



7 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



7.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ενέργεια είναι το αίτιο για τη δημιουργία του **κύκλου του νερού** στη Γη. Κάθε ώρα περισσότερα από 50 δισεκατομμύρια m^3 νερού εξατμίζονται παγκόσμια κυρίως από την επιφάνεια των ωκεανών. Όταν το νερό μέσω της **κατακρήμνισης** [precipitation] επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης δημιουργεί τις λίμνες και τα ποτάμια. Η υψομετρική διαφορά που υπάρχει σε διάφορες τοποθεσίες στη Γη κατά την πορεία αυτού του νερού προς τη θάλασσα προσδίδει **βαρυτική δυναμική ενέργεια** στη μάζα του νερού, που, κάτω από προϋποθέσεις, μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή άλλων μορφών ενέργειας και κυρίως ηλεκτρικής. Η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από το μετασχηματισμό της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας των μαζών του νερού τα οποία κινούνται καθοδικά μέσα από υδάτινους δρόμους ονομάζεται **υδροηλεκτρική ενέργεια**.

Η υδραυλική ενέργεια (δηλαδή η κινητική ενέργεια που αποκτά το νερό λόγω υψομετρικής διαφοράς) αποτελεί μία από τις παλαιότερες μορφές ενέργειας που αξιοποίησε ο άνθρωπος. Ήδη περίπου από το 3500 π.Χ. στη Μεσοποταμία χρησιμοποιούνταν νεροτροχοί για την άρδευση εκτάσεων, ενώ τον 1^ο αιώνα π.Χ. υπάρχουν μαρτυρίες από το Βιτρούβιο ότι στο ρωμαϊκό κόσμο παράγονταν άλευρα από την υδροκίνηση μύλων. Στα τέλη της πρώτης χιλιετίας μ.Χ. ήταν διαδομένη η υδροκίνηση σε όλη την Ευρώπη και άρχισε να χρησιμοποιείται και για άλλες παραγωγικές διαδικασίες (όπως πριονιστήρια κ.λπ.). Από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα ξεκίνησαν να κατασκευάζονται υδροστρόβιλοι [turbines]¹ που μπορούσαν να αξιοποιήσουν

¹ Τον όρο *τουρμπίνα* [turbine] χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το 1824 ο Γάλλος μηχανικός Claude Burdin (Μπιρντέν, 1790-1873), ενώ η θεωρητική περιγραφή της λειτουργίας του υδροστροβίλου διατυπώθηκε από τον Jean-Victor Poncelet (Πονσελέτ, 1788-1867) το 1835, <http://sfrang.com/historia/selida625.htm> (4/10/11).



μεγαλύτερες ποσότητες νερού και από μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές. Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα τέτοιοι υδροστρόβιλοι άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού². Η πρώτη δημόσια εμπορική υδροηλεκτρική εγκατάσταση άνοιξε το 1881 στο Godalming στο Surrey της Μ. Βρετανίας. Από τότε και μέσα στον 20^ο αιώνα οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις πολλαπλασιάστηκαν σε όλο τον κόσμο και το μέγεθος της ηλεκτρικής ισχύος τους αυξήθηκε από τα λίγα kW σε MW και GW³. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από το 1983 μέχρι το 2006 η υδροηλεκτρική εγκατάσταση στους ποταμούς Iguacu και Parana στα σύνορα της Βραζιλίας και της Παραγουάης, που τότε είχε τη μεγαλύτερη ισχύ στον κόσμο (12,6 GW), παρήγαγε περίπου 95.000 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως, ικανής να καλύψει το ¼ των ηλεκτρικών αναγκών της Βραζιλίας⁴. Από το Μάιο του 2006 άρχισε τη λειτουργία της η εγκατάσταση Three Gorges Dam στον ποταμό Yangtze στην Κίνα (το φράγμα έχει ύψος 185 m και μήκος 2,3 km), που θεωρείται η υδροηλεκτρική μονάδα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ στον κόσμο με 18,2 GW (2010) όταν λειτουργούν όλοι οι υδροστρόβιλοί της. Η ισχύς αυτή είναι περίπου ίση με την ισχύ 16 μέσων πυρηνικών εργοστασίων⁵.

Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι με διαφορά οι μεγαλύτεροι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ παγκοσμίως⁶. Στα δεδομένα που παρουσιάζο-

² Ενδεικτικά αναφέρεται ο υδροστρόβιλος του Francis, που κατασκευάστηκε το 1849 από τον Αμερικανό μηχανικό James B. Francis (1815-1892), και ο υδροστρόβιλος του Pelton, που κατασκευάστηκε το 1879 από τον Αμερικανό μηχανικό Lester Pelton (1829-1908). Αυτοί οι δύο υδροστρόβιλοι έχουν επιβιώσει μέχρι σήμερα (με αρκετές βελτιώσεις και παραλλαγές) και χρησιμοποιούνται σε σειρά από υδροηλεκτρικούς σταθμούς <http://sfrang.com/historia/selida625.htm> (4/10/11).

³ Για την πλειοψηφία των μεγάλων υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων μια τυπική ισχύς κυμαίνεται από 500 έως 1.000 MW (Boyle et al, 2004, σελ. 173).

⁴ Seifried et al, 2010, σελ. 120.

⁵ ο.π.

⁶ Στη διεθνή βιβλιογραφία ως προτεινόμενες περιβαλλοντικά εγκαταστάσεις ΑΠΕ θεωρούνται ανεπιφύλακτα τα Μικρής κλίμακας Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ) που είναι ισχύος περίπου κάτω από 10 MW (θα παρουσιαστούν αναλυτικά παρακάτω). Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μεσαίας και μεγάλης ισχύος (ουσιαστικά πάνω από 10 MW) και κυρίως οι γιγάντιες πολύ μεγάλης ισχύος δέχονται ισχυρή κριτική για κάποιες περιβαλλοντικές συνέπειές τους. Για παράδειγμα, αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι η κατασκευή αυτών των τεράστιων φραγμάτων δημιουργεί πολύ μεγάλα προβλήματα σε εκατοντάδες χιλιάδες ή και εκατομμύρια ανθρώπους (όπως στο Three Gorges Dam), οι οποίοι εκτοπίζονται. Επίσης το πλημμύρισμα ολόκληρων κοιλάδων καταστρέφει οικοσυστήματα όχι μόνο στη συγκεκριμένη αλλά και στις γειτονικές περιοχές από τις οποίες περνάει ο ποταμός μετά το φράγμα. Βέβαια, αυτή η κριτική δεν αναιρεί το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις έχουν κάποια από τα πλεονεκτήματα που έχουν γενικά οι ΑΠΕ (κυρίως ότι δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου) αλλά και τα πιο συγκεκριμένα πλεονεκτήματα των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων για τα οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω. Για περισσότερα για αυτό τον προβληματισμό βλ. Seifried et al, 2010, Breeze, 2005, The World Commission on Dams, 2000, <http://digitalcommons.wcl.american.edu/cgi/>

νται διεθνώς γίνεται συνήθως αναφορά στο σύνολο των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων (μικρών, μεσαίων και μεγάλων). Μερικές φορές από τη συνολική ισχύ διαχωρίζονται τα Μικρές κλίμακας Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ)⁷. Το 2005 παρήχθησαν 2.950 TWh υδροηλεκτρικής ενέργειας που αντιστοιχεί στο 90% της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήγαγαν οι ΑΠΕ και περίπου στο 16% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως⁸. Σε μερικές χώρες η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η επικρατούσα μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Ελβετία ~55%, Καναδάς 60%, Βραζιλία 84%, Ισλανδία ~80% και Νορβηγία ~98%)⁹.

Στην Ευρώπη το 2006 η υδροηλεκτρική ενέργεια έδινε το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήγαγαν οι ΑΠΕ και το 10% της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ΜΥΗΣ συνεισέφεραν το 3% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύ σε ΜΥΗΣ στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι η Ιταλία, η Γαλλία και η Ισπανία¹⁰.

Παρ' όλη την έκταση της αξιοποίησης του παγκόσμιου υδάτινου δυναμικού, εκτιμάται ότι το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που (θεωρητικά) μπορεί να παραχθεί ετησίως από υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι της τάξης των 15.000 TWh, που ισοδυναμεί με την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας (2005). Εκτιμάται όμως πως μόνο το μισό δυναμικό είναι με τα σημερινά μεγέθη οικονομικά αξιοποιήσιμο. Σε Ευρώπη, Καναδά και ΗΠΑ χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού¹¹ και υπάρχουν περιθώρια κυρίως για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων ΜΥΗΣ και για αντικατάσταση παλαιάς τεχνολογίας υδροστροβίλων με σύγχρονους που θα εξασφαλίσουν μεγαλύτερη απόδοση στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις¹². Σε μεγάλα όμως τμήματα της Ασίας, της Ν. Αμερικής και στην

viewcontent.cgi?article=1252&context=auilr (11/3/2011). Ιδιαίτερα για την υδροηλεκτρική εγκατάσταση «Three Gorges Dam» βλ. Boyle et al, 2004, σελ. 189-190, όπου σε ένα διαφωτιστικό πίνακα υπάρχουν τα «υπέρ» και τα «κατά» αυτού του εγχειρήματος.

⁷ Παρ' όλο που δεν υπάρχει γενική παραδοχή παγκοσμίως για το κατώφλι της ισχύος που κατατάσσει ένα υδροηλεκτρικό σύστημα στα ΜΥΗΣ (για παράδειγμα, στη Γερμανία είναι το 1 MW, ενώ στην Ελβετία τα 300 kW), στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης αυτό το όριο είναι τα 10 MW.

⁸ Seifried et al, 2010, σελ. 114. Αναφέρεται επίσης ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε το 2005 είναι ίση περίπου με αυτή που παρήγαγαν τα πυρηνικά εργοστάσια (2.771 TWh).

⁹ Seifried et al, 2010, σελ. 114.

¹⁰ http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/hydropower/background/index_en.htm (10/6/2012).

¹¹ Στην Ευρώπη των 15 (ΕΥ-15) ήδη χρησιμοποιείται το 80% του οικονομικά αξιοποιήσιμου υδάτινου δυναμικού http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/hydropower/background/index_en.htm (10/6/2012).

¹² Χαρακτηριστικό παράδειγμα από τη Γερμανία (στην οποία περίπου το 75% του υδάτινου δυναμικού της ήδη αξιοποιείται) είναι η περίπτωση της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης στο Rheinfelden, η οποία αναβαθμίστηκε με αποτέλεσμα τον τετραπλασιασμό της ισχύος (από 26 MW σε 100 MW) και τον υπερτριπλασιασμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (από 185 GWh το χρόνο σε 600 GWh). (Seifried et al, 2010, σελ. 116).

Αφρική υπάρχει ακόμα μεγάλο μέρος ανεκμετάλλευτου» υδάτινου δυναμικού¹³. Όσον αφορά ειδικότερα τα ΜΥΗΣ το εκτιμώμενο υδάτινο δυναμικό παγκοσμίως ανέρχεται σε 150-200 GW ηλεκτρικής ισχύος. Απ' αυτό το δυναμικό μόνο το 5% αξιοποιείται σήμερα¹⁴.



Εικόνα 7.1 Το φράγμα Chief Joseph Dam (στον ποταμό Columbia στο Oregon, ΗΠΑ) μήκους 2,4 km, δυναμικότητας ισχύος 2.620 MW με 27 υδροστροβίλους τύπου Francis και ύψος υδραυλικής κεφαλής 72 m.

(Πηγή: *commons.wikimedia.org*)

¹³ Η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζει η παγκόσμια κοινότητα σε αυτή την περίπτωση είναι να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν οι καινούριες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις με όσο το δυνατόν πιο αειφορικό τρόπο.

¹⁴ http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/hydropower/background/index_en.htm (15/6/2012).

