



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

«Αξιοποίηση της ροής: Μια μελέτη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας»

«Harnessing the Flow: A Comprehensive Study of Small Hydroelectric Power Plants»

Υπό

ΜΑΝΤΣΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2025

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Νταφόπουλος Βασίλειος

(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή
Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ονοματεπώνυμο

Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Ονοματεπώνυμο

Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσας πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της έρευνας μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσας εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	
ΟΝΟΜΑ	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Υπόβαθρο και Κίνητρο.....	2
1.3. Ορισμός και Κατηγοριοποίηση.....	3
1.4. Στόχοι της Διατριβής.....	4
1.5. Πεδίο Εφαρμογής και Περιορισμοί.....	5
1.6. Μεθοδολογία και Δομή.....	6
2. Θεμελιώδη των Μικρών Υδροηλεκτρικών Συστημάτων.....	7
2.1. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	7
2.2. Υδάτινο Δυναμικό.....	8
2.3. Τύποι μικρών υδροηλεκτρικών συστημάτων.....	9
2.3.1 Συστήματα ροής.....	9
2.3.2 Συστήματα φράγματος-δακτύλου [Dam-toe (Toe-of-Dam)]..	10
2.3.3 Συστήματα τύπου καναλιού (Canal).....	11
2.4. Βασικά Στοιχεία και Διατάξεις.....	12
2.4.1 Πολιτικές Δομές.....	12
2.4.2 Υδραυλικά Στοιχεία.....	13
2.4.3 Ηλεκτρικά και Μηχανικά Στοιχεία.....	14
2.4.4 Κανάλι Εξαγωγής.....	15
2.5. Τεχνολογίες Στροβίλων.....	16
2.5.1 Ταξινόμηση.....	16
2.5.2 Υδροστρόβιλοι Δράσης (τύπου Pelton).....	17
2.5.3 Υδροστρόβιλοι Αντίδρασης (τύπου Francis).....	18
2.5.4 Υδροστρόβιλοι Αντίδρασης (τύπου Kaplan).....	19
2.6. Συστήματα Ελέγχου και Αυτοματισμοί.....	20
3. Ανάλυση Αποδοτικότητας και Απόδοσης.....	21
3.1 Ορισμός Αποδοτικότητας.....	21
3.2 Τυπικά Εύρη Απόδοσης και Απώλειες.....	22
3.3 Ρύθμιση Ροής και Αντιστοίχιση Φορτίου.....	23
3.4 Τεχνικές Βελτιστοποίησης.....	24
3.5 Συγκριτικά Παραδείγματα Περιπτώσεων.....	25
4. Μελέτες Περιπτώσεων.....	26
4.1 Κριτήρια Επιλογής και Αιτιολόγηση.....	26
4.2 Περίπτωση I: Σταθμός του Κγείσμπουργκα (Kremsbrücke) της Αυστρίας.....	27

4.3 Περίπτωση II: Σταθμός στο Σουνταρίτζαλ (Sundarijal) του Νεπάλ.....	28
4.4 Περίπτωση III: Σταθμός Ντουαρί Κολά (Dwari Kholā) του Νεπάλ.....	29
4.5 Συγκριτικός Πίνακας.....	30
4.6 Συγκριτική Ανάλυση και Ερμηνεία.....	31
5. Ενσωμάτωση στο Δίκτυο.....	32
5.1 Επισκόπηση Προκλήσεων και Σημασίας.....	32
5.2 Τύποι Γεννητριών και Διεπαφές Ηλεκτρονικών Ισχύος.....	33
5.3 Συστήματα ελέγχου και στρατηγικές βασισμένες σε ΤΝΔ.....	34
5.4 Κανονιστικά Πρότυπα και Συμμόρφωση με τον Κώδικα Δικτύου.....	35
5.5 Λειτουργικές Προκλήσεις και Υβριδικές Λύσεις.....	36
5.6 Μελέτες Περιπτώσεων και Παραδείγματα Ανάπτυξης.....	37
6. Εφαρμογές περα του Δικτύου.....	38
6.1 Ηλεκτροδότηση Εκτός Δικτύου και Αγροτική Ανάπτυξη.....	38
6.2 Αντληση νερού και αγροτικές εφαρμογές.....	39
6.3 Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	40
6.4 Παραγωγή “Πράσινου” Υδρογόνου.....	41
6.5 Ενσωμάτωση σε Έξυπνα Μικροδίκτυα.....	42
6.6 Περιβαλλοντικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις.....	43
6.7 Τεχνολογικές και Πολιτικές Τάσεις.....	44
7. Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές.....	45
7.1 Περιβαλλοντικές και Οικολογικές Ανησυχίες.....	45
7.2 Κλιματική Αλλαγή και Υδρολογική Μεταβλητότητα.....	46
7.3 Πολιτική, Χρηματοδότηση και Δυναμική της Αγοράς.....	47
7.4 Ψηφιοποίηση, IoT και Απομακρυσμένη Παρακολούθηση.....	48
7.5 Μελλοντική Κατεύθυνση Έρευνας και Καινοτομίας.....	49
7.6 Ανάλυση Ενδιαφερόμενων Μερών και Περιφέρειας.....	50
7.7 Συμπέρασμα.....	51
8. Συμπεράσματα.....	52
8.1 Σύνοψη Ευρημάτων.....	52
8.2 Τελικές Σκέψεις.....	53

8.3 Συστάσεις για Μελλοντική Εργασία.....	54
Βιβλιογραφία.....	55

Κατάλογος Εικόνων/Φωτογραφίες

Εικόνα 1.1: Disaster History. Yellow River Flood 1938–47.

<https://disasterhistory.org/yellow-river-flood-1938-47>

Εικόνα 1.2: Historical Eve. Map with Nile River.

<https://historicaleve.com/map-with-nile-river/>

Εικόνα 2.1: Ασημακοπουλος Γ., Αραμπατζής Δ., Δημάκης Α., Καρταλιδης Α., Τσιλιγκιριδης Γ., ΑΠΕ: Δυναμικο & Τεχνολογιες, Εκδοσεις Σοφια, 2015, Θεσσαλονικη

Εικόνα 2.2: Ασημακοπουλος Γ., Αραμπατζής Δ., Δημάκης Α., Καρταλιδης Α., Τσιλιγκιριδης Γ., ΑΠΕ: Δυναμικο & Τεχνολογιες, Εκδοσεις Σοφια, 2015, Θεσσαλονικη

Εικόνα 2.3:

<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/o-ydrologikos-kyklos-water-cycle-greek>

Εικόνα 2.4: U.S. Department of Energy. Types of hydropower plants.

<https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>

Εικόνα 2.5: ResearchGate. Various diagrams of small hydropower schemes.

https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-a-typical-dam-toe-small-hydropower-scheme_fig11_257176542

Εικόνα 2.6: ResearchGate. Various diagrams of small hydropower schemes.

https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-a-typical-canal-based-small-hydropower-scheme_fig6_257176542

Εικόνα 2.7: ResearchGate. Various diagrams of small hydropower schemes.

https://www.researchgate.net/figure/ntake-weir-during-a-dry-day_fig2_323772043

Εικόνα 2.8: Elgin Separation Solutions. Coanda Screens.

<https://elginseparationsolutions.com/coanda-screens/>

Εικόνα 2.9: BC Watershed. Lake Marion Desilting Basin.

<https://bcwatershed.org/projects-lake-marion-desilting-basin/>

Εικόνα 2.10: BC Watershed. Lake Marion Desilting Basin.

<https://bcwatershed.org/projects-lake-marion-desilting-basin/>

Εικόνα 2.11: Wikimedia Commons. Headrace Channel.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Headrace_Channel_3.jpg

Εικόνα 2.12: Core Erosion Control. Understanding the Forebay.

<https://www.coreerosioncontrol.com/understanding-the-forebay-a-key-component-in-water-management-systems/>

Εικόνα 2.13: Energy Education. Penstock. <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Penstock>

Εικόνα 2.14: Housing.com. Surge Tank. <https://housing.com/news/surge-tank/>

Εικόνα 2.15: Hawle Knowledge. Air valves for water lines: Part 1.

<https://www.hawle.com/en/hawle-knowledge/basics/air-valves-for-water-lines-part-1>

Εικόνα 2.16: Made-in-China. Hydro Power Plant with Water Turbine Generator.

<https://cdforster.en.made-in-china.com/product/tdhmqscPXxWV/China-Hydro-Power-Plant-with-Water-Turbine-Generator.html>

Εικόνα 2.17: FST Generator. Hydroelectric Pelton Product.

<https://www.fstgenerator.com/hydroelectric-pelton-product/>

Εικόνα 2.18: Reivax. Digital Hydro Governor.
<https://www.reivax.com/us/digital-hydro-governor>

Εικόνα 2.19: Prima Automation. Hydro turbine control panels.
<https://www.prima-automation.com/services/hydro-turbine-control-panels/>

Εικόνα 2.20: Geograph. Water control infrastructure.
<https://www.geograph.org.uk/photo/4747907>

Εικόνα 2.21: Geppert Hydro. Pelton Turbine.
<https://www.geppert-hydro.com/en/our-solutions/new-plants/pelton-turbine/>

Εικόνα 2.22: ResearchGate. Pelton runner and detail of a bucket.
https://www.researchgate.net/figure/Pelton-runner-and-detail-of-a-bucket_fig7_302052573

Εικόνα 2.23: Hydropower Plant. About Us. <https://hydropowerplant.com/about-us/>

Εικόνα 2.24: Hydrowatt. Francis Turbines.
<https://hydrowatt.de/de/en/produkte/francis-turbinen/>

Εικόνα 2.25: Mechanical Booster. (2018, January). Francis Turbine.
<https://mechanicalbooster.com/2018/01/francis-turbine.html>

Εικόνα 2.26: Energy Education. Kaplan turbine.
https://energyeducation.ca/encyclopedia/Kaplan_turbine

Εικόνα 2.27: Voith Hydro Power Generation

Εικόνα 2.28: Renewables First. Kaplan Turbines.
<https://renewablesfirst.co.uk/renewable-energy-technologies/hydropower/hydropower-learning-centre/kaplan-turbines/>

Εικόνα 2.29: ResearchGate. Typical Kaplan turbine.
https://www.researchgate.net/figure/Typical-Kaplan-turbine-64_fig5_312376917

Εικόνα 2.30: MDPI. Energy - Article on hydropower.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2915>

Εικόνα 2.31: ResearchGate. SCADA system architecture example.
https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-generic-SCADA-system-architecture_fig1_41216365

Εικόνα 3.1: Axis Controls. DC Variable Speed Drives.
<https://www.axiscontrols.co.uk/products-services/products/dc-variable-speed-drives>

Εικόνα 3.2: ResearchGate. Selection chart for hydropower turbines.
https://www.researchgate.net/figure/Selection-chart-or-operating-envelope-diagram-for-hydropower-turbines_fig5_352681952

Εικόνα 3.3: ResearchGate. PM generator with propeller turbine.
https://www.researchgate.net/figure/PM-generator-integrated-with-a-propeller-turbine_fig1_252029546

Εικόνα 3.4: Electrical Blogging. Permanent Magnet Synchronous Generator.
<https://electricalblogging.com/permanent-magnet-synchronous-generator/>

Εικόνα 3.5: Medium. Star and Delta Connection – Engineering Notes Online.
<https://sushilneup712.medium.com/star-and-delta-connection-engineering-notes-online-ad28f174c4f>

Εικόνα 3.6: ResearchGate. Typical efficiency curves for hydropower turbines.
https://www.researchgate.net/figure/Typical-efficiency-curves-for-different-types-of-hydropower-turbines_fig4_352681952

Εικόνα 4.1: World of PORR. Hydroelectric Power Plant in Kremsbruecke.
<https://worldofporr.com/en/172-2018/hydroelectric-power-plant-in-kremsbruecke/>

Εικόνα 4.2: Wikipedia. Sundarijal Small Hydropower Station.

https://en.wikipedia.org/wiki/Sundarijal_Small_Hydropower_Station

Εικόνα 4.3: Facebook. Dwari Khola Small Hydropower Project.

<https://www.facebook.com/UnitsEngg/posts/dwari-khola-small-hydropower-project375-mwd-ailekha/2280601902242669/>

Εικόνα 4.4: Facebook. Dwari Khola Small Hydropower Project.

