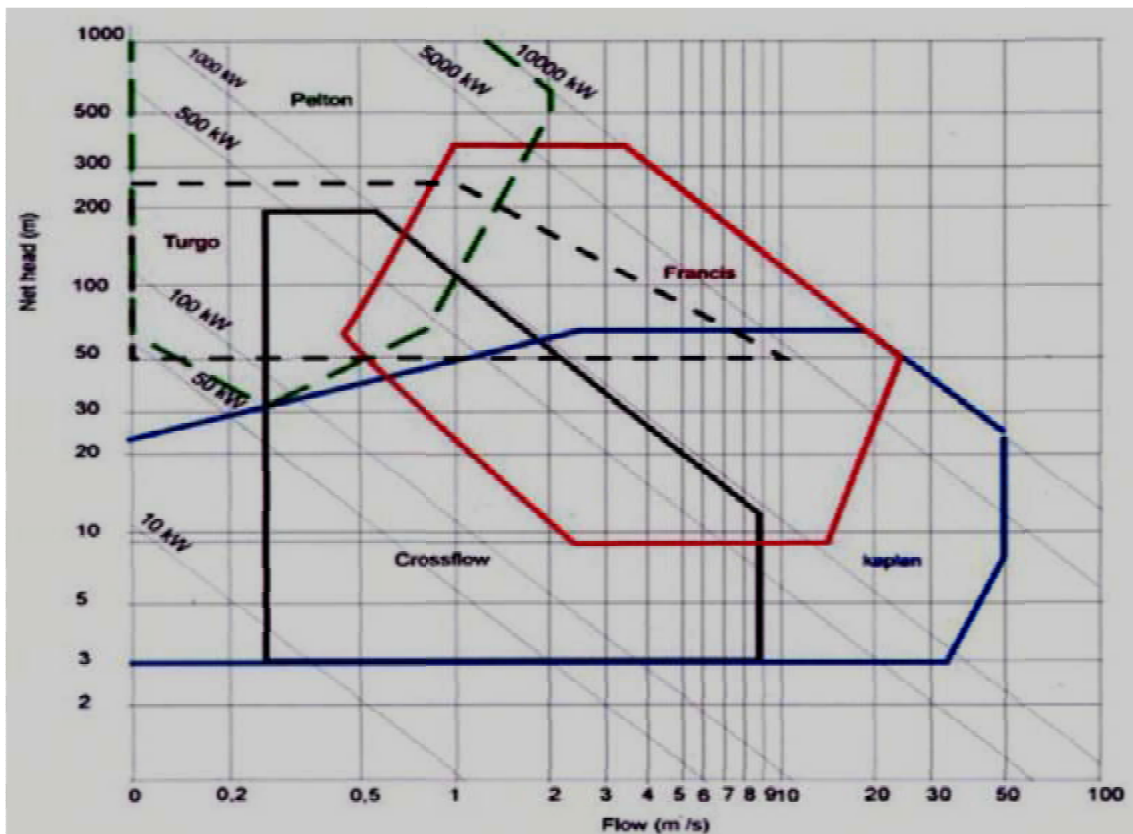


Εικόνα 77 Νομογράφημα της εταιρείας Energotech

--	--	--



Εικόνα 78. Νομογράφημα της εταιρείας Udo-Leuschner



Εικόνα 79. Νομογράφημα της εταιρείας Andritz

### 3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΗΣ

#### 3.1 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

Ο Ρυθμιστής Στροφών είναι η καρδιά του συστήματος της Μονάδας και υπεύθυνος για τον έλεγχο του υδροστροβίλου κατά την παράλληλη λειτουργία σε ένα σύστημα με άλλους στροβίλους ή την λειτουργία σε ένα απομονωμένο σύστημα. Επίσης, ο Ρυθμιστής είναι κατάλληλος για την αυτόματη εκκίνηση ή στάση της Μονάδας και επιτελεί δύο βασικές λειτουργίες. Πρώτον μας παρέχει την δυνατότητα να ελέγχουμε την κίνηση των πτερυγίων του στροβίλου και δεύτερον σαν επακόλουθο της προηγούμενης λειτουργίας παρέχει την δυνατότητα να κρατάμε τις στροφές της μονάδας σταθερές, πράγμα το οποίο είναι απαραίτητο για να είναι σταθερή και η συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος.



*Εικόνα 80 Ρυθμιστής στροφών, εξωτερικά οι ενδείξεις, εσωτερικά ο μηχανισμός.[πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

Βασική προϋπόθεση για να λειτουργήσει ο ρυθμιστής στροφών είναι ότι πρέπει το σύστημα του υπό πίεση ελαίου να βρίσκεται σε κανονική λειτουργία. Με άλλα λόγια όλα τα μέρη του συστήματος ελαίου να είναι σε κανονική λειτουργία, οι αντλίες σε αυτόματη λειτουργία, κανονική στάθμη λαδιού και πίεση και οι απαραίτητες δια την κυκλοφορία του λαδιού βάνες να είναι ανοιχτές.



*Εικόνα 81 Ταμπλό ρυθμιστή στροφών αριστερά, θάλαμος ελαίου ψύξης δεξιά. .[πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

--	--	--

### 3.2 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

Πρόκειται για ρυθμιστή τάσης συνεχούς ελέγχου, ο οποίος ανταποκρίνεται στη μέση τάση των 3 φάσεων της γεννήτριας.

Αποτελεί εφαρμογή του στρεφόμενου ενισχυτή (amplidyne) τύπου HTD (Hitachi Tuning Dynamo) και καθιστά δυνατή τη συνεχή ρύθμιση της τάσης μέσα σε ευρεία περιοχή τιμών, με μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη απόκριση.

Το σύστημα ελέγχου του ρυθμιστή τάσης τύπου HTD είναι ένα κύκλωμα κλειστού βρόγχου, το οποίο περιλαμβάνει:

- **μετασχηματιστές τάσης** (για τη μέτρηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας)
- **γέφυρα διόδων** (για την ανόρθωση της παραπάνω τάσης)
- **ανιχνευτή απόκλισης τάσης και μαγνητικό ενισχυτή** (για τη σύγκριση της πραγματικής τάσης με την επιθυμητή και τη διαμόρφωση του σήματος σφάλματος τάσης)
- **στρεφόμενους ενισχυτές** (amplidynes) τύπου HTD (για την ενίσχυση του σήματος σφάλματος τάσης)
- **βοηθητικό διεγέρτη DC** (για τη διέγερση του κύριου διεγέρτη DC)
- **κύριο διεγέρτη DC** (για την τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης της γεννήτριας) και τη γεννήτρια

Με αυτό το κύκλωμα κλειστού βρόγχου πραγματοποιείται:

1. η σύγκριση της τάσης στα τερματικά της γεννήτριας με την τάση αναφοράς
2. η ενίσχυση του σήματος απόκλισης τάσης και
3. μια ανάλογη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης, ώστε να επανακτηθεί η επιθυμητή τάση στα τερματικά της γεννήτριας

Ο κύριος διεγέρτης, στον οποίο εφαρμόζεται ο ρυθμιστής τάσης, έχει δύο ξεχωριστά τυλίγματα πεδίου, από τα οποία:

- το ένα τροφοδοτείται από το βοηθητικό διεγέρτη και χρησιμοποιείται για χειροκίνητο έλεγχο της διέγερσης μέσω ενός ροοστάτη ρύθμισης πεδίου και
- το άλλο τροφοδοτείται από το στρεφόμενο ενισχυτή και χρησιμοποιείται για τον αυτόματο έλεγχο της διέγερσης από το ρυθμιστή τάσης

Τα τερματικά εξόδου του στρεφόμενου ενισχυτή συνδέονται στο τύλιγμα ελέγχου του κύριου διεγέρτη και παρέχουν το σήμα ρεύματος ελέγχου, το οποίο και ρυθμίζει την τιμή της τάσης στα τερματικά εξόδου του διεγέρτη. Το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας τροφοδοτείται από την τάση εξόδου του κύριου διεγέρτη.

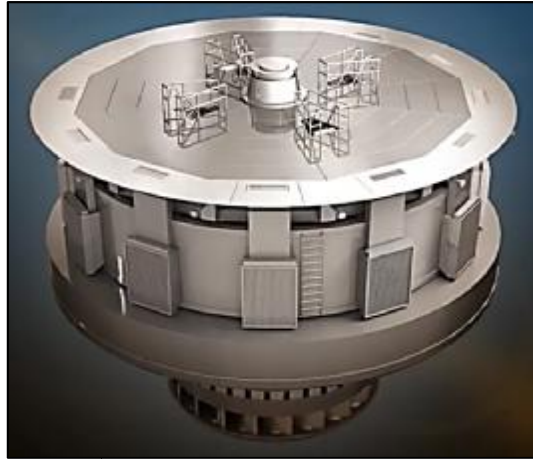




--	--	--

Εικόνα 82. Ρυθμιστής τάσης μονάδας. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

### 3.3 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ



Εικόνα 83 Γεννήτρια υδροστροβίλου [πηγή: Ξηρο-24]

Σύγχρονη γεννήτρια ονομάζεται η ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια στην είσοδό της σε ηλεκτρική ενέργεια συγκεκριμένης τάσης και συχνότητας. Επειδή ακριβώς η συχνότητα, της τάσης εξόδου, της γεννήτριας προσδιορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, η μηχανή αυτή ονομάστηκε *σύγχρονη*. Στις γεννήτριες αυτού του είδους βασίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών παγκοσμίως.

Για να συνδεθεί η μονάδα στο δίκτυο, ελέγχουμε 3 βασικές παραμέτρους:

1. Η συχνότητά της να είναι ίδια με την συχνότητα του δικτύου (50 Hz) και αυτό επιτυγχάνεται με τη συμβολή του ρυθμιστή στροφών ( $n=σταθ.$ ).
2. Η τάση εξόδου της γεννήτριας να είναι ίση με την τάση του δικτύου και η εξισορρόπηση διαμορφώνεται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσεως.
3. Η φασική απόκλιση να είναι κατά το δυνατόν ίση με 0.

Για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή (υδροστροβίλος Francis) το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Τελικά, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής.



Εικόνα 84 Προσαρμογή άξονα γεννήτριας με το στροφέιο υδροστροβίλου Francis [πηγή: learn engineering, [www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo](http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo)]


--	--	--

Ο δρομέας μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης τόσο στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι εκτύπων πόλων, όσο και όταν αυτή διαθέτει κυλινδρικό δρομέα. Ο δρομέας των σύγχρονων γεννητριών κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα με σκοπό τη μείωση των απωλειών λόγω των δινορρευμάτων. Πράγματι, επειδή ο δρομέας εκτίθεται σε συχνές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου η ανάπτυξη δινορρευμάτων στο εσωτερικό του είναι αναπόφευκτη.

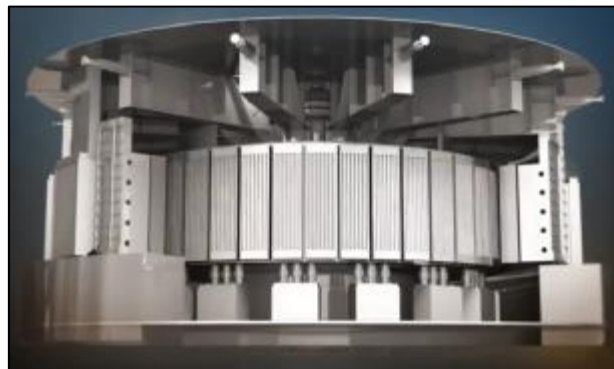
Το τύλιγμα του δρομέα στις σύγχρονες γεννήτριες θα πρέπει να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Επειδή ο δρομέας περιστρέφεται είναι ανάγκη να αναπτυχθεί κάποιος ειδικός τρόπος τροφοδοσίας του τυλίγματός του. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές τροφοδοσίας του δρομέα είναι:

1. Με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε ο δρομέας θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ψήκτες (brushes) και δαχτυλίδια (sliprings).
2. Με τροφοδοσία από ειδική πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη πάνω στον άξονα της γεννήτριας.

Η τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της και από τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της. Η τάση στα άκρα κάθε φάσης μιας σύγχρονης γεννήτριας (φασική τάση) διαφέρει από αυτήν που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της, λόγω της πτώσης τάσης που οφείλεται στην αντίδραση οπλισμού και στη σύνθετη αντίσταση των τυλιγμάτων οπλισμού. Η πολική τάση της σύγχρονης γεννήτριας είναι ίση με τη φασική τάση, όταν το τύλιγμα οπλισμού συνδέεται σε τρίγωνο και πολλαπλασιάζεται επί  $\sqrt{3}$ , όταν το τύλιγμα συνδέεται σε αστέρα.

Ο τρόπος με τον οποίο η σύγχρονη γεννήτρια συνεργάζεται με κάποιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζεται από τους περιορισμούς που της επιβάλλει το συγκεκριμένο σύστημα. Όταν η σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε κάποιο άπειρο ζυγό (ΥΗΣ Καστρακίου), τόσο το πλάτος όσο και η συχνότητα της τάσης εξόδου δεν είναι δυνατόν να μεταβάλλονται. Η ρύθμιση της ενεργού και της άεργης ισχύος είναι δυνατή μέσω της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και του ρεύματος διέγερσης αντίστοιχα.

Οι δυνατότητες παραγωγής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας περιορίζονται βασικά από τη θερμότητα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της. Κάθε φορά που η θερμοκρασία της γεννήτριας ξεπερνάει την ονομαστική της τιμή, η διάρκεια ζωής της μειώνεται σημαντικά. Επειδή σε μια σύγχρονη γεννήτρια υπάρχουν δυο τυλίγματα (οπλισμού και διέγερσης), οι περιορισμοί υπερθέρμανσης είναι δύο. Η μέγιστη επιτρεπόμενη φαινόμενη ισχύς εξόδου της μηχανής προσδιορίζονται από το όριο υπερθέρμανσης του τυλίγματος οπλισμού της, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της  $E_A$  προσδιορίζεται από το όριο υπερθέρμανσης του τυλίγματος διέγερσής της. Τέλος, οι μέγιστες τιμές των  $E_A$  και  $I_A$  ορίζουν από κοινού τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος της γεννήτριας.



Εικόνα 85 Τομή γεννήτριας υδροηλεκτρικού σταθμού [πηγή: Ένεργο-24]

--	--	--

### 3.3.1 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος που εξετάζονται εδώ, ονομάζονται σύγχρονες, επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας των μηχανών αυτών είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με φορά ίδια μ' αυτή του δρομέα. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

Όπου:

$$f_e = \frac{n_m \times P}{120} \quad (3.1)$$

$f_e$  = η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

$n_m$  = η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε rpm (= η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της σύγχρονες μηχανές)

$P$  = ο αριθμός των πόλων

Όλες οι γεννήτριες όμως, παράγουν συχνότητες 50Hz ή 60Hz, οπότε η ταχύτητα περιστροφής τους για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη. Για παράδειγμα, στο σύστημά μας, για τον ΥΗΣ Καστρακίου στο Συγκρότημα Αχελώου, κατά την παραγωγή συχνότητας 50Hz η μηχανή (γεννήτρια) 36 πόλων που διαθέτουμε θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα  $n = 166,7 \text{ rpm}$  εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση. Επομένως, αυτή είναι και η σταθερή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής για το σύστημά που εξετάζεται.

### 3.3.2 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ

Το πλάτος της τάσης στα άκρα της κάθε φάσης μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

$$E_A = \sqrt{2} \times \pi \times N_c \times \varphi \times f \quad (3.2)$$

Δηλαδή, η  $E_A$  εξαρτάται από τη μαγνητική ροή  $\varphi$ , από τη συχνότητα ή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και από κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Συνήα, όμως, χρησιμοποιείται μια πιο απλή μορφή της παραπάνω εξίσωσης, που δίνει έμφαση μόνο στους παράγοντες που μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία της μηχανής. Αυτή είναι

$$E_A = K \times \varphi \times \omega \quad (3.3)$$

Όπου η σταθερά  $K$  εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι:

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

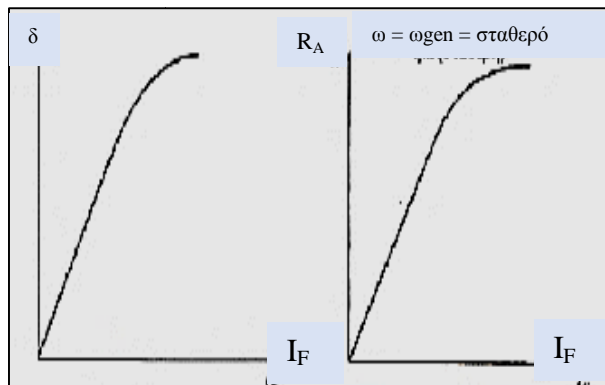
αν η  $\omega$  δίνεται σε ηλεκτρικά rad/sec.

Αν, η  $\omega$  δίνεται σε μηχανικά rad/sec, τότε ισχύει

$$K = \frac{N_c \times P}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

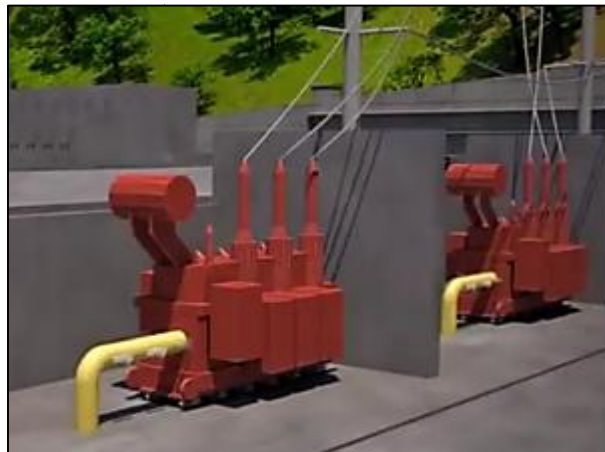
Η τάση  $E_A$  που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής στη μηχανή και της ταχύτητας περιστροφής της. Η μαγνητική ροή εξαρτάται από το ρεύμα του δρομέα (ρεύμα διέγερσης)  $I_F$ .

--	--	--



Εικόνα 86.α) Γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας ως της το ρεύμα διέγερσης. β) Η καμπύλη μαγνήτισης της σύγχρονης γεννήτριας [πηγή: Stephen J. Chapman, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ”]

### 3.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ



Εικόνα 87 Μετασχηματιστής ισχύος [πηγή: Voith Hydro, youtube.com/watch?v=pNx76qvT9EU]

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης μέσω της επίδρασης της μαγνητικού πεδίου. Αυτή η συσκευή αποτελείται από δυο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα. Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο (ή το τρίτο, αν υπάρχει) συνδέεται με το φορτίο. Το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα (primary winding) ή τύλιγμα εισόδου του μετασχηματιστή και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον (secondary) ή τύλιγμα εξόδου. Αν υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή.

Στην ιδανική περίπτωση ο μετασχηματιστής μετατρέπει το επίπεδο της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδό του σε τάση με διαφορετικό επίπεδο στην έξοδό του, χωρίς σημαντικές απώλειες. Έτσι, όταν η τάση εισόδου ανυψώνεται, το αντίστοιχο ρεύμα υποβιβάζεται, ώστε η ισχύς εξόδου να είναι ίση με την ισχύ στην είσοδο.

Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης σε κάποιο κεντρικό σημείο, η ανύψωση του επιπέδου της και η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις με

--	--	--

πολύ μικρές απώλειες. Στο σημείο της κατανάλωσης φυσικά το επίπεδο της τάσης θα πρέπει πάλι να υποβιβαστεί με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού. Όπως είναι γνωστό, οι απώλειες μιας γραμμής μεταφοράς είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος της γραμμής. Δηλαδή, ο δεκαπλασιασμός του επιπέδου της παραγόμενης τάσης πριν από τη μεταφορά της και η αντίστοιχη μείωση του ρεύματος συνεπάγεται εκατό φορές μείωση των απωλειών μεταφοράς. Είναι, λοιπόν, φανερό πως, χωρίς την εισαγωγή των μετασχηματιστών, η ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες από τις σημερινές εφαρμογές.

Στα σύγχρονα συστήματα ισχύος η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με επίπεδο τάσης 12 έως 25 kV. Οι μετασχηματιστές ανυψώνουν αυτά τα επίπεδα στα 110 kV έως περίπου 1000 kV, ώστε οι απώλειες μεταφοράς να είναι πολύ μικρές. Στο δικό μας σύστημα, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με επίπεδο τάσης 15,5 kV και οι μετασχηματιστές ανυψώνουν αυτά τα επίπεδα στα 150 kV. Ο πρώτος υποβιβασμός της τάσης γίνεται στους υποσταθμούς διανομής πάλι με τη βοήθεια των μετασχηματιστών σε επίπεδα τάσης από 12 έως 34,5 kV. Τελικά, με συνεχείς υποβιβασμούς (μέχρι π.χ. τα 120 V) η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε σπίτια, γραφεία και εργοστάσια.

Ανάλογα με τη συγκεκριμένη λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες. Ο μετασχηματιστής που συνδέεται στην έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο της τάσης εξόδου της (π.χ. στα 110 kV), πριν οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς, ονομάζεται μετασχηματιστής μονάδας (unit transformer).

Ο μετασχηματιστής στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει το επίπεδο τάσης της γραμμής στα επίπεδα διανομής (2,3 ως 34,5 kV) ονομάζεται μετασχηματιστής υποσταθμού (substation transformer). Τέλος, ο μετασχηματιστής που υποβιβάζει την τάση διανομής στα επίπεδα της χρησιμοποιήσιμης τάσης ονομάζεται μετασχηματιστής διανομής (distribution transformer). Όλοι οι παραπάνω μετασχηματιστές παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους και η βασικότερη απ' αυτές βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο καθένας.

### 3.4.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η ακρίβεια οποιουδήποτε μοντέλου του πραγματικού μετασχηματιστή εξαρτάται πάντα από το αν στην ανάπτυξη του λαμβάνονται υπόψη όλα τα είδη των απωλειών κατά τη λειτουργία του. Οι πιο βασικές απ' αυτές τις απώλειες είναι οι παρακάτω:

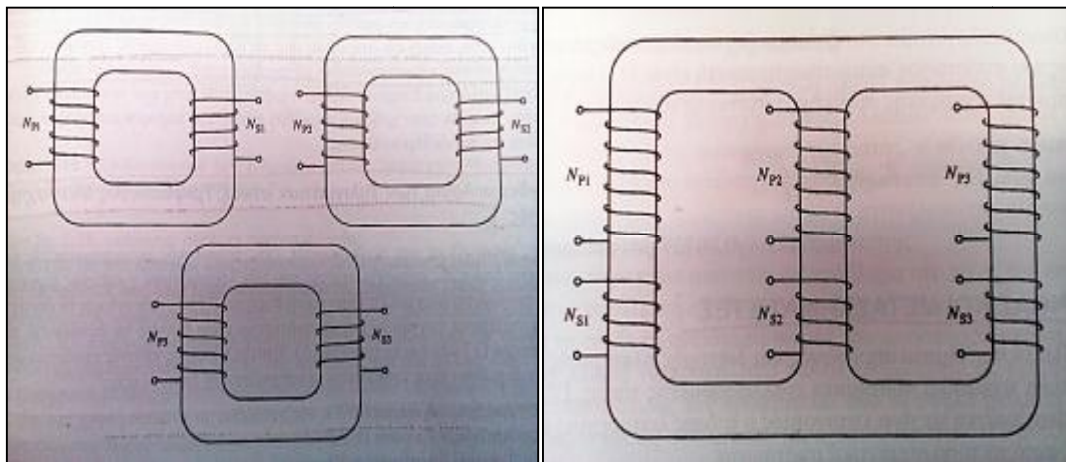
- Απώλειες χαλκού ( $I^2R$ ). Πρόκειται για τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του.
- Απώλειες εξαιτίας των δινορρευμάτων. Είναι οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή.
- Απώλειες υστέρησης. Αυτές έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια περίπλοκη, μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή.
- Ροή διαρροής. Πρόκειται για της μαγνητικές ροές  $\Phi_{LP}$  και  $\Phi_{LS}$  που αναλύθηκαν στα προηγούμενα, οι οποίες ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δυο τυλίγματα. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές (self-inductance) των τυλιγμάτων του πυρήνα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

--	--	--

### 3.5 ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Σχεδόν όλα τα συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ισχύος στις μέρες μας είναι τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενης τάσης. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο είναι ανάγκη να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των μετασχηματιστών σ' αυτά τα τόσο σημαντικά συστήματα.