7.2 Βασικές αρχές

Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις αξιοποιούν τη δυναμική ενέργεια που έχει μια μάζα νερού m όταν βρίσκεται σε υψομετρική διαφορά $h_{hw} - h_{tw}$. Με την πτώση του νερού από αυτή την υψομετρική διαφορά η βαρυτική δυναμική του ενέργεια $U_{grav} = m \cdot g \cdot (h_{hw} - h_{tw})$ μετατρέπεται σε κινητική. Αυτή η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική σε υδροστρόβιλο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρογεννήτριας. Η θεωρητική ισχύς που περιέχεται σε μια μάζα νερού m όταν αυτή πέφτει από μια γεωδαιτική υψομετρική διαφορά $(h_{hw} - h_{tw})$ με ογκομετρικό ρυθμό $\dot{q}_w$ είναι:

$$P_{wa,th} = \rho_{wa} g \dot{q}_w (h_{hw} - h_{tw}) \quad (7.1)$$

όπου

ρ_{wa} : η πυκνότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$\dot{q}_w$: ογκομετρικός ρυθμός πτώσης του νερού (ογκομετρική ροή)¹⁵

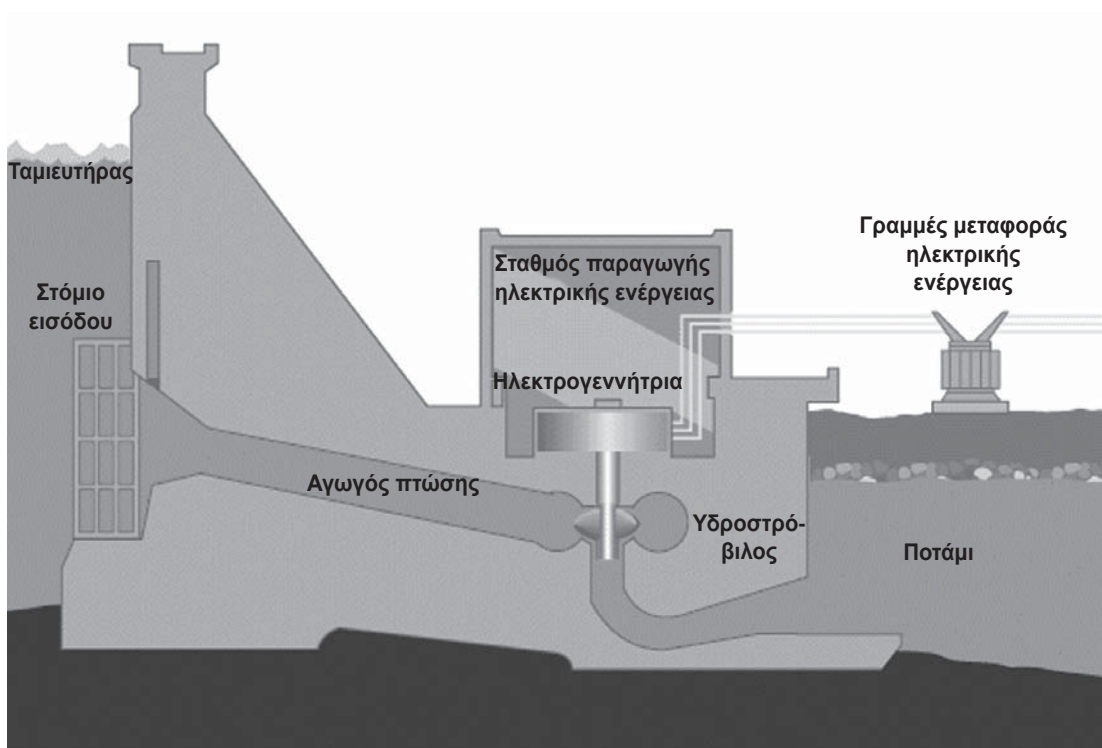
h_{hw} : αρχικό ύψος νερού [headwater]

h_{tw} : τελικό ύψος νερού [tailwater]

7.2.1 Βασική δομή μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης

Ανεξάρτητα από την κατηγορία μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης (μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους), η βασική δομή και λειτουργία της είναι ίδια. Το Σχήμα 7.1 απεικονίζει αυτήν τη δομή.

¹⁵ Δηλαδή dV/dt , που σε μονάδες SI υπολογίζεται σε m^3/s .



Σχήμα 7.1 Σχηματική αναπαράσταση μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης χαμηλής κεφαλής.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Το νερό¹⁶ φτάνει με κάποια ταχύτητα στο σημείο εισαγωγής του φράγματος που κατασκευάζεται μέσα σε ποτάμι (ή γενικότερα υδάτινο δρόμο). Πριν περάσει το νερό μέσα από το φράγμα, υπάρχει **σχάρα** [screen] καθαρισμού του από φερτά υλικά και ιζήματα που συνήθως μεταφέρονται (π.χ., κλαδιά, πέτρες, λάσπη κ.λπ.). Στη συνέχεια το νερό περνάει μέσω σωλήνα με διατομή μικρότερη (προφανώς) από τη διατομή του ποταμού, με αποτέλεσμα (σύμφωνα με την αρχή Bernoulli) η ταχύτητά του να αυξάνεται. Το νερό οδηγείται έτσι στο τμήμα που ονομάζεται **αγωγός πτώσης** ή **κανάλι προσαγωγής** [penstock], που συνδέει το άνω τμήμα του φράγματος (που ονομάζεται και **στόμιο εισόδου** [intake]) με τον υδροστρόβιλο στο κάτω τμήμα του φράγματος. Λόγω τριβών και **ανατάραξης** [turbulence] το νερό χάνει μικρό τμήμα της κινητικής του ενέργειας καθώς διασχίζει τον **αγωγό πτώσης**. Στον υδροστρόβιλο η μεταφορική κινητική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του υδροστροβίλου. Και σε αυτό το τμήμα της εγκατάστασης μέρος της κινητικής ενέργειας του νερού χάνεται (μετατρέπεται

¹⁶ Το νερό μπορεί να προέρχεται από τη φυσική ροή του ποταμού ή κυρίως, στις περιπτώσεις των μεσαίων και μεγάλων υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων, από τον ταμιευτήρα που έχει δημιουργηθεί εξαιτίας του φράγματος που έχει κατασκευαστεί.

σε θερμότητα) λόγω τριβών και ανατάραξης. Ο υδροστρόβιλος στη συνέχεια μεταφέρει την ενέργειά του σε ηλεκτρογεννήτρια, που μετατρέπει την ενέργεια που δέχεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ο ρυθμός P_{el} με τον οποίο παράγει ηλεκτρική ενέργεια η ηλεκτρογεννήτρια προκύπτει από τη θεωρητική ισχύ του νερού στο σημείο εισαγωγής του στο φράγμα P_{water} αν αφαιρεθούν οι απώλειες στο σημείο εισαγωγής [Intake], στο τμήμα κατάβασης [penstock], στον υδροστρόβιλο [turbine] και στην ηλεκτρογεννήτρια [generator]. Στα τρία πρώτα τμήματα οι απώλειες οφείλονται στις τριβές του νερού με τα υλικά των κατασκευών που έρχεται σε επαφή καθώς κινείται και σε φαινόμενα τυρβώδους ροής [turbulence flow]. Στο τμήμα της ηλεκτρογεννήτριας οφείλονται στις τριβές που δημιουργούνται κατά την κίνηση των τμημάτων σύνδεσης του υδροστρόβιλου με την ηλεκτρογεννήτρια, καθώς και στην κίνηση των τμημάτων της ίδιας της ηλεκτρογεννήτριας¹⁷.

7.2.2 Βασικός σχεδιασμός μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης

Όπως είναι φανερό από τα προηγούμενα, για τη δημιουργία μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης είναι απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη υδάτινου ρεύματος με επαρκή ογκομετρική παροχή και υψομετρική διαφορά. Η ισχύς που θα παράγει η εγκατάσταση εξαρτάται από το γινόμενο αυτών των δύο παραγόντων. Συνεπώς, η θέση που θα επιλεγεί θα πρέπει να ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Ο υπολογισμός της υψομετρικής διαφοράς είναι πολύ εύκολο να γίνει. Αυτό που συναντά αρκετές δυσκολίες και αβεβαιότητες είναι ο υπολογισμός της ογκομετρικής παροχής. Η παροχή ενός υδάτινου ρεύματος έχει σίγουρα εποχικές διακυμάνσεις (σε κλίμακα ημερών, μηνών και ετών) και επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις, η φύση του εδάφους, η κάλυψη της βλάστησης, η θερμοκρασία και η διάρθρωση της χρήσης των γαιών στη λεκάνη απορροής¹⁸. Συνεπώς, δεν έχουν νόημα οι μεμονωμένες μετρήσεις της παροχής σε συγκεκριμένα σημεία και χρονικές στιγμές εάν δε συνδυαστούν με την αξιοποίηση των πορισμάτων της επιστήμης της υδρολογίας, η οποία μελετά όλους τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν για να υπολογίσει και να προβλέψει την ογκομετρική ροή και τις διακυμάνσεις της σε μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Η μελέτη για την κατασκευή μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης ξεκινά με τη δημιουργία υδατογραφήματος της συγκεκριμένης περιοχής αξιοποιώντας αρχεία βροχόπτωσης και ροής του ρεύματος που αναφέρονται σε μεγάλες χρονικές περιό-

¹⁷ Για μια πιο αναλυτική παρουσίαση βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 349-352.

¹⁸ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 3.

δους. Έτσι, μπορούν να κατασκευαστούν καμπύλες (καμπύλη διάρκειας ροής) που εκτιμούν την ογκομετρική ροή του ρεύματος σε μεγάλη χρονική διάρκεια και την κατατάσσουν κατά μέγεθος.

Στη συνέχεια διαστασιολογείται η υδροηλεκτρική εγκατάσταση και καθορίζονται οι οικονομοτεχνικές παράμετροι για να είναι η εγκατάσταση αυτή οικονομικά βιώσιμη. Απαραίτητη προϋπόθεση για να προχωρήσει το έργο είναι η εκπόνηση προκαταρκτικής και στη συνέχεια αναλυτικής περιβαλλοντικής μελέτης που θα εγγυάται την αιφορική διάσταση της εγκατάστασης.

Από τη στιγμή που θα ληφθεί η απόφαση για την υλοποίηση του έργου και θα εξασφαλιστούν όλες οι προϋποθέσεις για να ολοκληρωθεί αρχίζουν τα λεγόμενα έργα πολιτικού μηχανικού. Αυτά αποσκοπούν στη διαμόρφωση του χώρου όπου θα κατασκευαστεί το φράγμα (κυρίως στις μεσαίες και μεγάλες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις)¹⁹. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το φράγμα²⁰ που θα δημιουργήσει τον **ταμιευτήρα**, έτσι ώστε να γίνεται αποτελεσματικά η διαχείριση του νερού (δηλαδή να είναι ελεγχόμενη η ροή του νερού στους υδροστροβίλους και να μπορεί η εγκατάσταση να αποθηκεύει υδάτινο δυναμικό σε περιόδους υπερπροσφοράς νερού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε περιόδους έλλειψης). Στα ΜΥΗΣ **εκτροπής** του νερού συνήθως κατασκευάζεται ελαφρύς υδατοφράκτης από σκυρόδεμα ή λιθοδομή που εκτρέπει το νερό από τη φυσική ροή του και το οδηγεί στον υδροστρόβιλο και στη συνέχεια ξανά στο φυσικό ρεύμα. Αυτή η κατασκευή έχει χαμηλότερο κόστος και πολύ ηπιότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά, επειδή δε δημιουργείται ταμιευτήρας, η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται αποκλειστικά από τη ροή του ποταμού κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, σε χρονικές περιόδους μειωμένης παροχής ή λειψυδρίας η ηλεκτρική ισχύς είναι μειωμένη ή μηδενική, ενώ σε περιόδους υπερπροσφοράς νερού τμήμα του νερού παραμένει ανεκμετάλλευτο, καθώς μέσω των αγωγών υπερχειλίσσης καταλήγει ξανά στον ποταμό χωρίς να περάσει από τους υδροστροβίλους.

Στα έργα πολιτικού μηχανικού περιλαμβάνεται και η κατασκευή των στομίων εισόδου στο φράγμα, των καναλιών και των αγωγών πτώσης του νερού, καθώς και των αυλακιών απαγωγής που διοχετεύουν το νερό ξανά στον ποταμό, αφού περάσει από τους υδροστροβίλους.

¹⁹ Λόγω (και) του υψηλού κόστους κατασκευής του σε μικρής κλίμακας έργα (ΜΥΗΣ) σπάνια κατασκευάζονται φράγματα.

²⁰ Της κατασκευής του φράγματος προηγείται προσεκτική γεωλογική μελέτη που θα εξασφαλίζει την κατασκευή από πιθανούς κινδύνους που σχετίζονται με τη γεωλογία της περιοχής (σεισμικός κίνδυνος από πιθανά ρήγματα, κίνδυνοι διάβρωσης του εδάφους κ.λπ.).

Μετά το τέλος των έργων του πολιτικού μηχανικού ακολουθεί ο εξοπλισμός της εγκατάστασης με τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα (υδροστρόβιλοι, ηλεκτρογεννήτριες), και η σύνδεση με το ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο ή με το μικροδίκτυο της περιοχής.

7.2.3 Κατηγορίες υδροηλεκτρικών συστημάτων ανάλογα με το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής

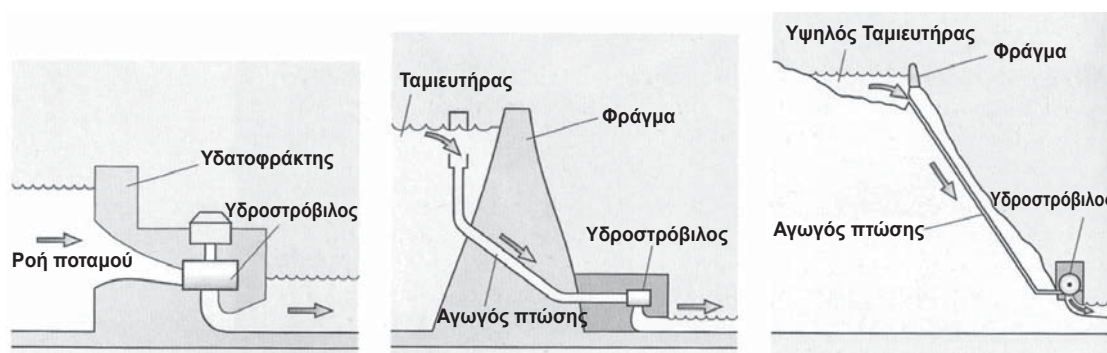
Η ηλεκτρική ισχύς υδροηλεκτρικής εγκατάστασης, όπως έχει ήδη διασαφηνιστεί, εξαρτάται από την ογκομετρική παροχή του υδάτινου ρεύματος και την υψομετρική διαφορά πτώσης του νερού στον υδροστρόβιλο που ονομάζεται **υδραυλική κεφαλή** [head of water]. Ο καθοριστικότερος παράγοντας για την επιλογή του είδους των υδροστροβίλων που θα χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση και γενικότερα για το σχεδιασμό του έργου είναι το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής. Γι' αυτόν το λόγο ο συνηθέστερος διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών συστημάτων γίνεται με βάση το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής. Αν και τα όρια της κατηγοριοποίησης είναι θολά, μπορεί να ειπωθεί ότι, όταν η υδραυλική κεφαλή είναι μικρότερη από 10 m²¹, τότε οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις θεωρούνται **χαμηλής κεφαλής**, ενώ για υδραυλικές κεφαλές μεγαλύτερες από 100 m οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις θεωρούνται **υψηλής κεφαλής**²². Τα ενδιάμεσα ύψη κατατάσσουν τις εγκαταστάσεις στα συστήματα **μεσαίας κεφαλής**.