<https://www.facebook.com/UnitsEngg/posts/dwari-khola-small-hydropower-project375-mwd-ailekha/2280601902242669/>

Εικόνα 5.1: Alternative Energy Tutorials. Synchronous Generator.

<https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/synchronous-generator.html>

Εικόνα 5.2: Diesel Generator Tech. What is a synchronous generator?

<https://www.dieseldgeneratortech.com/generators/what-is-synchronous-generator.html>

Εικόνα 5.3: Diesel Generator Tech. What is a synchronous generator?

<https://www.dieseldgeneratortech.com/generators/what-is-synchronous-generator.html>

Εικόνα 5.4: ResearchGate. AC-DC-AC converter control diagram.

https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-AC-DC-AC-converter-control-for-cooperation-of-the-generator-with-local_fig2_268279452

Εικόνα 5.5: IEEE. IEEE homepage. <https://www.ieee.org/>

Εικόνα 5.6: International Electrotechnical Commission (IEC). IEC homepage.

<https://www.iec.ch/homepage>

Κατάλογος Συντομογραφιών

Συντομογραφία	Πλήρης αγγλική γραφή	Πλήρης ελληνική γραφή
ΜΥΣΠΗΕ	(-)	Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας
IoT	Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Εποπτικός Έλεγχος και Συλλογή Δεδομένων
DFIG	Doubly Fed Induction Generator	Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας
TNΔ	(-)	Τεχνητό Νευρικό Δίκτυο
AC	Alternating Current	Εναλλασσόμενο ρεύμα
DC	Direct Current	Συνεχές ρεύμα
IEC	International Electrotechnical Commission	Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Περίληψη

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει αναδείξει τους μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΜΥΣΠΗΕ) ως μια βιώσιμη και αποκεντρωμένη λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρούσα διατριβή προσφέρει μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με το σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη βελτιστοποίηση των ΜΥΣΠΗΕ, εστιάζοντας στην αποδοτικότητά τους, τις προκλήσεις ενσωμάτωσης και τον ρόλο τους σε εφαρμογές εκτός δικτύου και συνδεδεμένες με το δίκτυο. Αρχικά, η εργασία διερευνά τις θεμελιώδεις αρχές που διέπουν την υδροηλεκτρική παραγωγή, αναλύοντας τα βασικά στοιχεία, τους υδρολογικούς παράγοντες και τα κριτήρια επιλογής ανεμογεννητριών. Μέσω τεχνικής και οικονομικής αξιολόγησης, η μελέτη εξετάζει τις παραμέτρους απόδοσης που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων, συμπεριλαμβανομένων των στρατηγικών αντιστοίχισης φορτίου και ελέγχου ροής.

Ένα σημαντικό μέρος της έρευνας επικεντρώνεται σε συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού, όπως ο Εποπτικός Έλεγχος και η Συλλογή Δεδομένων (SCADA) και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), τα οποία ενισχύουν την παρακολούθηση και την επιχειρησιακή ευελιξία στα ΜΥΠ. Μελέτες περίπτωσης από την Αυστρία και το Νεπάλ παρέχουν πρακτικές γνώσεις για τα ποικίλα λειτουργικά περιβάλλοντα, τις τεχνολογικές εφαρμογές και τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις.

Επιπλέον, η διατριβή ασχολείται με τις προκλήσεις που σχετίζονται με την ενσωμάτωση δικτύων, επισημαίνοντας τις διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος, τους τύπους γεννητριών και τα κανονιστικά πρότυπα. Αναλύονται επίσης οι δυνατότητες των ΜΥΣΠΗΕ σε υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ο ρόλος τους στην ηλεκτροδότηση των αγροτικών περιοχών και οι συνεισφορές τους στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Η εργασία ολοκληρώνεται με τον εντοπισμό μελλοντικών τάσεων, συμπεριλαμβανομένης της ψηφιοποίησης, της συμμετοχής των ενδιαφερόμενων μερών και των καινοτομιών που αποσκοπούν στην αύξηση της ανθεκτικότητας του συστήματος έναντι της κλιματικής μεταβλητότητας.

Συνολικά, η παρούσα μελέτη υπογραμμίζει τη στρατηγική σημασία των ΜΥΣΠΗΕ για την επίτευξη των στόχων ενεργειακής βιωσιμότητας, παρέχοντας μια πολυδιάστατη αξιολόγηση πολύτιμη για τους μηχανικούς, τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους ενδιαφερόμενους φορείς στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Abstract

The increasing global demand for renewable energy sources has spotlighted small hydropower plants (SHPs) as a sustainable and decentralized solution for electricity generation. This thesis offers a comprehensive study on the design, operation, and optimization of SHPs, focusing on their efficiency, integration challenges, and role in off-grid and grid-connected applications. Initially, the work explores the fundamental principles governing hydropower generation, detailing key components, hydrological factors, and turbine selection criteria. Through technical and economic evaluation, the study examines the performance parameters influencing plant efficiency, including load matching and flow control strategies.

A significant part of the research centers on control and automation systems, such as Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) and the Internet of Things (IoT), which enhance monitoring and operational flexibility in SHPs. Case studies from Austria and Nepal provide practical insights into varying operational environments, technological implementations, and socio-economic impacts.

Further, the thesis addresses challenges related to network integration, highlighting power electronics interfaces, generator types, and regulatory standards. The potential of SHPs in hybrid renewable systems, their role in rural electrification, and contributions to green hydrogen production are also analyzed. The work concludes by identifying future trends, including digitalization, stakeholder engagement, and innovations aimed at increasing system resilience against climate variability.

Overall, this study underscores the strategic importance of SHPs in achieving energy sustainability goals, providing a multidimensional assessment valuable to engineers, policymakers, and stakeholders in the renewable energy sector.

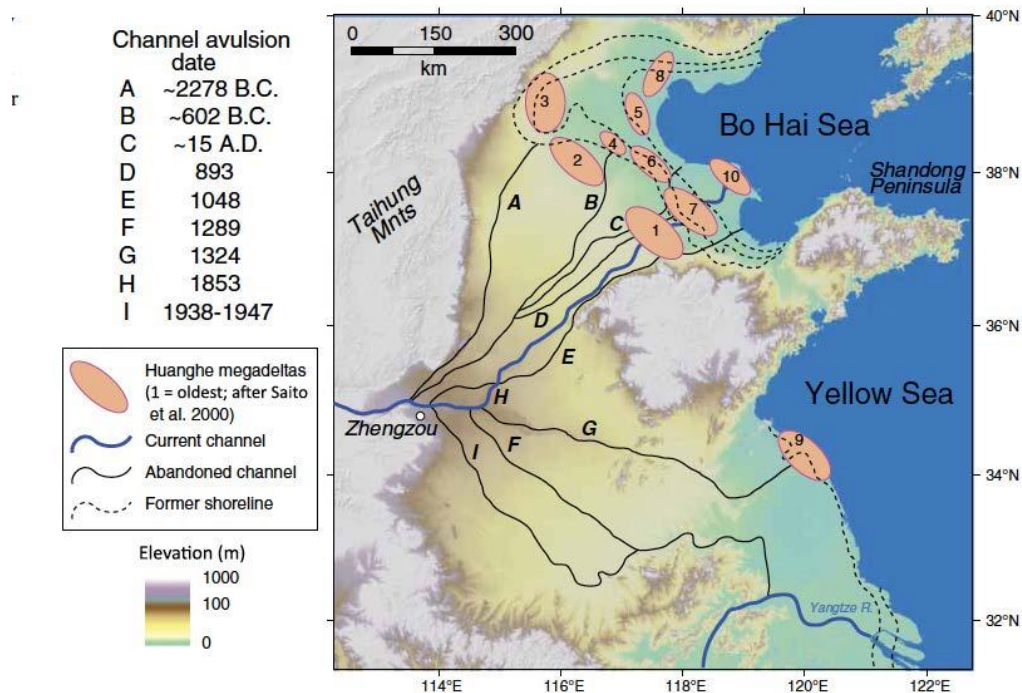
Εισαγωγή

Από την αυγή της ύπαρξης του ανθρώπινου είδους, η αλληλεπίδραση του με τα διάφορα στοιχεία της φύσης ήταν κρίσιμη για την επιβίωση και τη διαίωνιση του είδους του. Ο άνθρωπος, από την αρχή της ύπαρξης του, συννητηρχε και εξαρτώταν από όλα τα φυσικά στοιχεία που τον περιέβαλαν. Για παράδειγμα, η κάλυψη των απαραίτητων και καθημερινών διατροφή αναγκών του εξαρτώταν, πρώτα, αποκλειστικά από την επιτυχή διεξαγωγή των δραστηριοτήτων της τροφосуλλογής και της θήρας μικρών και μεγάλων ζώων. Όταν το περιβάλλον του δεν καθιστούσε δυνατή τη διεξαγωγή αυτών των αναγκαίων δραστηριοτήτων, τότε η μοναδική επιλογή του ανθρώπου ήταν η μετακίνηση του ή ενός πληθυσμού σε μια διαφορετική τοποθεσία που θα πληρεί τις αναγκαίες προϋποθέσεις για την επιβίωση και άνθηση του. Έτσι, το ανθρώπινο είδος κατάφερε να απλωθεί και να μετοικήσει με τη πάροδο των αιώνων σε διάφορες τοποθεσίες, σε όλες τις γωνίες της χερσαίας επιφάνειας του πλανήτη. Αυτή η μετακίνηση έφερε τους διάφορους κατα περιόδους μετοικήζοντες πληθυσμούς με μια πληθώρα καινούργιων και πρωτοφανών καταστάσεων, που, με την άφιξη τους, καλούνται να αντιμετωπίσουν για την επιβίωση και συνέχιση της ζωής τους. Η μετακίνηση πολλών διαφόρων ομάδων ανθρώπων σε μερικές συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες και, σε συνδυασμό με την έμφυτη παρατηρητικότητα και προσαρμοστικότητα, ανέπτυξε σε αρχικό στάδιο τη γεωργία που άλλαξε το τρόπο ζωής του ανθρώπινου είδους σε ριζικό βαθμό. Η επίδραση, ιδιαίτερα του υγρού στοιχείου στη καθημερινή ζωή και δραστηριότητα του ανθρώπου είναι ζήτημα εξαιρετικής σημασίας. Η τεράστια μάζα νερού που καλύπτει την πλειονότητα της επιφάνειας της υδρογείου ανακαλύφθηκε ότι προσφέρει εξ ίσου μεγέθους πλεονεκτήματα στη καθημερινή διαβίωση οπότε η εγκατάσταση ενός πληθυσμού κοντά σε ένα τέτοιο μέρος γρήγορα υλοποιήθηκε από διάφορες ομάδες. Άλλα σώματα του υγρού στοιχείου διαφόρου μεγέθους, όπως ποταμοί και λίμνες πρόσφεραν παρόμοιες επιδράσεις στη δραστηριότητα ανθρώπινων πληθυσμών και, εξίσου σύντομα, πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση και ανάπτυξη ανθρώπινου δυναμικού. Φυσικά φαινόμενα όπως η συχνή και σταθερή βροχόπτωση ήταν ένα μείζον δείκτης ιδανικών φυσικών και κλιματικών συνθηκών για την διατήρηση και ανάπτυξη της νεοαναπτυχθήσας δραστηριότητας της γεωργίας και, σε συνέχεια, της κτηνοτροφίας σε αυτές τις περιοχές, γεγονός που συνέβαλε σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη και διεύρυνση των όλων των πτυχών κατοικούντων πληθυσμών.