Οι τριφασικοί μετασχηματιστές κατασκευάζονται με δυο βασικούς τρόπους. Στην Εικόνα 88(α) τρεις απλοί μονοφασικοί μετασχηματιστές συνδέονται μεταξύ τους πάνω σ' ένα κοινό τριφασικό ζύγωμα (bank). Στη δεύτερη μέθοδο (β) κατασκευής τριφασικών μετασχηματιστών τρία διπλά τυλίγματα τοποθετούνται γύρω από έναν κοινό πυρήνα.



Εικόνα 88. α) Μια τριφασική συστοιχία μετασχηματιστών που αποτελείται από ανεξάρτητους μετασχηματιστές, δημιουργώντας τριφασικό μετασχηματιστή, β) Η δεύτερη τεχνική είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά, επειδή παρουσιάζει μικρότερο βάρος και όγκο, είναι πιο φθηνή και λειτουργεί με κάπως μεγαλύτερη απόδοση. [πηγή: Stephen J. Charman, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ”]

#### 3.5.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Όπως αναφέρθηκε, ένας τριφασικός μετασχηματιστής αποτελείται από τρεις μετασχηματιστές που είτε λειτουργούν ο καθένας ξεχωριστά είτε συνδέονται όλοι μαζί σ' έναν κοινό πυρήνα. Τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα τυλίγματα των τριών μετασχηματιστών είναι δυνατό να συνδέονται τόσο σε αστέρα (Y) όσο και σε τρίγωνο (Δ). Έτσι, οι τέσσερις πιθανές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι οι εξής:

1. Αστέρας – Αστέρας (Y-Y)
2. Αστέρας – Τρίγωνο (Y-Δ)
3. Τρίγωνο – Αστέρας (Δ-Y)
4. Τρίγωνο – Τρίγωνο (Δ-Δ)

Το κλειδί για την ανάλυση ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι η παρατήρηση του καθενός από τους τρεις μετασχηματιστές ξεχωριστά. Όμως, ο καθένας μετασχηματιστής συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ο απλός μονοφασικός μετασχηματιστής. Έτσι, οι υπολογισμοί της σύνθετης αντίστασης, της διακύμανσης τάσης, της απόδοσης και των άλλων ποσοτήτων του τριφασικού μετασχηματιστή αναφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη τιμή βάσης (pu) και χρησιμοποιούν τις μεθόδους του μονοφασικού μετασχηματιστή.

--	--	--

### 3.5.2 ΤΟ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Εφαρμόζεται με την ίδια ευκολία και με τους ίδιους νόμους στους τριφασικούς μετασχηματιστές, όπως και τους μονοφασικούς. Οι βασικές εξισώσεις του ανά μονάδα συστήματος εφαρμόζονται χωρίς μεταβολές στα ανά φάση κυκλώματα του τριφασικού μετασχηματιστή. Αν η συνολική τιμή βάσης της φαινόμενης ισχύος ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι η  $S_{base}$ , τότε η αντίστοιχη τιμή βάσης της μιας φάσης του είναι η  $S_{1φ,base}$

$$S_{ij,base} = \frac{S_{base}}{3} \quad (3.6)$$

και οι τιμές βάσης του ρεύματος και της σύνθετης αντίστασης, της μιας φάσης του είναι

$$I_{j,base} = \frac{S_{ij,base}}{V_{j,base}} \quad (3.7)$$

$$I_{j,base} = \frac{S_{base}}{3V_{j,base}} \quad (3.8)$$

$$Z_{base} = \frac{(V_{j,base})^2}{S_{ij,base}} \quad (3.9)$$

$$Z_{base} = \frac{3(V_{j,base})^2}{S_{base}} \quad (3.10)$$

Οι πολικές ποσότητες του τριφασικού μετασχηματιστή μπορούν επίσης να εκφραστούν στο ανά μονάδα σύστημα. Οι τιμές βάσης των πολικών ποσοτήτων συνδέονται με τις τιμές βάσης των φασικών ποσοτήτων με σχέσεις που αντιστοιχούν στον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα, αν τα τυλίγματα συνδέονται σε τρίγωνο, ισχύει η σχέση  $V_{L,base} = V_{j,base}$  ενώ αν συνδέονται σε αστέρα ισχύει η  $V_{L,base} = \sqrt{3} V_{j,base}$ . Τέλος, η τιμή βάσης για το πολικό ρεύμα ενός τριφασικού μετασχηματιστή δίνεται από τη σχέση

$$I_{L,base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{L,base}} \quad (3.11)$$

### 3.5.3 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η ονομαστική τάση ενός μετασχηματιστή προσδιορίζεται από δυο παράγοντες. Ο πρώτος και λιγότερο σημαντικός λόγος περιορισμού της μέγιστης τάσης του είναι η προστασία της μόνωσης των αγωγών του από υψηλές τάσεις. Ο δεύτερος λόγος έχει σχέση με την καμπύλη μαγνήτισης και με το ρεύμα μαγνήτισης.

$$v(t) = V_M \sin \omega t \quad (3.12)$$

η μαγνητική ροή που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του έχει τιμή

$$j(t) = \frac{1}{N_p} \dot{v}(t) dt = \frac{1}{N_p} \omega V_M \cos \omega t dt \quad (3.13)$$

$$j(t) = - \frac{V_M}{\omega N_p} \sin \omega t \quad (3.14)$$

Αν το πλάτος της εφαρμοζόμενης τάσης  $v(t)$  αυξηθεί κατά 10%, η αντίστοιχη μέγιστη ροή θα αυξηθεί επίσης κατά 10%. Όμως, πέρα από ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης



--	--	--

μαγνήτισης η αύξηση της μαγνητικής ροής κατά 10% προϋποθέτει αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης πολύ μεγαλύτερη από 10%.

Με τη συνεχή αύξηση του πλάτους της τάσης εισόδου, το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να πάρει τιμές μη αποδεκτές. Έτσι, η μέγιστη τιμή του πλάτους της τάσης (η ονομαστική τιμή της τάσης) περιορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα μαγνήτισης.

Επίσης, παρατηρείται ότι, στην περίπτωση που η μέγιστη μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή, το πλάτος της τάσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητάς της.

$$j_{max} = \frac{V_{max}}{w N_p} \quad (3.15)$$

Έτσι, αν κάποιος μετασχηματιστής με ονομαστική συχνότητα 60 Hz λειτουργεί στα 50 Hz, η τάση εισόδου θα πρέπει να είναι κι αυτή μειωμένη κατά το ένα έκτο της. Αν δε συμβαίνει αυτό, η μέγιστη μαγνητική ροή στον πυρήνα θα είναι απαράδεκτα υψηλή. Αυτή η επιβαλλόμενη μείωση στην τάση εισόδου ονομάζεται υποβιβασμός (derating) της τάσης. Εντελώς ανάλογα, όταν της μετασχηματιστής των 50 Hz λειτουργεί στα 60 Hz, είναι δυνατή η αύξηση του πλάτους της τάσης εισόδου κατά 20%, αν φυσικά κάτι τέτοιο δεν υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας της μόνωσής του.

### 3.5.4 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Ο βασικός λόγος που περιορίζει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ ενός μετασχηματιστή είναι το γεγονός ότι, μαζί με την ονομαστική τάση του, επιβάλλουν το μέγιστο ρεύμα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Αυτό ακριβώς το ρεύμα είναι που επηρεάζει της απώλειες χαλκού στη συσκευή και στη συνέχεια τη θερμοκρασία του τυλίγματός του. Προφανώς, αν αυτή η θερμοκρασία ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένη τιμή, το τυλίγμα θα υπερθερμανθεί και η διάρκεια ζωής του θα μειωθεί σημαντικά.

Όμως, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς ενός μετασχηματιστή είναι δυνατό να εκφράζεται με περισσότερες από μια τιμές. Συνήθως, η μια από αυτές της τιμές εκφράζει την ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος, χωρίς τη χρήση κάποιας μεθόδου ψύξης των τυλιγμάτων, ενώ η άλλη τιμή υπολογίζεται για την περίπτωση εφαρμογής μιας τέτοιας μεθόδου. Το τελικό αποτέλεσμα, για τον προσδιορισμό της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή, είναι το ότι η θερμοκρασία των τυλιγμάτων του θα πρέπει να περιορίζεται με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής του.

Ακόμη, αν η τάση ενός μετασχηματιστή περιορίζεται για οποιονδήποτε λόγο (π.χ. λειτουργεί σε συχνότητα μικρότερη από την ονομαστική του), τότε και η ονομαστική του ισχύς θα πρέπει να μειώνεται με τον ίδιο συντελεστή. Σε περίπτωση που αυτό δεν τηρείται, το ρεύμα που αναπτύσσεται στα τυλίγματά του προκαλεί υπερθέρμανση.

### 3.5.5 .ΚΡΟΥΣΤΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Ένα ακόμη πρόβλημα που σχετίζεται με το επίπεδο τάσης του μετασχηματιστή είναι το κρουστικό ρεύμα που αναπτύσσεται κατά την έναρξη της λειτουργίας του. Εάν υποθεθεί ότι η τάση

$$v(t) = V_M \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.16)$$

εφαρμόζεται στα άκρα του μετασχηματιστή όταν αυτός συνδεθεί στη γραμμή μεταφοράς ισχύος. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής που θα αναπτυχθεί στο εσωτερικό του μετασχηματιστή κατά την πρώτη ημιπερίοδο της τάσης εισόδου εξαρτάται από τη φάση αυτής της τάσης τη στιγμή που εφαρμόζεται στο πρωτεύον του. Αν η αρχική τάση έχει τιμή

--	--	--

$$v(t) = V_M \sin(\omega t + 90^\circ) = V_M \cos \omega t \quad (3.17)$$

και η αρχική τιμή της μαγνητικής ροής είναι μηδενική, τότε η μέγιστη τιμή της ροής στην πρώτη ημιπερίοδο αυτής της τάσης θα είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της ροής

$$j_{max} = \frac{V_{max}}{\omega N_p} \quad (3.18)$$

Αυτή η τιμή της ροής δεν προκαλεί προβλήματα στο μετασχηματιστή, επειδή είναι ακριβώς η μέγιστη επιτρεπόμενη. Όταν η τάση εισόδου δίνεται από την

$$v(t) = V_M \sin \omega t \quad (3.19)$$

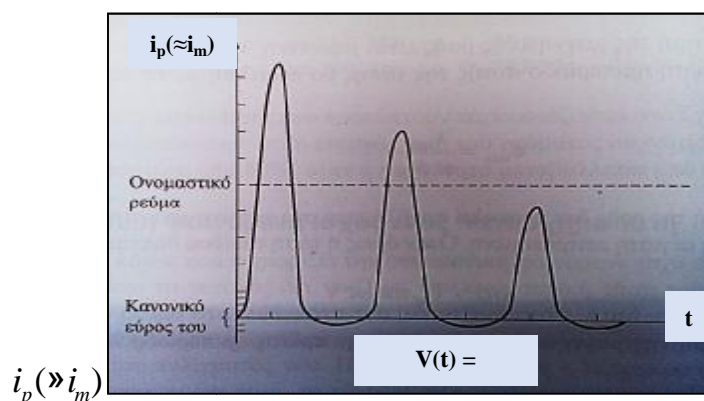
η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής κατά την πρώτη ημιπερίοδο λειτουργίας είναι η

$$j(t) = \frac{1}{N_p} \int_0^{t/w} V_M \sin \omega t dt = - \frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \Big|_0^{t/w} = - \frac{V_M}{\omega N_p} (\cos(\omega t/w) - 1) \quad (3.20)$$

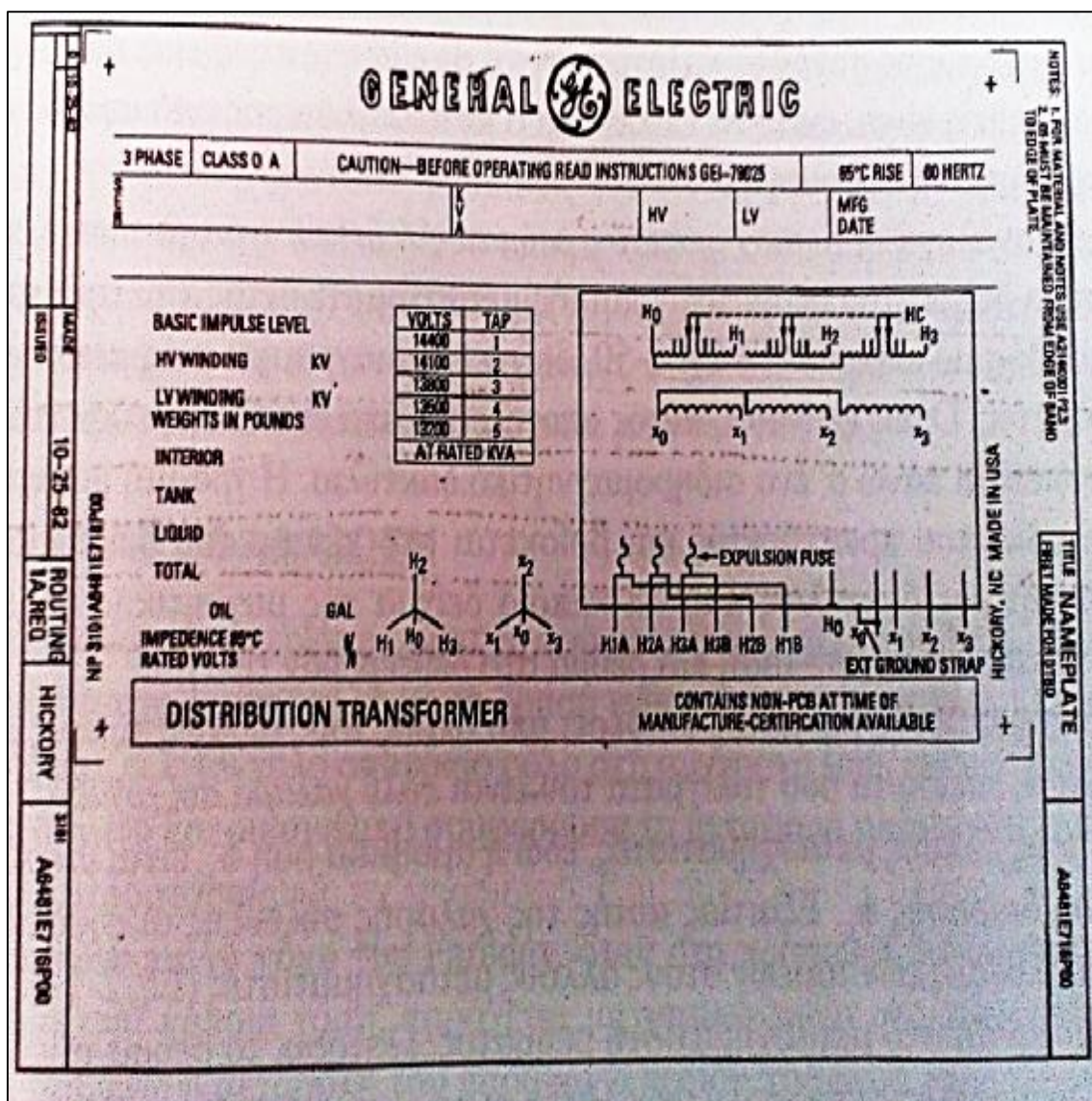
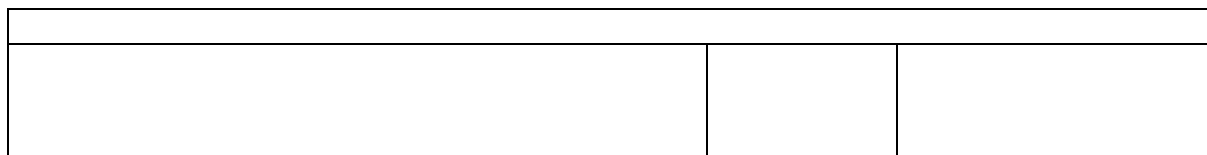
$$j_{max} = \frac{2V_{max}}{\omega N_p} \quad (3.21)$$

Αυτή η μέγιστη ροή είναι διπλάσια από τη μαγνητική ροή του μετασχηματιστή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Από την καμπύλη μαγνήτισης γίνεται φανερό ότι ο διπλασιασμός της μέγιστης ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή προκαλεί ένα τεράστιο ρεύμα μαγνήτισης. Στην πραγματικότητα αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί με βραχυκύκλωση του μετασχηματιστή για κάποιο μέρος του κύκλου, καθώς το ρεύμα μαγνήτισης είναι πολύ υψηλό.

Σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση όπου η φάση της τάσης εισόδου έχει τιμή ανάμεσα στις  $90^\circ$  - όπου δεν υπάρχει πρόβλημα και στις  $0^\circ$  - όπου το πρόβλημα γίνεται μέγιστο, πάντα αναπτύσσεται κάποιο μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης. Η φάση της τάσης εισόδου στο μετασχηματιστή δεν μπορεί να ρυθμιστεί με κανένα τρόπο. Έτσι πάντα κατά τη σύνδεση του μετασχηματιστή στη γραμμή μεταφοράς υπάρχει ο κίνδυνος να αναπτυχθούν τεράστια κρουστικά ρεύματα τα οποία μηδενίζονται μόνο μετά από μερικές περιόδους της τάσης. Τόσο ο μετασχηματιστής όσο και το σύστημα στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί αυτός θα πρέπει να αντέχουν στα παραπάνω ρεύματα.



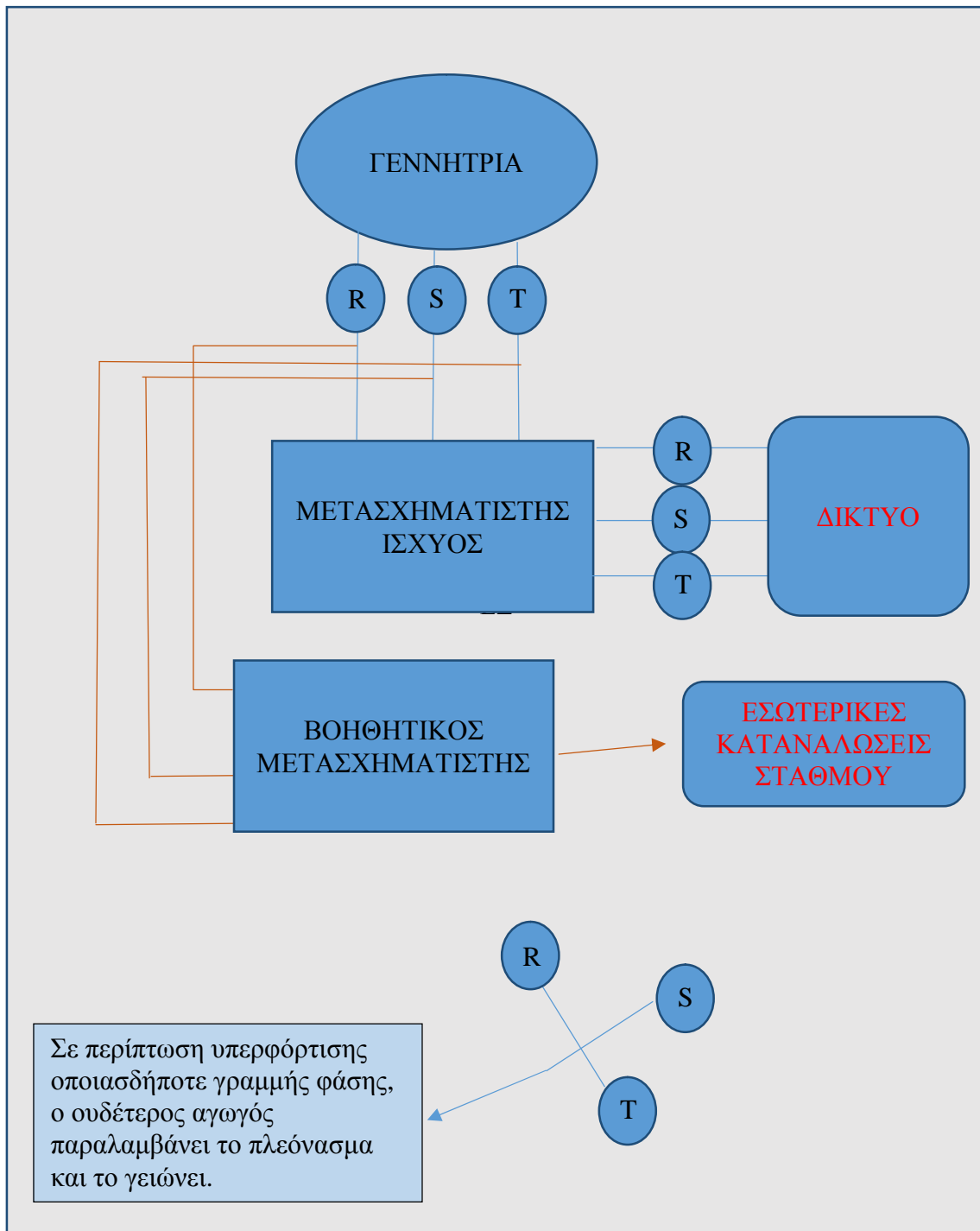
Εικόνα 89. Κρουστικό ρεύμα που οφείλεται στο ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή κατά την εκκίνηση. [πηγή: Stephen J. Chapman, "ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ"]



Εικόνα 90. Πινακίδα μετασχηματιστή διανομής. Προδιαγραφές, τάσης, συχνότητας, φαινόμενης ισχύος και ενδιάμεσων λήψεων [General Electric Company]

Στην Εικόνα 90, φαίνεται η τυπική πινακίδα ενός μετασχηματιστή. Σ' αυτήν περιλαμβάνονται κάποιες πληροφορίες, όπως η ονομαστική τάση, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς, η ονομαστική συχνότητα και η ανά μονάδα τιμή της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή. Ακόμη, περιλαμβάνονται οι ονομαστικές τάσεις που αντιστοιχούν στην κάθε ενδιάμεση λήψη του, αλλά και κάποια σχέδια για τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του. Τέλος, τέτοιου είδους πινακίδες, δίνουν πληροφορίες για τον τρόπο σχεδίασης του μετασχηματιστή και χρήσιμες οδηγίες.