Οι περισσότερες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις χαμηλής κεφαλής είναι ΜΥΗΣ που αξιοποιούν τη φυσική ροή ενός ποταμού (τύπου run of river)²³, ενώ οι εγκαταστάσεις μεσαίας και υψηλής κεφαλής προϋποθέτουν την κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα. Τα παρακάτω σχήματα απεικονίζουν τις εγκαταστάσεις αυτές.

²¹ Στη βιβλιογραφία ο αριθμός αυτός μπορεί να φτάσει τα 20 m (Kaltschmitt et al, 2007, σελ 355) ή ακόμα και τα 30 m σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Σύνδεσμο Μικρών Υδροηλεκτρικών (European Small Hydropower Association: ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*).

²² Boyle et al, 2004, σελ. 162.

²³ Δηλαδή λειτουργούν μόνο όταν υπάρχει ροή στον ποταμό, καθώς δε δημιουργείται ξεχωριστός ταμιευτήρας που αποθηκεύει ποσότητες νερού.



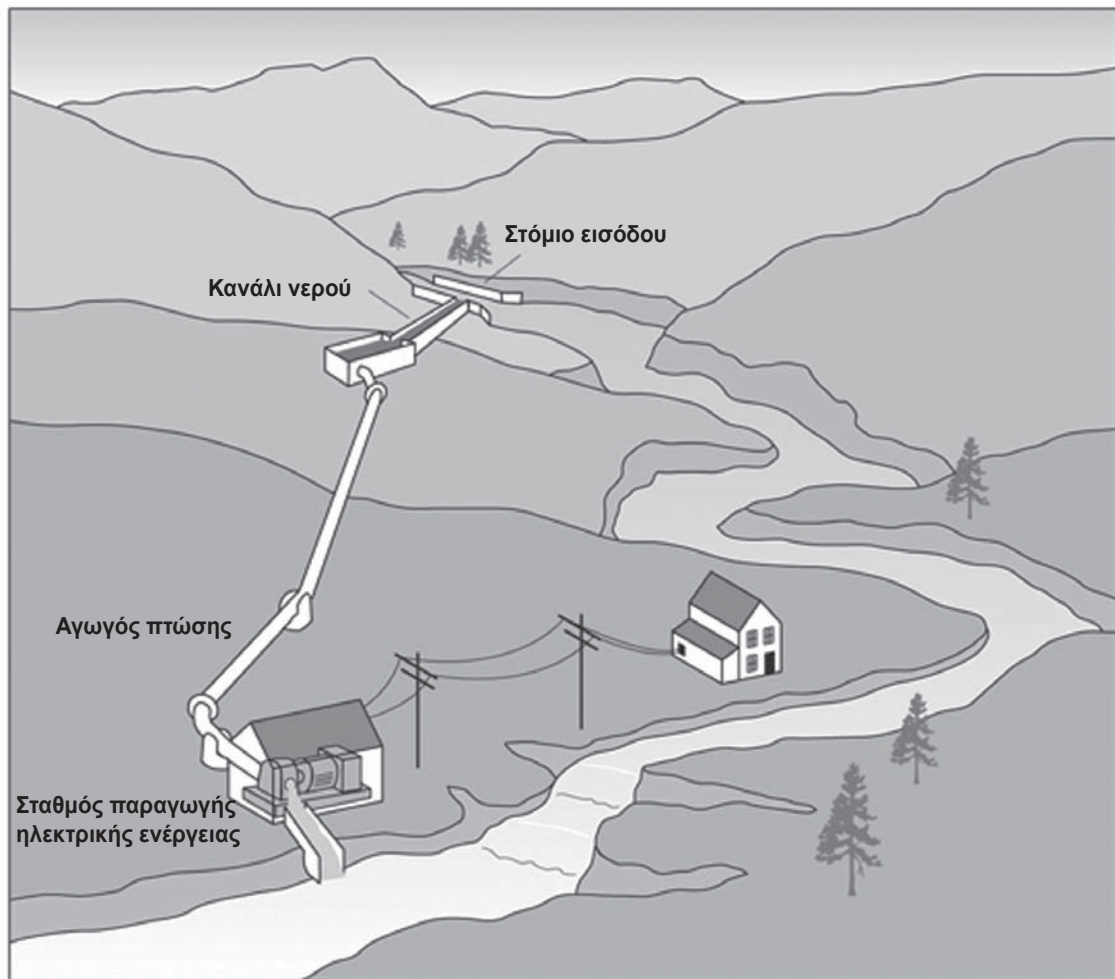
Σχήμα 7.2 Σχηματική αναπαράσταση υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων χαμηλής, μεσαίας και υψηλής κεφαλής.

(Πηγή: Oxford University Press)

Οι εγκαταστάσεις υψηλής υδραυλικής κεφαλής μπορούν να παράγουν την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ με πολύ μικρότερη ογκομετρική παροχή, αλλά χρειάζονται πολύ ισχυρά φράγματα για να αντέξουν τις τεράστιες πιέσεις που δημιουργούνται στη βάση του φράγματος από το νερό που συσσωρεύεται στον ταμιευτήρα.

Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις χαμηλής κεφαλής έχουν σχετικά μεγάλη ογκομετρική παροχή για να αντισταθμίσουν τη μικρή υψομετρική διαφορά. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν απαιτούν τη δημιουργία ταμιευτήρα. Τα φράγματα που δημιουργούνται συνήθως είναι μικρά και ελαφριά. Το νερό εκτρέπεται από τον ποταμό με τη δημιουργία φράγματος που διοχετεύει το νερό σε αυλάκι ή αγωγό για να μεταφερθεί στον υδροστρόβιλο²⁴ (Σχήμα 7.3), ή το φράγμα κατασκευάζεται σε μια πλευρά του ποταμού και ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με τους υδροστροβίλους βρίσκεται στην άλλη πλευρά. Στο σύνολο των εγκαταστάσεων που έχουν δημιουργηθεί μέχρι σήμερα υπάρχουν πολλών ειδών συνδυασμοί ανάλογα με τις ιδιομορφίες του τόπου κατασκευής του έργου.

²⁴ Μερικές φορές για να διασφαλιστεί η απαραίτητη υδραυλική κεφαλή, η απόσταση από το σημείο εκτροπής του νερού μέχρι τον υδροστρόβιλο είναι πολύ μεγάλη (της τάξης των χιλιομέτρων) (Breeze, 2005, σελ. 108).



Σχήμα 7.3 Σχηματική αναπαράσταση υδροηλεκτρικής εγκατάστασης χαμηλής κεφαλής. Εδώ δημιουργείται παράκαμψη στο ποτάμι όπου το νερό διοχετεύεται μέσω του «καναλιού προσαγωγής» στον υδροστρόβιλο για να μεγαλώσει το ύψος της υδραυλικής κεφαλής.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

7.2.4 Τα Μικρής κλίμακας Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ)

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, Μικρής κλίμακας Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ) ονομάζονται εκείνα που η ισχύς τους είναι μικρότερη από τα 10 MW²⁵. Σύμφωνα με μια κατηγοριοποίηση των ΜΥΗΣ που έχει υιοθετήσει το παγκόσμιο πρόγραμμα ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών [United Nations Development Programme], αν η ισχύς μιας υδροηλεκτρικής μονάδας είναι 1-100 kW, τότε ανήκει στην κατηγορία **μικρό** [micro], ενώ με ισχύ που κυμαίνεται μεταξύ 100 kW - 1 MW κατατάσσεται στην κατηγορία **μίνι** [mini].

Τις περισσότερες φορές στη βιβλιογραφία τα ΜΥΗΣ εξετάζονται ξεχωριστά από τα συστήματα μεσαίας ή μεγάλης κλίμακας καθώς έχουν ορισμένες τεχνικές διαφοροποιήσεις αλλά –κυρίως– διότι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος που έχουν στις περιοχές που κατασκευάζονται είναι πολύ μικρότερος απ' αυτόν της μεσαίας και μεγάλης κλίμακας.

Κάποια από τα συστήματα αυτά δεν είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο και καλύπτουν τις ανάγκες συγκεκριμένων απομονωμένων (συνήθως) περιοχών²⁶. Τα περισσότερα όμως ΜΥΗΣ έχουν σύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο των χωρών που είναι εγκατεστημένα.

Τα ΜΥΗΣ είναι συνήθως συστήματα χαμηλής κεφαλής και ισχύουν για αυτά όσα έχουν ήδη αναφερθεί. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Ευρωπαϊκού Συνδέσμου Μικρών Υδροηλεκτρικών [European Small Hydropower Association – ESHA] τα ΜΥΗΣ μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- α) στα υδροηλεκτρικά συστήματα *ροής του ποταμού* [run of river]
- β) σ' αυτά που ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατασκευασμένος στη βάση ήδη υπάρχοντος φράγματος και
- γ) σ' αυτά που ενσωματώνονται σε αρδευτικό κανάλι ή σε αγωγό μεταφοράς νερού χρήσης. Αμέσως παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά σε καθεμία απ' αυτές τις κατηγορίες²⁷.

²⁵ Υπενθυμίζεται ότι δεν υπάρχει γενική παραδοχή παγκόσμια για το κατώφλι της ισχύος που κατατάσσει ένα υδροηλεκτρικό σύστημα στα ΜΥΗΣ (για παράδειγμα, στην Κίνα είναι 25 MW, στη Γερμανία είναι 1 MW, στην Ελβετία 300 kW κ.λπ.). Η πιο μεγάλη όμως συναίνεση που υπάρχει παγκόσμια για τον καθορισμό αυτού του ορίου είναι τα 10 MW και αυτό ισχύει και στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

²⁶ Τέτοιες (για παράδειγμα) είναι οι περιπτώσεις σειράς ΜΥΗΣ που έχουν κατασκευαστεί στο Νεπάλ στην οροσειρά των Ιμαλαΐων, που προμηθεύουν με ηλεκτρικό ρεύμα απομονωμένους οικισμούς.

²⁷ Για περισσότερα βλ. ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*.

α) Υδροηλεκτρικά συστήματα ροής του ποταμού

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, τα συστήματα αυτά λειτουργούν μόνο όταν υπάρχει ροή στον ποταμό, καθώς δε δημιουργείται ταμιευτήρας (ή είναι πολύ μικρός) για την αποθήκευση νερού. Το νερό εκτρέπεται από τον ποταμό και οδηγείται στον υδροστρόβιλο μέσα από αυλάκι ή αγωγό χαμηλής πίεσης. Αν η ροή του ποταμού είναι κάτω από ένα όριο, οι υδροστρόβιλοι διακόπτουν τη λειτουργία τους.

β) Υδροηλεκτρικά συστήματα με την ηλεκτρογεννήτρια εγκατεστημένη στη βάση ήδη υπάρχοντος φράγματος

Σε περιπτώσεις που ένα φράγμα είναι ήδη κατασκευασμένο για σκοπούς ύδρευσης, άρδευσης, έλεγχου πλημμυρών κ.λπ. είναι δυνατόν να γίνεται περιοδική εκφόρτιση του φράγματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδροστροβίλου και ηλεκτρογεννήτριας που εγκαθίστανται στη βάση του φράγματος.

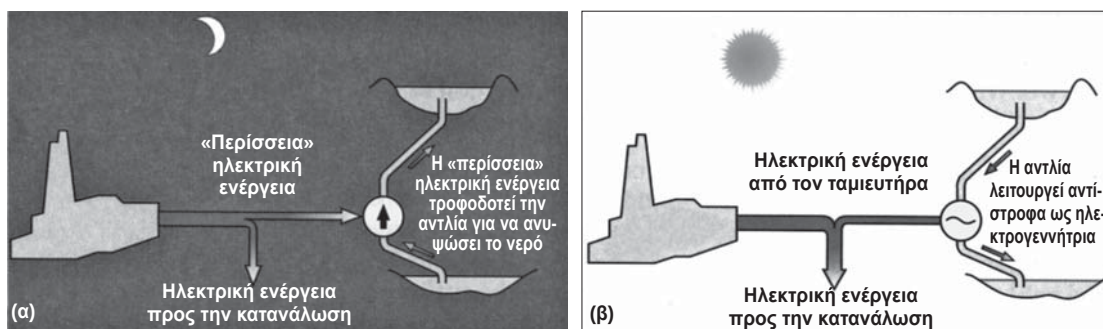
γ) Υδροηλεκτρικά συστήματα ενσωματωμένα σε αρδευτικό κανάλι ή αγωγό μεταφοράς νερού χρήσης

Υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης υδροστροβίλου και ηλεκτρογεννήτριας σε αρδευτικό κανάλι. Αυτή η εγκατάσταση μπορεί είτε να γίνει σε προϋπάρχον κανάλι με διάνοιξη του πλάτους του είτε να κατασκευαστεί ταυτόχρονα με τη διάνοιξη του καναλιού. Στην περίπτωση αγωγού μεταφοράς νερού χρήσης (και πόσιμου νερού) ο υδροστρόβιλος τοποθετείται στο τέλος του σωλήνα που οδηγεί το νερό στο εργοστάσιο επεξεργασίας του.