Η σωστή διαχείριση και εκμετάλλευση των υπάρχων υδάτινων πόρων, όπως ποταμών και λιμνών, από τους πληθυσμούς που κατοικούσαν στις περιοχές που βρίσκονται ήταν πάντα

μειζουσας σημασίας. Σε πολλές περιπτώσεις, η σωστή διαχείριση και διαγωγή ενός ποταμού μπορεί να αποφέρει σε μια κοινότητα πλήθος πλεονεκτημάτων τόσο άμεσων, όπως μεγάλη και καρποφόρα σοδειά, και έμμεσων, όπως κοινωνική και οικονομική σταθερότητα και ευημερία. Ιστορικά, οι πλημμύρες του ποταμού Νείλου και του Κίτρινου Ποταμού προσφέρουν χαρακτηριστικά παραδείγματα:

Οι ετήσιες υπερχειλίσσεις του ποταμού Νείλου ήταν η ζωοποιός δύναμη της αρχαίας Αιγύπτου, με τις προβλέψιμες πλημμύρες να εναποθέτουν πλούσια σε θρεπτικά συστατικά ιλή που επέτρεψαν τη δημιουργία γεωργικού πλεονάσματος. Αυτός ο σταθερός ρυθμός ενίσχυσε τη σταθερότητα, επιτρέποντας την άνοδο ενός συγκεντρωτικού κράτους υπο τους φαραώ από το 3100 π.Χ. Αυτή η “γενναιοδωρία” του Νείλου υποστήριξε μνημειώδεις εργασίες, οι Πυραμίδες της Γκίζας το μεγαλύτερο μνημείο ανάμεσα τους, και μυθοποιήθηκαν σε τελετές που τιμούσαν τον Χάπι, το θεό των πλημμυρών.



Εικόνα 1.1 Χάρτης του Κίτρινου Ποταμού



Εικόνα 1.2 Χάρτης του Νείλου

Σε αντίθεση, οι πλημμύρες του Κίτρινου Ποταμού της Κίνας ήταν ασταθείς και συχνά καταστροφικές, κερδίζοντας του το όνομα “Η θλίψη της Κίνας”. Ωστόσο, το εύφορο έδαφος αποτελούμενο από κίτρινη ασβεστώδης λάσπη, συντήρησε πρώιμες κινέζικες δυναστείες, όπως τη Σάνγκ (Shang) από το 1600 έως το 1050 π.Χ και τη Ζάου (Zhou), που ένωσαν την γνησιότητα τους με τον έλεγχο των πλημμυρών όπως, για παράδειγμα τον Γιού τον Μεγάλο (Yu the Great) που “δάμασε” τις πλημμύρες. Εκεί που οι πλημμύρες στην Αίγυπτο την θεϊκή ιδιότητα της βασιλείας, οι πλημμύρες της Κίνας απαιτούσαν γραφειοκρατική καινοτομία, που σχημάτισε τα Κομφουκιανά ιδεώδη της κρατικής ευθύνης.

Οι κοινωνικές και οικονομικές επιδράσεις αυτών των πλημμυρών αντηχούν κατά την διάρκεια των χιλιετιών. Στην Αίγυπτο, η αξιοπιστία του Νείλου διευκόλυνε τη δημιουργία και ανάπτυξη εμπορικών δικτύων που εκτεινόταν σε όλη τη Μεσόγειο, ενώ οι ξηρασίες συνέβαλαν στη κατάρρευση του παλαιού βασιλείου (~2200 π.Χ.). Εντωμεταξύ, οι αλλαγές της διεύθυνσης του Κίτρινου Ποταμού άρχισε μαζικές μεταναστεύσεις και επαναστάσεις όπως μια πλημμύρα του 14 αιώνα π.Χ. που βοήθησε στη ανατροπή της δυναστείας Γιουάν (Yuan). Αυτοί οι δύο ποταμοί υπογραμμίζουν τον τρόπο που η υδρολογία υπαγορεύει όχι απλώς την επιβίωση, αλλά και την ίδια τη δομή της εξουσίας, τα συστήματα πεποιθήσεων και η ανθεκτικότητα στον αρχαίο κόσμο.

Η ανάπτυξη των υδρόμυλων σηματοδοτούν ένα κριτικό σημείο στην ιστορία της ανθρώπινης εκμετάλλευσης της υδραυλικής ενέργειας. Οι υδρόμυλοι καταγράφηκαν, με παλαιότερη αναφορά τον 3ο αιώνα π.Χ., στον Ελληνιστικό κόσμο και ιδιαίτερα στην ελληνική αποικία του Βυζαντίου. Αυτοί οι πρώτοι νερόμυλοι χρησιμοποιούνταν κυρίως για την άλεση σιτηρών, μειώνοντας την χειρωνακτική εργασία που απαιτούνταν προηγουμένως για την παραγωγή τροφίμων. Η παλαιότερη γνωστή αναφορά σε έναν υδρομυλο εμφανίζεται στα έγγραφα του Φίλων του Βυζαντίου (γύρω στο 280–220 π.Χ.), και αρχαιολογικά ευρήματα αποδεικνύουν ευρεία χρήση μύλων με οριζόντιους τροχούς στην ανατολική Μεσόγειο ξεκινώντας τον 1ο αιώνα π.Χ.

Κατά τη κυριαρχία της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, ο νερόμυλος έγινε βασικό χαρακτηριστικό της αγροτικής και πρωτο-βιομηχανικής κοινωνίας. Ρωμαίοι μηχανικοί, με την προηγμένη πολιτική υποδομή τους, επέκτειναν τη τεχνολογία για να περιλαμβάνει κάθετους υδροτροχούς και βελτιωμένους μηχανισμούς γραναζιών. Κατά τον 4ο αιώνα μ.Χ., συγκροτήματα μύλων μεγάλης κλίμακας όπως ο μύλος του Barbegal στη νότια Γαλλία επέδειξαν την ικανότητα τροφοδότησης πολλαπλών μυλόπετρων ταυτόχρονα, εξυπηρετώντας ολόκληρους αστικούς πληθυσμούς. Αυτές οι εγκαταστάσεις υποδεικνύουν ένα σημαντικό, παλαιό παράδειγμα ανανεώσιμης ενέργειας χρησιμοποιούμενης σε

βιομηχανική κλίμακα, και έθεσαν τα θεμέλια για τις υδροκίνητες τεχνολογίες στη μεσαιωνική Ευρώπη.

Στη μεσαιωνική και πρώιμη σύγχρονη περίοδο, οι υδρόμυλοι διαφοροποιήθηκαν πέρα από την άλεση σιτηρών και υιοθετήθηκαν για την εκπλήρωση ενός εύρους μηχανολογικών διαδικασιών όπως γυάλισμα (στην παραγωγή υφασμάτων), σφυρηλάτηση μετάλλου και πριόνισμα ξύλου. Η διάδοση της τεχνολογίας του υδρόμυλου σε όλη την Ευρώπη ήταν στενά συνδεδεμένη με μοναστικούς οικισμούς και φεουδαρχικά συστήματα γαιοκτησίας, με τοπικές τροποποιήσεις βασισμένες στις υδρολογικές ιδιότητες. Στην Ασία, παρόμοιες τεχνολογίες άκμασαν ανεξάρτητα, με οριζόντιες και κάθετες διατάξεις μολόπετρων που χρησιμοποιήθηκαν στην σημερινή Κίνα και Κορέα για άρδευση και άλεσμα ρυζιού ήδη από τη δυναστεία Τανγκ (618-907 μ.Χ.). Αυτές οι ιστορικές εξελίξεις όχι μόνο διευκρινίζουν την εφευρετικότητα στα πρώιμα μηχανήματα με βάση το νερό αλλά επίσης επιδεικνύουν τη μακροχρόνια σχέση της ανθρωπότητας με το τρεχούμενο νερό ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, ανοίγοντας τον δρόμο για τα μοντέρνα υδροηλεκτρικά συστήματα.

Υπόβαθρο και Κινητρο

Στη σημερινή εποχή, με την ανθρωπότητα να παλεύει με αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες, προκλήσεις για ενεργειακή ασφάλεια και η επείγουσα ανάγκη για απανθρακοποίηση, οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν γίνει κεντρικό σημείο στις παγκόσμιες ενεργειακές πολιτικές. Μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΜΥΣΠΗΕ) αντιπροσωπεύουν μια αξιόπιστη, χρονικά δοκιμασμένη και περιβαλλοντικά φιλική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντιθέτως με τα υδροηλεκτρικά έργα μεγάλης κλίμακας, οι ΜΥΣΠΗΕ λειτουργούν σε τοπική κλίμακα, γενικά με ικανότητες κάτω από 10 MW, προσφέροντας μια αποκεντρωμένη προσέγγιση στη παραγωγή ενέργειας που ελαχιστοποιεί την οικολογική αναστάτωση και το και κόστος υποδομών.

Η σημασία των ΜΥΣΠΗΕ έγκειται όχι μόνο στη βιωσιμότητα τους αλλά και στην ικανότητα τους να δυναμώνουν μικρες, αγροτικές ή απομακρυσμένες κοινότητες μέσω της παροχής συνεχούς ηλεκτρικής ενέργειας, συχνά σε περιοχές πέρα από την εμβέλεια των εθνικών δικτύων. Η ευελιξία τους, η μεγάλη διάρκεια λειτουργίας τους και η δυνατότητα ενσωμάτωσης με άλλα ανανεώσιμα πηγών ενέργειας καθιστούν τους ΜΥΣΠΗΕ βασικό παράγοντα στο εξελισσόμενο τοπίο των καταναμημένων ενεργειακών συστημάτων.

Ορισμός και Κατηγοριοποίηση

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τυπικά κατηγοριοποιούνται βάσει της εγκατεστημένης χωρητικότητάς τους:

- Μίκρο(**Micro**) υδροηλεκτρικοί: < 100 kW
- Μίνι(**Mini**) υδροηλεκτρικοί: 100 kW έως 1 MW
- Μικροί(**Small**) υδροηλεκτρικοί: 1 MW έως 10 MW

Ωστόσο, οι ορισμοί μπορεί να διαφέρουν ανά τη χώρα και ρυθμιστικό φορέα. Η κατηγοριοποίηση δεν είναι μονάχα τεχνική: αντικατοπτρίζει τη πολυπλοκότητα της εγκατάστασης, ρυθμιστική εποπτεία και πιθανή περιβαλλοντική επίπτωση. Αντίθετα με τα φράγματα μεγάλης κλίμακας, οι περισσότεροι ΜΥΣΠΗΕ είναι συστήματα ροής, χρησιμοποιούν δηλαδή τη φυσική ροή του νερού χωρίς σημαντική αποθήκευση σε ταμιευτήρα.

Σκοποί της Πτυχιακής

Ο κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάλυση και τεκμηρίωση της λειτουργικότητας, αποδοτικότητας και εφαρμογής των ΜΥΣΠΗΕ στον πραγματικό κόσμο. Οι συγκεκριμένοι στόχοι περιλαμβάνουν:

1. την εξερεύνηση των λειτουργικών αρχών και χαρακτηριστικών αποδοτικότητας των ΜΥΣΠΗΕ
2. την έρευνα μελετών περιπτώσεων που υπογραμμίζουν την απόδοση, τις προκλήσεις και τον αντίκτυπο των ΜΥΣΠΗΕ
3. τη κατανόηση του πώς η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ΜΥΣΠΗΕ διοχετεύεται στα τοπικά ή εθνικά δίκτυα
4. την εξέταση εκτεταμένων εφαρμογών των ΜΥΣΠΗΕ πέρα από τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως υβριδικά ενεργειακά συστήματα και λύσεις για εφαρμογές εκτός δικτύου
5. την εκτίμηση των μελλοντικών πιθανοτήτων και περιορισμών των ΜΥΣΠΗΕ στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Πεδίο Εφαρμογής και Περιορισμοί

Αυτή η διατριβή εστιάζει αποκλειστικά σε υδροηλεκτρικά συστήματα κάτω από 10 MW, εξαιρουμένων των φραγμάτων μεγάλης κλίμακας και συστήματα αντλησιοταμίευσης. Θα δοθεί έμφαση στις διαμορφώσεις ροής και καναλιών όπως αντιπροσωπεύουν τη πλειονότητα

των τρεχόντων εφαρμογών ΜΥΣΠΗΕ. Ενώ αυτή η διατριβή συζητά την ενσωμάτωση στο δίκτυο και υβριδικά συστήματα, λεπτομερής οικονομική μοντελοποίηση και ανάλυση κύκλου ζωής υπερβαίνουν το πεδίο εφαρμογής της.