--	--	--



Εικόνα 91 Διάγραμμα συσχέτισης μετασχηματιστή ισχύος – βοηθητικού μετασχηματιστή

--	--	--

## 4 ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ – ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ

Ο Αχελώος είναι ένας ποταμός που από αρχαιολογικά και ιστορικά στοιχεία προκύπτει ότι λατρευόταν ως Θεός από τους κατοίκους των περιοχών που διέσχισε. Οι παλαιότερες γνωστές παραστάσεις του θεού Αχελώου χρονολογούνται μόλις τον 7ο αιώνα π.Χ. Η επικρατέστερη ερμηνεία του ονόματος του προκύπτει από το πρώτο συνδετικό της ρίζας «αχ» ή «αχα» (λατινικό aqua) που σημαίνει νερό και το συγκριτικό επίθετο «λώων» που έχει και την έννοια του ποσοτικά μεγαλύτερου. Μαζί δηλώνουν έναν πολύνερο ποταμό.



Εικόνα 92 Αχελώος ποταμός. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.]

Ο Αχελώος, δεύτερος σε μήκος ελληνικός ποταμός μετά τον Αλιάκμονα, πηγάζει από το όρος Λάκμος της οροσειράς της Πίνδου, στην περιοχή του Μετσόβου και ρέει σε ένα από τα πιο σημαντικά υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας. Η λεκάνη απορροής του έχει συνολική έκταση 4.470 km και μέγιστο υψόμετρο 2.496 m. Ονομάζεται και Ασπροπόταμος, επειδή η τυρβώδης ροή του νερού δημιουργούσε άσπρους αφρούς επειδή η κοίτη του σε πολλά σημεία παρουσιάζεται κατάσπρη.

Είναι ένας από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Ελλάδας, με διαδρομή εξ' ολοκλήρου σε ελληνικό έδαφος, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ποτάμια οικοσυστήματα της χώρας. Παράλληλα είναι ο σπουδαιότερος ποταμός από υδροηλεκτρικής παραγωγής και αρκετά σημαντικός από πλευράς γεωργικής αξιοποίησης για την ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας.

Αρχικά ρέει στα δυτικά της Θεσσαλίας με κατεύθυνση προς νότο και στη συνέχεια, εισέρχεται στη Στερεά Ελλάδα και διαγράφει, για αρκετό διάστημα, τα σύνορα Ευρυτανίας και Αιτωλοακαρνανίας. Στην περιοχή αυτή εμπλουτίζεται με νερά της Πίνδου από τους διάφορους παραποτάμους του, κυριότεροι των οποίων είναι ο Αγραφιώτης ή Αγραφιώτικος, ο Μέγδοβας ή Ταυρωπός και ο Τρικεριώτης. Συνεχίζοντας την πορεία του προς νότο, συναντά τους παραποτάμους Μπιζάκο ή Ίναχο μεταξύ των ορεινών όγκων του Βάλτου και του Μακρυνόρους και κατόπιν το Μεγάλο ρέμα και το Ρύακα. Στο ύψος του Αγρινίου σχηματίζει ένα διπλό μαιανδρισμό και στρέφεται δυτικά προς την Αιτωλική λεκάνη. Από το σημείο αυτό, ακολουθεί πάλι νότια κατεύθυνση και εμπλουτίζεται με τα πλεονάζοντα νερά των λιμνών Οζερού, Λυσιμαχείας και Τριγωνίδας. Στη συνέχεια, ρέοντας μέσα από μια πλατιά πλέον κοίτη, στρέφεται δυτικά στην περιοχή του Νεοχωρίου και τελικά εκβάλλει στο Ιόνιο πέλαγος, νότια των Εχινάδων νήσων. Τα φράγματα που έχουν κατασκευαστεί στον Αχελώο είναι τα εξής: του Στράτου, των Κρεμαστών, του Καστρακίου, του Ταυρωπού, της Μεσοχώρας και της Συκιάς.

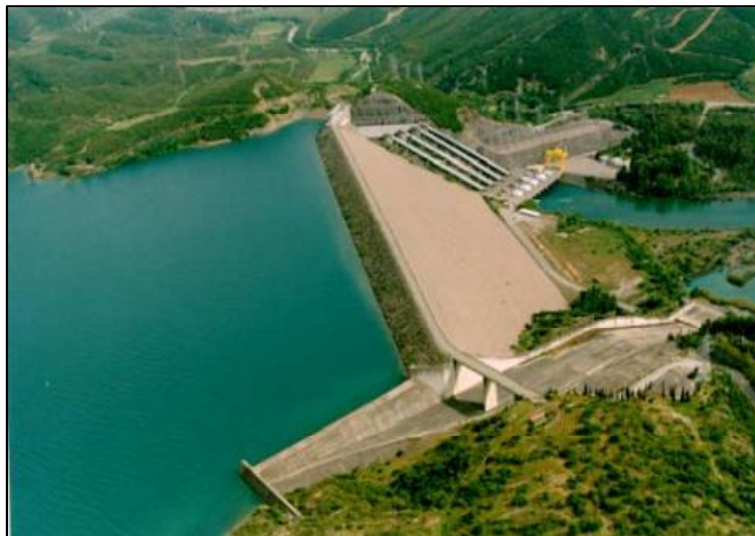
--	--	--

## 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ

Πίνακας 5. Πινακίδα τεχνικών πληροφοριών όλων των στοιχείων του ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

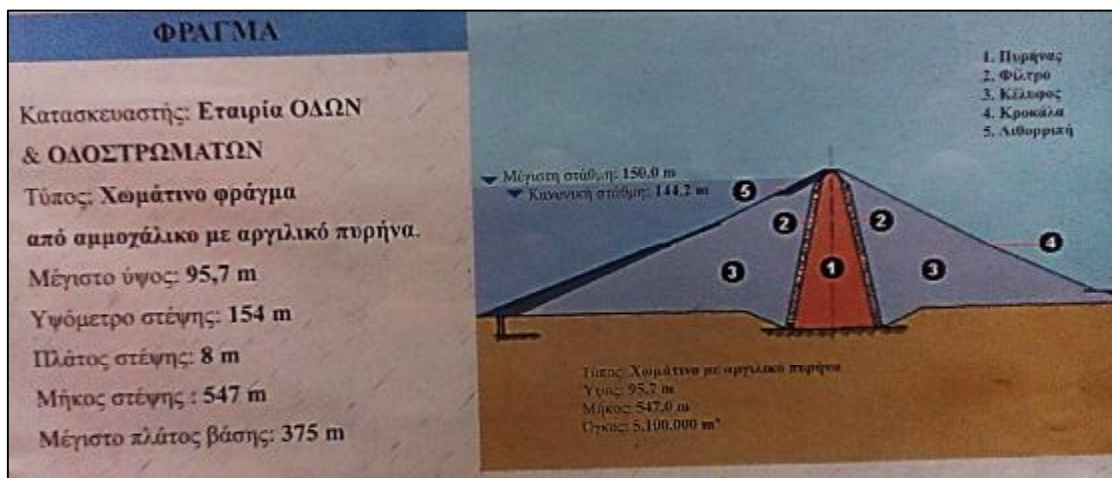
<b>ΦΡΑΓΜΑ</b>	
ΤΥΠΟΣ:	ΧΩΜΑΤΙΝΟ
ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΣ (m) :	97,5
ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΕΨΗΣ (m):	154
ΠΛΑΤΟΣ ΣΤΕΨΗΣ (m) :	8
ΜΗΚΟΣ ΣΤΕΨΗΣ (m) :	547
ΜΗΚΟΣ ΒΑΣΗΣ (m) :	375
<b>ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ</b>	
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (km <sup>2</sup> ):	548
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (km <sup>2</sup> ):	28
ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ (m <sup>3</sup> ):	785X10 <sup>6</sup>
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ (m) :	144,20
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ (m) :	142,00
ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΘΜΗ (m) :	2,20
<b>ΕΚΧΕΙΛΙΣΤΕΣ</b>	
ΑΡΙΘΜΟΣ/ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ:	1 ελεύθερης πτώσης (L =120m)
ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ (m <sup>3</sup> /sec):	3700
<b>ΥΔΡΟΛΗΨΙΣ</b>	
ΑΡΙΘΜΟΣ :	4
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (m):	5,26-4,22
ΜΗΚΟΣ (m) :	254,20 – 246,30 - 238,60 - 230,60
<b>ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ</b>	
ΑΡΙΘΜΟΣ	4
ΙΣΧΥΣ (MW) :	80
ΜΑΝΟΜΕΤΡΙΚΟ(m) :	75,7
ΤΥΠΟΣ :	FRANCIS
ΣΤΡΟΦΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ (ανά λεπτό) :	166,6
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ	1969
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ:	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ :	4
ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΑΣ (MW) :	80
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW) :	320
ΜΕΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (GWH) :	650
ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m <sup>3</sup> /kWh) :	6

## 4.2 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ



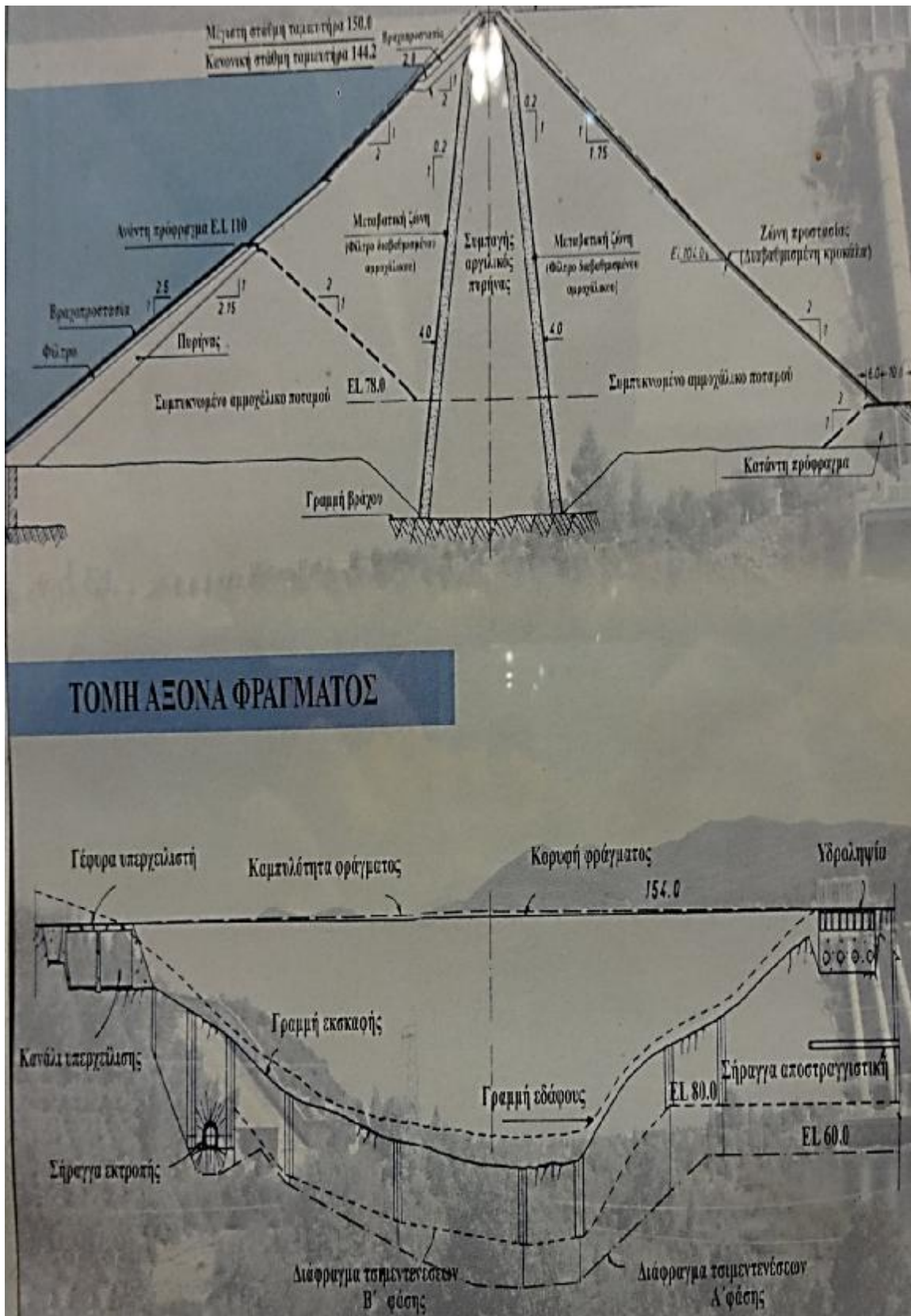
Εικόνα 94 Το φράγμα Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

Το υδροηλεκτρικό φράγμα Καστρακίου είναι το δεύτερο φράγμα του Αχελώου που δημιουργήθηκε, κατασκευάστηκε απέναντι από το χωριό Καστράκι της Αιτωλοακαρνανίας, λίγο έξω από την πόλη του Αγρινίου, σε απόσταση περίπου 35 χλμ. νότια των Κρεμαστών, όπου υπάρχει το πρώτο φράγμα του Αχελώου, κατασκευάστηκε το 1969. Το μέγιστο ύψος του φράγματος είναι 95,7 μέτρα, το μήκος στέψης του 547 μέτρα και ο συνολικός όγκος του είναι 5.100.000 m<sup>3</sup>. Είναι φτιαγμένο από αμμοχάλικο του ποταμού με κεντρικό αργιλικό πυρήνα για ανακοπή των διαρροών. Ο ταμιευτήρας που σχηματίστηκε είναι τρίλοβος, Με την κατασκευή του φράγματος δημιουργήθηκε η τεχνητή λίμνη του Καστρακίου. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός, ο οποίος λειτούργησε το 1969, είναι εγκατεστημένος στο αριστερό πρηνές κατόντη του φράγματος και έχει τέσσερις μονάδες συνολικής ισχύος 320 MW. (οι οποίες φαίνονται στην φωτογραφία μας στην κατάληξη των τεράστιων σωλήνων) που εξοικονομεί σημαντική ενέργεια από πετρέλαιο και την μόλυνση από αυτό του περιβάλλοντος.



Εικόνα 95. Χαρακτηριστικά Φράγματος ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

--	--	--



**ΤΟΜΗ ΑΞΟΝΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**

Εικόνα 96 Απεικόνιση τομής φράγματος [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]



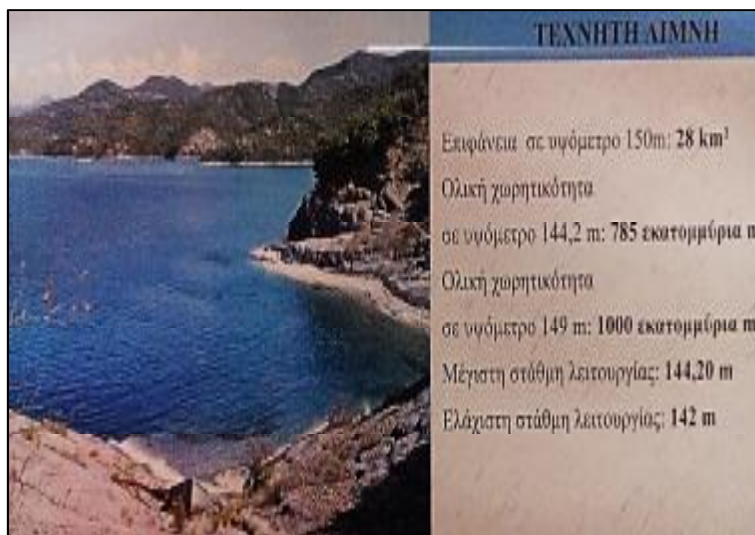
--	--	--

#### 4.2.1 ΛΙΜΝΗ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ

Η λίμνη Καστρακίου είναι τεχνητή λίμνη κοντά στα χωριά Καστράκι και Μπαμπαλιό της Αιτωλοακαρνανίας, πάνω στην κοίτη του ποταμού Αχελώου **στην περιοχή** συμβολής του με τον παραπόταμο Ύναχο. Η έκταση της επιφάνειας της λίμνης που έχει δημιουργηθεί είναι 28 km<sup>2</sup> και περιέχει 950.000.000 m<sup>3</sup> νερό σε μέγιστο υψόμετρο 149m και 785.000.000 m<sup>3</sup> για μέγιστη στάθμη λειτουργίας 144,20m. Η ελάχιστη στάθμη λειτουργίας είναι 142,00m. Τα νερά σκέπασαν σχεδόν όλο τον τόπο απ' τα χωριά Μαλατέικα και Μπαμπαλιό, οι κάτοικοι σχεδόν όλοι υποχρεώθηκαν σε αναγκαστική μετανάστευση, μικρό όμως τμήμα απ' αυτούς ανασυγκρότησε οικισμούς σε παραλίμνιες περιοχές. Η λίμνη του Καστρακίου είναι κι αυτή ολιγοτροφική και η πανίδα της είναι παρόμοια μ' εκείνη της λίμνης των Κρεμαστών.



Εικόνα 97. Τρεις λίμνες που απαρτίζουν το συγκρότημα Αχελώου. Χρήση τους σαν έργα πολλαπλού σκοπού.  
[πηγή: ΒΙΒΛΙΟ : ΑΧΕΛΩΟΣ του Νίκου Πέτρου]

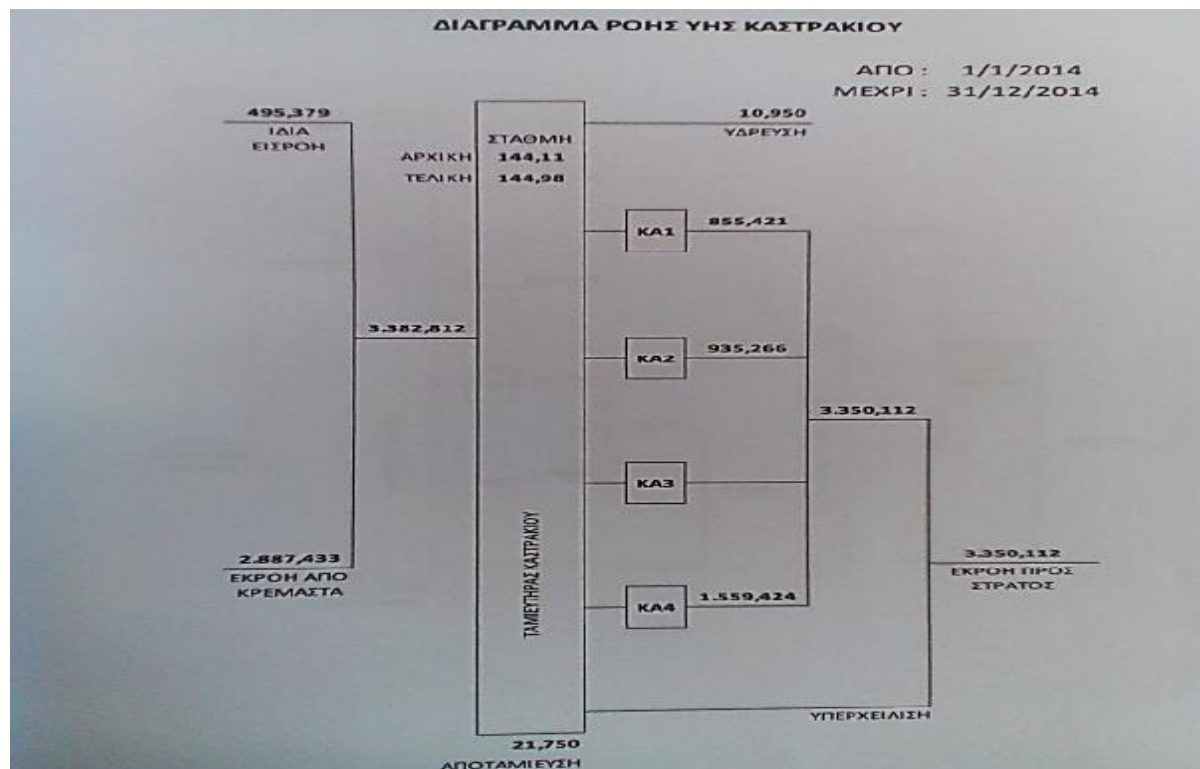


Εικόνα 98 Χαρακτηριστικά λίμνης Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.]

--	--	--

#### 4.2.2 ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ ΩΣ ΕΡΓΟ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΚΟΠΟΥ

Το φράγμα Καστρακίου λειτουργεί μερικώς ως Έργο Πολλαπλού Σκοπού, δηλαδή να εξυπηρετεί εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης γεωργικών εκτάσεων. Λειτουργεί κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για παροχή ύδρευσης στον δήμο Αγρινίου και των γύρω περιοχών. Τα νερά που απορρέουν από το φράγμα Καστρακίου καταλήγουν στο επόμενο *φράγμα του Στράτου* το οποίο εξυπηρετεί τις αρδευτικές ανάγκες τις περιοχής και ανθρώπινες δραστηριότητες.



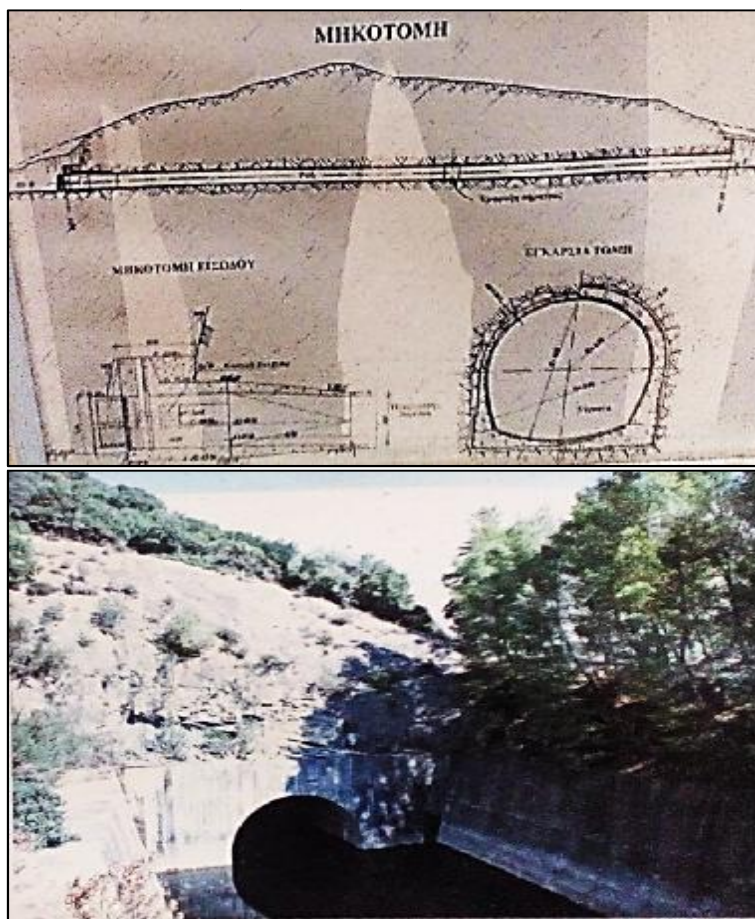
Εικόνα 99. Ανάλυση ροής ύδατος ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε την διαχείριση της ροής των υδάτων από το φράγμα Καστρακίου. Εισέρχονται **3.382,812 Mm<sup>3</sup>** ετησίως εκ των οποίων τα **3.350,112 Mm<sup>3</sup>** χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ τα **10,950 Mm<sup>3</sup>** χρησιμοποιούνται για παροχή ύδρευσης στον δήμο Αγρινίου και τις γύρω περιοχές.