7.2.5 Τα υδροηλεκτρικά συστήματα με αντλίες αντιστροφής και δύο ταμιευτήρες

Τα συστήματα αυτά είναι κυρίως μεσαίας ισχύος και ουσιαστικά επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες που δε χρειάζεται να διατεθεί στο δίκτυο και την αποδίδουν σε ώρες ή περιόδους αιχμής. Πώς επιτυγχάνεται αυτό; Με την κατασκευή δύο ταμιευτήρων σε υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Όταν η ποσότητα του νερού στο χαμηλό ταμιευτήρα είναι αρκετή και το δίκτυο δε χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια, τότε αντλίες μεταφέρουν το νερό προς τον υψηλό ταμιευτήρα. Το νερό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτροπαραγωγή με την κάθοδό του από τον υψηλό στο χαμηλό ταμιευτήρα όταν κριθεί απαραίτητο²⁸.

²⁸ Η δυνατότητα του ηλεκτρικού δικτύου να ανταποκρίνεται γρήγορα σε απότομες αυξήσεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ή να αναπληρώνει άμεσα την απώλεια ισχύος ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής που

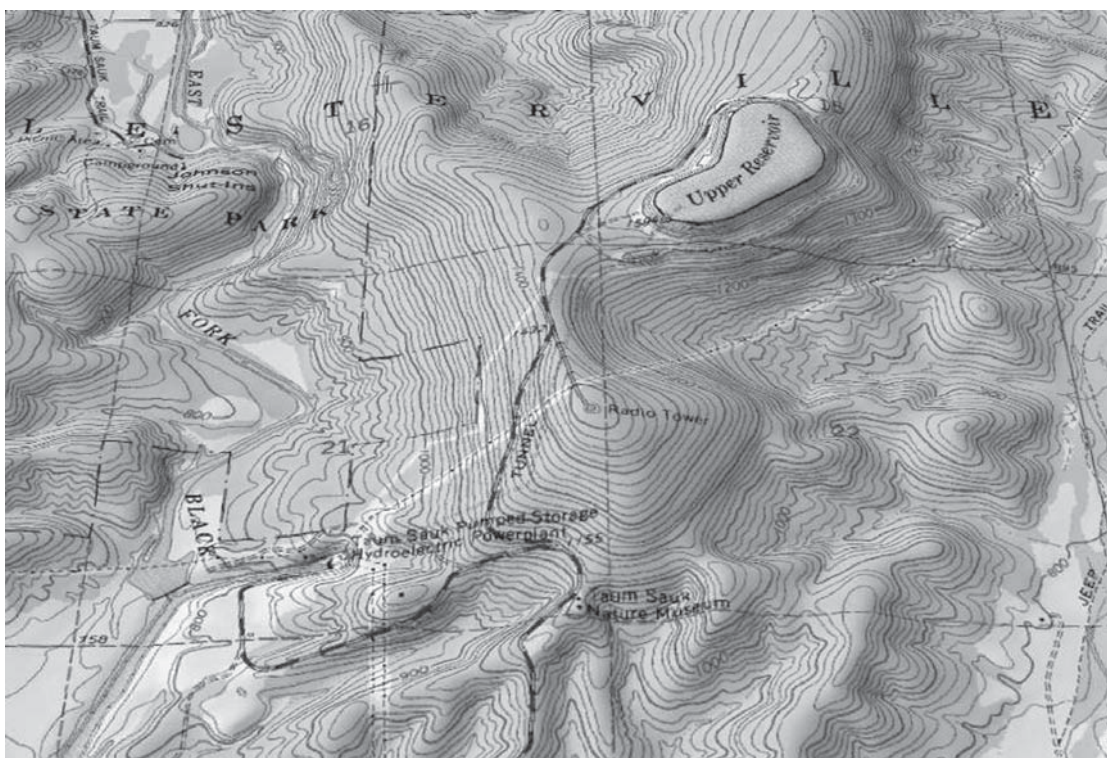


Σχήμα 7.4 Σχηματική αναπαράσταση υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων με αντλίες αντιστροφής και δύο ταμιευτήρες α) τη χρονική περίοδο χαμηλής ζήτησης (μεταφορά νερού από το χαμηλό στον υψηλό ταμιευτήρα αξιοποιώντας την περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια), β) τη χρονική περίοδο υψηλής ζήτησης (το νερό κατεβαίνει απ' τον υψηλό στο χαμηλό ταμιευτήρα παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια).

(Πηγή: Oxford University Press)

Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις αυτού του τύπου στηρίζουν τη λειτουργία τους σε ειδικά κατασκευασμένους **αντλιοστροβίλους**, δηλαδή σε ένα τεχνολογικό υβρίδιο που συνδυάζει τις λειτουργίες της αντλίας και του στροβίλου. Αυτοί οι αντλιοστροβίλοι συνδυάζονται με κατάλληλες ηλεκτρογεννήτριες, που μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα. Δηλαδή, όταν το σύστημα με την πτώση του νερού παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η λειτουργία του στροβίλου και της γεννήτριας είναι η κλασική (ο υδροστροβίλος μετατρέπει την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική και η ηλεκτρογεννήτρια τη μηχανική ενέργεια του υδροστροβίλου σε ηλεκτρική). Στην αντίστροφη λειτουργία η ηλεκτρογεννήτρια παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στον υδροστροβίλο, που λειτουργεί ως αντλία και μεταφέρει το νερό προς τα επάνω (στον υψηλό ταμιευτήρα) δίνοντας ουσιαστικά στο νερό βαρυτική δυναμική ενέργεια.

έπαθε βλάβη είναι πάρα πολύ σημαντική στη σύγχρονη βιομηχανική κοινωνία. Γι' αυτό η ύπαρξη **εφεδρικών** [backup] συστημάτων που θα ανταποκρίνονται άμεσα είναι αναγκαία. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα με αντλίες αντιστροφής είναι τέτοιου είδους εφεδρικά συστήματα που μπορούν να συνεργαστούν και με συμβατικά τα οποία σε χρονικές περιόδους μειωμένης ζήτησης μπορούν να προσφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν στα υδροηλεκτρικά συστήματα για να την αποθηκεύσουν με τη μορφή βαρυτικής δυναμικής ενέργειας του νερού, και να την επιστρέψουν ως ηλεκτρική όταν είναι αναγκαίο (αντλιοσταμιευτικά συστήματα).



Σχήμα 7.5 Τοπογραφική πλάγια όψη της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης Taum Sauk με αντλίες αντιστροφής και δύο ταμιευτήρες που βρίσκεται στο Missouri (ΗΠΑ). Η κατασκευή της εγκατάστασης άρχισε το 1960 και τέθηκε σε λειτουργία το 1963. Οι δύο αρχικές αναστρέψιμες αντλίες-ηλεκτρογεννήτριες ήταν ισχύος 175 MW η καθεμία. Το 1999 αναβαθμίστηκαν σε ισχύ 225 MW καθεμία. Η εγκατάσταση τέθηκε εκτός λειτουργίας όταν κατέρρευσε ο υψηλός ταμιευτήρας δημιουργώντας τεράστιες ζημιές και στο γειτονικό φυσικό πάρκο στις 14 Δεκεμβρίου 2005. Μετά την ανοικοδόμηση και την επαναπιστοποίησή της η εγκατάσταση άρχισε να παράγει και πάλι ενέργεια στις 21 Απριλίου 2010. Ο υψηλός ταμιευτήρας βρίσκεται σε υψομετρική διαφορά από το χαμηλό κατά 240 m, ενώ το τούνελ που μεταφέρει το νερό μεταξύ των δύο έχει μήκος 2.100 m. (Πηγή: commons.wikimedia.org)

Η συνολική απόδοση των **υβριδικών** (αντλησιοταμιευτικών) συστημάτων ήταν περίπου 40% όταν ξεκίνησε η εφαρμογή τους στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενώ το 1991 ήταν 70-80%²⁹. Το 1990 υπήρχαν παγκοσμίως 283 τέτοιες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 74 GW³⁰, ενώ το 2001 η ισχύς είχε ανέλθει στα 86 GW από τα συνολικά 420 GW υδροηλεκτρικής ισχύος που ήταν εγκατεστημένα μέχρι τότε³¹.

²⁹ Johansson et al, 1993, σελ. 87.

³⁰ ο.π.

³¹ Boyle et al, 2004, σελ. 185.

7.3 Τεχνική περιγραφή

Στις παραπάνω παραγράφους έχει γίνει αναφορά στη διαφοροποίηση μεταξύ των Μικρής Ισχύος Υδροηλεκτρικών Συστημάτων (ΜΥΗΣ) και εκείνων της μεσαίας και μεγάλης ισχύος. Παρ' όλες όμως τις διαφορές που έχουν, μπορεί κάποιος να ισχυριστεί ότι τα περισσότερα στοιχεία της δομής των υδροηλεκτρικών συστημάτων είναι όμοια, αν και διαφέρουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και η κλίμακα. Ακολουθεί η συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των βασικών στοιχείων της δομής των υδροηλεκτρικών συστημάτων. Για πιο εκτεταμένη και λεπτομερέστερη παρουσίαση ο αναγνώστης θα πρέπει να συμβουλευτεί περισσότερο εξειδικευμένες πηγές³².

7.3.1 Τα βασικά στοιχεία της δομής των υδροηλεκτρικών συστημάτων

Τα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα υδροηλεκτρικό σύστημα είναι το φράγμα, ο ταμιευτήρας, το στόμιο εισόδου, οι αγωγοί πτώσης, το σύστημα απαγωγής του νερού και η *μονάδα παραγωγής ισχύος* [power house] που εμπεριέχει τους υδροστρόβιλους, τις ηλεκτρογεννήτριες, τους (πιθανούς) μετασχηματιστές και τα συστήματα ελέγχου. Στα μεσαία και μεγάλα υδροηλεκτρικά συστήματα τα προηγούμενα τμήματα της δομής είναι παρόντα, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με τα περισσότερα στοιχεία για τα ΜΥΗΣ. Βέβαια, στα ΜΥΗΣ κάποιο τμήμα μπορεί να μην υπάρχει (π.χ., ο ταμιευτήρας) ή κάποια άλλα να έχουν ορισμένες ιδιαιτερότητες. Παρακάτω θα γίνεται ξεχωριστή αναφορά σε αυτές τις ιδιαιτερότητες για τα ΜΥΗΣ.

α) Φράγματα, υδατοφράκτες

Το φράγμα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των μεσαίων και μεγάλων υδροηλεκτρικών συστημάτων, γιατί δημιουργεί τον ταμιευτήρα (δηλαδή τη δεξαμενή συγκέντρωσης του νερού) και αυξάνει την υδραυλική κεφαλή του συστήματος. Επίσης και σε ΜΥΗΣ υπάρχει κάποια μορφή *φράγματος* [weir] ή *υδατοφράκτη* [barrage] με στόχο την εκτροπή του νερού από το ποτάμι και την προώθησή του στον υδροστρόβιλο ή την αύξηση της υδραυλικής κεφαλής.

³² Αρκετές λεπτομέρειες παρουσιάζονται από τους Kaltschmitt et al, 2007. Για το συγκεκριμένο θέμα βλ. σελ. 352-369. Για τα Μικρής Ισχύος Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ) πολύ χρήσιμος είναι ο οδηγός της της Ευρωπαϊκής Ένωσης για Μικρά Υδροηλεκτρικά (ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*).

Το φράγμα, με τη γενικότερη έννοια ως εμποδίου στην ελεύθερη καθοδική κίνηση του νερού μέσα στο ποτάμι, μπορεί να έχει πολλές μορφές και να είναι κατασκευασμένο από ποικίλα υλικά. Το φράγμα μπορεί να είναι υδατοφράκτης με κινούμενα ή μη κινούμενα μέρη (θύρες) κατασκευασμένος από σκυρόδεμα, να είναι υδατοφράκτης με σχισμές σε διάφορες τομές, να είναι ανάχωμα από πέτρες, να είναι λιθοδομή ή μπορεί να είναι κλασικό τεράστιο φράγμα από σκυρόδεμα.

Μια κατηγοριοποίηση της ESHA διακρίνει δύο κατηγορίες φραγμάτων: τα φράγματα από φυσικά υλικά (πέτρες κ.λπ.) σε μορφή *αναχώματος* [embankment] και τα φράγματα από σκυρόδεμα³³. Παγκόσμια τα φράγματα αναχώματος είναι η πλέον συνηθισμένη μορφή, καθώς έχουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται φυσικά τοπικά υλικά, μπορούν να κατασκευαστούν σε μια ποικιλία γεωμορφολογικών συνθηκών κ.λπ. Τα φράγματα από σκυρόδεμα είναι οι πιο συνηθισμένες κατασκευές για τα μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικά συστήματα³⁴. Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες και είδη τόσο φραγμάτων αναχώματος³⁵ όσο και φραγμάτων από σκυρόδεμα³⁶.