Γεωγραφικά, η μελέτη βασίζεται σε παγκόσμιες μελέτες περιπτώσεων αλλά δίνει ιδιαίτερη σημασία στην Ευρώπη και στην Ασία, όπου οι ΜΥΣΠΗΕ έχουν δείξει σημαντική ανάπτυξη σε ποικίλη περιβαλλοντικά και ρυθμιστικά πλαίσια. Περιορισμοί ίσως να προκύψουν λόγω της περιορισμένης πρόσβασης σε ιδιόκτητα δεδομένα απόδοσης ορισμένων εγκαταστάσεων.

Μεθοδολογία και Δομή

Η μεθοδολογία της έρευνας συνδυάζει βιβλιογραφική ανασκόπηση, συγκριτική ανάλυση περιπτώσεων, και θεωρητική μοντελοποίηση των συστημάτων ΜΥΣΠΗΕ. Τα δεδομένα προέρχονται από ακαδημαϊκά περιοδικά, κυβερνητικές εκθέσεις και τεκμηρίωση του κλάδου. Ποσοτικοί παράμετροι όπως ρυθμός ροής, υδραυλική κεφαλή, απόδοση τουρμπίνας και συντελεστής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν την απόδοση σε επιλεγμένες μελέτες περιπτώσεων.

Η δομή της διατριβής είναι όπως ακολουθεί:

- Το Κεφάλαιο 2 προσφέρει μια τεχνική επισκόπηση των ΜΥΣΠΗΕ, συμπεριλαμβανομένων τύπων τουρμπινών και αρχές σχεδιασμού.
- Το Κεφάλαιο 3 αξιολογεί τη αποδοτικότητα του συστήματος και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.
- Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει διεθνής μελέτες περιπτώσεων, συγκρίνοντας το σχεδιασμό των συστημάτων και τα αποτελέσματα.
- Το Κεφάλαιο 5 συζητά την ενσωμάτωση των ΜΥΣΠΗΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα.
- Το Κεφάλαιο 6 διερευνεί εναλλακτικές εφαρμογές όπως υβριδικά συστήματα και μικροδίκτυα.
- Το Κεφάλαιο 7 αντιμετωπίζει προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές.
- Το Κεφάλαιο 8 ολοκληρώνει με μια σύνθεση ευρημάτων και προτάσεων.

Αυτή η δομημένη προσέγγιση διασφαλίζει μια περιεκτική εξέταση των ΜΥΣΠΗΕ απο μια τεχνική και πρακτική σκοπιά.

Θεμελιώδη των Μικρών Υδροηλεκτρικών Συστημάτων

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παρουσιάζουν πληθώρα σημαντικών **πλεονεκτημάτων** σε σχέση με τους άλλους διάφορου τύπου σταθμών παραγωγής ενέργειας:

1.Ενεργειακά. Τα προτερήματα των υδροηλεκτρικών σταθμών με δεξαμενή σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά σε σύγκριση με άλλα συμβατικά συστήματα, είναι πως είναι ικανά σε λιγότερο χρονικό διάστημα να παραδώσουν το μεγαλύτερο μέρος ονομαστική ισχύ τους, συμβάλλοντας έτσι στην κάλυψη του φορτίου αιχμής. Επισημαίνεται ότι η παροχή στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας MWh σε περίοδο αιχμής είναι δύσκολη, κρίσιμη και κατά επομένως αρκετά κοστοβόρα. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ισχύ σε σταθερό ρυθμό και με απουσία διακυμάνσεων. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης μετατροπής ενέργειας από τη μία μορφή στην άλλη είναι μεγαλύτερος σε σχέση με άλλα βιώσιμες τεχνολογίες ΑΠΕ, αλλά και σε σύγκριση με τις συνηθισμένες τεχνολογίες. Επιπλέον παρουσιάζουν αξιόπιστη λειτουργία. Τα παραπάνω οφέλη πολλαπλασιάζονται με τη χρήση των λεγόμενων υδροηλεκτρικών συστημάτων αμφίδρομης λειτουργίας.

2.Οικονομικά. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα παρουσιάζουν γενικά υψηλό κόστος εγκατάστασης, αλλά επίσης διαθέτουν μικρό κόστος λειτουργίας (σε σταθμο με ισχύ 300 MW απαιτείται προσωπικό 20 υπαλλήλων) και συντήρησης (προγραμματισμένη κάθε 5.000 ώρες). Διαθέτουν υψηλή διάρκεια ζωής (για μικρά συστήματα 25 έως 30 ετη καθώς επίσης για μεσαίας και μεγάλης κλίμακας 50 έως 60 έτη). Αξιόλογη επίσης είναι η συμβολή τους στην αύξηση του επιπέδου ζωής των κατοίκων μιας κοινότητας (τελούνται συνοδευτικά έργα υποδομής όπως κατασκευή/ανακαίνιση δρόμων, γεφυρών κ.λπ.).

3.Περιβαλλοντικά. Διάφορα περιβαλλοντικά οφέλη προκύπτουν από τη συμβολή των υδροηλεκτρικών σταθμών όπως, για παράδειγμα, βελτίωση του φυσικού περιβάλλοντος μέσω την δημιουργίας των βιότοπων. Επιπλέον, παρουσιάζουν μηδαμινές εκπομπές καυσαερίων. Κατά την κατασκευή τους, το φυσικό στοιχείο του υδατος δεν υποκλέπτεται από τον σταθμό με αποτέλεσμα να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί συγχρόνως για διαφορετικές ανάγκες. Η κατασκευή ή ύπαρξη μεγάλων φυσικών ή ανθρωπίνων ταμιευτήρων προσθέτει στο υδροδυναμικό μιας χώρας μεγάλη φυσική ρυθμιστική ικανότητα ενέργειας, ενώ σε συνδυασμό με τα σχετικά μεγάλα υδραυλικά ύψη πτώσης λόγω του έντονου μορφολογικού πεδίου το κάνει κατάλληλο για την αντιμετώπιση του φορτίου αιχμής. Οι σταθμοί με ταμιευτήρα κατανομούνται σε έργα μονού ή πολλαπλού σκοπού με τα έργα μονού να αποδίδουν μόνο ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τα έργα πολλαπλού σκοπού επιτρέπουν τη χρήση το νερό και για πλήθος άλλων δραστηριοτήτων. Μερικές από τις δραστηριότητες αυτές είναι: αρδεύσεις καλλιεργήσιμων εκτάσεων, ύδρευση αστικών, αντιπλημμυρική

προστασία, ψύξη θερμοηλεκτρικών σταθμών ή βιομηχανικές χρήσεις, δημιουργία υδροβιότοπων και άλλες δραστηριότητες, όπως αλιεία ή ιστιοπλοΐα.

Τα υδροηλεκτρικά συστήματα όμως έχουν και ορισμένα **μειονεκτήματα**:

1. Υπάρχει μεγάλη διαφορά του υδρευτικού δυναμικού ανάμεσα στην υγρή και ξηρή περίοδο και κατα συνέπεια στην εποχιακή αυξομείωση της παραγόμενης ισχύος, κυρίως στους σταθμούς οι οποίοι δεν διαθέτουν ταμιευτήρα.
2. Μειωμένη ειδική ενεργειακή πυκνότητα του νερού (kW/kg νερού) κάτι το οποίο απαιτεί μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης υδάτων (π.χ. φράγματα, υδαταγωγοί, κ.λπ.) και, επιπλέον, υψηλό κεφάλαιο επένδυσης.
3. Πληθος τεχνικών προκλήσεων σχετικά με την κατασκευή (έργα διαφόρων ιδιοτήτων στον τομέα του μηχανικού όπως για παράδειγμα, στεγανότητα φραγμάτων, εκτροπές ποταμών κ.λπ., από την πλευρά του πολιτικού και: διασύνδεση με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο κ.λπ. από την πλευρά του του ηλεκτρολόγου/ μηχανολόγου.)
4. Εκτενής χρονική διάρκεια υλοποίησης της κατασκευής που συναρτήσει με το μέγεθος αλλά και τις τυχόν τροποποιήσεις των συστημάτων (3-8 χρόνια)
5. Αλλαγή χρήσης γης στην περίπτωση κατασκευής μεγάλων φραγμάτων με αποτέλεσμα τη μετεγκατάσταση επαγγελματικών και κοινωνικών δραστηριοτήτων και την κοινωνική δυσανασχέτιση.

Υδάτινο Δυναμικό

Κατα το πρώτο και βασικό στάδιο απαιτείται η μελέτη του υδάτινου δυναμικού για την εκμετάλλευσή του, είτε πρόκειται για υδρομηχανικές ή υδροηλεκτρικές μηχανές μικρής ή μεγάλης κλίμακας. Το υδάτινο δυναμικό ταξινομείται σε:

- θεωρητικό
- διαθέσιμο
- τεχνολογικό
- οικονομικά εκμεταλλεύσιμο

Η εκμετάλλευσή του υδάτινου δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί σε σημεία που διατίθεται σημαντική ποσότητα ρέοντος νερού με εξίσου σημαντική μηχανική ενέργεια, (κινητική ενέργεια κατα το μήκος ενός ποταμού ή δυναμική ενέργεια ενός ταμιευτήρα).

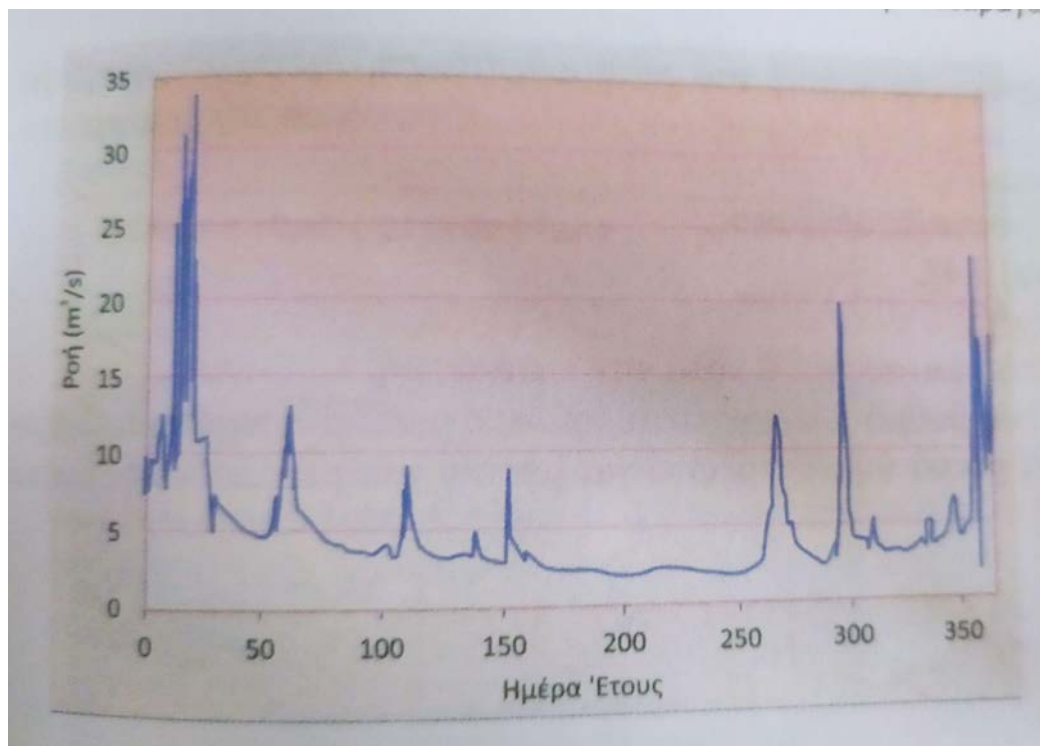
Η ύπαρξη χρονοσειράς δεδομένων της μέσης ημερήσιας ροής του ποταμού για μεγάλη σχετικά χρονική περίοδο απαιτείται κατά την εκτίμηση της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από έναν ΥΗΣ το οποίο είναι εγκατεστημένο στη ροή ενός ποταμού, απαιτεί την

ύπαρξη χρονοσειράς δεδομένων της μέσης ημερήσιας ροής του ποταμού για μεγάλη σχετικά χρονική περίοδο, ικανή να αναπαραστήσει την πραγματική ροή και να μειωθούν τα σφάλματα στους υπολογισμούς λόγω μεταβλητότητας. Επειδή μακροχρόνιες μετρήσεις στα σημεία που είναι δυνατόν να εγκατασταθούν τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια πρέπει να γίνονται αναγωγές από τα σημεία των ποταμών στα οποία υπάρχουν μετρήσεις (τουλάχιστον 20 ετών) με βάση στοιχεία από τη γεωγραφία της περιοχής, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και δεδομένα από περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά (κλίμα, γεωλογία, βλάστηση, ανθρώπινη δραστηριότητα, κ.λπ.).