--	--	--

### 4.3 ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

Κατά την διάρκεια κατασκευής του φράγματος διανοίχθηκε υπογείως μια σήραγγα εκτροπής ώστε να μην διακόπτεται η ροή του ποταμού. Το μήκος της είναι 393m ολικής παροχτευτικής ικανότητας 2900 m<sup>3</sup>/s πεταλοειδούς διατομής ύψους και πλάτους 8 m. Πλέον έχει τοποθετηθεί μόνιμη έμφραξη με πώμα από σκυρόδεμα.



Εικόνα 100. Σχέδιο Μηκοτομής σήραγγας εκτροπής, έξοδος [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

Πίνακας 6 Τεχνικά στοιχεία σήραγγας εκτροπής [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

<b>ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ</b>	
Κατασκευαστής	Εταιρία οδών & οδοστρωμάτων
Μήκος	393 m
Ολική παροχτευτική ικανότητα	2900 m <sup>3</sup> /sec
Σήραγγα	Πεταλοειδούς διατομής (ύψους κ πλάτους 8m
Πόρτα εξόδου	Χαλύβδινη με οδοντωτή τροχαλία διαστάσεων 8,41 x 6,31m
Μόνιμη έμφραξη	Με πώμα από σκυρόδεμα

--	--	--

#### 4.4 ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ

Η εισροή νερού στους αγωγούς προσαγωγής γίνεται από το σημείο υδροληψίας με τα παρακάτω κατασκευαστικά στοιχεία.

Πίνακας 7. Τεχνικά στοιχεία Υδροληψίας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

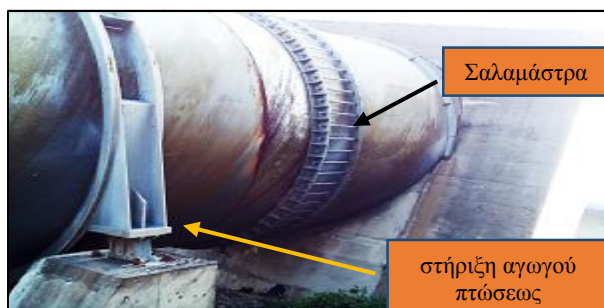
	ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ	
	Τύπος	Κάθετος
	Αριθμός θυρών	4 θύρες διαστάσεων 5.8 m x 5.0 m
	Έλεγχος ανοίγματος - κλεισίματος	Από αίθουσα ελέγχου και επιτόπια
	Προστασία θυρών	Σχάρες χαλύβδινες με κλίση 1/4
Τρόπος ανύψωσης	Τύπος βαρούλκου	

#### 4.5 ΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ



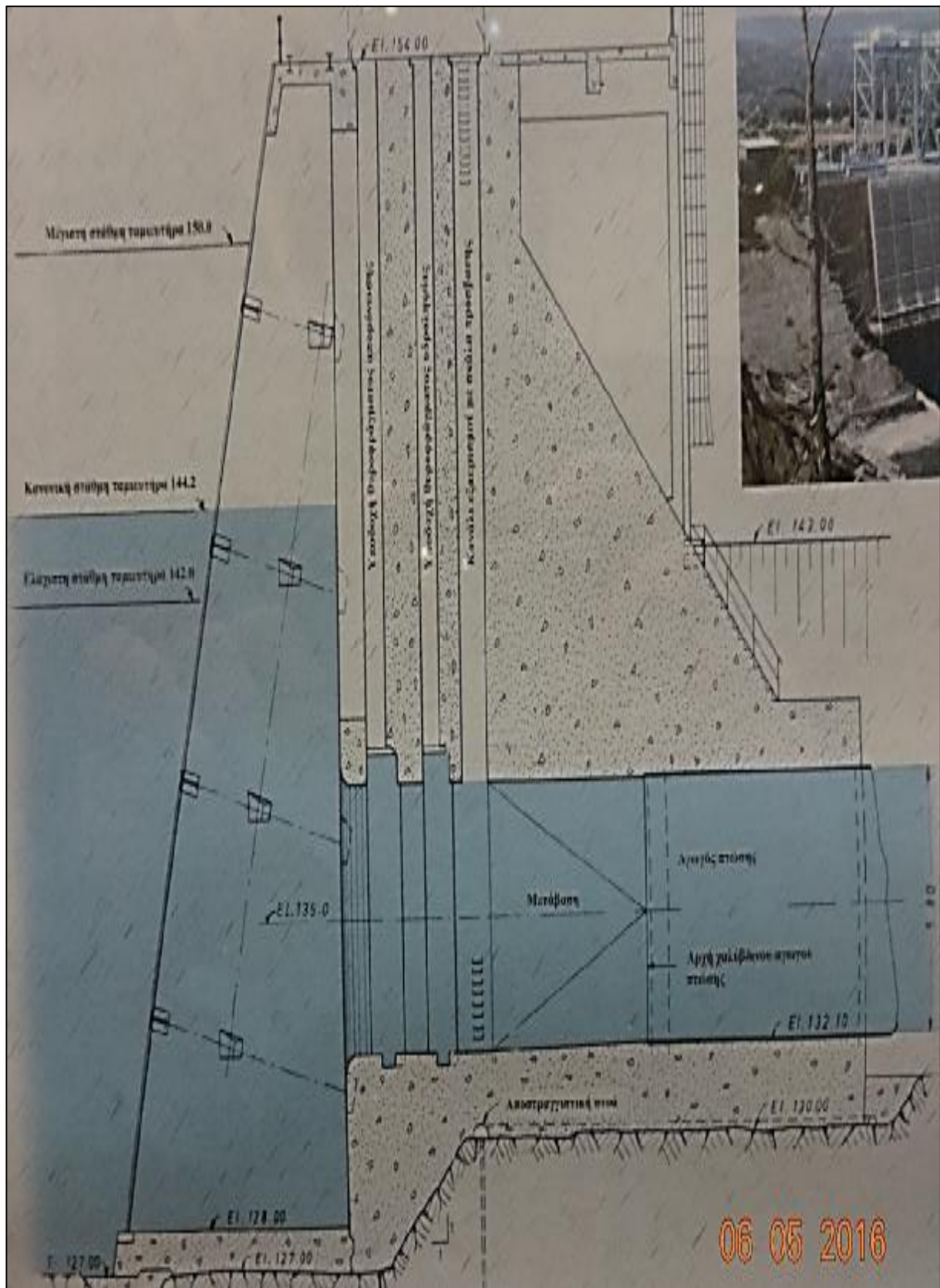
Εικόνα 101. Αγωγοί πτώσεις. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

προσαγωγής διαμέτρων 5,26-4,22 (m) και μήκους 1→254,20 - 2→246,80 - 3→238,60 - 4→230,60 , και μπορούν να παρέχουν 116 m<sup>3</sup>/s. Οι αγωγοί πτώσεις έχουν διαφορετικό μήκος και συνεπώς διαφορετική διάμετρο για να εξασφαλίζουν ίδια παροχή στην έξοδό του, δηλ., στην είσοδο του στροφείου.



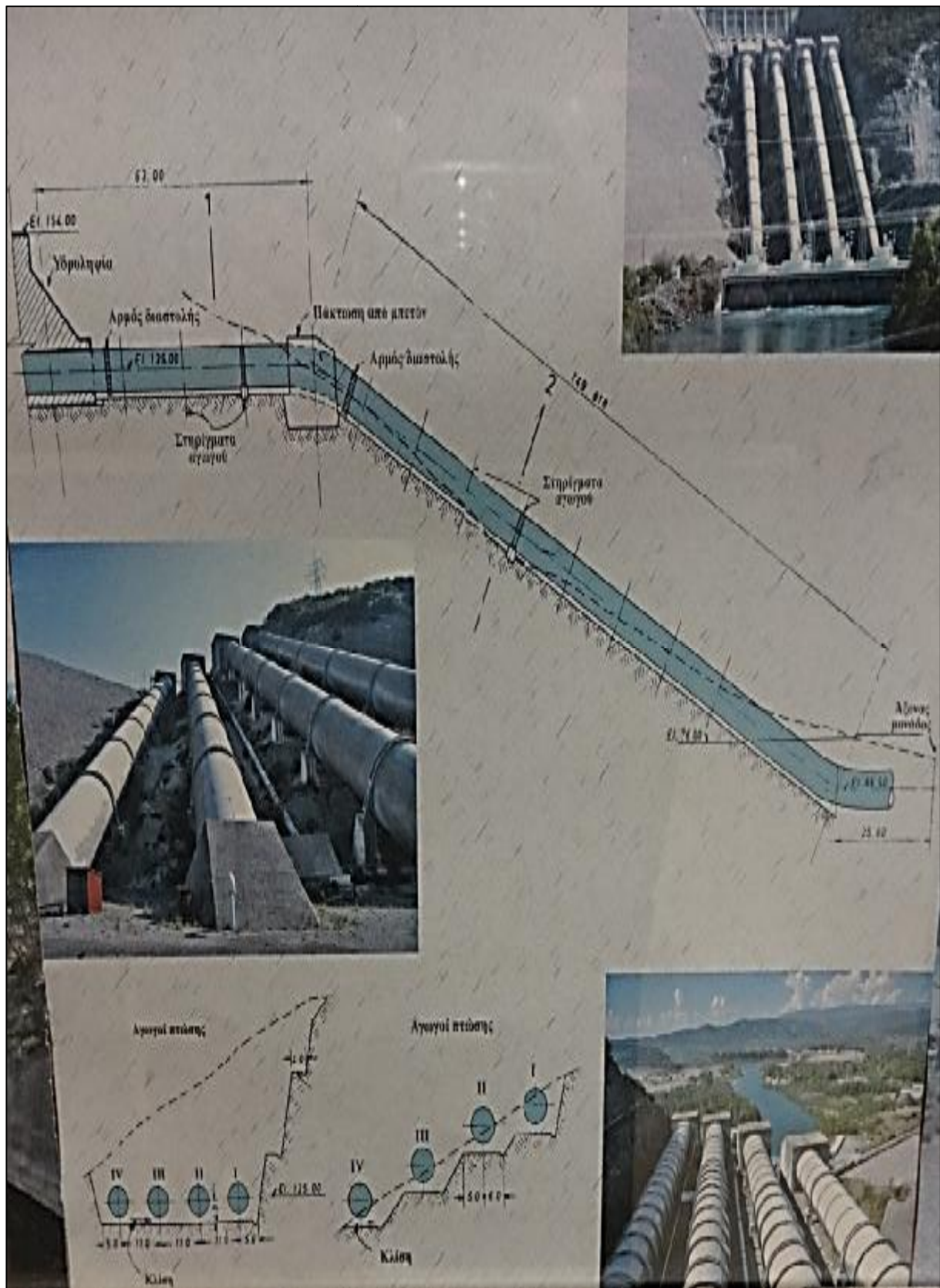
Εικόνα 102. Τρόπος στήριξης και σύνδεσης Αγωγών πτώσεως [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

--	--	--

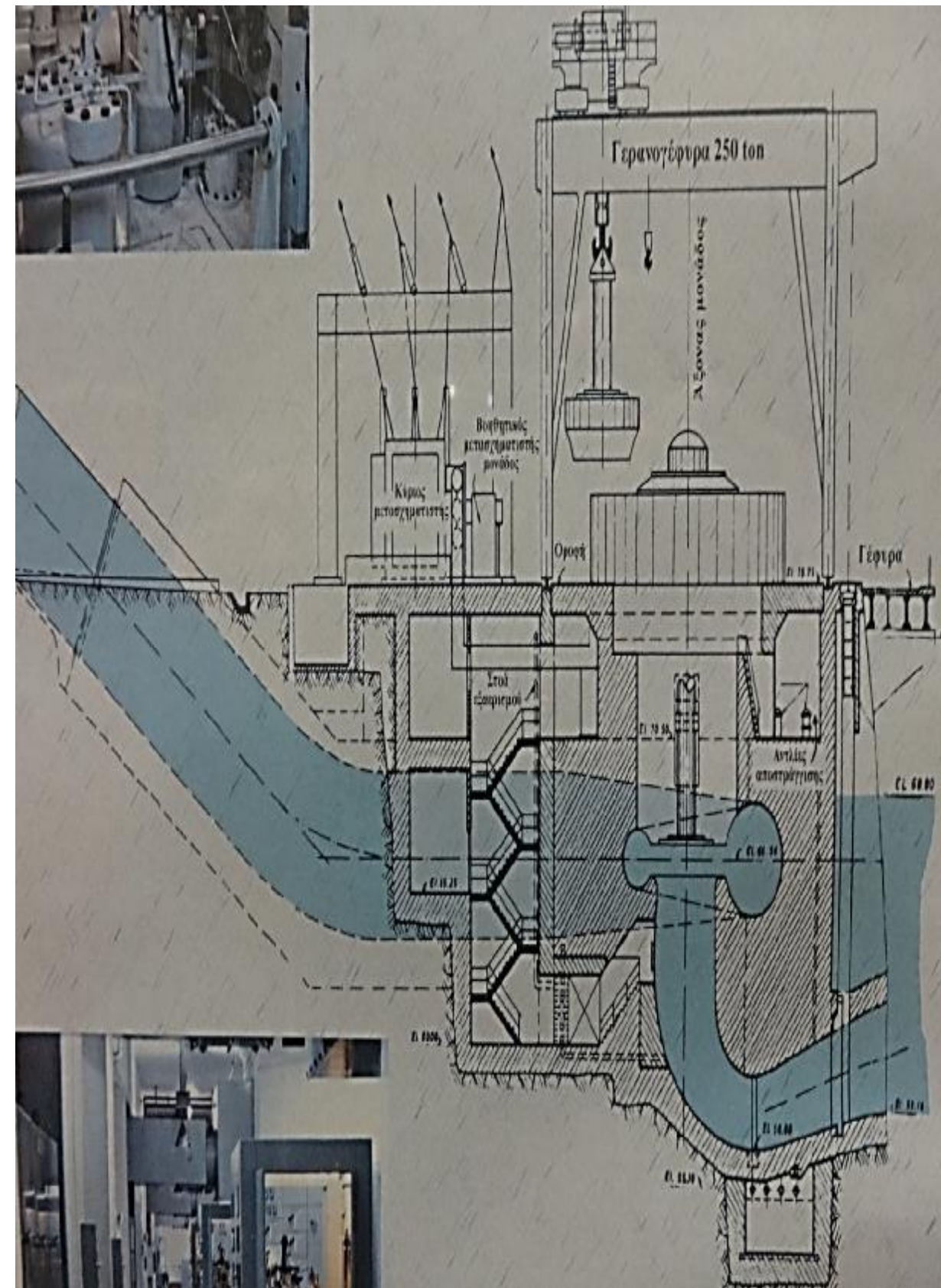


Εικόνα 103. Γεωμετρία αγωγού προσαγωγής στην σύνδεση του στο σημείο υδροληψίας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

--	--	--



Εικόνα 104. Γεωμετρία Αγωγών πτώσεως [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]



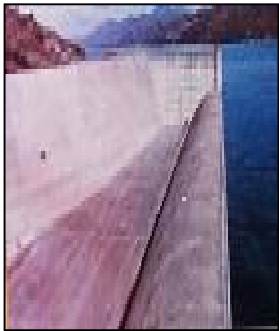

*Εικόνα 105. Διάταξη αγωγού προσαγωγής – υδροστρόβιλου Francis – γεννήτριας – μετασχηματιστή-γερανογέφυρα [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

--	--	--

## 4.6 ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ

Σε περίπτωση που η στάθμη του φράγματος υπερβεί μια ορισμένη τιμή, τότε το νερό εκτρέπεται προς το κανάλι διαφυγής. Έχει μήκος 120m και η παροχαρακτηριστικότητα του είναι 3700 m<sup>3</sup>/sec. Ο Υπερχειλιστής ήταν φυσικός. Τώρα πλέον έχουν τοποθετηθεί μεταλλικά θυροφράγματα για να ανέβει η στάθμη της λίμνης συν 2m, έτσι ώστε να βελτιωθεί η παροχαρακτηριστικότητα στην υδροληψία.

*Πίνακας 8. Τεχνικά στοιχεία Υπερχειλιστή [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

<b>ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ</b>			
Τύπος	Ανοικτός πλευρικού τύπου χωρίς θυροφράγματα		
Μήκος στέψης	120 m		
Υψόμετρο στέψης	144.2 m		
Εκφόρτιση υπερχειλιστή	3700 m <sup>3</sup> /sec		

## 4.7 ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑ

*Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά γερανογέφυρας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

<b>ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑ</b>		
<b>Τύπου:</b>	Εξωτερικού τύπου με μετακινούμενο φορέα πάνω σε ράγες	
<b>Ικανότητα Κύριας Ανύψωσης</b>	250 μετρικούς τόνους	
<b>Ικανότητα βοηθητικής Ανύψωσης</b>	25 μετρικούς τόνους	



--	--	--

## 4.8 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΣ FRANCIS



Εικόνα 106. Απεικόνιση Υδροστρόβιλου Francis.[πηγή: Ένεργο-24]

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Καστρακίου (ΥΗΣ) αποτελείται από 4 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υδροστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται για αυτή την μετατροπή είναι όμοιοι και τύπου Francis, εγκατεστημένης ισχύος 80 MW έκαστος.

Πίνακας 10. Στοιχεία στρόβιλου στον ΥΗΣ Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

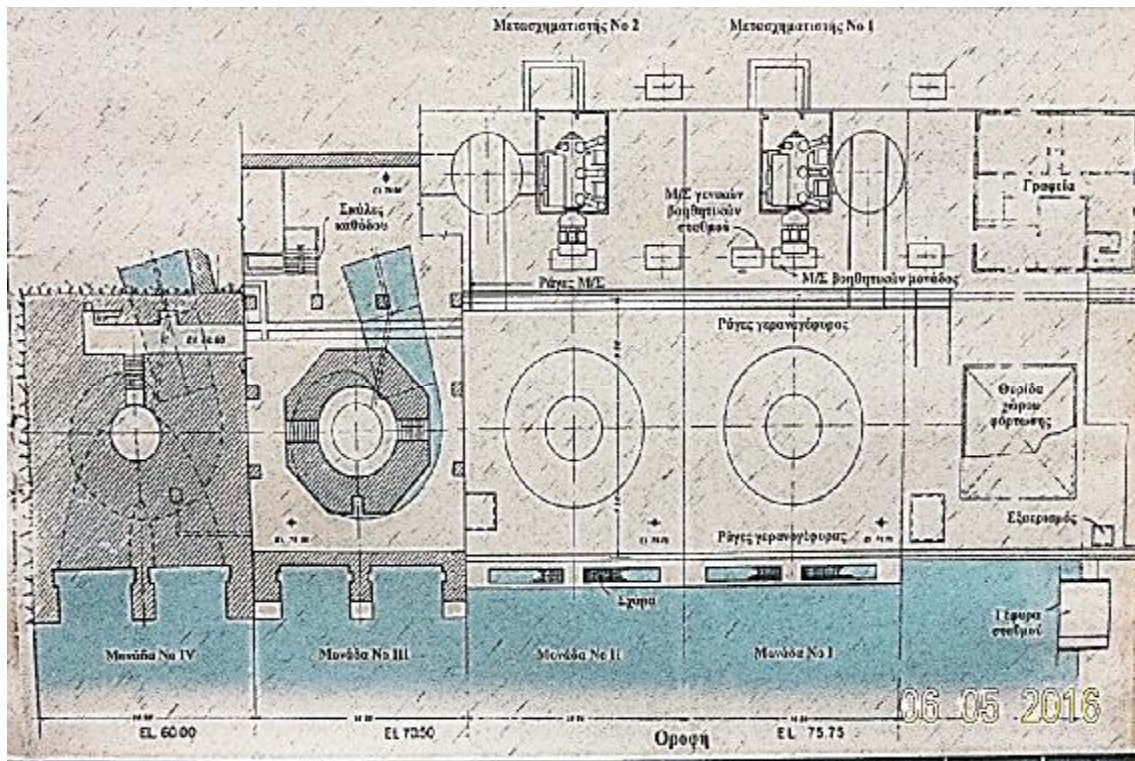
ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΙ FRANCIS	
Κατασκευαστής:	BALDWIN,LIMA,HAMILTON
Τύπος:	FRANCIS κατακόρυφου άξονα
Αριθμός:	4
Σχεδιασθέν καθαρό μανομετρικό:	74.5 m
Ικανότητα Σχεδιασθέν καθαρό μανομετρικό:	84 MW
Μέγιστο καθαρό μανομετρικό λειτουργίας:	75.7 m
Ελάχιστο καθαρό μανομετρικό λειτουργίας:	72.2 m
Μέγιστη παραγόμενη ισχύς:	80 MW
Μέγιστο ύψος πτώσεις στα 80 MW	72.4 m
Αριθμός στροφών:	166.6 RPM
Παροχή στη μέγιστη στάθμη λειτουργίας:	120 m <sup>3</sup> /s



Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε την κάτοψη της εγκατάστασης των 4 όμοιων υδροστρόβιλων Francis του ΥΗΣ Καστρακίου. Για λόγους ελαχιστοποίησης της σπηλαίωσης, διακρίνουμε τα 2 τμήματα αγωγού φυγής στην έξοδο του νερού από το στρόφειο, καθώς αυτό

--	--	--

κρίθηκε απαραίτητο κατά τη σχεδίαση βάσει διαθέσιμης διαφοράς ύψους μεταξύ στροφείου και κάτω στάθμης ταμειωτήρα (όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 2.4).



Εικόνα 107. Σχηματική αναπαράσταση κάτωμης τεσσάρων μονάδων ΥΗΣ Καστρακίου. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

--	--	--

## 4.9 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ



*Εικόνα 108. Μηχανισμός ρυθμιστή στροφών. Δεξαμενή αέρα και ελαίου υψηλής πίεσης [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

Μέσω του ρυθμιστή στροφών επιτυγχάνουμε σταθερές στροφές  $n=166,7\text{rpm}$  στον κοινό άξονα υδροστροβίλου – γεννήτριας.

#### 4.10 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

Πρόκειται για ρυθμιστή τάσης συνεχούς ελέγχου, ο οποίος ανταποκρίνεται στη μέση τάση των 3 φάσεων της γεννήτριας.

Αποτελεί εφαρμογή του στρεφόμενου ενισχυτή (amplidyne) τύπου HTD (Hitachi Tuning Dynamo) και καθιστά δυνατή τη συνεχή ρύθμιση της τάσης μέσα σε ευρεία περιοχή τιμών, με μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη απόκριση.