Σε ΜΥΗΣ που ο βασικός στόχος του φράγματος είναι να διατηρεί συνεχώς την υδραυλική κεφαλή σε συγκεκριμένο ύψος, η συνηθέστερη επιλογή είναι υδατοφράκτης [weir]. Ο υδατοφράκτης μπορεί να έχει διάφορες μορφές και παραλλαγές και είναι συνήθως είτε σταθερού είτε κινητού τύπου. Οι υδατοφράκτες κινητού τύπου διαθέτουν κάποια μορφή ανοιγοκλεινόμενων θυρών. Οι ενσωματωμένες θύρες ανοίγουν στις περιπτώσεις που η ροή του νερού στους υδροστροβίλους υπερβαίνει το μέγιστο μέγεθος εκφόρτισης που έχει υπολογιστεί για το συγκεκριμένο σύστημα³⁷. Σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχουν διάφορα είδη κατασκευών [fish pass] που επιτρέπουν την ανοδική και καθοδική κίνηση των ψαριών μέσα ή δίπλα από το φράγμα.

Β) Ταμιευτήρες

Η δημιουργία ταμιευτήρα σε υδροηλεκτρική εγκατάσταση, ανάλογα με το μέγεθός του, έχει στόχο την αποθήκευση του νερού σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία ή ετήσια βάση. Η παρουσία του επιτρέπει τη διαχείριση της ροής του νερού

³³ Στην Ευρώπη στις περιοχές βορείως των Άλπεων τα φράγματα αναχώματος είναι τα επικρατέστερα, καθώς η γεωμορφολογία του εδάφους ευνοεί τη δημιουργία τους, ενώ νοτίως των Άλπεων επικρατούν τα φράγματα από σκυρόδεμα (ESHA, 2004).

³⁴ ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*, σελ. 94.

³⁵ ο.π. σελ. 95.

³⁶ «Gravity dams», «Buttress dams», «Arch and Cupola dams». Για περισσότερα βλ. ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*, σελ. 95-96.

³⁷ Για περισσότερα βλ. ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*, σελ. 100-108.

προς τους στροβίλους και μπορεί να εξασφαλίσει σταθερή ροή που επηρεάζεται λιγότερο από εποχιακές διακυμάνσεις. Επίσης σε υδροηλεκτρικά συστήματα με αντλίες αντιστροφής εξασφαλίζεται η δυνατότητα για την παροχή ισχύος αιχμής εκτός από την παροχή ισχύος φορτίου που εξασφαλίζει ο υδροηλεκτρικός σταθμός. Η δημιουργία ταμιευτήρα μπορεί να είναι ευκολότερη σε ορεινές περιοχές που οι γεωμορφολογικές φυσικές συνθήκες ευνοούν την αποθήκευση νερού χωρίς ουσιαστικά τεχνητές κατασκευές.

γ) Στόμια εισόδου [intake]

Η βασική λειτουργία του στομίου εισόδου είναι να κατευθύνει το νερό από τον ποταμό ή τον ταμιευτήρα προς τον αγωγό πτώσης ή το κανάλι προσαγωγής σε ελεγχόμενες συνθήκες³⁸. Η σχεδιάσή του πρέπει να είναι πολύ προσεκτική έτσι ώστε να αποφεύγονται περιττή συντήρηση ή λειτουργικά προβλήματα που δεν μπορούν να διορθωθούν εύκολα, καθώς το στόμιο εισόδου αποτελεί δομικό στοιχείο της κατασκευής³⁹. Το βασικότερο στοιχείο του σχεδιασμού του στομίου εισόδου είναι ο προσανατολισμός του σε σχέση με το ρεύμα, γιατί, αν δεν είναι ο ενδεδειγμένος, θα δημιουργούνται συνεχώς προβλήματα συντήρησης εξαιτίας κυρίως των φερτών υλικών και των ιζημάτων που μεταφέρονται, αλλά και προβλήματα που συνδέονται με την υπερχείλιση. Για την προφύλαξη των στροβίλων από τα φερτά υλικά στην είσοδο του στομίου τοποθετούνται σχάρες απορριμμάτων. Επίσης βασικό δομικό στοιχείο του στομίου εισόδου αποτελεί ένας προσεκτικά σχεδιασμένος υπερχειλίστης που εξασφαλίζει τη σταθερή ογκομετρική ροή του νερού προς το στρόβιλο. Τέλος, ιδιαίτερα σε μεγάλες εγκαταστάσεις, τοποθετούνται θύρες που αποκόπτουν τη ροή του νερού προς τους στροβίλους σε περιπτώσεις συντήρησης ή βλάβης στη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου βρίσκονται οι στρόβιλοι και οι ηλεκτρογεννήτριες. Στην περίπτωση των ΜΥΗΣ οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις πρέπει να είναι οι μικρότερες δυνατές στην κατασκευή του στομίου εισόδου και χρειάζεται να γίνει πρόβλεψη για τη δημιουργία *ιχθυοπερασμάτων* [fish passes].

δ) Κανάλια

Το νερό από το στόμιο εισόδου κατευθύνεται στον υδροστρόβιλο είτε κατευθείαν μέσω των αγωγών πτώσης ή αφού πρώτα περάσει από τεχνητό κανάλι ή σωλήνα λόγω μεγάλης απόστασης από το στόμιο εισόδου μέχρι τους αγωγούς πτώσης. Τα

³⁸ Ιδιαίτερα στα ΜΥΗΣ πρέπει να εμποδίζεται και η μικρότερη πιθανή μείωση της υδραυλικής κεφαλής, καθώς το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής είναι ιδιαίτερα σημαντικό σ' αυτά τα συστήματα.

³⁹ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 9.

κανάλια πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να επιτρέπουν την απρόσκοπτη κίνηση του νερού με ταχύτητα αρκετά μικρή για να αποφεύγεται η διάβρωση του καναλιού και αρκετά μεγάλη για να αποτρέπει την ιζηματοπόθεση και την ανάπτυξη υδρόβιων φυτών στο εσωτερικό των καναλιών.

ε) Αγωγοί πτώσης

Όπως προαναφέρθηκε, το νερό απ' το στόμιο εισόδου είτε κατευθείαν είτε μέσω καναλιών καταλήγει σε αγωγούς που κατευθύνουν το νερό προς τους υδροστροβίλους. Οι αγωγοί αυτοί μπορεί να είναι υπερδάφιοι ή υπεδάφιοι ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους, τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος, το υλικό του αγωγού, καθώς και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου. Για παράδειγμα, σε έδαφος με κατάλληλη κλίση και σύσταση μπορεί να τοποθετηθεί επιφανειακά εύκαμπτος πλαστικός αγωγός με μικρή διάμετρο που θα ακολουθεί το ανάγλυφο του εδάφους. Αντίθετα σε περιοχές με έντονες θερμοκρασιακές διαφορές στη διάρκεια της ημέρας ή του έτους και με ανάγλυφο της περιοχής που δεν προσφέρεται για επιφανειακή τοποθέτηση, ο αγωγός θα πρέπει να τοποθετηθεί κάτω από το έδαφος και ως υλικό κατασκευής να επιλεγεί, π.χ., ο χάλυβας. Σε κάθε περίπτωση καθορίζονται προσεκτικά τα δομικά στοιχεία των σωλήνων (υλικό, διάμετρος, πάχος κ.λπ.) έτσι ώστε οι σωλήνες να αντέχουν στις πιέσεις και στη διάβρωση και να διευκολύνουν την κίνηση του νερού στο εσωτερικό τους μειώνοντας στο ελάχιστο τις τριβές⁴⁰.

στ) Υδροστροβίλοι [turbines]

Παρουσιάζονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 7.3.2.

ζ) Αυλάκια απαγωγής

Το νερό, αφού περάσει από τους στροβίλους, επιστρέφει στον ποταμό μέσω μικρών καναλιών που ονομάζονται αυλάκια απαγωγής. Στις περιπτώσεις που οι στροβίλοι είναι τύπου ώθησης το αυλάκι απαγωγής πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένο που να μην παρεμποδίζει το δρομέα του στροβίλου (που τονίζεται ότι περιστρέφεται στον αέρα). Στις περιπτώσεις που οι στροβίλοι είναι τύπου αντίστασης η στάθμη του νερού στο αυλάκι απαγωγής καθορίζει το διαθέσιμο ύψος πτώσης και έχει κατα-

⁴⁰ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 12-13, Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 361, ESHA, 2004, *Guide on how to develop a Small Hydro Site*, σελ. 134-148.

λυτική επίδραση στην οικονομική επίδοση των εγκαταστάσεων στα συστήματα με χαμηλή υδραυλική κεφαλή⁴¹.

η) Σύστημα μετάδοσης ενέργειας από το στρόβιλο στην ηλεκτρογεννήτρια

Ο στρόβιλος και η ηλεκτρογεννήτρια μπορεί να είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο άξονα και η μηχανική ενέργεια να μεταφέρεται στη γεννήτρια μέσω ενός απλού *συζευκτήρα* [coupler]. Αυτό συνήθως συμβαίνει στις εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος. Στα μικρότερα όμως συστήματα και ιδιαίτερα στα ΜΥΗΣ⁴² χρησιμοποιούνται πιο σύνθετοι μηχανισμοί μετάδοσης, καθώς αυτοί επιτρέπουν την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής στην ηλεκτρογεννήτρια. Μ' αυτό τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συνηθισμένες ηλεκτρογεννήτριες υψηλής ταχύτητας μειώνοντας έτσι το κόστος του εξοπλισμού. Οι αποδόσεις των μηχανισμών μετάδοσης φτάνουν σε ποσοστά της τάξης 95-98%.⁴³

θ) Ηλεκτρογεννήτριες

Στις ηλεκτρογεννήτριες γίνεται η μετατροπή της μηχανικής περιστροφικής ενέργειας του στροβίλου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι γεννήτριες μπορεί να είναι *σύγχρονες* ή *ασύγχρονες*⁴⁴. Οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται κυρίως σε απομονωμένα συστήματα ή σε συστήματα που η υδροηλεκτρική εγκατάσταση είναι ο βασικός πάροχος του δικτύου. Οι ασύγχρονες χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις που συνδέονται στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο γιατί είναι φτηνότερες και απλούστερες, αν κι έχουν λίγο μικρότερη απόδοση. Στα ΜΥΗΣ οι αποδόσεις των γεννητριών είναι της τάξεως του 90% με 95%, ενώ στις μεγάλες εγκαταστάσεις η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 95% και 99%.

ι) Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι αναγκαίοι όταν χρειάζεται η μετατροπή της τάσης (συνήθως ανύψωση) για τη μεταφορά της από την ηλεκτρογεννήτρια προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Η απόδοση των μετασχηματιστών είναι πολύ υψηλή και φτάνει το 99%.

⁴¹ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 14.

⁴² Σ' εκείνα τα συστήματα που η υδραυλική κεφαλή είναι χαμηλή, η γωνιακή περιστροφική ταχύτητα στο στρόβιλο είναι μικρή (π.χ., 75 rpm).

⁴³ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 368.

⁴⁴ Για περισσότερα για τις ηλεκτρογεννήτριες βλέπε στο κεφ. 5 για την αιολική ενέργεια.

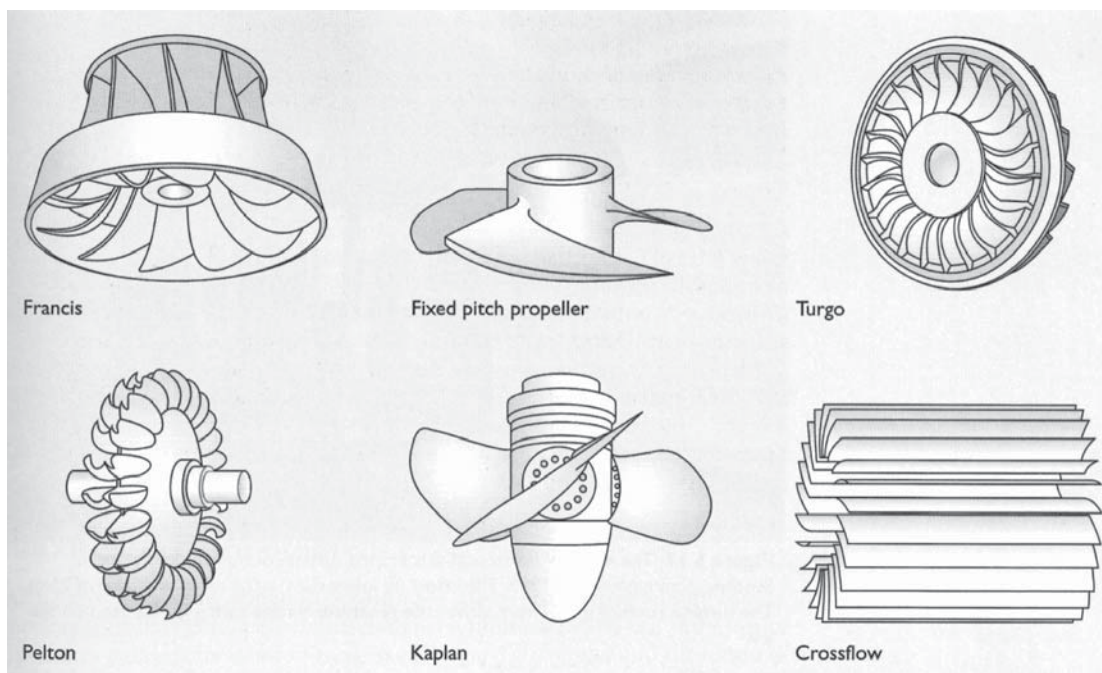
7.3.2 Οι υδροστροβίλοι

Ο υδροστροβίλος είναι το τμήμα της εγκατάστασης όπου η μεταφορική κινητική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του στροβίλου. Οι προπομποί του στροβίλου στις εγκαταστάσεις αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας ήταν οι *νεροτροχοί* [water wheels], που σήμερα κυρίως λειτουργούν είτε σε επιδεικτικές-εκπαιδευτικές είτε σε διατηρητέες παλαιές εγκαταστάσεις.