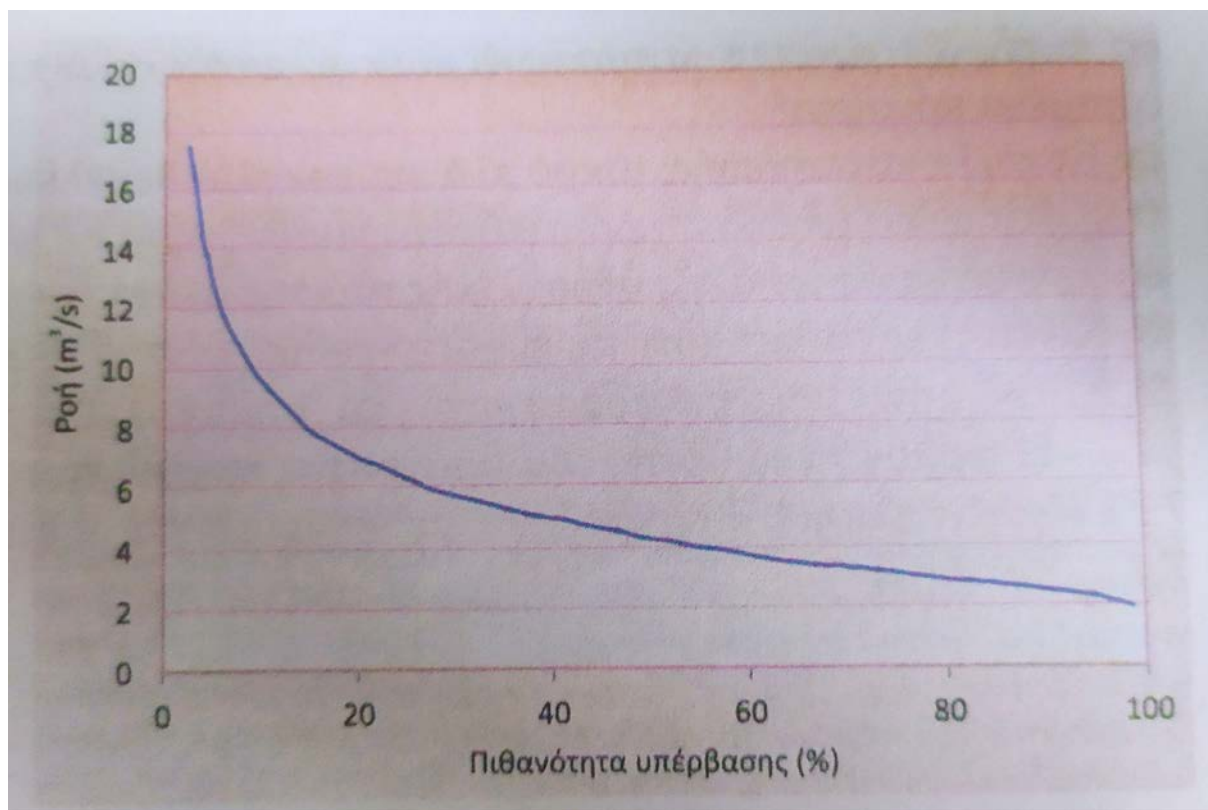
Χρησιμοποιώντας διάφορα υδρολογικά μοντέλα και μετρήσεις μπορούν να δημιουργηθούν ακριβείς χρονοσειρές της μέσης ημερήσιας ροής ενός ποταμού σε μία συγκεκριμένη θέση. Η γραφική αναπαράσταση της χρονοσειράς αυτής στη διάρκεια ενός έτους ορίζεται ως ετήσιο υδρογράφημα (Εικόνα 2.1).

Από το υδρογράφημα είναι δυνατόν να δημιουργηθεί η καμπύλη διάρκειας παροχής η οποία συμβάλλει σημαντικά στον υπολογισμό του δυναμικού όπως επίσης στον αρχικό προσχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού έργου. Η καμπύλη παροχής παρουσιάζει το ποσοστό του χρόνου (t) του έτους όπου η παροχή του νερού είναι ίση ή υπέρβουσα μιας συγκεκριμένης τιμής της ροής, (Εικόνα 2.2).

Η μορφή της καμπύλης διάρκειας παροχής είναι επίσης ικανή, από μόνη της, να παρέχει κρίσιμα δεδομένα για την προτεινόμενη εγκατεστημένη ισχύ, τον αριθμό των μονάδων καθώς και για τον έλεγχο της οικονομικής βιωσιμότητας του σταθμού.



Εικόνα 2.1. Παράδειγμα ετήσιου υδρογραφήματος ποταμού



Εικόνα 2.2 Παράδειγμα καμπύλης διάρκειας παροχής

Για παράδειγμα, η καμπύλη διάρκειας παροχής είναι ικανή να αποκαλύψει αν ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής ετήσιας παροχής κάνει την εμφάνιση του για ελάχιστη χρονική περίοδο ή, αντίθετα, αν ο ρυθμός ροής είναι σταθερός για εκτενή χρονική περίοδο

Η μορφολογία μιας περιοχής (ανάγλυφο) καθώς και ο υδρολογικός κύκλος συμβάλλουν στη δημιουργηθούν κατάλληλων συνθηκών για την εκμετάλλευση της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας του ύδατος. Το νερό της ατμόσφαιρας καταλήγει στην επιφάνεια της Γης ως βροχόπτωση ή χιονόπτωση. Καποια ποσότητα του νερού εξατμίζεται, ενώ η μεγαλύτερη ποσότητα συσσωρεύεται επιφανειακά σε θάλασσες, λίμνες ή ποτάμια. Ο κύκλος του νερού ολοκληρώνεται με τη δημιουργία σύννεφων μέσω της εξάτμιση από τη θάλασσα και της υγρασία της ξηράς (Εικόνα 2.3). Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι ο ρολος του ήλιου είναι καθοριστικός για τη δημιουργία του υδρολογικού κύκλου.

Η εκτίμηση των διαθέσιμων υδάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε άμεσα μέσω μετρήσεων σε συγκεκριμένες θέσεις, πχ. ποτάμια ή λίμνες, είτε έμμεσα από αξιοποίηση δεδομένων βροχόπτωσης και χρήση υπολογιστικών μοντέλων. Διαθέσιμα στοιχεία μετρήσεων κατακρημνίσεων υπάρχουν σε όλες τις περιοχές, ενώ μετρήσεις ποσότητας νερού στα

Ο υδρολογικός κύκλος

ήλιος

η ατμόσφαιρα

Εξάτμιση

Εξατμοδιαπνοή

Συμπύκνωση

Κατακρήμιση

Εξάχωση

Κατακρήμιση

δρόσος

Ομίχλη

Επιφανειακή απορρόφηση

Αλμυρές λίμνες

Υγρότοποι

Ο ποταμός ρέει στους ωκεανούς

τους ωκεανούς

Εξάτμιση

Απορρόφηση από τα φυτά

των ζώων

λίμνες

Πηγή

Υγρασία εδάφους

Γρασαία

διαρροή

Ροή σε υδατορεύματα

τήξη χιόνι

Χιόνι, πάγος και παγετώνες

Κατεψυγμένο χώμα

ηφαιστειακό ατμό

Διήθηση υπογείου νερού

Εκφόρτιση υπόγειου νερού

ρεύματα στον ωκεανό

τρύπα

Αποθήκευση υπόγειου νερού

U.S. Dept. of the Interior
U.S. Geological Survey
Howard Perlman, John Evans, USGS
<https://www.usgs.gov/water-science-school>
Αυτό το διάγραμμα δείχνει τον «κλασικό» κύκλο του ύδατος της Γης, παραλείποντας τις σημαντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης επιρροής.

Επίσημοι φορείς περιβαλλοντικών υπηρεσιών διαφόρων χωρών πραγματοποιούν τις μετρήσεις αυτές. Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (Global Information System, GIS) και τα υδρολογικά μοντέλα αποτελούν δύο εργαλεία τα οποία, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις, μπορούν να οδηγήσουν σε εκτίμηση του δυναμικού τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Οι βασικές παράμετροι εκτίμησης του υδατικού δυναμικού που καθορίζουν τη θέση στην οποία η εκμετάλλευση του είναι δυνατή είναι:

- $$g(E-A)=gh \text{ (J/kg)}$$

12

Η κινητική ενέργεια του νερού στον ταμιευτήρα, λόγω του μεγάλου όγκου του μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Επομένως η υδραυλική ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού που ιδανικά διατίθεται προς μετατροπή σε μηχανική ισχύ ισούται με:

$$e_{\text{hyd}} = g(E - A) = gh \text{ (J/kg)}$$

Εάν η ογκομετρική παροχή του νερού είναι $\dot{V}$ (m^3/s), τότε η αντίστοιχη θεωρητική υδραυλική ισχύς, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{W} = \rho \dot{V} gh \text{ (W)}$$

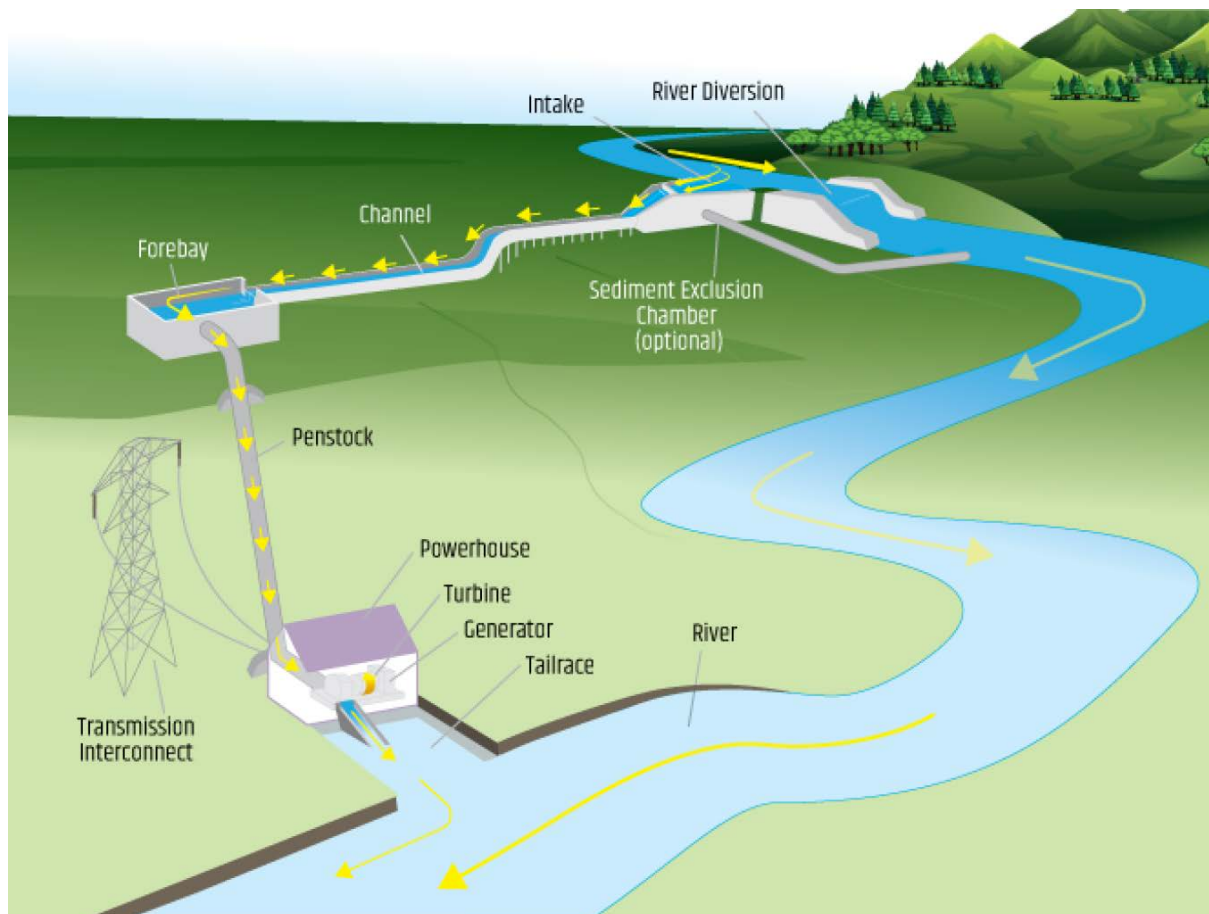
$$\varepsilon = \rho g$$

$$\dot{W} = \varepsilon \dot{V} h \text{ (W)}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού και ε το ειδικό βάρος του νερού.