Εικόνα 109. Αυτόματος ρυθμιστής τάσης μονάδας. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]



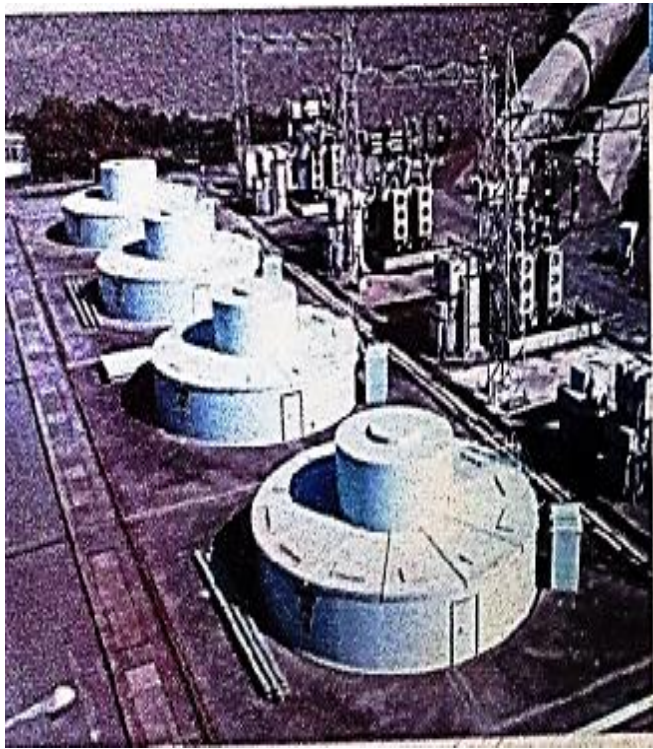
Εικόνα 110. Τεχνικά χαρακτηριστικά αυτόματου ρυθμιστή τάσης μονάδας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

--	--	--

## 4.11 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

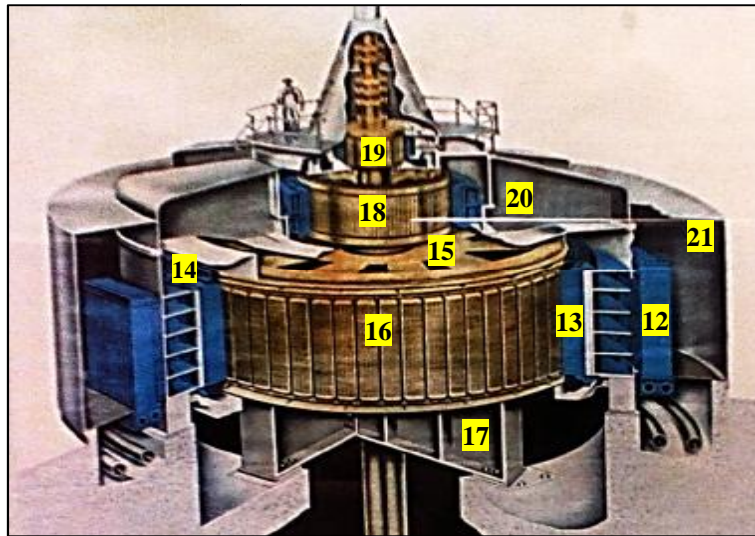
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά Σύγχρονης Γεννήτριας. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	
Κατασκευαστής:	HITACHI
Αριθμός :	4
Τύπος:	Σύγχρονες, κατακόρυφου άξονα, τύπου ομπρέλα
Αριθμός στροφών:	166,7 RPM
Αριθμός πόλων κάθε γεννήτριας:	36
Ισχύος:	77.390 KVA για $\Delta\theta=60^{\circ}\text{C}$ 89.000 KVA για $\Delta\theta=80^{\circ}\text{C}$
Συντελεστής ισχύος:	0,90
Συχνότητα:	50 Hz
Τάση μεταξύ φάσεων:	15.750 KV




Εικόνα 111. Άνω μέρος γεννήτριας ΥΗΣ Καστρακίου . [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

--	--	--




ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ			
12	Ψυγείο αέρα	17	Κέλυφος ωστικού οδηγού εδράνου
13	Πυρήνας στάτη	18	Κύρια διέγερση
14	Τύλιγμα στάτη	19	Βοηθητική διέγερση
15	Αράχνη δρομέα	20	Κάλυμμα γεννήτριας
16	Πόλοι ρότορα	21	Χώρος αέρα ψύξης

Εικόνα 112. Υπόμνημα Γεννήτριας [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

## 4.12 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά μετασχηματιστή ισχύος ΥΗΣ [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	
Αριθμός:	4
Τύπος:	3 φάσεων εξωτερικού τύπου
Κλάση:	FO <sub>A</sub>
Συνθήκες Λειτουργίας	
Τύλιγμα Υψηλής Τάσης	Γειωμένο τύπου Υ
Τύλιγμα Χαμηλής Τάσης	Αγείωτο τύπου Δ



## 4.13 ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ

Μετά το μετασχηματιστή και την ανύψωση τάσης από 15,5 kV σε 150 kV , το ρεύμα μεταφέρεται στον Υποσταθμό. Από εκεί θα μεταφερθεί στο ΚΥΤ (Κέντρο Υψηλής Τάσεως) στην περιοχή Ραϊννες για να διανεμηθεί, τελικά, μέσω του διασυνδεδεμένου δικτύου της ΔΕΗ και στις υπόλοιπες περιοχές τροφοδότησης.



Εικόνα 113. πορεία ρεύματος παραγωγής από τους μετασχηματιστές στον χώρο του ΥΗΣ στον ανυψωτή τάσης και στον υποσταθμό [πηγή: Voith Hydro, youtube.com/watch?v=pNx76qvT9EU]

--	--	--

#### 4.14 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

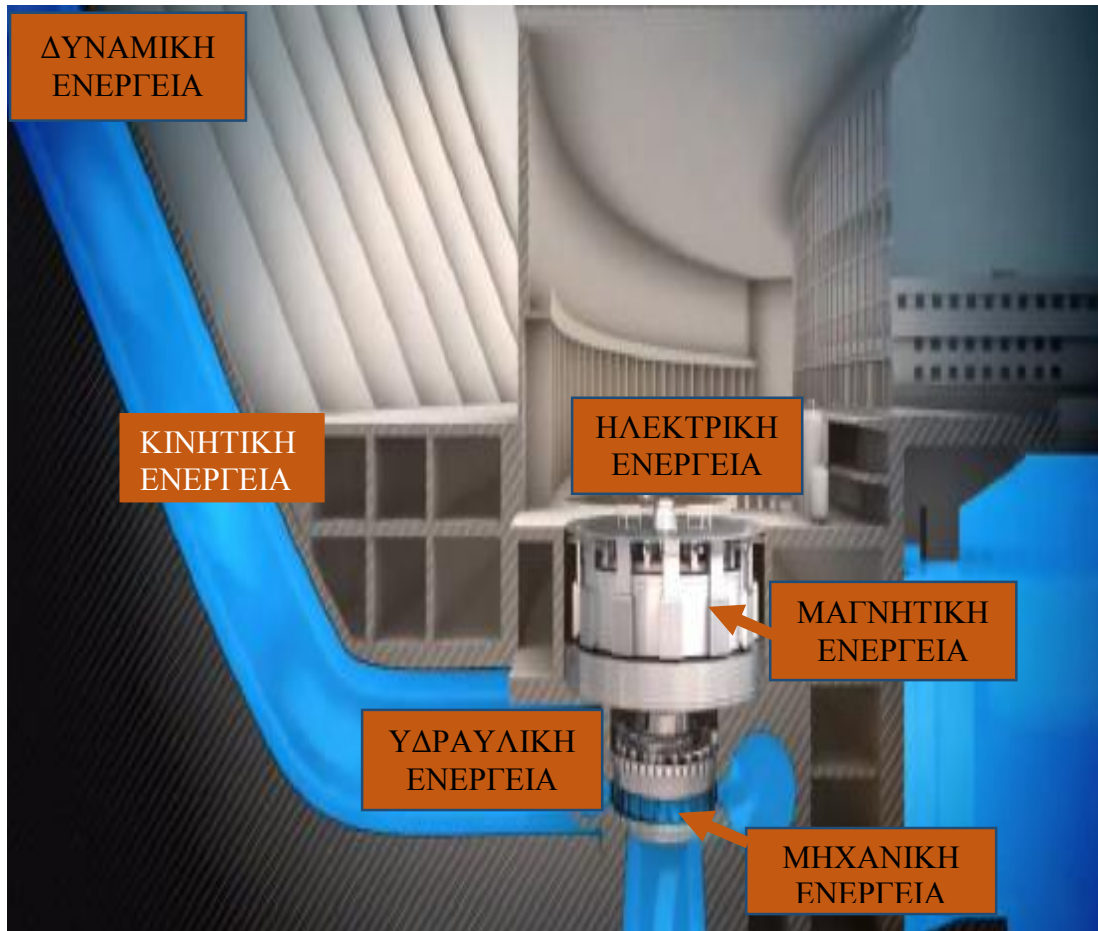
Οι πολλές εκκινήσεις και κρατήσεις των Μονάδων παραγωγής κατά τα τελευταία έτη σε συνδυασμό και με τη συμμετοχή τους στη Δευτεροβάθμια ρύθμιση του Συστήματος, έχουν σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της γήρανσης του Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Οι Μονάδες του ΥΗΣ Καστρακίου αλλά και Κρεμαστών, μετά από διάστημα πλέον των 4 δεκαετιών λειτουργίας υπό συνθήκες κάθε άλλο παρά ιδανικές, βρίσκονται σήμερα σε κατάσταση που συνεπάγεται κινδύνους εμφάνισης σοβαρών προβλημάτων

*Πίνακας 13. Πίνακας εργασιών συντήρησης [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

Εργασίες Συντήρησης Εγκαταστάσεων ΥΗΣ						
Εργασίες Μηχανολογικής Συντήρησης (ΜΣ)						
Κωδ.	Εγκατάσταση	Τύπος Συντήρησης				
		Εβδομαδιαία (ε)	Μηνιαία (μ)	Διμηνιαία (δμ)	Εξαμηνιαία (εξ)	Ετήσια (ετ)
1	Υδροληψία	*			*	*
2	Αγωγοί Πτώσης και Φυγής	*				*
3	Στρόβιλος	*		*	*	*
4	Γεννήτρια				*	*
5	Ρυθμιστής Στροφών			*	*	*
6	Σύστημα Ψύξης	*			*	*
7	Γερανοέφιρα				*	*
8	Αεροσυμπιεστές Γ.Χ.	*			*	
9	Σύστημα Αποστράγγισης και Εκκένωσης			*		*
10	Σύστημα Πυρόσβεσης				*	*
11	Σύστημα Παροχής Ψυχρού και Θερμού Νερού	*		*		*
12	Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος	*				*
13	Εκχειλιστής		*			*

Εκτός προγραμματισμένης συντήρησης πραγματοποιείται τακτικός οπτικοακουστικός έλεγχος από τους εργαζόμενους του Σταθμού για τυχόν βλάβες που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης ή αυξημένης προσοχής στο επικείμενο χρονικό διάστημα μέχρι και την επόμενη προγραμματισμένη συντήρηση. Υπάρχουν 3 κύριοι κλάδοι εργασιών συντήρησης για τις εγκαταστάσεις του Υδροηλεκτρικού Σταθμού: α) Η μηχανολογική συντήρηση (που μας ενδιαφέρει και περισσότερο ως μηχανολόγους μηχανικούς), β) η ηλεκτρολογική συντήρηση και γ) η ηλεκτρονική συντήρηση.

## 5 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



Εικόνα 114. Πορεία εναλλαγής μορφών ενέργειας σε έναν Υδροηλεκτρικό σταθμό. [πηγή: Ένεργο-24]

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η μετατροπή της ενέργειας σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Αρχικά, υφίσταται η Δυναμική ενέργεια ( $DE = r gH$ ) στο ύψος της εισόδου του νερού στον αγωγό πτώσης, όπου μετατρέπεται σε Κινητική ( $KE = u^2 / 2g$ ) μέσα στον αγωγό και υπεισέρχεται στο στροφέιο όπου ορίζεται ως Υδραυλική ενέργεια ( $UE = DE \times Q = r gH Q$ ). Μέσω του σπειροειδούς θαλάμου προσπίπτει στον δρομέα, θέτοντάς τον σε περιστροφή και παράγοντας έτσι Μηχανική ενέργεια ( $ME = Mw = r gH Q h_{turbine}$ ), η οποία μέσω του κοινού άξονα μεταδίδεται στην γεννήτρια όπου και παράγεται Ηλεκτρική ενέργεια ( $HE = VI \cos \phi = ME \eta_{generator}$ ) υποβοηθούμενη από τη Μαγνητική ενέργεια του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

### 5.1 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Σε ένα Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ) η ενέργεια του νερού ανά μονάδα μάζας του είναι ουσιαστικά η δυναμική του ενέργεια λόγω θέσης (ύψους) και ισούται με την επονομαζόμενη **διαθέσιμη υδραυλική πτώση** που ορίζεται:

$$H = Z_E - Z_A \quad (5.1)$$



--	--	--

όπου:

$Z_E$  είναι η στάθμη της επιφάνειας του νερού στον ταμιευτήρα ή στη δεξαμενή φόρτισης όταν υπάρχει και

$Z_A$  είναι η στάθμη του νερού κατόπιν του ΥΗΣ, όταν η παροχή οδηγείται στη φυσική κοίτη.

Λόγω της μεγάλης επιφάνειας του ταμιευτήρα ή της δεξαμενής φόρτισης, η κινητική ενέργεια του νερού εκεί θεωρείται αμελητέα. Η υδραυλική ισχύς που διατίθεται προς μετατροπή σε μηχανική ισχύ ισούται με:

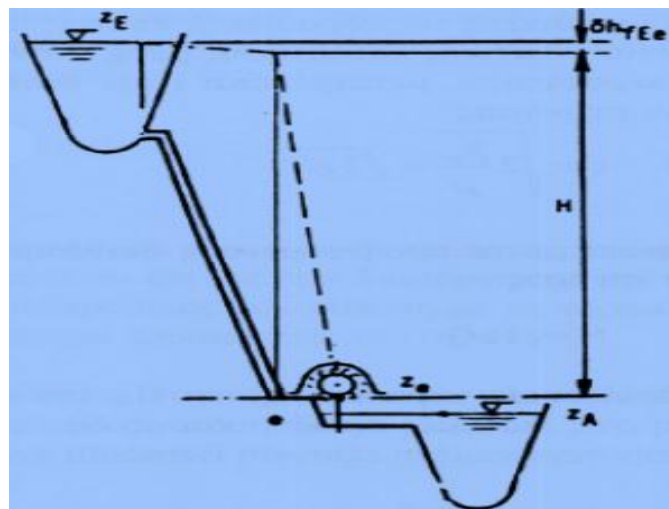
$$N_h = \rho \times g \times Q \times h = g \times Q \times h \quad (5.2)$$

Η μηχανική ισχύς που ανακτάται από τον υδροστρόβιλο είναι μικρότερη της  $N_h$  κατά τις απώλειες της ροής στο σύστημα προσαγωγής και τις απώλειες στον ίδιο τον υδροστρόβιλο. Οι υδραυλικές απώλειες  $dh_{fEe}$  στο σύστημα προσαγωγής (σήραγγα, αγωγός προσαγωγής) δίνονται ως

$$dh_{fEe} = k \times Q^2 \quad (5.3)$$

Στη σχέση (3) ο δείκτης  $e$  αναφέρεται στη διατομή εισόδου του υδροστροβίλου. Επομένως η διαθέσιμη υδραυλική πτώση ή καθαρό ύψος ενέργειας  $H$  δηλ. η ενέργεια της οποίας η μετατροπή σε μηχανική, ζητείται από τον υδροστρόβιλο θα είναι ίση με:

$$H = h - dh_{fEe} \hat{=} H - k \times Q^2 \hat{=} H = z_E - z_A - k \times Q^2 \quad (5.4)$$



Εικόνα 115. Τοπική διάταξη μελέτης υδραυλικής ενέργειας. [πηγή: Σημειώσεις Ρευστοδυναμικών Μηχανών ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας]

## 5.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ηλεκτρική ενέργεια  $N_e$  που παράγεται από τον υδροστρόβιλο θα είναι μικρότερη της  $N$  κατά τις απώλειες της γεννήτριας και του μετασχηματιστή, που εκφράζονται μέσω των αντίστοιχων βαθμών απόδοσης  $n_G$  και  $n_{Tr}$ :

$$N_e = n_G \times n_{Tr} \times N_h = n_G \times n_{Tr} \times (\rho \times g \times H \times Q)$$

Η τελική ηλεκτρική ενέργεια που τελικά θα διατεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο θα είναι μικρότερη της  $N_e$  κατά το ποσό της ενέργειας που ιδιοκαταναλώνεται από τον ίδιο τον ΥΗΣ (φωτισμός, αυτοματισμοί κλπ).

--	--	--

Όπου:

$h = \frac{N}{N_h} \text{ με } N = M \cdot \Omega$ . Η πραγματική μηχανική ισχύς  $N$  που αποδίδεται από το υδροστροβίλο

είναι μικρότερη από την υδραυλική ισχύ  $N_h$  κατά τις συνολικές απώλειες του υδροστροβίλου, οι οποίες εκφράζονται με το βαθμό απόδοσης  $\eta$

$M$ : η κινητήρια ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα του υδροστροβίλου

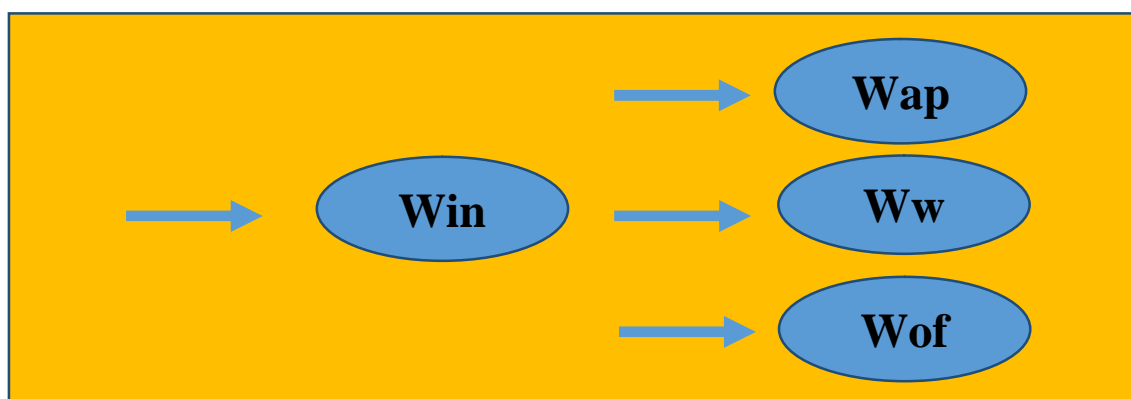
$\Omega$ : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου

## 5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 5.3.1 Υδρολογικά δεδομένα ΥΗΣ Καστρακίου

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον ΥΗΣ Καστρακίου διαφέρει σημαντικά από την παραγωγική διαδικασία ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού τύπου ΑΠΕ, (πχ. ΥΗΣ Γλαύκου), διότι εδώ υπάρχει ταμιευτήρας. Το οποίο σημαίνει ότι είναι διαθέσιμος ανά πάσα στιγμή ο απαιτούμενος όγκος νερού για την παραγωγή της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh (μεγαβατώρες).

Αρχικά καθορίζεται ο διαθέσιμος όγκος νερού ( $W_{ap}$ ) που απαιτείται για την παραγωγή συγκεκριμένου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας που καθορίζεται από το δίκτυο. Ο διαθέσιμος όγκος νερού ( $W_{ap}$ ) για παραγωγή υπολογίζεται σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 116. Διάγραμμα κατανομής όγκου νερού εισροής

$W_b$ : τον περιεχόμενο όγκο νερού στον ταμιευτήρα στην αρχή της περιόδου

$W_e$ : τον περιεχόμενο όγκο νερού στον ταμιευτήρα στο τέλος της περιόδου

$W_{in}$ : τον όγκο του νερού που εισέρρευσε στον ταμιευτήρα (στο μέγεθος αυτό θα θεωρήσουμε ότι συμπεριλαμβάνονται όλες οι εισροές – εκροές, στις οποίες δεν γίνεται ειδική αναφορά στην παρούσα εξέταση, όπως διαρροές φράγματος, εξάτμιση κτλ.)

$W_{ap}$ : τον όγκο του νερού που χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή

$W_{rp}$ : τον όγκο του νερού που χρησιμοποιήθηκε για αντιστάθμιση άεργης ισχύος (Μονάδες σε λειτουργία σαν κινητήρες)

$W_{of}$ : τον όγκο του νερού που χάθηκε από υπερχειλίση

$W_{st}$ : τον όγκο του νερού που αποταμιεύτηκε στον ταμιευτήρα

$W_w$ : τον όγκο του νερού που χρησιμοποιήθηκε για ύδρευση των γύρω περιοχών.

$W_{out}$ : ο συνολικός όγκος νερού που εξέρρευσε από των ταμιευτήρα.

--	--	--

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει η σχέση:

$$W_{st} = W_{in} - (W_{ap} + W_{rp} + W_{of}) \leftrightarrow [Αποταμίευση] = [Εισροή] - [Εκροή] \quad (5.5)$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε την εισροή:

$$W_{in} = W_{st} + (W_{ap} + W_{rp} + W_{of}) \quad (5.6)$$

Η αποταμίευση υπολογίζεται –κατά κανόνα- με βάση την αρχική και τελική στάθμη του ταμιευτήρα, όταν δίνεται (από πίνακες) το περιεχόμενο του ταμιευτήρα για κάθε τιμή της στάθμης:

$$W_{st} = W_e - W_b \leftrightarrow [Αποταμίευση] = [Τελικό περιεχόμενο] - [Αρχικό περιεχόμενο] \quad (5.7)$$

Ο όγκος νερού που εξέρρευσε από τον ταμιευτήρα υπολογίζεται ως:

$$W_{out} = W_{ap} + W_{rp} + W_{of} + W_w \quad (5.8)$$

Όταν ο όρος αποταμίευσης  $W_{st}$  προκύπτει αρνητικός σημαίνει ότι το νερό που εξέρρευσε για παραγωγή ήταν περισσότερο από αυτό που εισέρρευσε στον ταμιευτήρα.

Ø Ο συντελεστής *χρησιμοποίησης νερού* ορίζεται από τη σχέση:

$$K_w = \frac{W_{ap}}{W_{in}} \times 100[\%] \quad (5.9)$$

και μας δίνει το ποσοστό (%) του εισρεύσαντος νερού στον ταμιευτήρα ( $W_{in}$ ), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή ( $W_{ap}$ ).

Επομένως:

- $K_w < 100$  % σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή λιγότερο
- $K_w > 100$  % περισσότερο νερό από αυτό που εισέρρευσε στον ταμιευτήρα.