Εξαιτίας της ποικιλίας των υδραυλικών κεφαλών και των ογκομετρικών ροών του νερού και της συνεπαγόμενης ποικιλίας της πίεσης και της ταχύτητας του νερού που προσπίπτει έχουν κατασκευαστεί τους δύο τελευταίους αιώνες διαφορετικοί τύποι υδροστροβίλων. Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς της κινητικής ενέργειας του νερού στο δρομέα του στροβίλου που αποκτά έτσι μηχανική ενέργεια περιστροφής, οι υδροστροβίλοι μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- στους **υδροστροβίλους ώθησης** [impulse turbines] και
- στους **υδροστροβίλους αντίδρασης** [reaction turbines]

Οι υδροστροβίλοι ώθησης στηρίζουν τη λειτουργία τους στη μετατροπή της μεταφορικής κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του στροβίλου μέσω της εκτόξευσης του νερού από ακροφύσιο (ένα ή περισσότερα) πάνω στα περύγια του δρομέα του στροβίλου. Έτσι, το νερό προσδίδει ώθηση στο δρομέα του στροβίλου για να περιστραφεί. Γνωστοί υδροστροβίλοι ώθησης είναι ο λεγόμενος *Pelton*, ο λεγόμενος *Turgo*, καθώς και ο τύπου *εγκάρσιας ροής* [cross-flow].



Σχήμα 7.6 Σχηματική αναπαράσταση υδροστροβίλων διαφόρων τύπων.
(Πηγή: Oxford University Press)

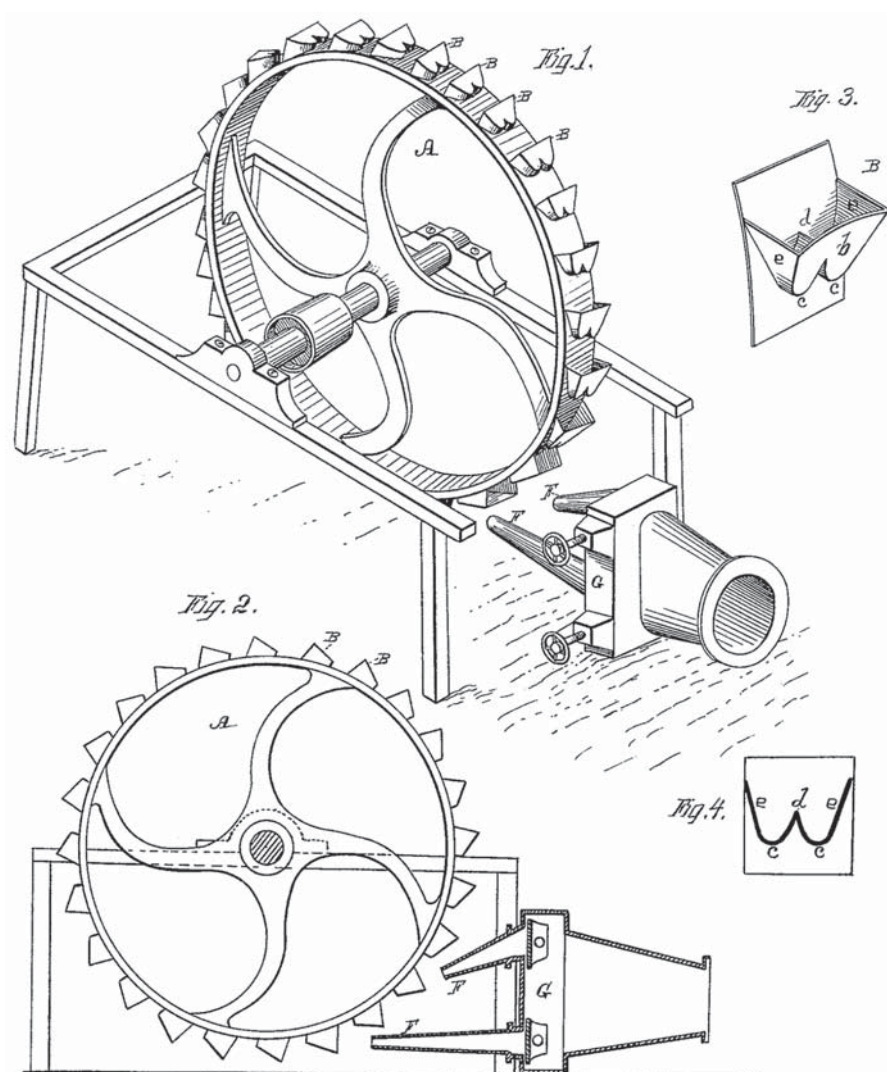
Στους υδροστροβίλους αντίδρασης το νερό κατακλύζει το δρομέα και μεταφέρει την κινητική του ενέργεια μέσω της πίεσης που ασκεί στην επιφάνεια των πτερυγίων του δρομέα. Η πίεση του νερού είναι μεγάλη κατά την είσοδό του στο στρόβιλο και εξασθενεί καθώς κατευθύνεται προς την έξοδο. Υδροστρόβιλοι αντίδρασης είναι ο λεγόμενος *Francis*, ο *Kaplan*, καθώς και ο τύπου έλικας [propeller].

α) Οι Στρόβιλοι Pelton και Turgo

Ο στρόβιλος Pelton είναι ο τύπος στροβίλου *ώθησης* που χρησιμοποιείται συχνότερα σήμερα και πήρε το όνομά του από τον Αμερικανό μηχανικό που τον δημιούργησε το 1879. Αυτού του τύπου οι στρόβιλοι χρησιμοποιούνται για υψηλές υδραυλικές κεφαλές, συνήθως πάνω από 200 m και μέχρι 1.000 m (για υδραυλικές κεφαλές πάνω από 1.000 m εγκαθίστανται δύο στρόβιλοι, που ο καθένας εκμεταλλεύεται το μισό ύψος)⁴⁵. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ειδικά σχεδιασμένοι μικροί στρόβιλοι Pelton και σε μικρότερης ισχύος υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, αρκεί η υδραυλική κεφαλή να είναι πάνω από 30 m⁴⁶.

⁴⁵ Breeze, 2005, σελ. 110.

⁴⁶ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 366.

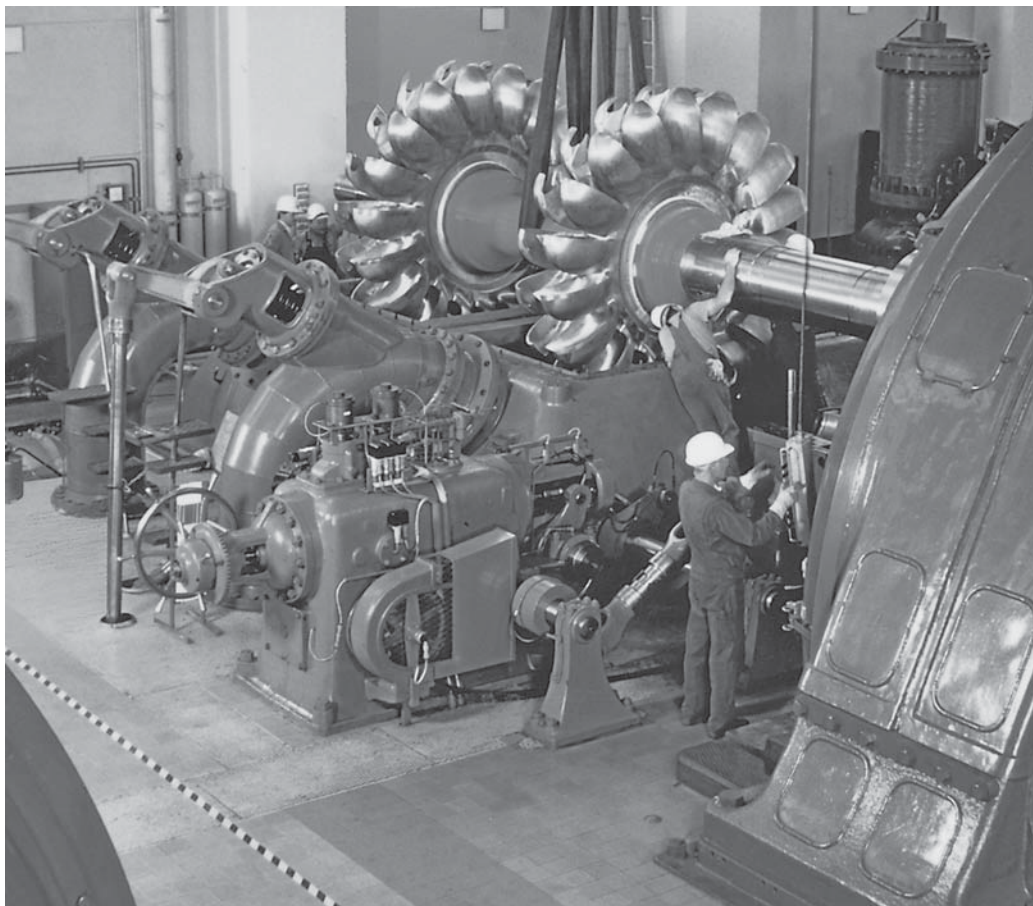


Σχήμα 7.7 Αυθεντική σχηματική αναπαράσταση του υδροστροβίλου τύπου Pelton από την αίτηση για την κατοχύρωση της ευρεσιτεχνίας (πατέντας) του Αμερικανού μηχανικού Lester Allan Pelton, που τον δημιούργησε (Οκτώβριος 1880).

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Ο υδροστρόβιλος Pelton διαθέτει δρομέα (τροχός Pelton) με πτερύγια που έχουν τη μορφή κάδου. Το νερό που φτάνει στη βάση της υδραυλικής κεφαλής σε υψηλή πίεση (λόγω του μεγάλου ύψους) οδηγείται προς το δρομέα του στροβίλου μέσω ενός ή περισσότερων ακροφυσίων – που αυξάνουν ακόμα περισσότερο την πίεσή του. Τη στιγμή που απελευθερώνεται προς το δρομέα το νερό δημιουργεί **ισχυρότατο ρεύμα [jet]**, το οποίο προσπίπτει εφαπτομενικά στους κάδους του δρομέα. Περίπου το 95% (αυτή είναι η θεωρητική απόδοση του στροβίλου) της μεταφορικής

κινητικής ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε μηχανική περιστροφική ενέργεια του στρόβιλου μέσω της ώθησης που ασκείται από το νερό στους κάδους του δρομέα.



Εικόνα 7.2 Οι υδροστρόβιλοι Pelton στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση του Walchensee Power Plant στη Γερμανία.

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ο υδροστρόβιλος Pelton (όπως και όλοι οι στρόβιλοι ώθησης) χρειάζεται να λειτουργεί στον αέρα κι όχι βυθισμένος στο νερό, όπως γίνεται στους στροβίλους αντίδρασης.

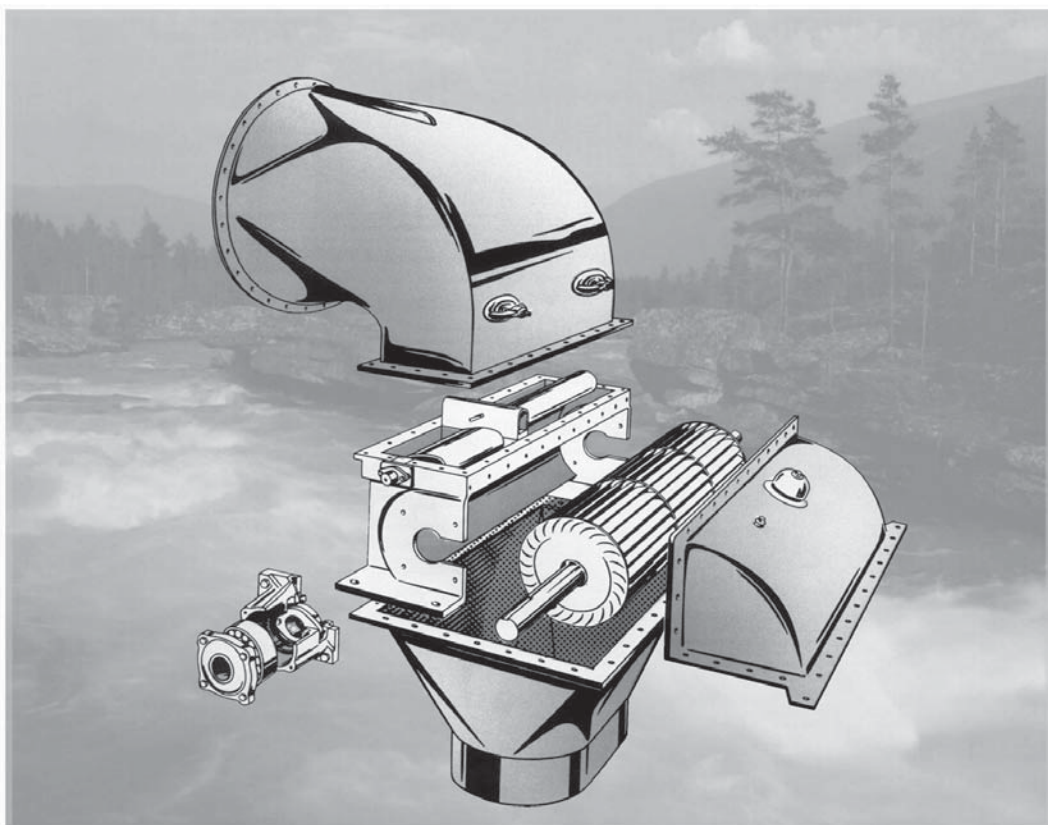
Ο υδροστρόβιλος Turgo αποτελεί παραλλαγή του Pelton κι είναι τύπος υδροστροβίλου που έχει επίσης αναπτυχθεί κυρίως για εφαρμογές υψηλής υδραυλικής κεφαλής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υδραυλικές κεφαλές που κυμαίνονται από 30-300 m⁴⁷. Σ' αυτόν το στρόβιλο (που αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1920)

⁴⁷ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 17.