Τύποι μικρών υδροηλεκτρικών συστημάτων

Συστήματα ροής (Run-of-River)



Εικόνα 2.4. Παράδειγμα υδροηλεκτρικού σταθμού ροής

Τα συστήματα ροής (συχνά καλούμενα και εκτροπής) είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών σε παγκόσμια κλίμακα. Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια

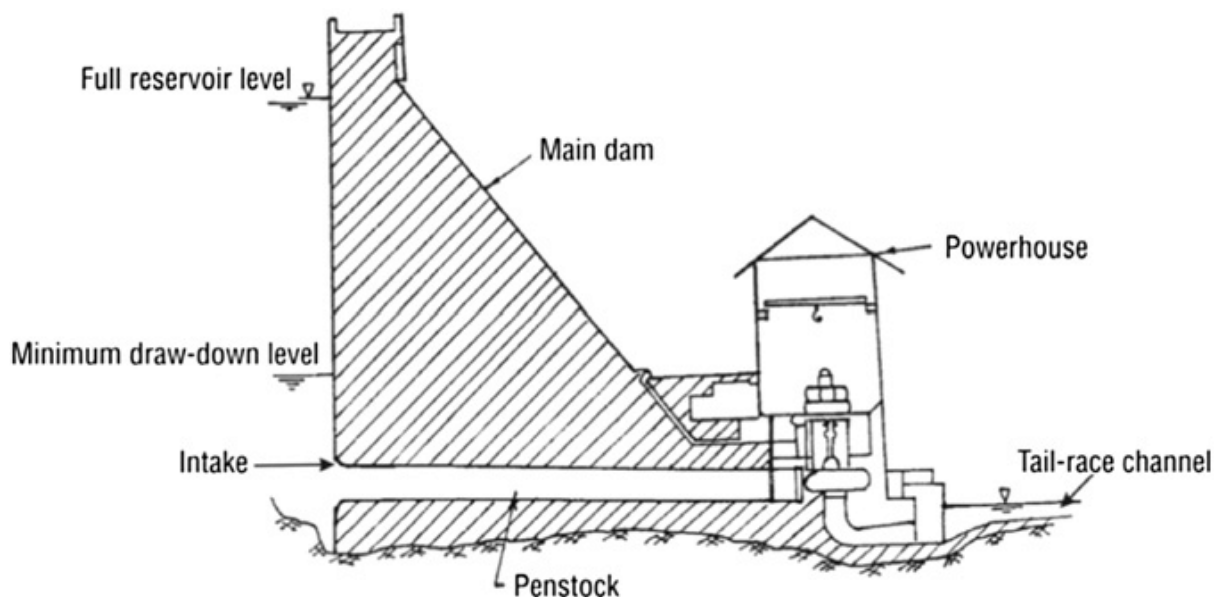
εκτρέποντας ένα κομμάτι της φυσικής ροής του ποταμού μέσω ενός καναλιού ή αγωγού πτώσης προς ένα στρόβιλο, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης μεγάλης δεξαμενής.

Το νερό εκτρέπεται σε ένα φράγμα ή μικρό κτίριο εισαγωγής και κατευθύνεται σε μια λεκάνη καθίζησης για να αφαιρεθούν συντρίμια και ιζήματα. Έπειτα ρέει μέσω ενός αγωγού –συνχά πεπιεσμένου σωλήνα– σε μια αποθήκη που, εκεί, ωθεί έναν στρόβιλο που είναι συνδεδεμένος σε μια γεννήτρια. Μετά τη μετατροπή της ενέργειας, το νερό επιστρέφεται στο ποτάμι σε ένα κατώτερο σημείο της ροής

Οι σταθμοί αυτού του τύπου εγκατασθίζονται συνήθως σε ορεινές ή λοφώδεις περιοχές με σταθερές κλίσεις εδάφους. Επίσης, τέτοιοι σταθμοί παρουσιάζουν ελάχιστη περιβαλλοντική αναστάτωση λόγω της έλλειψης έλλειψη μεγάλης δεξαμενής. Το ποσό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλει ανάλογα με την εποχή λόγω της εξάρτησης από τη ροή του ποταμού.

Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου σταθμού απαιτεί προσεκτική προσέγγιση για την αποφυγή μεγάλων προκλήσεων. Πρώτα, προσεκτική υδρολογική έρευνα είναι απαραίτητη για να εκτιμηθεί η αξιοπιστία της ροής. Η ροή και η υψομετρική διαφορά πρέπει να είναι επαρκής για την βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή.

Συστήματα φράγματος-δακτύλου [Dam-toe (Toe-of-Dam)]



Εικόνα 2.5 Παράδειγμα σταθμού φράγματος-δακτύλου

Ένας άλλος τύπος είναι τα συστήματα φράγματος-δακτύλου, που χρησιμοποιούν υπάρχοντα φράγματα, τα οποία χτίστηκαν για μη ενεργειακούς σκοπούς όπως άρδευση, έλεγχος πλυμμήρων και παροχή νερού, ως το θεμέλιο για την υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας. Αυτά είναι μετασκευαστικά έργα που εγκαθιστούν στρόβιλους στη βάση (ή δάκτυλα) του φράγματος όπου νερό ήδη απελευθερώνεται.

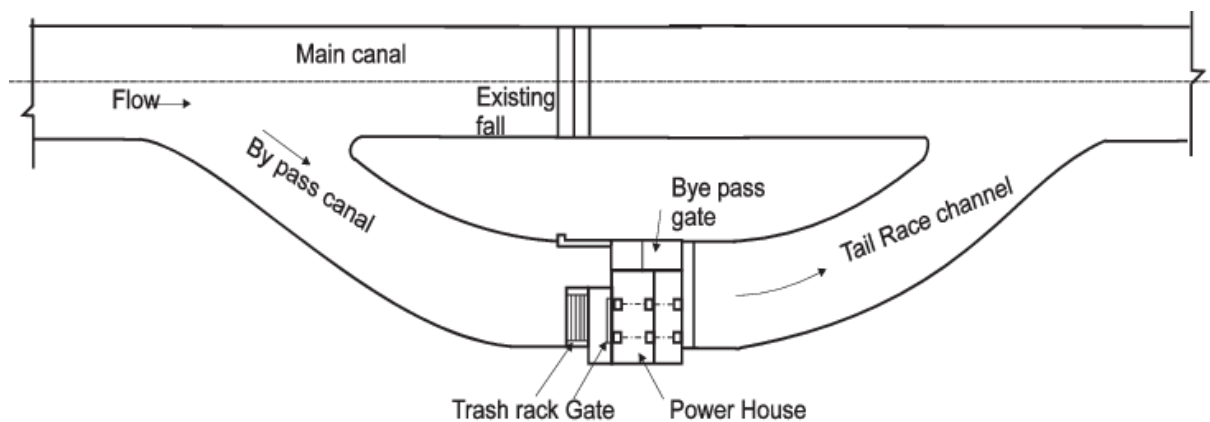
Το νερό που είναι αποθηκευμένο στο φράγμα απελευθερώνεται με ελεγχόμενο τρόπο μέσω ενός στρόβιλου τοποθετημένου στην κάτω έξοδο. Η πίεση που δημιουργείται από το ύψος

της δεξαμενής κινεί τον στρόβιλο, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να αλλοιώνει τον αρχικό σκοπό του φράγματος

Αυτή η διάταξη τυπικά λειτουργεί υπό υψηλή και σταθερή υψομετρική διαφορά, εγγυώντας σταθερή παραγωγή. Επίσης, λόγω της χρήσης ήδη υπάρχουσας υποδομής, το κόστος είναι χαμηλό και επιτρέπει τη πολλαπλή χρήση του νερού, για αρδευση και παράλληλη παραγωγή ενέργειας.

Όμως, αυτός ο τύπος, επίσης, χρειάζεται μελέτη μετακατασκευής και εκτίμηση ασφαλείας του φράγματος. Επιπλέον, η επιλογή του στροβίλου εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά και τον ρυθμό εκροής και η κατασκευή πρέπει να συμμορφώνεται με τους ισχύοντες κανόνες λειτουργίας φραγμάτων και τους κανονισμούς περιβαλλοντικής ροής.

Συστήματα τύπου καναλιού



Εικόνα 2.6 Παράδειγμα σταθμού τύπου καναλιού

Ακόμη ένας τύπος είναι ένα σύστημα σαν αυτό, που χρησιμοποιεί τεχνητά κτίσματα μεταφοράς νερού, όπως κανάλια άρδευσης ή υδραγωγεία, για να εκμεταλλευτεί την κινητική ή δυναμική ενέργεια του τρεχούμενου νερού. Σταθμοί τέτοιου τύπου είναι συνήθως εγκατεστημένοι εκεί όπου ήδη υπάρχει πτώση υψομετρου ή και ρύθμιση της ροής.

Ένα μέρος της ροής του αρδευτικού καναλιού διοχετεύεται σε έναν στρόβιλο, συνήθως τύπου Kaplan ή Ossberger, που βρίσκεται εγχώρια, μέσα στην υποδομή του καναλιού. Οι σταθμοί αυτού του τύπου λειτουργούν με μικρή ή μεσαία υψομετρική διαφορά και σταθερούς ρυθμούς ροής, συχνά ωφελώντας από την προβλεψιμότητα της ροής λόγω των διαχειριζόμενων αρδευτικών προγραμμάτων

Τα συστήματα τύπου καναλιών έχουν χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω των τεχνητών υδραγωγικών υποδομών. Επίσης, έχουν συμπαγή και αρθρωτό σχεδιασμό που ταιριάζει στις τοπικές, κατανεμημένες ενεργειακές απαιτήσεις, και, λόγω του σταθερού ρυθμού ροής που είναι συγχρονισμένος με το πρόγραμμα άρδευσης αποτελούν ιδανική λύση για αγροτικές περιοχές.

Ωστόσο, ιδιότητες όπως η υψομετρική διαφορά και η εκτροπή του ρεύματος δεν πρέπει να παρεμβαίνουν με τη κανονική λειτουργία του καναλιού. Επιπλέον, ο τύπος του στροβίλου πρέπει να είναι κατάλληλος για περιβάλλον με χαμηλή υψομετρική διαφορά και υψηλή

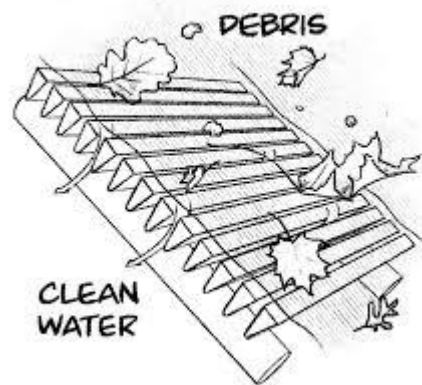
ροή.Επίσης, πρέπει να διασφαλίζεται πρόσβαση για συντήρηση χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του καναλιού

Βασικά Στοιχεία και Διατάξεις

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί αποτελούνται από πολλά αλληλένδετα υδραυλικά και ηλεκτρομηχανικά στοιχεία που είναι σχεδιασμένα να αλλάζουν την δυναμική ενέργεια του τρεχούμενου νερού σε ηλεκτρική ενέργεια αποδοτικά και αξιόπιστα. Αυτό το μέρος υπογραμμίζει βασικά πολιτικά, υδραυλικά και ηλεκτρικά στοιχεία που συναντώνται σε πολλές εγκαταστάσεις ΜΥΣΠΗΕ, ακολουθούμενα από αντιπροσωπευτικές διατάξεις που απεικονίζουν την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα.