### 5.3.2 Υδρολογικά δεδομένα ΥΗΣ Καστρακίου για το έτος 2012

*Πίνακας 14. Υδρολογικά δεδομένα ΥΗΣ Καστρακίου [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]*

ΜΗΝΑΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m) ΩΡΑ 00.00	ΤΕΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m) ΩΡΑ 24.00	ΣΤΑΘΜΗ ΑΓΩΓΟΥ ΦΥΓΗΣ (m)	ΜΕΣΟ ΥΨΟΣ ΥΔΑΤΟΠΤΩΣΗΣ (m)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΙΣΡΟΗ ΝΕΡΟΥ (m <sup>3</sup> )	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΡΟΗ ΝΕΡΟΥ (m <sup>3</sup> )	ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (m <sup>3</sup> )
ΙΑΝ	143,62	143,62	68	75,62	7.865.145	7.911.596	7.881.596
ΦΕΒ	143,64	143,64	68	75,64	8.214.900	8.297.658	8.267.658
ΜΑΡ	143,54	143,57	68	75,56	3.185.265	2.556.535	2.526.535
ΑΠΡ	144,51	144,52	68	76,52	2.651.732	2.326.732	2.296.732
ΜΑΪ	144,74	144,75	68	76,75	4.157.295	3.931.489	3.901.489
ΙΟΥΝ	144,75	144,75	68	76,75	8.941.579	8.924.912	8.894.912
ΙΟΥΛ	145,17	145,17	68	77,17	11.924.855	12.126.468	12.096.468
ΑΥΓ	144,76	144,77	68	76,77	11.750.323	11.597.098	11.567.098
ΣΕΠ	144,87	144,86	68	76,87	7.042.409	7.182.052	7.152.052
ΟΚΤ	144,88	144,89	68	76,89	5.045.451	4.763.193	4.733.193
ΝΟΕ	144,81	144,81	68	76,81	11.693.331	11.651.331	11.621.331
ΔΕΚ	144,89	144,89	68	76,89	18.364.884	18.281.013	18.251.013

--	--	--

Παρατηρούμε ότι η εισροή στον ταμιευτήρα κατά τους θερινούς μήνες είναι αυξημένη. Αυτό γίνεται επειδή ο ΥΗΣ Καστρακίου έπεται του ΥΗΣ Κρεμαστών και η εισερχόμενη ποσότητα νερού προσαυξάνεται λόγω λειτουργίας του δεύτερου. Να σημειωθεί ότι τα υδρολογικά δεδομένα του ΥΗΣ Κρεμαστών επηρεάζονται άμεσα από τις φυσικές παροχές (λώσιμο χιονιού, πηγές) και άρα παρουσιάζουν πτώση της εισερχόμενης ροής τους θερινούς μήνες.

**Πίνακας 15. (συνέχεια πίνακα 2) [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε]**

ΜΗΝΑΣ	ΝΕΡΟ ΓΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗ (m <sup>3</sup> )	ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟ ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m <sup>3</sup> ) ΩΡΑ 00.00	ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟ ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΟ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m <sup>3</sup> ) ΩΡΑ 24.00	ΑΠΟΤΑΜΙΕΥΣΗ ΝΕΡΟΥ (m <sup>3</sup> )
ΙΑΝ	30.000	37.979.677	37.933.226	-46.451
ΦΕΒ	30.000	38.457.241	38.374.483	-82.758
ΜΑΡ	30.000	36.045.141	36.673.871	628.730
ΑΠΡ	30.000	59.650.000	59.975.000	325.000
ΜΑΪ	30.000	65.588.710	65.814.516	225.806
ΙΟΥΝ	30.000	65.858.333	65.875.000	16.667
ΙΟΥΛ	30.000	76.507.419	76.305.806	-201.613
ΑΥΓ	30.000	66.008.065	66.161.290	153.225
ΣΕΠ	30.000	68.700.333	68.560.690	-139.643
ΟΚΤ	30.000	68.983.871	69.266.129	282.258
ΝΟΕ	30.000	67.300.000	67.342.000	42.000
ΔΕΚ	30.000	69.172.258	69.256.129	83.871

Θεωρητικά γνωρίζουμε ότι:

- η μέγιστη ενέργεια  $E_{net,max}$  που μπορεί να παραχθεί από την κάθε Μονάδα, λειτουργώντας με δυναμικότητα  $P_{max} = 80 \text{ MW}$  επί  $t_{max} = 24 \text{ h}$  είναι ίση με 1920 MWh
- η μέγιστη παροχετευτική ικανότητα του αγωγού προσαγωγής είναι  $Q_{max} = 116 \text{ m}^3/\text{sec}$  και
- η ειδική κατανάλωση νερού  $l = 5,22 \text{ m}^3 / \text{KWh}$
- η υδραυλική ισχύς που υπεισέρχεται στο στροφέιο  $P_{h,max} = 85,89 \text{ MW}$
- ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης Μονάδας  $h_{th,max} = 0,93 = 93\%$

Το τυπολόγιο που θα χρησιμοποιήσουμε για τους υπολογισμούς μας είναι το ακόλουθο:

$$H = \text{aver.} (\text{Άρχ. Στάθμη Ταμιευτήρα} - \text{Τελ. Στάθμη Ταμιευτήρα}) - \text{Στάθμη Αγωγού Φυγής} [m]$$

$$Q = \frac{W_{ap}}{(t \times 3600)} [m^3 / sec] \quad (5.10)$$

$$l = \frac{W_{ap}}{(E \times 1000)} [m^3 / KWh] \quad (5.11)$$

$$P_e = \frac{E}{t} [MW] \quad (5.12)$$

$$P_h = r \times g \times Q \times H [MW] \quad (5.13)$$

$$h_p = \frac{P_e}{P_h} [\%] \quad (5.14)$$

$$F \text{ ORTIO} = \frac{Q}{Q_{max}} [\%] \quad (5.15)$$


--	--	--

**Σημαντικές παράμετροι λειτουργίας που θα λαμβάνονται υπόψιν για την ρύθμιση της φόρτισης των Υδροστροβίλων για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας**

Ο ΥΗΣ Καστρακίου διαθέτει 4 Μονάδες ισχύος 80 MW έκαστος και συνολικής εγκατεστημένης 320 MW.

**Μονάδες Νο1 & Νο2** : Λόγω παλαιότητας και συχνής εμφανίσεως κάποιων συγκεκριμένων βλαβών σύμφωνα με στοιχεία ετών του Σταθμού, όπως η θραύση πείρων ασφαλείας στο μηχανισμό κινητών περυγίων των Μονάδων και οι έντονες ταλαντώσεις αυτών σε χαμηλά φορτία λειτουργίας, θα πρέπει να μπαίνουν στο Δίκτυο λειτουργώντας σε υψηλές τιμές φορτίου (περίπου από 70 έως 85 MW) και για λιγότερες ώρες. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση σε ενέργεια και δεν επαρκεί η λειτουργία των Μονάδων Νο3 & Νο4, οι οποίες λειτουργούν πάντα σε προτεραιότητα. Επιπλέον, ο χρόνος λειτουργίας τους στο Δίκτυο εξαρτάται από το διάστημα που έχει μεσολαβήσει από την τελευταία προγραμματισμένη ή έκτακτη συντήρηση. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η Μονάδα Νο2 θα προτιμηθεί έναντι της Νο1 όσον αφορά τις συνθήκες φόρτισης και τις ώρες λειτουργίας διότι πρόσφατα έχει περάσει από γενική (προγραμματισμένη) συντήρηση.

**Μονάδες Νο3 & Νο4** : Πρόκειται για τις Μονάδες που μπαίνουν πρώτες σε λειτουργία και φορτίζονται περισσότερες ώρες αλλά με μέσες τιμές φορτίου (περίπου από 15 έως 70 MW). Δεν παρουσιάζουν έντονες ταλαντώσεις και συχνά προβλήματα θραύσης των πείρων ασφαλείας στο μηχανισμό κινητών περυγίων σε σχέση με τις Μονάδες Νο1 & Νο2. Τις επιλέγουμε ως τις βασικές Μονάδες παραγωγής στο Δίκτυο, διότι έχουν περάσει από τις απαιτούμενες συντηρήσεις σε πρόσφατο χρόνο και λειτουργούν σε πολύ καλό βαθμό.

**5.3.3 Υπολογισμός στοιχείων λειτουργίας Μονάδων ΥΗΣ για την εξυπηρέτηση των απαιτούμενων ενεργειακών αναγκών του δικτύου**

*Πίνακας 16. Στοιχεία 4 μονάδων σχετικά με παραγόμενη ενέργεια και κατανάλωση νερού. [πηγή: ΔΕΗ Α.Ε.]*

ΜΗΝΑΣ	ΜΟΝΑΔΑ	E <sub>net</sub>	W <sub>ap</sub>	t	ΜΗΝΑΣ	E <sub>net</sub>	W <sub>ap</sub>	t
		MWh	m <sup>3</sup>	h		MWh	m <sup>3</sup>	h
ΙΑΝ	1	2.205	11.660.160	28,40	ΙΟΥΝ	4.400	22.973.040	57,45
	2	5.380	28.405.410	69,25		4.935	25.733.220	62,55
	3	12.335	78.490.950	384,30		28.285	151.291.410	448,30
	4	19.380	125.772.960	649,10		32.795	174.992.850	516,00
ΦΕΒ	1	1.905	10.094.340	25,10	ΑΥΓ	6.190	32.517.870	80,50
	2	8.925	47.102.730	115,25		5.255	27.526.500	67,55
	3	12.495	78.688.830	374,15		25.590	139.481.370	431,35
	4	16.330	103.876.170	508,20		29.195	159.054.300	485,00
ΜΑΡ	1	1.390	7.338.630	18,05	ΣΕΠ	1.515	7.916.940	19,00
	2	785	4.145.880	10,10		3.350	17.569.260	43,35
	3	4.935	29.562.120	123,30		13.585	74.158.170	234,15
	4	6.335	37.275.960	147,00		21.175	114.917.190	351,25
ΑΠΡ	1	0	0	0,00	ΟΚΤ	0	0	0,00
	2	1.620	8.513.310	21,10		1.790	9.373.710	23,00
	3	5.630	33.696.660	151,40		11.080	61.508.160	207,40
	4	4.404	26.691.990	122,25		13.605	75.847.110	263,05
ΜΑΪ	1	410	2.156.880	5,20	ΝΟΕ	6.470	33.715.290	83,45
	2	425	2.225.220	5,30		13.150	68.468.340	185,45
	3	7.225	42.258.540	176,30		20.790	113.659.770	363,50
	4	13.275	74.305.530	259,25		24.045	132.796.530	447,45
ΙΟΥΝ	1	1.645	8.647.530	21,55	ΔΕΚ	22.780	119.354.130	307,10
	2	2.580	13.466.520	33,00		27.755	144.240.090	356,55
	3	14.790	82.423.980	282,05		27.950	152.507.190	492,40
	4	29.065	162.309.330	558,20		27.250	149.679.990	499,40

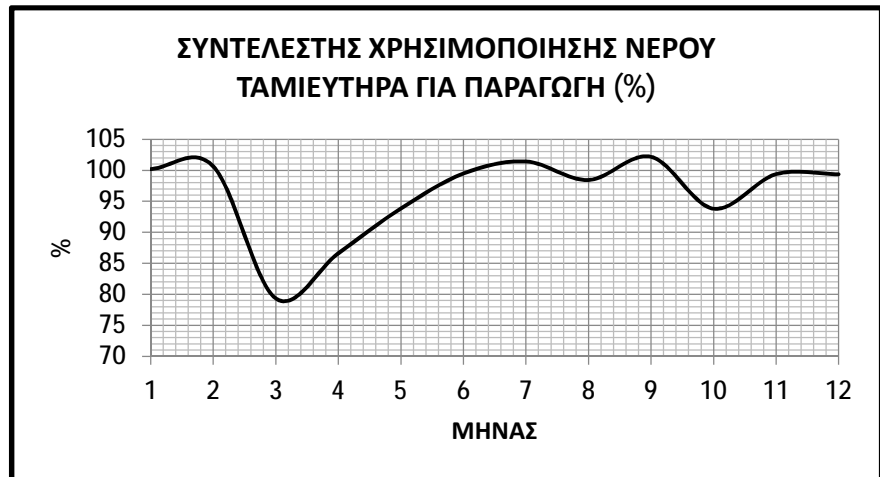
--	--	--

**Πίνακας 17. Στοιχεία λειτουργίας 4 μονάδων**

ΜΗΝΑΣ	ΜΟΝΑΔΑ	H	Q	λ	P <sub>e</sub>	P <sub>h</sub>	η <sub>p</sub>	Q/Q <sub>max</sub>
		m	m <sup>3</sup> /sec	m <sup>3</sup> /kWh	MW	MW	%	-
ΙΑΝ	1	75,62	114,05	5,29	77,64	84,61	91,77%	0,98
	2	75,62	113,94	5,28	77,69	84,53	91,91%	0,98
	3	75,62	56,73	6,36	32,10	42,09	76,26%	0,49
	4	75,62	53,82	6,49	29,86	39,93	74,77%	0,46
ΦΕΒ	1	75,64	111,71	5,30	75,90	82,90	91,56%	0,96
	2	75,64	113,53	5,28	77,44	84,24	91,92%	0,98
	3	75,64	58,42	6,30	33,40	43,35	77,04%	0,50
	4	75,64	56,78	6,36	32,13	42,13	76,27%	0,49
ΜΑΡ	1	75,56	112,94	5,28	77,01	83,71	92,00%	0,97
	2	75,56	114,02	5,28	77,72	84,51	91,96%	0,98
	3	75,56	66,60	5,99	40,02	49,36	81,08%	0,57
	4	75,56	70,44	5,88	43,10	52,21	82,54%	0,61
ΑΠΡ	1	76,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00
	2	76,51	112,08	5,26	76,78	84,12	91,27%	0,97
	3	76,51	61,82	5,99	37,19	46,40	80,14%	0,53
	4	76,51	60,65	6,06	36,02	45,52	79,13%	0,52
ΜΑΪ	1	76,75	115,22	5,26	78,85	86,75	90,89%	0,99
	2	76,75	116,63	5,24	80,19	87,81	91,32%	1,01
	3	76,75	66,58	5,85	40,98	50,13	81,75%	0,57
	4	76,75	79,62	5,60	51,21	59,94	85,42%	0,69
ΙΟΥΝ	1	76,75	111,47	5,26	76,33	83,93	90,95%	0,96
	2	76,75	113,35	5,22	78,18	85,35	91,60%	0,98
	3	76,75	81,18	5,57	52,44	61,12	85,79%	0,70
	4	76,75	80,77	5,58	52,07	60,82	85,62%	0,70
ΙΟΥΛ	1	77,17	111,08	5,22	76,59	84,09	91,08%	0,96
	2	77,17	114,28	5,21	78,90	86,51	91,20%	0,99
	3	77,17	93,74	5,35	63,09	70,97	88,91%	0,81
	4	77,17	94,20	5,34	63,56	71,32	89,12%	0,81
ΑΥΓ	1	76,76	112,21	5,25	76,89	84,50	91,00%	0,97
	2	76,76	113,19	5,24	77,79	85,24	91,26%	0,98
	3	76,76	89,82	5,45	59,33	67,64	87,71%	0,77
	4	76,76	91,10	5,45	60,20	68,60	87,75%	0,79
ΣΕΠ	1	76,86	115,74	5,23	79,74	87,28	91,36%	1,00
	2	76,86	112,58	5,24	77,28	84,89	91,03%	0,97
	3	76,86	87,98	5,46	58,02	66,34	87,46%	0,76
	4	76,86	90,88	5,43	60,28	68,53	87,97%	0,78
ΟΚΤ	1	76,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00
	2	76,88	113,21	5,24	77,83	85,39	91,15%	0,98
	3	76,88	82,38	5,55	53,42	62,13	85,98%	0,71
	4	76,88	80,09	5,57	51,72	60,41	85,62%	0,69
ΝΟΕ	1	76,81	112,23	5,21	77,53	84,56	91,68%	0,97
	2	76,81	102,56	5,21	70,91	77,28	91,76%	0,88
	3	76,81	86,86	5,47	57,19	65,45	87,39%	0,75
	4	76,81	82,44	5,52	53,74	62,12	86,51%	0,71
ΔΕΚ	1	76,88	107,96	5,24	74,18	81,43	91,10%	0,93
	2	76,88	112,37	5,20	77,84	84,76	91,84%	0,97
	3	76,88	86,03	5,46	56,76	64,89	87,48%	0,74
	4	76,88	83,26	5,49	54,57	62,79	86,90%	0,72

--	--	--

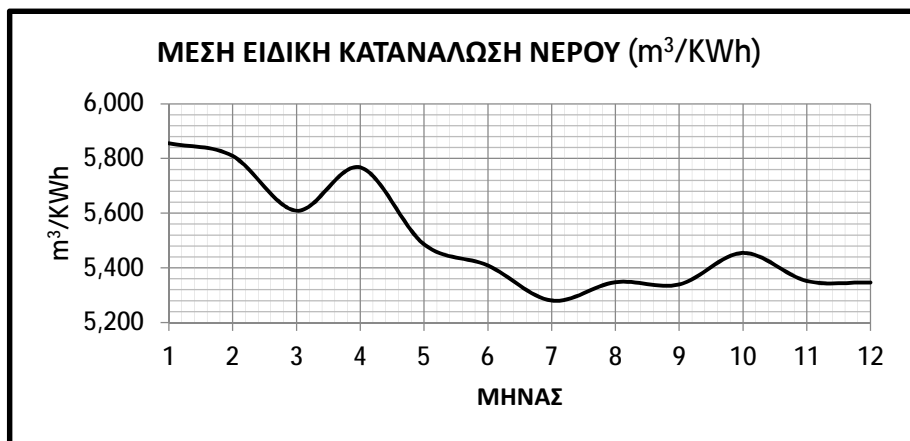
Μήνας	Συντελεστής χρησιμοποίησης (%)
ΙΑΝ	100,2
ΦΕΒ	100,6
ΜΑΡ	79,3
ΑΠΡ	86,6
ΜΑΪ	93,8
ΙΟΥΝ	99,5
ΙΟΥΛ	101,4
ΑΥΓ	98,4
ΣΕΠ	102,2
ΟΚΤ	93,8
ΝΟΕ	99,4
ΔΕΚ	99,4



Διάγραμμα Υπολογισμών 1. Συντελεστής χρησιμοποίησης νερού για παραγωγή

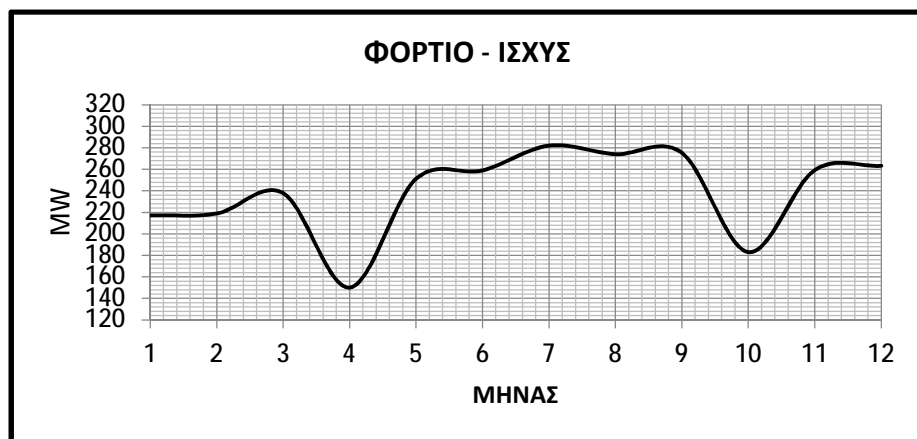
Από το διάγραμμα 1 φαίνεται ότι για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του έτους υπάρχει σχετική εξισορρόπηση μεταξύ εισροών (νερό που εισέρρευσε στον ταμιευτήρα) και εκροών (νερό που χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή), εκτός από τους μήνες Μάρτιο και Οκτώβριο όπου βλέπουμε δικαιολογημένα πτώση του συντελεστή χρησιμοποίησης νερού λόγω του ότι είχαμε αυξημένες εισροές στον ταμιευτήρα σε συνδυασμό με τις όχι τόσο υψηλές ενεργειακές ανάγκες, άρα και μέτριες ως χαμηλές εκροές για παραγωγή.