οι κάδοι του δρομέα δεν είναι διπλοί (όπως στον Pelton) αλλά μονοί και ρηχότεροι. Αυτή η κατασκευή τού επιτρέπει να εκφορτίζει μεγαλύτερους όγκους νερού στον ίδιο χρόνο, σε σύγκριση με στρόβιλο Pelton ίδιας διαμέτρου, παράγοντας έτσι μεγαλύτερη ισχύ κυρίως σε υδραυλικές κεφαλές μεγάλου ύψους.

β) Στρόβιλος εγκάρσιας ροής [cross-flow]

Αυτός ο υδροστρόβιλος συχνά ονομάζεται στη βιβλιογραφία και Ossberger (από το όνομα της εταιρείας που το κατασκευάζει για πάνω από 50 χρόνια) ή Mitchell-Banki. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ευρύ φάσμα «υδραυλικών κεφαλών» επικαλύπτοντας την εμβέλεια υδροστροβίλων όπως ο Kaplan, ο Francis ή ο Pelton. Είναι υδροστρόβιλος *ώθησης*, με το νερό να προσπίπτει πάνω στα επίπεδα φύλλα από τα οποία αποτελείται ο δρομέας. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ΜΥΗΣ ισχύος περίπου κάτω από 100 kW, όπου υπάρχει χαμηλή υδραυλική κεφαλή και μεγάλη υδραυλική παροχή.



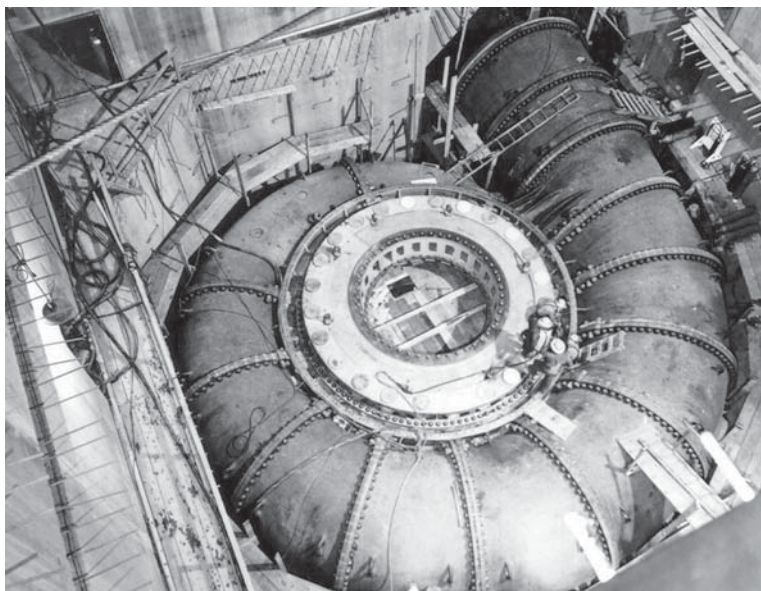
Σχήμα 7.8 Σχηματική αναπαράσταση ενός υδροστροβίλου εγκάρσιας ροής τύπου Ossberger. (Πηγή: commons.wikimedia.org)

δ) Στρόβιλος Francis

Οι στρόβιλοι Francis είναι στρόβιλοι *αντίδρασης* ακτινικής ροής (με δυνατότητα περιστροφής τόσο σε οριζόντιο όσο και κατακόρυφο άξονα) και είναι οι πιο συνηθισμένοι υδροστρόβιλοι στις μεσαίες και μεγάλες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και σε ΜΥΗΣ, με συνέπεια το εύρος των υδραυλικών κεφαλών που είναι κατάλληλες για την εγκατάστασή τους να κυμαίνεται μεταξύ 2-300 m⁴⁸.

Τα πτερύγια του δρομέα είναι σταθερά (σε αντίθεση με το στρόβιλο Kaplan), ενώ τα οδηγά πτερύγια είναι ρυθμιζόμενα. Το νερό, καθώς εισέρχεται με υψηλή πίεση στον υδροστρόβιλο που είναι βυθισμένος στο νερό, προσπίπτει πάνω στα πτερύγια του δρομέα. Η πίεση που ασκεί το νερό πάνω στα πτερύγια έχει ως συνέπεια την εκτροπή του λόγω των μεγάλων δυνάμεων που ασκούνται. Ταυτόχρονα λόγω της φυσικής αρχής της δράσης-αντίδρασης στα πτερύγια ασκούνται δυνάμεις αντίδρασης (για αυτό και οι υδροστρόβιλοι ονομάζονται τύπου αντίδρασης), που προσδίδουν στα πτερύγια μηχανική περιστροφική ενέργεια παράγοντας με αυτό τον τρόπο μηχανική ισχύ. Η απόδοση των στρόβιλων Francis είναι μεγαλύτερη όταν η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων είναι ελαφρώς μικρότερη από την ταχύτητα με την οποία προσπίπτει πάνω τους το νερό.

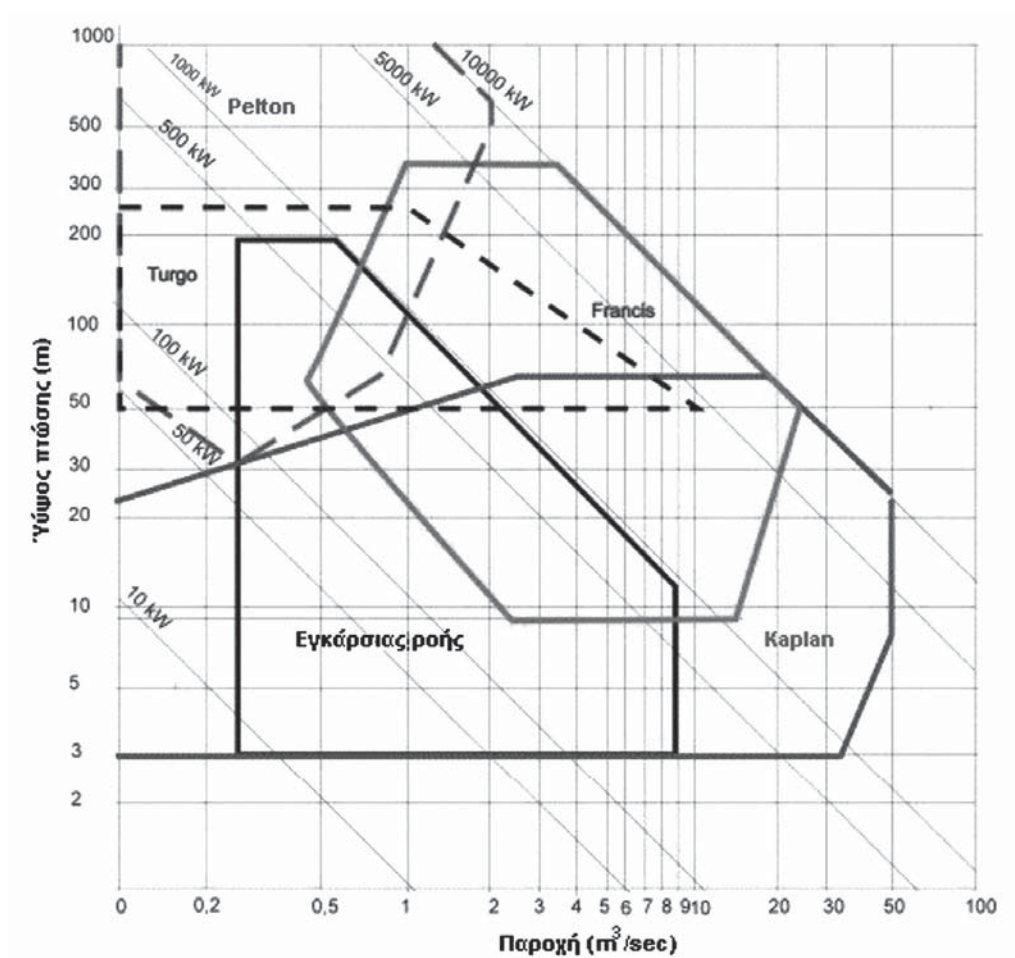
⁴⁸ Boyle et al, 2004, σελ. 164.



Εικόνα 7.3 Η μεταφορά και η εγκατάσταση υδροστροβίλου Francis στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση του φράγματος Grand Coulee Dam στον ποταμό Columbia, ΗΠΑ. Το συγκεκριμένο φράγμα είναι ένα από τα μεγαλύτερα στον κόσμο με ισχύ 6,8 MW και έχει εγκατεστημένους 27 υδροστροβίλους Francis, ενώ η υδραυλική κεφαλή του είναι 116 m.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

ε) Επιλογή τύπου υδροστροβίλου

Τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν το ποιος τύπος υδροστροβίλου θα επιλεγεί σε υδροηλεκτρική εγκατάσταση είναι το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής (υψομετρική διαφορά), η ογκομετρική παροχή και η ταχύτητα του δρομέα του στροβίλου. Στο Σχήμα 7.10 απεικονίζεται το εύρος λειτουργίας διαφόρων τύπων στροβίλων σε συνάρτηση με την υδραυλική κεφαλή και την ογκομετρική παροχή.



Σχήμα 7.10 Διάγραμμα με το εύρος λειτουργίας διαφόρων τύπων στροβίλων σε συνάρτηση με την υδραυλική κεφαλή και την ογκομετρική παροχή.
(Πηγή: ΚΑΠΕ)

Η υψομετρική διαφορά αποτελεί το πρώτο κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου. Στον Πίνακα 7.1 φαίνονται διάφο-

ροι τύποι υδροστροβίλων και το αντίστοιχο εύρος υψομετρικής διαφοράς για το οποίο είναι κατάλληλοι.

Πίνακας 7.1 Οι διάφοροι τύποι υδροστροβίλων και το ύψος της υδραυλικής κεφαλής για το οποίο είναι κατάλληλοι.

(Πηγή: ΚΑΠΕ)

Τύπος στροβίλου	Εύρος ύψους πτώσης (σε m)
Karlan και έλικας	$2 < H < 15$
Francis	$4 < H < 100$
Pelton	$30 < H < 1000$
Εγκάρσιας ροής	$1 < H < 150$
Turgo	$50 < H < 250$

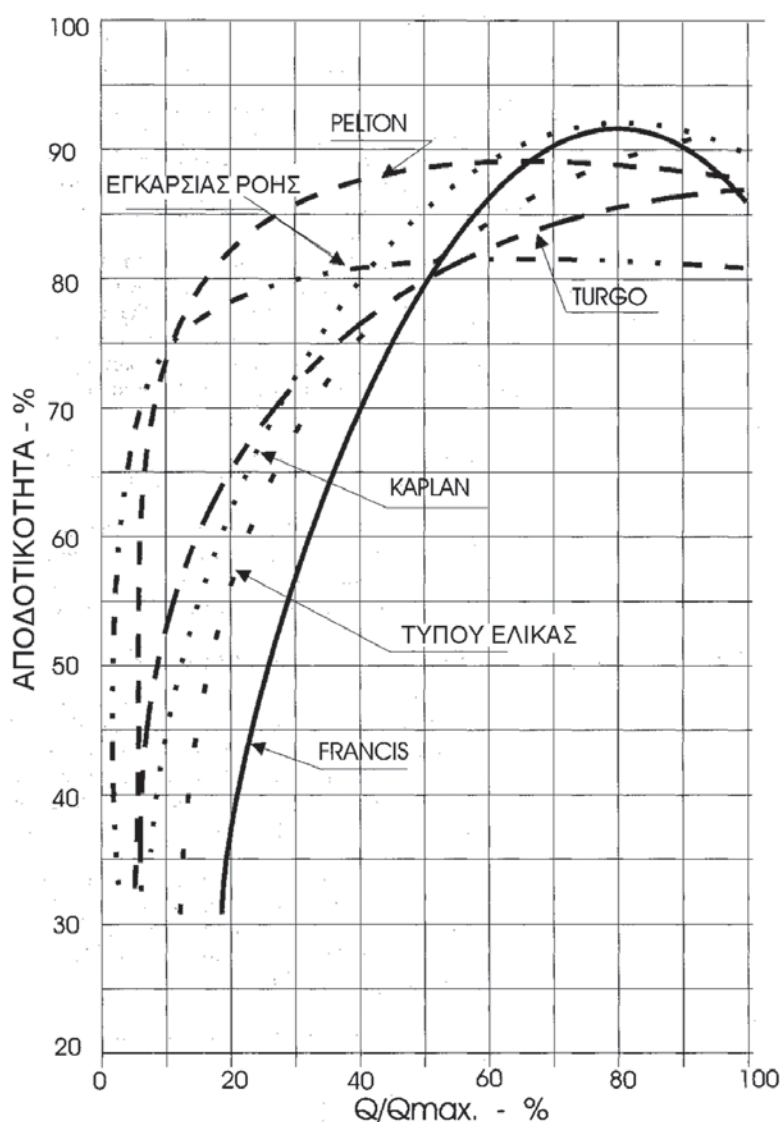
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.1⁴⁹, για συγκεκριμένη υψομετρική διαφορά είναι καταρχάς κατάλληλοι περισσότεροι του ενός στρόβιλοι. Συνεπώς, γεννιέται το ερώτημα: με τι άλλα κριτήρια γίνεται η τελική επιλογή; Η απάντηση είναι ότι η επιλογή εξαρτάται από πολλούς άλλους παράγοντες, τόσο τεχνικούς όσο και οικονομικούς.