Πολιτικές Δομές

1.Φράγμα εισαγωγής ή Κτίσμα εκτροπής



Εικόνα 2.7 (αριστερά) Κτίσμα εισροής

Εικόνα 2.8 (δεξιά) Κόσκινο (Coanda screens)

Ένα κτίσμα εκτροπής είναι το πρώτο σημείο επαφής της κατασκευής με το ποτάμι, ρεύμα ή κανάλι. Το υλικό κατασκευής ενός τέτοιου κτίσματος είναι συνήθως σκυρόδεμα ή πέτρα σε ορισμένες περιπτώσεις και τυπικά είναι εξοπλισμένο με μια σχάρα απορριμάτων για να εμποδίζει την εισροή μεγάλων μπαζών και ίσως να περιλαμβάνει υδροφρακτικές πύλες για τη ρύθμιση της ροής. Σε μοντέρνους σχεδιασμούς, χρησιμοποιούνται κόσκινα (Coanda screens) που παρέχουν δυνατότητες αυτοκαθαρισμού ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν τη μείωση της υψομετρικής διαφοράς [1]. Η θέση της εισαγωγής και η γωνία σε σχέση με τη ροή επηρεάζουν την είσοδο ιζημάτων και τις υδραυλικές απώλειες.

2.Λεκάνη αφαλάτωσης (δεξαμενή καθίζησης)

Η λεκάνη αφαλάτωσης είναι στοιχείο κριτικής σημασίας για την προστασία του στροβίλου από τη διάβρωση και τη φθορά από λείανση, ειδικά σε ποτάμια πλούσια σε ιζήματα. Η ταχύτητα του νερού μειώνεται στη λεκάνη για να επιτρέψει βαρύτερα σωματίδια να

καταθέσουν. Σχέδια συχνά ακολουθούν εμπειρικές οδηγίες βασισμένες στη ταχύτητα κατακάθισης και στο χρόνο διατήρησης [2].



Εικόνα 2.9 (αριστερά) Δεξαμενή καθίζησης της λίμνης Marion στη νοτιοκεντρική Minnesota πριν τον καθαρισμό

Εικόνα 2.10 (αριστερά) Δεξαμενή καθίζησης της λίμνης Marion στη νοτιοκεντρική Minnesota μετά τον καθαρισμό

3.Κανάλι μεταφοράς (Headrace Channel)



Εικόνα 2.11 Παράδειγμα καναλιού μεταφοράς

Εκεί όπου η εισαγωγή είναι απομακρυσμένη από το σταθμό, ένα κανάλι μεταφοράς (ανοιχτό ή με επένδυση) μεταφέρει νερό σε μια προκυμαία. Ένα τέτοιο στοιχείο συναντάται συνήθως στα συστήματα ροής ή στα συστήματα τύπου καναλιού. Αυτά τα κανάλια πρέπει να είναι σχεδιασμένα για μηδαμινές ταραχές, κατάλληλη κλίση, και επαρκή επίστρωση ώστε να μειωθούν οι απώλειες διαρροών [3].

4. Δεξαμενή Πρόβειου Κόλπου



Εικόνα 2.12 Παράδειγμα δεξαμενής προβείου κόλπου

Τοποθετημένο στο τέλος του καναλιού μεταφοράς, υπηρετεί ως μια δεξαμενή αδρανοποίησης που σταθεροποιεί τη ροή πριν εισαχθεί στον υδατοφράκτη. Επιτρέπει στον αέρα που έχει παρασυρθεί να διαφύγει και εξασφαλίζει σταθερή υψομετρική διαφορά στην είσοδο του υδατοφράκτη

Υδραυλικά Στοιχεία

1. Υδατοφράκτης

Ο υδατοφράκτης είναι ένας κλειστός σωλήνας, συνήθως κατασκευασμένος από χάλυβα, HDPE ή GRP, που παρέχει νερό υπό πίεση στον στρόβιλο. Η διάμετρος, το πάχος του τοιχώματος και η αγκύρωση καθορίζονται από τον ρυθμό ροής, το μανομετρικό ύψος και τις συνθήκες του εδάφους. Οι απώλειες τριβής πρέπει να ελαχιστοποιούνται μέσω της επιλογής

και της ευθυγράμμισης του υλικού [4]. Η σωστή αγκύρωση και οι αρμοί διαστολής είναι ζωτικής σημασίας για την αντοχή σε δυναμικά φορτία.



Εικόνα 2.13 Παράδειγμα υδατοφράκτη

2.Δοχείο Υπερτάσεων / Βαλβίδα Αέρος



Εικόνα 2.14 (αριστερά) Παράδειγμα δοχείου υπερτάσεως



Εικόνα 2.15 (δεξιά) Παράδειγμα βαλβίδος αέρα

Σε μακριούς ή απότομους υδατοφράκτες, χρησιμοποιούνται δοχεία υπερτάσεως ή βαλβίδες αέρος για να μετριάσουν τη διακύμανση της πίεσης (γνωστή και ως υδατοσφύριση). Αυτά τα στοιχεία βελτιώνουν την ευστάθεια του συστήματος και εμποδίζουν μηχανικές αστοχίες [5].

Ηλεκτρικά και Μηχανικά Στοιχεία

1. Στρόβιλος



Εικόνα 2.16 Παράδειγμα στροβίλου

Ο στρόβιλος είναι η βασική μονάδα μετατροπής ενέργειας που μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική περιστροφή. Η επιλογή του στροβίλου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μανομετρικού ύψους και της ροής (καλύπτονται στην Ενότητα 2.4). Στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, οι συνηθισμένοι τύποι περιλαμβάνουν τους στροβίλους Pelton, Francis, Kaplan και τους στροβίλους διασταυρούμενης ροής.

2. Γεννήτρια



Εικόνα 2.17 Παράδειγμα γεννήτριας

Συνδεδεμένη απευθείας με τον άξονα του στροβίλου, η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται συχνά σε

συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο που απαιτούν ακριβή έλεγχο συχνότητας, ενώ οι ασύγχρονες γεννήτριες προσφέρουν απλότητα και οικονομικά οφέλη για μεμονωμένες λειτουργίες ή λειτουργίες μεταβλητού φορτίου [6].

3.Ρυθμιστής Στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών ρυθμίζει την ταχύτητα του στροβίλου ρυθμίζοντας τη ροή του νερού, διατηρώντας τη συχνότητα και τη σταθερότητα του συστήματος. Τα σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν συχνά ηλεκτρονικούς ρυθμιστές στροφών (μέσω PLC ή μικροελεγκτών) που επιτρέπουν την απομακρυσμένη επίβλεψη και την πιο άμεση παρακολούθηση του φορτίου [7].



Εικόνα 2.18 Παράδειγμα ρυθμιστή στροφών

4.Πίνακες Ελέγχου και Προστασίας

Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει ηλεκτρικό εξοπλισμό, ανίχνευση σφαλμάτων (υπέρταση, υπερένταση) και όργανα παρακολούθησης. Πολλοί ΜΥΣΠΗΕ ενσωματώνουν συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (Εποπτικός Έλεγχος και Συλλογή Δεδομένων) για αυτοματοποιημένη λειτουργία, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένους ή μη επανδρωμένους σταθμούς [8].

Κανάλι Εξαγωγής

Το κανάλι εξαγωγής επιστρέφει το χρησιμοποιημένο νερό στο κατηφορικό ρεύμα του ποταμού. Ο σχεδιασμός του θα πρέπει να ελαχιστοποιεί την αντίθλιψη, τις αναταράξεις και

την παρασυρόμενη ροή αέρα, τα οποία μπορούν να μειώσουν την απόδοση της τουρμπίνας και να αυξήσουν τη φθορά.



Εικόνα 2.19 Παράδειγμα πίνακα ελέγχου



Τεχνολογίες Στροβίλων

Ο υδροστρόβιλος αποτελεί το πιο κρίσιμο εξάρτημα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς ευθύνη του είναι να η μετατροπή της μηχανική ενέργεια του ύδατος σε περιστροφική. Η ενέργεια μεταδίδεται σε κατάλληλα διαμορφωμένες υδροδυναμικές επιφάνειες (σκαφίδια ή πτερύγια) μέσω επαφής με το ρεύμα του νερού. Η επιλογή του τύπου και του μεγέθους του υδροστρόβιλου γίνεται με στόχο την βελτίωση βαθμού απόδοσης, που με τη σειρά του οδηγεί στη βελτίωση παραγωγή ισχύος αλλά και στην εκμετάλλευση όσο μεγαλύτερης οικονομικά συμφέρουσας παροχής σε σχέση με την καμπύλη διάρκειας παροχής. Η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του του στροβίλου αποτελεί την κύρια παράμετρος σχεδιασμού του. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πάνω από ένας υδροστρόβιλος για τη βελτιστοποίηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του έργου έτσι ώστε κάθε φορά να επιλέγεται η λειτουργία που παρέχει συνδυαστικά τον καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Ταξινόμηση

Οι υδροστρόβιλοι ανάλογα με τον τρόπο που παραλαμβάνουν την ενέργεια του νερού, χωρίζονται σε:

- Υδροστρόβιλους δράσης ή ισοθλιπτικούς (τύπου Pelton). Η διαθέσιμη (κυρίως δυναμική) ενέργεια των υδάτων μετασχηματίζεται σε κινητική ενέργεια σε συνθηκες ατμοσφαιρική πίεση, κάνοντας χρήση του ακροφυσίου εξόδου του αγωγού προσαγωγής. Η δέσμη ύδατος η οποία διαθέτει πλέον μόνο κινητική ενέργεια, οδηγείται και προσκρούει πάνω στα σκαφίδια χωρίς να τα γεμίζει εντελώς και εξέρχεται από τα σκαφίδια διαθέτοντας καινούργια διεύθυνση, καθώς κατά τη ροή του πάνω σε κάθε πτερύγιο ακολουθεί το σχήμα της επιφάνειας του σκαφιδίου. Τα σκαφίδια είναι τοποθετημένα στη περιμετρο του στροφείου του υδροστρόβιλου το οποίο περιστρέφεται εξαιτίας του πλήγματος (δύναμης) που δέχεται από την επιτρεπόμενη στα σκαφίδια του υδάτινη δέσμη, με τη στατική πίεση του νερού να παραμένει σταθερή στο χώρο του στροφείου.
- Υδροστρόβιλους αντίδρασης (τύπου Kaplan, Francis), στους οποίους παρατηρείται κυρίως δυναμική ενέργεια στο νερό. Τμήμα της αυτής ενέργειας μετασχηματίζεται σε κινητική κατά την διέλευση του νερού μέσα από τα οδηγία πτερύγια του εσωτερικού σώματος του κελύφους όπου μέρος της διαθέσιμης πίεσης μετατρέπεται σε ταχύτητα και στη συνέχεια πέφτει πάνω στα πτερύγια του στροφείου. Στο σημείο αυτό, στο μέρος ανάμεσα στα πτερύγια του στροφείου, το νερό λόγω της υφιστάμενης υψηλής πίεσης που διαθέτει αρχικά, δέχεται επιταχύνση εξερχόμενο από τα πτερύγια του στροφείου με μεγαλύτερη ταχύτητα και βέβαια μικρότερη πίεση. Με αυτόν τον τρόπο, το νερό το οποίο εξέρχεται από τα πτερύγια του στροφείου νερό δημιουργεί εξ αντιδράσεως μία συνιστώσα δύναμη εφαπτομενικής διεύθυνσης. Στη κατηγορία αυτή των υδροστρόβιλων, τμήμα μόνο της δυναμικής του ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε κινητική, ενώ το υπόλοιπο παρουσιάζεται ως δυναμική (υπό τη μορφή πίεσης). Έτσι, καθώς το νερό διέρχεται μέσα από τα κινούμενα και σταθερά πτερύγια, με πίεση καταλαμβάνει ολόκληρο το διαθέσιμο χώρο, χωρίς να

παρουσιάζονται κενά. Δηλαδή στους υδροστροβίλους αντίδρασης η παραγωγή ισχύος οφείλεται κυρίως στη δυναμική ενέργεια και λιγότερο στην κινητική ενέργεια που διαθέτει το νερό σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους δράσης που εκμεταλλεύονται τη μοναδική ενέργεια που διαθέτει το νερό λίγο πριν την πρόσπτωσή του στον υδροστροβίλο και αυτή είναι η κινητική. Το νερό κατά την έξοδο του από το υδροστροβίλο μπορεί να εκρέει υπό πίεση μέχρι και 8m ύψους στήλης νερού. Για αυτό απαιτείται η δημιουργία κατάλληλου αγωγού εκτόνωσης (διαχύτης) κατά την έξοδο.