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ (m <sup>3</sup> /KWh)
ΙΑΝ	5,855
ΦΕΒ	5,809
ΜΑΡ	5,609
ΑΠΡ	5,767
ΜΑΪ	5,486
ΙΟΥΝ	5,408
ΙΟΥΛ	5,280
ΑΥΓ	5,348
ΣΕΠ	5,339
ΟΚΤ	5,454
ΝΟΕ	5,352
ΔΕΚ	5,346



Διάγραμμα Υπολογισμών 2. Μέση ειδική Κατανάλωση νερού

ΜΗΝΑΣ	ΦΟΡΤΙΟ - ΙΣΧΥΣ (MW)
ΙΑΝ	217
ΦΕΒ	219
ΜΑΡ	238
ΑΠΡ	150
ΜΑΪ	251
ΙΟΥΝ	259
ΙΟΥΛ	282
ΑΥΓ	274
ΣΕΠ	275
ΟΚΤ	183
ΝΟΕ	259
ΔΕΚ	263

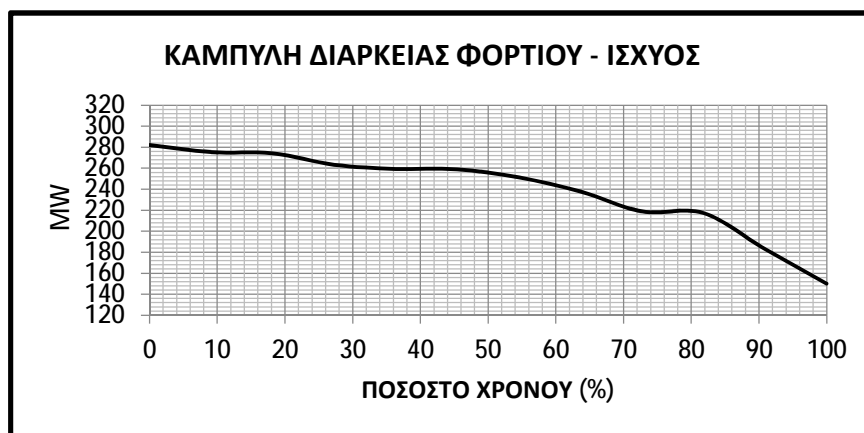


Διάγραμμα Υπολογισμών 3. Φορτίο-Ισχύς



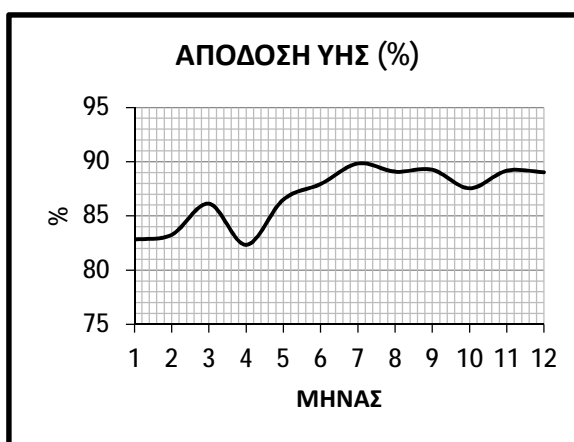
--	--	--

ΜΗΝΑΣ	Ποσοστό χρόνου (%)	ΦΟΡΤΙΟ
ΙΑΝ	0	282
ΦΕΒ	9,09	275
ΜΑΡ	18,18	274
ΑΠΡ	27,27	263
ΜΑΪ	36,36	259
ΙΟΥΝ	45,45	259
ΙΟΥΛ	54,54	251
ΑΥΓ	63,63	238
ΣΕΠ	72,72	219
ΟΚΤ	81,81	217
ΝΟΕ	90,9	183
ΔΕΚ	99,99	150



Διάγραμμα Υπολογισμών 4. Καμπύλη διάρκειας φορτίου

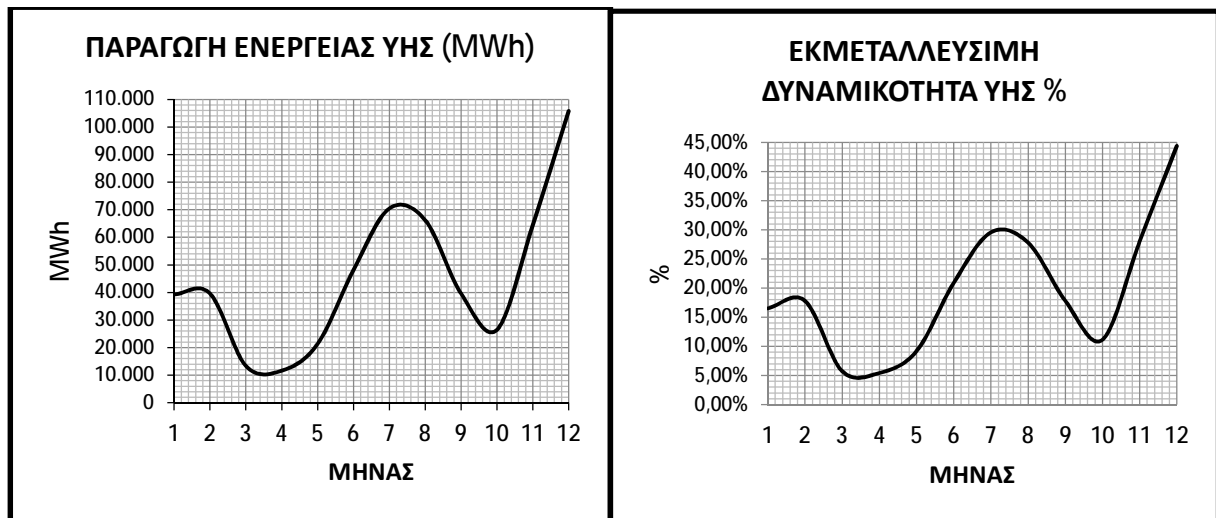
Μήνας	Απόδοση η (%)				
	Μονάδα 1	Μονάδα 2	Μονάδα 3	Μονάδα 4	ΥΗΣ
ΙΑΝ	91,63	91,87	73,65	74,05	82,8
ΦΕΒ	91,42	91,77	74,96	74,85	83,25
ΜΑΡ	92,09	91,97	78,75	81,65	86,12
ΑΠΡ		90,99	78,95	77,01	82,32
ΜΑΪ	91,13	91,39	79,05	84,45	86,5
ΙΟΥΝ	91,14	91,15	84,47	84,97	87,93
ΙΟΥΛ	91,43	90,91	88,53	88,45	89,83
ΑΥΓ	90,84	90,57	87,34	87,52	89,07
ΣΕΠ	91,43	90,93	86,99	87,66	89,25
ΟΚΤ		90,98	85,98	85,64	87,53
ΝΟΕ	91,67	91,7	87,01	86,25	89,16
ΔΕΚ	89,86	91,85	87,49	86,86	89,02



Διάγραμμα Υπολογισμών 5. Απόδοση ΥΗΣ Καστρακίου

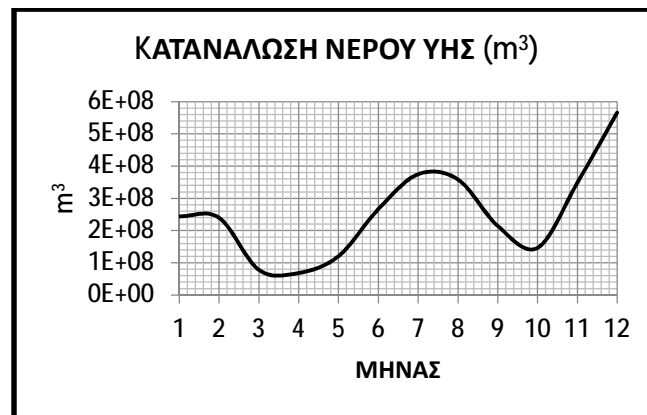
Μήνας	Παραγωγή Ενέργειας (ΜWΗ)					Δυναμικότητα (ΜWΗ)				
	Μονάδα 1	Μονάδα 2	Μονάδα 3	Μονάδα 4	ΥΗΣ	Μονάδα 1	Μονάδα 2	Μονάδα 3	Μονάδα 4	ΥΗΣ
ΙΑΝ	2.205	5.380	12.335	19.380	39.300	59.520	59.520	59.520	59.520	238.080
ΦΕΒ	1.905	8.925	12.495	16.330	39.655	55.680	55.680	55.680	55.680	222.720
ΜΑΡ	1.390	785	4.935	6.335	13.445	59.520	56.947	59.073	58.959	234.499
ΑΠΡ	0	1.620	5.630	4.404	11.654	57.600	57.600	57.600	42.880	215.680
ΜΑΪ	410	425	7.225	13.275	21.335	59.520	59.520	59.520	54.580	233.140
ΙΟΥΝ	1.645	2.580	14.790	29.065	48.080	57.600	57.600	57.600	57.600	230.400
ΙΟΥΛ	4.400	4.935	28.285	32.795	70.415	59.520	59.520	59.520	59.520	238.080
ΑΥΓ	6.190	5.255	25.590	29.195	66.230	59.520	59.520	59.520	59.520	238.080
ΣΕΠ	1.515	3.350	13.585	21.175	39.625	57.600	57.600	49.647	57.600	222.447
ΟΚΤ	0	1.790	11.080	13.605	26.475	59.520	59.520	59.520	59.520	238.080
ΝΟΕ	6.470	13.150	20.790	24.045	64.455	57.600	57.600	57.600	57.600	230.400
ΔΕΚ	22.780	27.755	27.950	27.250	105.735	59.520	59.520	59.520	59.520	238.080

--	--	--



Διάγραμμα Υπολογισμών 6. Παραγωγή ενέργειας ΥΗΣ

Διάγραμμα Υπολογισμών 7. Εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα ΥΗΣ



Διάγραμμα Υπολογισμών 8. Κατανάλωση νερού ΥΗΣ.

Παρατηρούμε την ομοιομορφία των 3 παραπάνω διαγραμμάτων[(6),(7),(8)] ως προς την μεταβολή τους στο χρόνο και αυτό είναι λογικό γιατί η σχέση κατανάλωσης νερού και παραγόμενης ενέργειας είναι ευθέως ανάλογη. Επιπλέον, φαίνεται ότι η εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα του Σταθμού κυμαίνεται στο επίπεδο 15-45% και αυτό οφείλεται καθαρά στη συμμετοχή των Μονάδων ΥΗΣ στη Δευτεροβάθμια ρύθμιση του Συστήματος, έχοντας σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της γήρανσης του Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

### 5.3.4 Μέσο ύψος πτώσης, ταχύτητα αγωγού, παροχή

Για να ορίσουμε το διαθέσιμο ύψος πτώσης χρειαζόμαστε την αρχική και τελική στάθμη ταμιευτήρα και τη στάθμη του αγωγού φυγής. Άρα:

$$H = \text{average}(h_{\text{ταμ1}}, h_{\text{ταμ2}}) - h_{\text{αγ.φυγής}}$$

όπου:

$H$  = μέσο ύψος πτώσης

$h_{\text{ταμ1}}$  = αρχική στάθμη ταμιευτήρα

$h_{\text{ταμ2}}$  = τελική στάθμη ταμιευτήρα

$h_{\text{αγ.φυγής}}$  = στάθμη αγωγού φυγής

--	--	--

Από τη βιβλιογραφία σύμφωνα με μια ανάλυση που χρησιμοποιεί στοιχεία όπως μεταβολή της παροχής στον αγωγό, κόστος επένδυσης, μεταβολές ταχύτητας ροής, ενδεχόμενα εναλλακτικά υλικά κατασκευής, διάφοροι τρόποι αγκυρώσεων καταλήξαμε στον παρακάτω εμπειρικό πίνακα ως βάση εκκίνησης προκαταρκτικού σχεδιασμού:

**Πίνακας 18. Ταχύτητα αγωγού συναρτήσει του Ύψους Πτώσης [πηγή: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΑΣ, Ρευστοδυναμικές Μηχανές]**

<b>Ύψος υδατόπτωσης (m)</b>	30	60	90	120	150	180	240	300
<b>Ταχύτητα στον πιεστικό αγωγό (m/sec)</b>	3,66	4,2	4,45	4,46	4,5	4,6	4,6	4,6

Για την δεδομένη εγκατάσταση, με διαθέσιμο μέσο ύψος πτώσης  $H = 75,7 \text{ m}$  και εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή στο πίνακα 18, καταλήγουμε σε ταχύτητα αγωγού προσαγωγής  $u = 4,39 \text{ m/sec}$ .

Εφαρμόζοντας τον τύπο της ογκομετρικής παροχής  $Q = u \times A$ , η παροχή στον αγωγό προσαγωγής θα είναι:

$$Q = u \times A \quad (5.16)$$

$$A = \frac{\rho \times D^2}{4} \quad (5.17)$$

Από (5.16), (5.17) προκύπτει:

$$Q_{max} = u \times \frac{\rho \times D^2}{4} = 4,39 \frac{m}{sec} \times \frac{\rho \times 5,8m^2}{4} = 116 \frac{m^3}{sec} \quad (5.18)$$

Αυτή θα είναι και η μέγιστη παροχή που δύναται να προσάγει ο αγωγός στο στροφέιο, για κάθε μια από τις 4 Μονάδες.

- Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 2.2.3, εντός του σπειροειδούς κελύφους το νερό είναι υποχρεωμένο να περάσει μέσα από τα ρυθμιστικά κινητά οδηγητικά πτερύγια τα οποία είναι προσαρμοσμένα στην περιφέρεια του δρομέα. Κάθε ένα από τα πτερύγια αυτά μπορεί να στρέφεται περί του άξονά του. Σκοπός αυτής της ρύθμισης είναι ο έλεγχος της εισερχόμενης παροχής εντός των πτερυγίων του δρομέα και συνεπώς ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος. Κατά συνέπεια, ανάλογα την κλίση των κινητών πτερυγίων ρυθμίζεται ο όγκος νερού που εισέρχεται στο στροφέιο ανά μονάδα χρόνου για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας. Για παράδειγμα, με κλίση πτερυγίων  $OB = 50\%$  έχουμε:

$$Q' = Q \times OB = 116 \text{ m}^3 / \text{sec} \times 50\% = 58 \text{ m}^3 / \text{sec} \quad (5.19)$$

Όπου:  $OB =$  άνοιγμα πτερυγίων

Που σημαίνει ότι εάν η Μονάδα λειτουργούσε επί 4 ώρες ο όγκος νερού που καταναλώθηκε είναι:

$$W_{ap} = Q' \times t = 58 \frac{m^3}{sec} \times 4 \text{ h} \times 3.600 \frac{sec}{h} = 835.200 \text{ m}^3 \quad (5.20)$$

--	--	--

### 5.3.5 Εύρεση απωλειών όλων των τμημάτων του Υδροηλεκτρικού εγκατάστασης

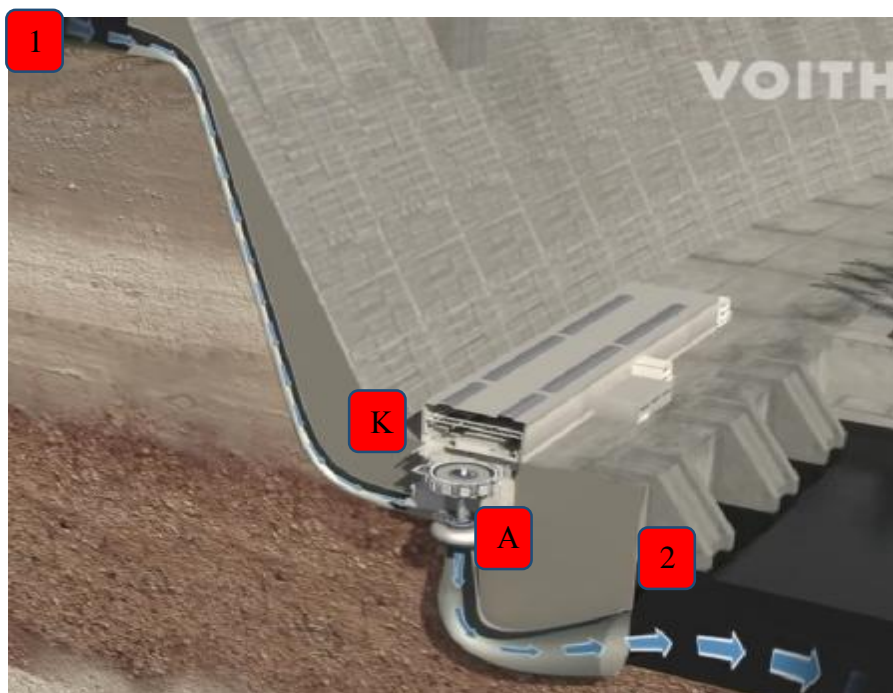
Κατά το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης όπου θα χρησιμοποιηθεί υδροστροβίλος ή συνδυασμός υδροστροβίλων είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το σύνολο των απωλειών πίεσης του δικτύου, ώστε να γίνει και κατάλληλη επιλογή του απαιτούμενου εξοπλισμού. Για τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου αναλύεται η διαδρομή του εργαζόμενου μέσου (ρευστού) από μια μεγάλη δεξαμενή (λεκάνη) έως τη δεξαμενή απόρριψης του ρευστού.

#### Διαδρομή Ρευστού

1 → K (Δεξαμενή -Κατάθλιψη Στροβίλου)

K → A (Κατάθλιψη- Αναρρόφηση Στροβίλου)

A → 2 (Αναρρόφηση Στροβίλου- Δεξαμενή απόρριψης)



Εικόνα 117. Σημεία εισόδου-εξόδου-αναρρόφησης και κατάθλιψης [πηγή: Voith Hydro]

1 → K (Δεξαμενή -Κατάθλιψη Στροβίλου)

$$h_{1-K} = \frac{p_1 - p_K}{\rho g} - \frac{u_K^2}{2g} + (H_{geo} - h_K) \quad (5.21)$$

Όπου:  $h_{1-K} = \text{ύψος διαφοράς, } h_1 = 0, u_1 \approx 0$

K → A (Κατάθλιψη- Αναρρόφηση Στροβίλου)

$$h_{K-A} = \frac{p_K - p_A}{\rho g} + (h_K - h_A) - h_{turbine} \quad (5.22)$$

A → 2 (Αναρρόφηση Στροβίλου- Δεξαμενή απόρριψης)

$$h_{A-2} = \frac{p_A - p_2}{\rho g} - \frac{u_A^2 - u_2^2}{2g} + h_A \quad (5.23)$$

--	--	--

**Ενεργειακό Ισοζύγιο Ενέργειας Υδροστροβίλου σε Εγκατάσταση.**

$$\dot{a} h_{v_{1@2}} = h_{v_{1@K}} + h_{v_{K@A}} + h_{v_{A@2}}$$

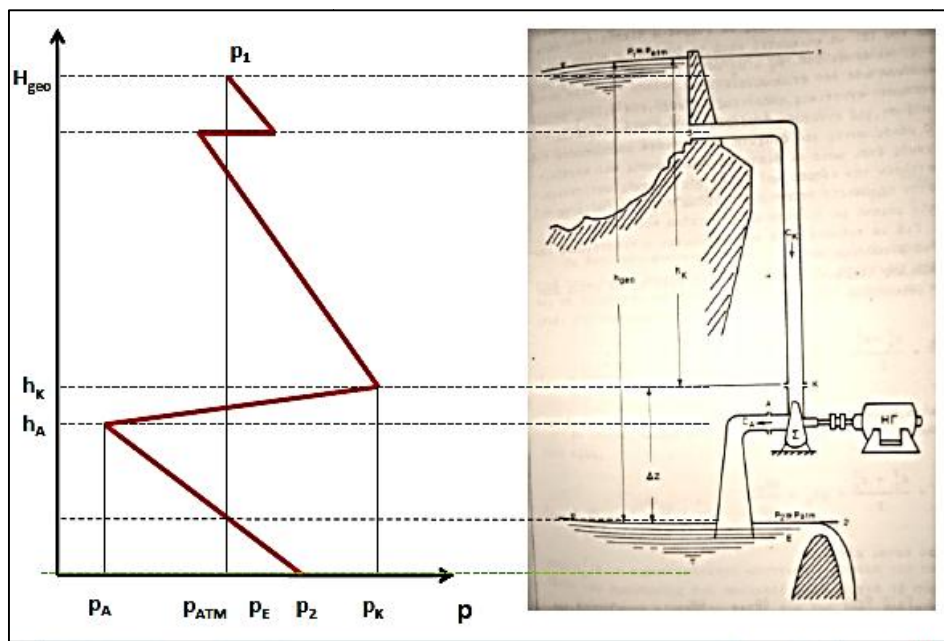
$$\dot{a} h_{v_{1@2}} = \frac{p_1 - p_K}{\rho g} - \frac{1}{2} \frac{u_K^2}{g} + (H_{geo} - h_K) + \frac{p_K - p_A}{\rho g} + (z_K - z_A) - H_{TURB} + \frac{p_A - p_2}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{u_A^2 - u_2^2}{g} + h_A \text{ (B)}$$

$$H_{TURB} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} - \frac{1}{2} \frac{u_2^2}{g} + H_{geo} - \dot{a} h_{v_{1@2}} \quad \text{ή}$$

$$H_{TURB} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} - \frac{1}{2} \frac{u_2^2}{g} + H_{geo} - (h_{v_{1@K}} + h_{v_{K@A}} + h_{v_{A@2}}) \quad (5.24)$$

Εάν υποθέσουμε ότι  $p_1 \gg p_2 \gg p_{atm}$  τότε:

$$H_{TURB} = H_{geo} - \frac{1}{2} \frac{u_2^2}{g} - (h_{v_{1@K}} + h_{v_{K@A}} + h_{v_{A@2}}) \quad (5.25)$$



Διάγραμμα Υπολογισμών 9 Διάγραμμα στατικής πίεσης σε εγκατάσταση υδροστροβίλου. [πηγή: Σημειώσεις Ρευστοδυναμικών Μηχανών ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας]


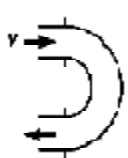
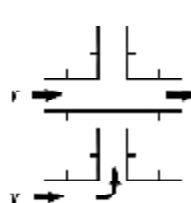
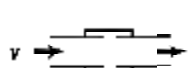
\*(Στους παρακάτω υπολογισμούς λαμβάνουμε υπόψη:  $Re = 2,54 \times 10^7$ ,  $\varepsilon = 0,046 \text{ mm}$  και  $f = 0,0085$ )

--	--	--

Πίνακας 19. Ιδιότητες του νερού [πηγή: Google]

Θερμοκρασία [°C]	Ειδικό βάρος [kN/m <sup>3</sup> ]	Πυκνότητα μάζας [kg/m <sup>3</sup> ]	Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	Δυναμική συνεκτικότητα [N s/m <sup>2</sup> ]	Κινηματική συνεκτικότητα [m <sup>2</sup> /s]	Επιφανειακή τάση [N/m]	Πίεση υδρατμών [kPa]
0	9,805	999,8	1,98	1,781(10) <sup>-3</sup>	1,785(10) <sup>-6</sup>	0,0756	0,61
5	9,807	1000,0	2,05	1,518(10) <sup>-3</sup>	1,519(10) <sup>-6</sup>	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	2,10	1,307(10) <sup>-3</sup>	1,306(10) <sup>-6</sup>	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	2,15	1,139(10) <sup>-3</sup>	1,139(10) <sup>-6</sup>	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	2,17	1,002(10) <sup>-3</sup>	1,003(10) <sup>-6</sup>	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	2,22	0,890(10) <sup>-3</sup>	0,893(10) <sup>-6</sup>	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	2,25	0,798(10) <sup>-3</sup>	0,800(10) <sup>-6</sup>	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	2,28	0,653(10) <sup>-3</sup>	0,658(10) <sup>-6</sup>	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	2,29	0,547(10) <sup>-3</sup>	0,553(10) <sup>-6</sup>	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	2,28	0,466(10) <sup>-3</sup>	0,474(10) <sup>-6</sup>	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	2,25	0,404(10) <sup>-3</sup>	0,413(10) <sup>-6</sup>	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	2,20	0,354(10) <sup>-3</sup>	0,364(10) <sup>-6</sup>	0,0626	47,34

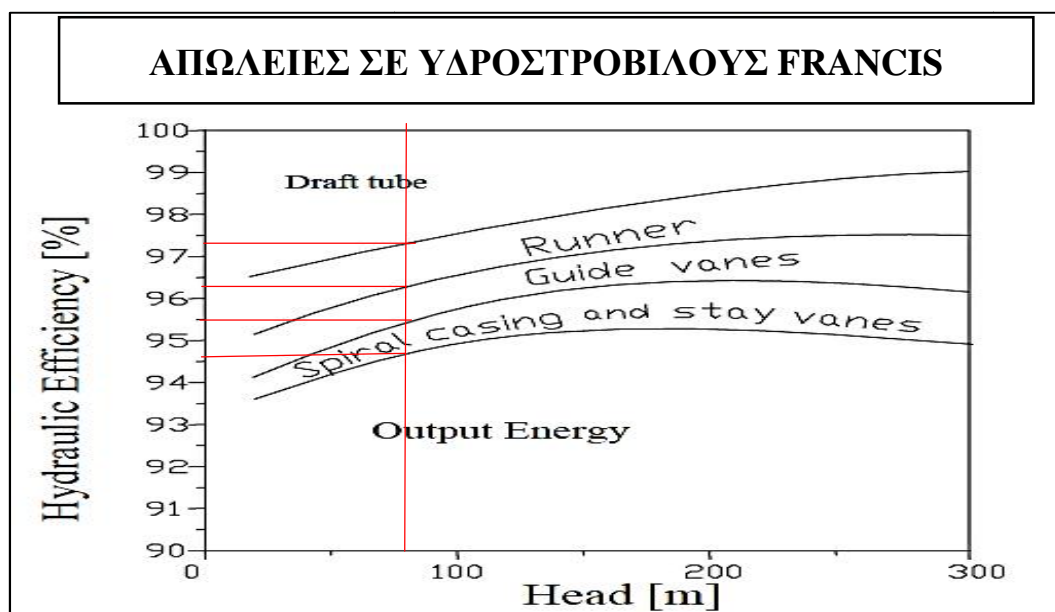
Πίνακας 20. Πίνακας απολειών σωληνώσεων [πηγή: Σημειώσεις ΘΨΚΙ ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας]