Όσον αφορά τους οικονομικούς παράγοντες χρειάζεται να επισημανθεί ότι για την ίδια υδραυλική κεφαλή το κόστος κατασκευής δεν είναι το ίδιο σε κάθε υδροστρόβιλο. Σε μια μικρή υδραυλική κεφαλή ο Karlan είναι ακριβότερος από άλλον αντίστοιχο στρόβιλο τύπου έλικας. Για μεσαία υδραυλική κεφαλή στρόβιλος εγκάρσιας ροής είναι οικονομικότερος από τον Francis, παρ' όλο που η απόδοση του τελευταίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη⁵⁰.

Όσον αφορά τους τεχνικούς παράγοντες σημαντικό ρόλο παίζει η ογκομετρική παροχή που προβλέπεται για την εγκατάσταση. Η απόδοση των στροβίλων μειώνεται όταν μειώνεται επίσης η παροχή για την οποία έχουν σχεδιαστεί. Πολλοί στρόβιλοι μπορούν να λειτουργήσουν μόνο σε παροχές που υπερβαίνουν το 40% της ονομαστικής παροχής του υδροστροβίλου, ενώ κανένας υδροστρόβιλος δεν μπορεί να λειτουργήσει κάτω από το 1/6 της ονομαστικής παροχής του. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη σχέση μεταξύ της απόδοσης διαφόρων τύπων στροβίλων και του ποσοστού της ονομαστικής παροχής που λειτουργούν.

⁴⁹ Το ύψος της υδραυλικής κεφαλής που εμφανίζεται στον πίνακα είναι ενδεικτικό και αρκετές φορές εμφανίζονται διαφορετικές τιμές στη βιβλιογραφία. Όμως οι τιμές δίνουν μια ενδεικτική τάξη μεγέθους.

⁵⁰ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 18.



Σχήμα 7.11 Διάγραμμα της σχέσης μεταξύ της απόδοσης διαφόρων τύπων στροβίλων και του ποσοστού της ονομαστικής παροχής που λειτουργούν (Q/Q_{max}).
(Πηγή: ΚΑΠΕ)

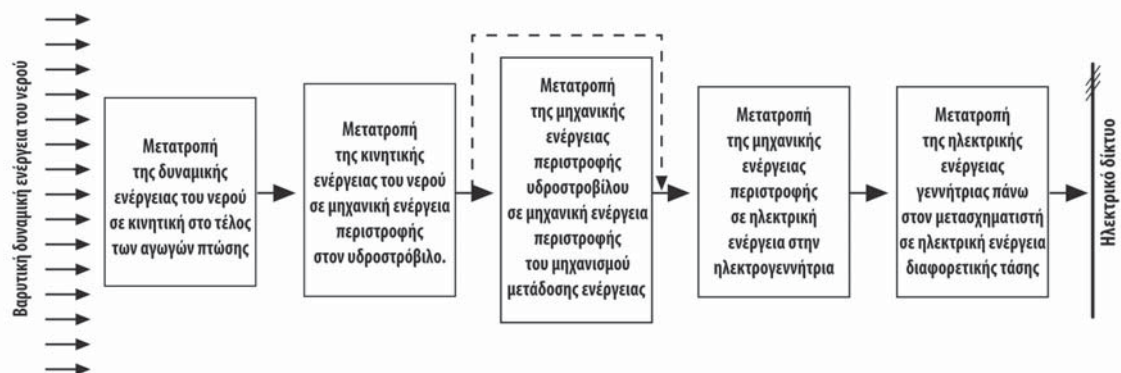
Η παροχή στην οποία θα επιλεγεί να λειτουργήσει ένας υδροστροβίλος (και συνεπώς και το είδος του υδροστροβίλου) εξαρτάται, εκτός των άλλων, από το εάν η υδροηλεκτρική εγκατάσταση είναι συνδεδεμένη στο κεντρικό δίκτυο ή τροφοδοτεί το τοπικό δίκτυο απομονωμένου οικισμού ή περιοχής. Στην πρώτη περίπτωση η ονομαστική παροχή επιλέγεται με βάση το καθαρό κέρδος από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στη δεύτερη επιλέγεται παροχή που θα δίνει τη δυνα-

τότητα στην εγκατάσταση να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους⁵¹.

7.3.3 Ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών, απώλειες, καμπύλη ισχύος

α) Ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών

Κατά τη λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού συστήματος συμβαίνει σειρά ενεργειακών μετατροπών στα διάφορα τμήματα της εγκατάστασης, οι οποίες έχουν ήδη αναφερθεί. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει αυτές τις ενεργειακές μετατροπές που ξεκινούν από τη βαρυτική δυναμική ενέργεια του νερού και καταλήγουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 7.12 Η ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών σε μια υδροηλεκτρική εγκατάσταση.

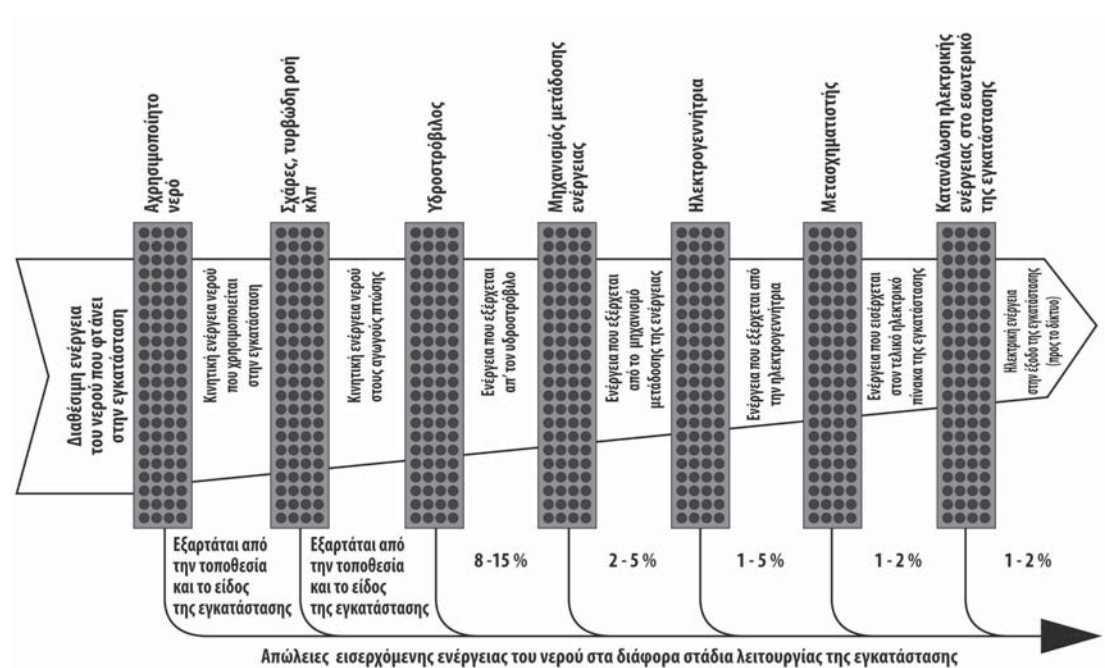
Όπως φαίνεται και από το σχήμα, το νερό εμπεριέχει βαρυτική δυναμική ενέργεια. Εκτός από τη δυναμική ενέργεια το νερό έχει ήδη μεταφορική κινητική ενέργεια όταν φτάνει στο στόμιο εισόδου. Αυτή η μεταφορική κινητική ενέργεια αυξάνεται καθώς το νερό πέφτει μέσω των αγωγών πτώσης προς τον υδροστρόβιλο, αφού η βαρυτική δυναμική ενέργειά του μετατρέπεται σε μεταφορική κινητική ενέργεια. Όταν το νερό φτάνει στον υδροστρόβιλο, μεταφέρει τη μεταφορική κινητική του ενέργεια στον υδροστρόβιλο, ο οποίος αποκτά έτσι μηχανική περιστροφική ενέργεια. Αυτή η μηχανική περιστροφική ενέργεια μεταφέρεται είτε απευθείας είτε μέσω μηχανισμού μετάδοσης στην ηλεκτρογεννήτρια, η οποία μέσω του φυσικού φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μετατρέπει την ενέργεια

⁵¹ ΚΑΠΕ, 2001, *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, σελ. 19.

που λαμβάνει από το στρόβιλο σε ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστή η ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Β) Απώλειες ενέργειας

Κατά τη διάρκεια αυτών των ενεργειακών μετατροπών συμβαίνουν αναπόφευκτα (λόγω του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου) απώλειες ενέργειας, οι οποίες έχουν τη μορφή θερμότητας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Το παρακάτω σχήμα δείχνει αυτές τις απώλειες σε κάθε στάδιο των ενεργειακών μετατροπών.



Σχήμα 7.13 Οι απώλειες στα διάφορα στάδια των ενεργειακών μετατροπών σε υδροηλεκτρική εγκατάσταση.

Το συνολικό ποσοστό των απωλειών είναι της τάξης του 20% (λιγότερο ή περισσότερο), με συνέπεια η συνολική απόδοση⁵² μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης (όταν δουλεύει σε πλήρες φορτίο) να φτάνει το 85% και σε μερικές ειδικές περιπτώσεις το 90% ή περισσότερο⁵³. Βέβαια, επειδή οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως λειτουργούν όχι σε πλήρες αλλά σε μερικό φορτίο,

⁵² Ως απόδοση ορίζεται το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδει στην έξοδο η εγκατάσταση προς την ισχύ που έχει το νερό στο αρχικό ύψος του h_{hw} [headwater].

⁵³ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 371.

η συνολική ετήσια απόδοσή τους είναι μικρότερη. Στις καινούριες και προσεκτικά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις αυτές οι τιμές κυμαίνονται από 70% έως 90% (το μέγιστο), ενώ σε παλαιότερες εγκαταστάσεις (ιδιαίτερα χαμηλής ισχύος) βρίσκονται στο διάστημα 50% και 70%.

Οι απώλειες ενέργειας συμβαίνουν κυρίως λόγω των τριβών του νερού με τα διάφορα δομικά στοιχεία της εγκατάστασης (σημείο εισόδου, σχάρες, κανάλια, αγωγοί πτώσης κ.λπ.), καθώς και λόγω των τριβών που δημιουργούνται στα κινούμενα μέρη των μηχανολογικών στοιχείων της εγκατάστασης (υδροστρόβιλοι, ηλεκτρογεννήτριες, συστήματα μετάδοσης κ.λπ.). Επίσης απώλειες ενέργειας γίνονται λόγω της τυρβώδους ροής του νερού σε διάφορα σημεία της κατάβασής του προς τους υδροστροβίλους.

γ) Συνθήκες λειτουργίας και καμπύλη ισχύος υδροηλεκτρικού σταθμού

Η καμπύλη της απόδοσης ισχύος σε υδροηλεκτρικό σταθμό εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

- το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής και
- την ογκομετρική ροή

Κατά τη διάρκεια του έτους στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς μικρής κλίμακας ΜΥΗΣ αυξομειώνεται η ροή και κυμαίνεται, σε μικρότερο βαθμό, και η υδραυλική κεφαλή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα Μικρής Κλίμακας Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ) είναι κυρίως συνεχούς ροής χωρίς ταμειυτήρες ιδιαίτερης χωρητικότητας και συνεπώς επηρεάζονται από τις εποχιακές διακυμάνσεις της ροής του ποταμού. Σε γενικές γραμμές στο Βόρειο Ημισφαίριο η ροή των ποταμών είναι αυξημένη κυρίως την άνοιξη και το χειμώνα και μειωμένη το καλοκαίρι. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας παρακολουθεί τις αυξομειώσεις της ογκομετρικής ροής⁵⁴, καθώς οι διακυμάνσεις της υδραυλικής κεφαλής είναι ελάχιστες⁵⁵.

⁵⁴ Αρκεί η ροή να μην υπερβαίνει το σχεδιασμό της μέγιστης χωρητικότητας του υδροστροβίλου. Τότε ο στρόβιλος δεν μπορεί να ανταποκριθεί και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται. Για να μη συμβαίνει αυτό, όταν η ροή είναι υπερβολική, η περισσευούμενη ποσότητα νερού επιστρέφει ξανά προς το ποτάμι μέσω διόδων υπερχειλίσσης χωρίς να διοχετεύεται στον υδροστρόβιλο.

⁵⁵ Το ύψος της υδραυλικής κεφαλής παρουσιάζει πολύ μικρή διακύμανση και συνήθως σε μικρές ροές αυξάνεται ελαφρώς, ενώ με μεγαλύτερες ροές μειώνεται λίγο. Οι αυξομειώσεις της υδραυλικής κεφαλής επηρεάζουν πολύ λιγότερο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απ' ό,τι οι αυξομειώσεις της ογκομετρικής ροής. Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 372-373.