Απώλειες Σύνδεσης/Μορφής Σωληνώσεων (Τοπικές Απώλειες)		7																																
 (α)	 (β)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Είδος</th> <th>K<sub>L</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Γόνατα</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>90° με φλάντζα</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>90° με σπείρωμα</td> <td>1.5</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td>45° με φλάντζα</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>45° με σπείρωμα</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td><b>Γωνίες 180°</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>με φλάντζα</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>με σπείρωμα</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td><b>Διακλαδώσεις 180°</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>κύρια γραμμή με φλάντζα</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>κύρια γραμμή με σπείρωμα</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>διακλάδωση με φλάντζα</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>διακλάδωση με σπείρωμα</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td><b>Ενώσεις (ρακόρ)</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td>με σπείρωμα</td> <td>0.08</td> </tr> </tbody> </table>	Είδος	K <sub>L</sub>	<b>Γόνατα</b>		90° με φλάντζα	0.3	90° με σπείρωμα	1.5	45° με φλάντζα	0.2	45° με σπείρωμα	0.4	<b>Γωνίες 180°</b>		με φλάντζα	0.2	με σπείρωμα	1.5	<b>Διακλαδώσεις 180°</b>		κύρια γραμμή με φλάντζα	0.2	κύρια γραμμή με σπείρωμα	0.9	διακλάδωση με φλάντζα	1.0	διακλάδωση με σπείρωμα	2.0	<b>Ενώσεις (ρακόρ)</b>		με σπείρωμα	0.08
Είδος	K <sub>L</sub>																																	
<b>Γόνατα</b>																																		
90° με φλάντζα	0.3																																	
90° με σπείρωμα	1.5																																	
45° με φλάντζα	0.2																																	
45° με σπείρωμα	0.4																																	
<b>Γωνίες 180°</b>																																		
με φλάντζα	0.2																																	
με σπείρωμα	1.5																																	
<b>Διακλαδώσεις 180°</b>																																		
κύρια γραμμή με φλάντζα	0.2																																	
κύρια γραμμή με σπείρωμα	0.9																																	
διακλάδωση με φλάντζα	1.0																																	
διακλάδωση με σπείρωμα	2.0																																	
<b>Ενώσεις (ρακόρ)</b>																																		
με σπείρωμα	0.08																																	
 (γ)	 (δ)																																	
<p>(α) Γόνατα            (β) Γωνίες 180°            (γ) Διακλαδώσεις 180°            (δ) Ενώσεις (ρακόρ)</p>																																		
		$\dot{h}_L = K_L \frac{v^2}{2g}$																																

--	--	--

Πίνακας 21. Υπολογισμός Απωλειών.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ							
ταχύτητα νερού εντός του αγωγού προσαγωγής	u =	4,39	m/s	συντελεστής τριβής	f	0,0085	-
διάμετρος αγωγού προσαγωγής	D =	5,8	m	μήκος αγωγού 1	L1	254,2	m
αριθμός Reynolds	Re =	2,54E+07	-	μήκος αγωγού 2	L2	246,8	m
τραχύτητα	ε =	0,046	mm	μήκος αγωγού 3	L3	238,6	m
σχετική τραχύτητα	ε / D =	7,93E-06	-	μήκος αγωγού 4	L4	230,6	m
	Αγωγός 1	Αγωγός 2	Αγωγός 3	Αγωγός 4	ΛΟΙΠΕΣ ΑΠΩΛΕΙΣ		
απώλειες τριβών hf (m)	0,366	0,355	0,343	0,332	Σπειροειδές κέλυφος και σταθ. οδηγητικά πτερύγια		0,945
πίεση απωλειών τριβών (Pa)	3583	3479	3363	3251	Κινητά πτερύγια		0,954
απώλειες γεωμετρίας (m)	0,393	0,393	0,393	0,393	Δρομέας		0,962
πίεση απωλειών γεωμετρίας (Pa)	3854	3854	3854	3854	Αγωγός φυγής		0,972
Συνολικές απώλειες (Pa)	7437	7333	7217	7105	Aver.	<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ</b>	<b>0,843</b>
Συνολικές απώλειες (m)	<b>0,759</b>	<b>0,748</b>	<b>0,736</b>	<b>0,725</b>	<b>0,742</b>		



Διάγραμμα Υπολογισμών 10 Διάγραμμα απωλειών τμημάτων υδροστροβίλου Francis [πηγή: Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker]

--	--	--

### 5.3.6 Υπολογισμός σπηλαίωσης NPSH

Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί η πίεση στην αναρρόφηση του υδροστροβίλου. Σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις είναι:

$$\frac{p_A}{\rho g} + \frac{U_{2e}^2}{2g} + h_A = 0 \quad \text{®} \quad p_A = \frac{\rho U_{2e}^2}{\rho} - h_A \rho g \quad (5.26)$$

Ο όρος της ταχύτητας στην αναρρόφηση του υδροστροβίλου είναι άγνωστος και υπολογίζεται:

$$U_{2e} = \frac{u_{2e}}{\sqrt{2gH}} = \frac{\pi D_{2e} n}{60 \sqrt{2gH}} = 0,86 \frac{m}{s} \quad (5.27)$$

Όπου

$$D_{2e} = 3,81 \text{ m}$$

$$n = 166,7 \text{ rpm}$$

$$H = 75,8 \text{ m}$$

Με αντικατάσταση της (5.27) à (5.26) γίνεται:

$$p_A = \frac{\rho 0,86^2}{\rho} - 0,86^2 \rho g = 369 \text{ Pa} = 0,0037 \text{ atm} \quad (5.28)$$

Σε έναν υδροστροβίλο ακτινικής ροής οι πλέον πιθανές περιοχές ανάπτυξης της σπηλαίωσης είναι αυτές στις οποίες η στατική πίεση είναι ήδη χαμηλή οπότε με περαιτέρω μείωση της, λόγω υδροδυναμικών φαινομένων επιτάχυνσης της ροής, ενδέχεται αυτή να μειωθεί κάτω από την πίεση ατμοποίησης. Άρα, στην περίπτωση των υδροστροβίλων το πιο κατάλληλο μέρος να εμφανιστεί σπηλαίωση είναι οι πίσω πλευρές των πτερυγίων του δρομέα κοντά στα άκρα, όπου το νερό εγκαταλείπει τα πτερύγια και η μέση στατική πίεση είναι χαμηλή (όπως αναφέραμε και σε προηγούμενα κεφάλαια). Έστω ότι εκεί επικρατεί η χαμηλότερη πίεση. Για να αποφευχθεί σπηλαίωση πρέπει η  $P_A > P_S$ . Έτσι ορίζεται μια ελάχιστη τιμή του ύψους αναρρόφησης, **το διαθέσιμο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH<sub>A</sub>) για τον υδροστροβίλο με την παρακάτω σχέση:**

$$NPSH_A = \frac{\rho p_A - p_S}{\rho g} + H - \frac{\rho D_{pwl} \dot{\omega}}{\rho g} \quad (5.29)$$

πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH<sub>R</sub>), με :

$$NPSH_R = \frac{\rho p_o - p_S}{\rho g} \quad (5.30)$$

Άρα, από την σχέση 5.28 και για νερό θερμοκρασίας 20°C, πίεση Τάσης ατμών από τον Πίνακα 19 ίση με  $P_S = 2340 \text{ Pa}$ , προκύπτει:

$$NPSH_A = \frac{\rho 369 \text{ Pa} - 2340 \text{ Pa}}{\rho g} + 76,52 \text{ m} - 0,742 \text{ m} = 75,58 \text{ m} \quad (5.31)$$

$$NPSH_R = \frac{\rho p_o - p_S}{\rho g} = \frac{\rho 100000 \text{ Pa} - 2340 \text{ Pa}}{\rho g} = 9,97 \text{ m} < 75,58 \text{ m} \quad (5.32)$$



--	--	--

Όπου,

$p_0$ : η απόλυτη ολική πίεση στην έξοδο του υδροστροβίλου

$p_s$ : η τάση ατμών του ρευστού

$H$ : η υψομετρική διαφορά μεταξύ δεξαμενής και υδροστροβίλου

### 5.3.7 Υπολογισμός της γωνίας σχεδιασμού $\alpha_{opt}$ ανοίγματος των ρυθμιστικών κινητών πτερυγίων

Τα κινητά πτερύγια έχουν κατασκευαστεί υπό συγκεκριμένη αεροδυναμική μορφή με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργίας της υδροτουρμπίνας εκτός σημείου σχεδιασμού. Για τον υπολογισμό της γωνίας ανοίγματος ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\alpha_{go} = 4 \times (-4 \lambda W^2 + 13 \lambda + 1) \quad (5.33)$$

$$W = w \sqrt{Q} \quad (5.34)$$

$$\underline{w} = w / \sqrt{2gH} \quad (5.35)$$

$$\underline{Q} = Q / \sqrt{2gH} \quad (5.36)$$

Όπου  $\alpha_{go}$  η μέγιστη γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών κινητών πτερυγίων (wicket gates) και η λειτουργία του υδροστροβίλου συνίσταται να προγραμματίζεται για ιδανικές συνθήκες φόρτισης και συμμετοχή στη Δευτεροβάθμια ρύθμιση του συστήματος (πολλές εκκινήσεις, εναλλαγές κτλ.) στην τιμή:

$$\alpha_{opt} = \alpha_{go} / 2 \quad (5.33)$$

Όπου:

$\underline{\omega}$ : αριθμός ταχύτητας

$\underline{Q}$ : αριθμός παροχής

$Q$ : παροχή σε ( $m^3/s$ )

$H$ : ύψος υδατόπτωσης

$\omega$ : γωνιακή ταχύτητα σε ( $rad/s$ )

Ο υπολογισμός στην μέγιστη δυνατή γωνία ανοίγματος των κινητών πτερυγίων  $\alpha_{go}$  και μέσω αυτής την τιμή σχεδιασμού  $\alpha_{opt}$  για τα δεδομένα τις παρούσας εργασίας, δηλ. για τον ΥΗΣ Καστρακίου και από τις σχέσεις 5.18 και  $H$ ,  $\omega$ , γνωστά, είναι: .

$$Q = 116 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = 75,8 \text{ m}$$

$$\omega = 17,46 \text{ rad/s} \quad (\text{προκύπτει από τις στροφές του στροφείου } n = 166,7 \text{ rpm, } \omega = (2 \cdot \pi \cdot n) / 60)$$

$$\underline{Q} = \frac{116 \text{ m}^3/\text{s}}{\sqrt{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 75,8 \text{ m}}} = 3,01 \quad (5.34)$$

$$\underline{\omega} = \frac{17,46 \text{ rad/s}}{\sqrt{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 75,8 \text{ m}}} = 0,45 \quad (5.35)$$

$$\Omega = 0,45 \times \sqrt{3,01} = 0,785 \quad (5.36)$$

$$\alpha_{go} = 4 \times (-4 \times 0,785^2 + 13 \times 0,785 + 1) = 34,96^\circ \quad (5.37)$$

$$\alpha_{opt} = \frac{34,96^\circ}{2} = 17,48^\circ \quad (5.38)$$


### 5.3.8 Υπολογισμός ειδικού αριθμού στροφών $n_s$ και παραμέτρου σπηλαιώσης $s_{kr}$ υδροστροβίλου Francis

Ο ειδικός αριθμός στροφών  $n_s$  και η παράμετρος σπηλαιώσης  $s_{kr}$  είναι μεγέθη μεγάλης σημασίας για τον τελικό σχεδιασμό και την εξασφάλιση ομαλής λειτουργίας όλης της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης όπως αναφέραμε και σε προηγούμενα κεφάλαια. Υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών και είναι της μορφής:

$$n_s = 1304 \times H^{-0,654} \quad (5.39)$$

$$s_{kr} = 7,54 \times 10^{-5} \times n_s^{1,41} \quad (5.40)$$

Για τα δεδομένα του ΥΗΣ Καστρακίου με μανομετρικό ύψος  $H = 76,52$  m από τις σχέσεις 5.39 και 5.40 προκύπτει:

$$n_s = 1304 \times 76,52^{-0,654} = 76,4$$

$$s_{kr} = 7,54 \times 10^{-5} \times 76,4^{1,41} = 0,034$$

Ο αριθμός  $n_s$  θα επηρεάσει σημαντικά την επιλογή τύπου υδροστροβίλου (διαστάσεις, βαθμός απόδοσης), τη στάθμη τοποθέτησης αυτού, την ταχύτητα φυγής και το εύρος περιοχής λειτουργίας για την εγκατάστασή, ενώ η παράμετρος σπηλαιώσης  $s_{kr}$  χαρακτηρίζει την εμφάνιση της κυριότερης μορφής σπηλαιώσης στους υδροστροβίλους αντιδράσεως, αυτής δηλαδή που έχει την μορφή φουσαλίδων που αναπτύσσονται στην κυρτή επιφάνεια των πτερυγίων (πλευρά υποπίεσης) και κοντά στην ακμή εκφυγής.

--	--	--

## 6 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΥΗΣ ΣΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Όπως έχει προαναφερθεί οι ΥΗΣ συμβάλλουν σε σημαντικό ποσοστό στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του Συστήματος. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Μονάδων Παραγωγής της ΔΕΗ Α.Ε. στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα σήμερα ανέρχεται σε 11.612 MW από την οποία οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί διαθέτουν τα 3.060 MW, δηλαδή διαθέτουν το 26,5 % περίπου της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς της ΔΕΗ Α.Ε.

Η μέση ετήσια παραγωγή των ΥΗΣ καλύπτει περίπου το 9% της παραγόμενης ενέργειας από το Παραγωγικό δυναμικό της ΔΕΗ Α.Ε. Η ετήσια παραγωγή των ΥΗΣ εξαρτάται από την Υδραυλικότητα του έτους. Με στοιχεία των τελευταίων έξι (6) ετών η ετήσια παραγωγή κυμαίνεται από 3.150 GWh έως 6.230 GWh δηλαδή η συμμετοχή τους συνέβαλλε από 6 % έως 13 %.

Χαρακτηριστική είναι η Υδροηλεκτρική Παραγωγή κατά το έτος 2006, η οποία έφθασε τις 6.232GWh και κάλυψε το 13 % της Παραγωγής του Εθνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος.

Πέραν όμως των ποσοτικών χαρακτηριστικών η παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από τους ΥΗΣ έχει τα εξής χαρακτηριστικά, τα οποία της προσδίδουν ιδιαίτερη αξία στο Εθνικό Σύστημα.

- a) Η ισχύς των ΥΗΣ είναι ευέλικτη και εντάσσεται γρήγορα στο Σύστημα. Η αναφερόμενη ιδιότητα καθιστά πολύτιμη τη συμβολή της στην κάλυψη αιχμών φορτίου (σε περιόδους αυξημένης ζήτησης), με την αντίστοιχη ενέργεια να αποτελεί ενέργεια υψηλής οικονομικής αξίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ένταξη μιας Υδροηλεκτρικής μονάδας στο Σύστημα απαιτεί μόλις λίγα λεπτά ώστε από ακινησία να παραλάβει το πλήρες της φορτίο. Έτσι οι Υδροηλεκτρικές μονάδες παρέχουν εφεδρεία ισχύος που αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος. Η ευελιξία τους, η ικανότητα τους δηλαδή σε γρήγορες αυξομειώσεις του φορτίου, τις καθιστά πολύ χρήσιμες στην παροχή Επικουρικών Υπηρεσιών δηλαδή στη συμβολή τους στη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του Συστήματος (Συχνότητα, Τάση κλπ) δηλαδή στοιχεία που εξασφαλίζουν την ποιότητα της Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- b) Η παραγόμενη ενέργεια είναι «πράσινη», ή καθαρή χωρίς ρύπους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια μέση παραγωγή της τάξεως των 5.000 GWh κατ' έτος από ΥΗΣ υποκαθιστά, εκπομπές ρύπων CO<sub>2</sub> που είναι της τάξης των 3 ÷ 8 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> κατ' έτος ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου που υποκαθιστά (φυσικό αέριο ή λιγνίτη). Από αυτό προκύπτουν τα προφανή οικολογικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση της Υδροηλεκτρικής Παραγωγής αλλά και τα οικονομικά οφέλη για την ΔΕΗ Α.Ε. και κατ' επέκταση της Εθνικής Οικονομίας από το εναλλακτικό σενάριο αγοράς δικαιωμάτων ρύπων των οποίων το κόστος είναι πολύ υψηλό. Τρέχουσες τιμές της αγοράς είναι της τάξης των 15€/ton, (τιμές από 8 έως 28€/ton), οπότε το κόστος αγοράς ισοδύναμων δικαιωμάτων κυμαίνεται από 45 έως 100 εκ. €ανά έτος.
- c) Ορισμένοι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί της ΔΕΗ Α.Ε. όπως ο ΥΗΣ Σφηκιάς και ο ΥΗΣ Θησαυρού λειτουργούν και ως αναστρέψιμοι – αντλητικοί Σταθμοί. Με τη λειτουργία αυτή αποθηκεύουν νερό στους άνω ταμιευτήρες με άντληση κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου χρησιμοποιώντας ενέργεια χαμηλού κόστους και την αποδίδουν σε ώρες αιχμής συμβάλλοντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών της ημερήσιας καμπύλης φορτίου με αποτέλεσμα αφ' ενός τη δυνατότητα κάλυψης αυξημένων ενεργειακών

--	--	--

αναγκών τις συγκεκριμένες ώρες, αφ' ετέρου και την μείωση του κόστους παραγωγής (βελτιστοποίηση ενεργειακού ισοζυγίου).

Εάν δεν υπήρχαν οι ΥΗΣ με τα παραπάνω χαρακτηριστικά το Εθνικό Σύστημα θα απαιτούσε υποκατάσταση της αντίστοιχης ισχύος με ευέλικτη παραγωγή (αεροστροβίλους κλπ), υψηλού κόστους και Περιβαλλοντικής Επιβάρυνσης.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

- Η ΔΕΗ Α.Ε. λειτουργεί όλους σχεδόν τους μεγάλους ΥΗΣ στην Ελλάδα εκμεταλλευόμενη μεγάλο μέρος του Υδροδυναμικού της.
- Οι ΥΗΣ είναι αναγκαίοι για την παραγωγή «καθαρής» ανανεώσιμης ενέργειας.
- Οι ΥΗΣ κυρίως εξασφαλίζουν τις παραμέτρους και την ποιότητα της ενέργειας στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα (Συχνότητα, Τάση, Εφεδρεία Ισχύος κ.λπ.).
- Οι ΥΗΣ παρέχουν άλλες υπηρεσίες και χρήσεις νερού προς τρίτους (αντιπλημμυρική προστασία, Αρδεύσεις, Ύδρευση, Αναψυχή κ.λπ.).
- Οι ΥΗΣ ως εγκαταστάσεις πολλαπλού σκοπού είναι πολύ σημαντικές ιδιαίτερα για την Ελλάδα, (Μεσογειακή χώρα), όπου το πρόβλημα της λειψυδρίας είναι έντονο. Ο ρόλος τους αποβαίνει όλο και πιο σημαντικός τις ημέρες μας γιατί οι κλιματικές αλλαγές θα επηρεάσουν σημαντικά την Μεσογειακή Ζώνη (όπου και η Ελλάδα) με σοβαρή μείωση των βροχοπτώσεων αλλά με ένταση των ακραίων φαινομένων (πλημμύρες, καταιγίδες κ.λπ.).

--	--	--

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ, Υδροδυναμικές Μηχανές (Αντλίες – Υδροστροβίλοι), Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ 1994
2. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΑΣ, Ρευστοδυναμικές Μηχανές, Εκδόσεις MEDIA GURU 2012
3. Μπέλλου Κων. “Σημειώσεις Υδροδυναμικών Έργων”, Ξάνθη 2000
4. Σούλη, Ι. Β. “Υδραυλικά Στροβιλομηχαναί, Μηχανική Ρευστών, Πρώτος Τόμος, υδροστροβίλοι”, Ξάνθη 1993-1995.
5. Stephen J. Charman, “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ”, Εκδόσεις Τζιόλα
6. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΑΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ τμήμα Μηχανολογίας (ΣΚΟΥΡΑΣ-ΒΟΥΡΟΣ, Ρευστοδυναμικές μηχανές)
7. Θεόδωρος Ι. Τσιρίκογλου – Μιχαήλ Α. Βλαχογιάννης, Ρευστοδυναμικές Μηχανές Θεωρητική προσέγγιση - εφαρμογές, Γλωσσική επιμέλεια Ελένη Νίκα – τεχνική επεξεργασία Τηλέμαχος Στυλιανός.
8. Γ. Λ. Γεώργιος Λέρης *Μηχανολόγος Μηχανικός* (Η Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών της ΔΕΗ Α.Ε. ως Έργα Πολλαπλού Σκοπού).
9. Ι. Γ. Αργυράκης *Μηχανολόγος – Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Βοηθός Δ/ντής Υδροηλεκτρικής Παραγωγής – ΔΕΗ Α.Ε*
10. ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ & Περιφερειακό Τμήμα Ηπείρου του ΤΕΕ Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ



ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ Α.Ε.  
ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ / ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ, ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ

### ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

1. [www.hydroenergy.gr](http://www.hydroenergy.gr)
2. [www.energotech.gr](http://www.energotech.gr)
3. [www.aegean.gr](http://www.aegean.gr)
4. [www.ekowatt.cz](http://www.ekowatt.cz)
5. [www.hydro-energy.com](http://www.hydro-energy.com)
6. [www.udo-leuschner.de](http://www.udo-leuschner.de)
7. [www.ckdblansko.cz](http://www.ckdblansko.cz)
8. [www.wkv-ag.com](http://www.wkv-ag.com)
9. [www.andritz.com](http://www.andritz.com)
10. [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
11. [www.canren.gc.ca](http://www.canren.gc.ca)
12. [www.philenergydb.upd.edu.ph](http://www.philenergydb.upd.edu.ph)
13. [www.voithsiemenshydropower.com](http://www.voithsiemenshydropower.com)
14. [www.turbogen-engineering.com](http://www.turbogen-engineering.com)
15. [www.ckdturbo.cz](http://www.ckdturbo.cz)
16. [www.irem.it](http://www.irem.it)
17. [www.phys.jyu.fi](http://www.phys.jyu.fi)
18. [www.ept.ntnu.no](http://www.ept.ntnu.no)
19. [hydropower.inel.gov](http://hydropower.inel.gov)
20. [rs-saarburg.bildung-rp.de](http://rs-saarburg.bildung-rp.de)
21. [www.daviddarling.info](http://www.daviddarling.info)


22. [www.toshiba.co.jp](http://www.toshiba.co.jp)
23. Энерго-24
24. Voith Hydro/[www.youtube.com/channel/UCbKBagP4nLUzZxXxbe2WCWQ](http://www.youtube.com/channel/UCbKBagP4nLUzZxXxbe2WCWQ)
25. Power Machines/ [www.youtube.com/watch?v=ispytw3VaP8](http://www.youtube.com/watch?v=ispytw3VaP8)
26. Learn Engineering/ [www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo](http://www.youtube.com/watch?v=3BCiFeykRzo)
27. Scth4646/ [www.youtube.com/watch?v=dghmoudZiWw](http://www.youtube.com/watch?v=dghmoudZiWw)
28. Fundamental of Turbomachinery for Mechanical Engineering/[www.youtube.com/watch=crNdftDJcZE](http://www.youtube.com/watch=crNdftDJcZE)
29. Francis Turbine-Noelle Fillo, Kimberly Fridsma, Callen Hecker