Οι υδροστροβίλοι ανάλογα του διαθέσιμου ύψους πτώσεως χρησιμοποιούνται:

- Για υψηλές τιμές του υδραυλικού ύψους πτώσης (>500 μετρα) χρησιμοποιείται συνήθως ο στροβίλος τύπου Pelton.
- Για μεσαίες τιμές του υδραυλικού ύψους πτώσης (50-500 μετρα), είναι συνηθέστερη η χρήση του στροβίλου τύπου Francis
- Για χαμηλές τιμές του υδραυλικού ύψους πτώσης (<50 μέτρα), χρησιμοποιείται συχνά ο στροβίλος τύπου Kaplan.

Οι υδροστροβίλοι ανάλογα το βαθμό αντίδρασης (ο οποίος ορίζεται για ασυμπίεστη και ισηντροπική ροή, ως εξής: $R = \Delta P_{\text{TOR}} / \Delta P_{\text{STAGE}}$), χωρίζονται σε:

- Αντιδράσεως ή ολικής προσβολής, όπου ολόκληρο το στροφείο λειτουργεί αξονοσυμμετρικά. Οι υδροστροβίλοι αυτοί διαθέτουν βαθμό αντίδρασης διάφορο του μηδενός, με άλλα λόγια η ροή διά μέσου του στροφείου πραγματοποιείται με ταυτόχρονη μεταβολή της στατικής πίεσης και γι' αυτό τα στροφεία τους είναι ολικής προσβολής, (ομοιόμορφη λειτουργία κατά την περιφερειακή διεύθυνση)
- Δράσεως, (βαθμός αντίδρασης $R=0$) οι οποίοι είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα του στροφείου συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή.

Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης του άξονα περιστροφής του υδροστροβίλου χωρίζονται σε οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα περιστροφής.

Ανάλογα με τη διεύθυνση των υδάτων στον υδροστροβίλο χωρίζονται σε:

- Εφαπτομενικής ροής (Pelton)
- Αξονικής ροής (Kaplan)
- Αντινικής (Francis)
- Μικτής ροής (Francis)

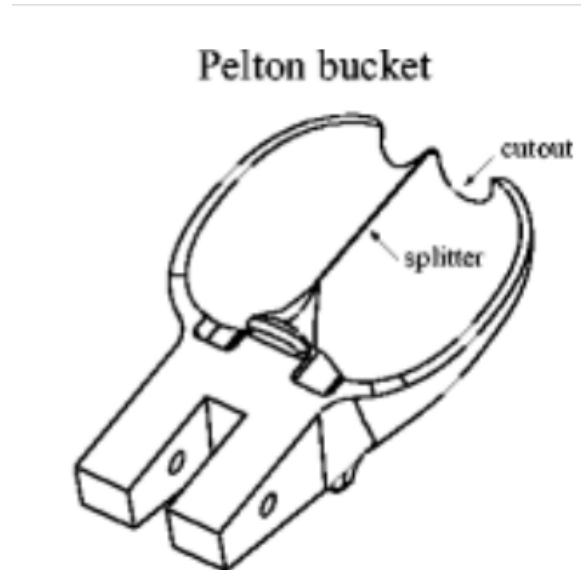
Υδροστροβίλοι Δράσεως (τύπου Pelton)

Ο υδροστροβίλος αυτός κατασκευάστηκε για πρώτη φορά το 1889 από τον Αμερικανό Lester Pelton. Ποσότητα νερού με τη μορφή δέσμης jet υψηλής πίεσης και ταχύτητας εκτοξεύεται από ένα ακροφύσιο και ρίχνεται στα περύγια του στροβίλου. Τα περύγια του στροβίλου του υδροστροβίλου έχουν τη μορφή κουταλιών (buckets) διατεταγμένα περιφερειακά του στροφείου που στο κάθετο άξονα τους έχουν ένα διαχωριστικό, ώστε όταν η δέσμη νερού πέφτει σε αυτά να χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο εξωτερικό μέρος, τα σκαφίδια έχουν μια

εγκοπή που κάνει δυνατή αρχικά την γρήγορη εκπλήρωση του ιδανικού σκαφιδίου και στη συνέχεια το γρήγορο άδειασμα του. Το στροφείο κατασκευάζεται είτε ως ένα μέρος ή σε κομμάτια που συναρμολογούνται. Στη δεύτερη περίπτωση, τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και προσαρμόζονται στο στροφείο μέσω κοχλίωσης με ασφάλιση. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από τη ροή, αυτά κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο αριθμός των σκαφιδίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του jet νερού και των σκαφιδίων, αλλά συνήθως είναι 20 με 26.

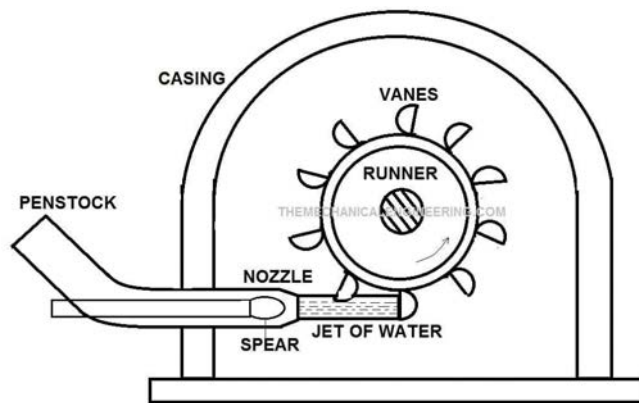


Εικόνα 2.11 (αριστερά) Υδροστρόβιλος τυπου Pelton



Εικόνα 2.12 (δεξιά) Απεικόνιση ενός σκαφιδίου

Σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό με στροβίλο Pelton, το νερό κατέρχεται μέσα από τον αγωγό προσαγωγής και, κατευθύνεται στον στρόβιλο, διέρχεται από το/τα ακροφύσιο/ακροφύσια και εξέρχεται με τη μορφή jet κυκλικής διατομής, δηλαδή η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε κινητική. Καθώς το jet προσπίπτει εφαπτομενικά στα σκαφίδια του στροφείου, δημιουργεί τη ζητούμενη κινητήρια ροπή. Το στροφείο είναι τοποθετημένο πάνω από την ελεύθερη ροή της κάτω δεξαμενής και έτσι το jet του νερού, μετά την πρόπτωση του στα σκαφίδια του στροφείου, προσπίπτει στην ελεύθερο μέρος του αγωγού απαγωγής εξαιτίας της βαρύτητας.

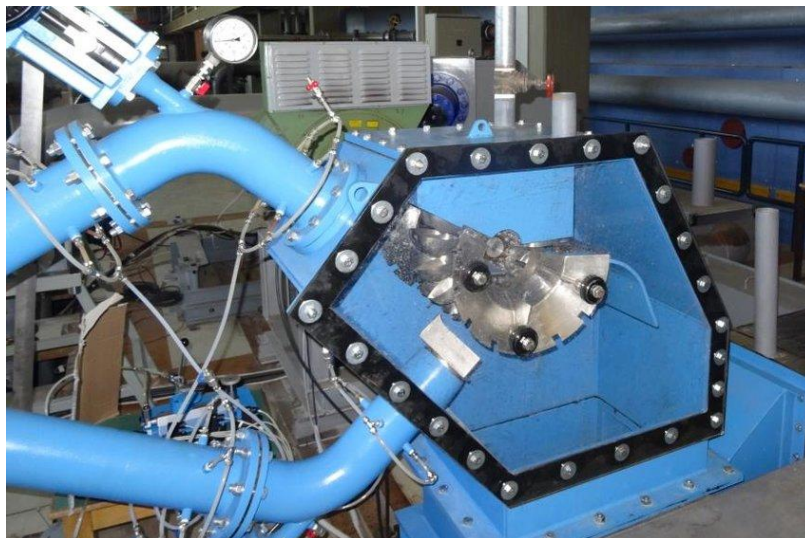


PELTON WHEEL TURBINE LINE DIAGRAM

Εικόνα 2.23 Λεπτομέρεια ΥΗΣ με υδροστροβίλο Pelton

Η ροή του νερού ρυθμίζεται με τη χρήση ενός ρυθμιστή παροχής (αξονικά μετακινούμενη ακίδα) στην έξοδο του ακροφυσίου, (Εικόνα 2.23). Το ακροφύσιο είναι κατασκευασμένο τις περισσότερες φορές από χυτο χάλυβα, ενώ το άκρο της ακίδας από άδωτο χάλυβα και αντικαθίσταται μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας λόγω της διάβρωσης που δέχεται από την υψηλή ταχύτητα της δέσμης νερού και την ύπαρξη ουσιών όπως άμμος και χώμα μέσα στο νερό

Ο άξονας του στροβίλου είναι τοποθετημένος είτε οριζόντια ή κατακόρυφα ανάλογα με την παροχή όγκου της υδραυλικής πτώσης και την ποιότητα του νερού. Υδροστρόβιλοι Pelton με οριζόντιο άξονα περιστροφής είναι συνήθως εφοδιασμένοι με ένα ή δύο ακροφύσια). Οι υδροστρόβιλοι Pelton με περισσότερα ακροφύσια (συνήθως έξι) επιλέγεται να έχουν τον άξονα κατακόρυφο, τότε όλα τα ακροφύσια τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο και έτσι δεν εμποδίζεται η λειτουργία τους από τα άλλα νερα των σκαφιδίων, (Σχήμα 7.14).



Εικόνα 2.23 Οριζόντιος υδροστρόβιλος με 2 jets



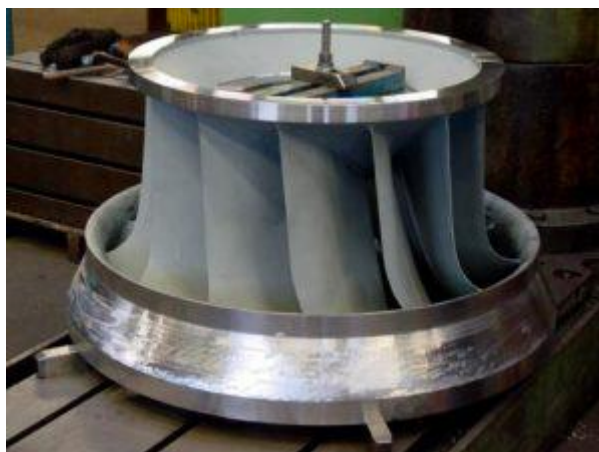
Εικόνα 2.24 Κατακόρυφος υδροστρόβιλος με 6 jets

Συνήθως, ο άξονας του τροχού Pelton συνδέεται άμεσα με τη γεννήτρια χωρίς μετατροπέα στροφών (μειωτήρα ή πολλαπλασιαστή στροφών). Οι υδροστρόβιλοι Pelton έχουν διαμέτρους που μπορεί να ξεπερνούν τα έπαι και ζυγίζουν μέχρι 40 τόνους. Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ εγκατεστημένων υδροστρόβιλων φθάνει σήμερα μέχρι και 400MW.

Το νερό που πέφτει από τον υδροστρόβιλο, συλλέγεται στον αγωγό απαγωγής (εάν υπάρχει) για να οδηγηθεί τελικά στη φυσική κοίτη του ποταμού ή απευθείας στον κάτω ταμιευτήρα. Στο τμήμα εξόδου συνδέεται επίσης και το περίβλημα του υδροστρόβιλου το οποίο συσσωρεύει τα ύδατα που εκτινάσσονται προς διάφορες κατευθύνσεις από το στροφέιο, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας (κυρίως σε παροχές διάφορες της κανονικής).

Υδροστρόβιλοι αντίδρασης (τύπου Francis)

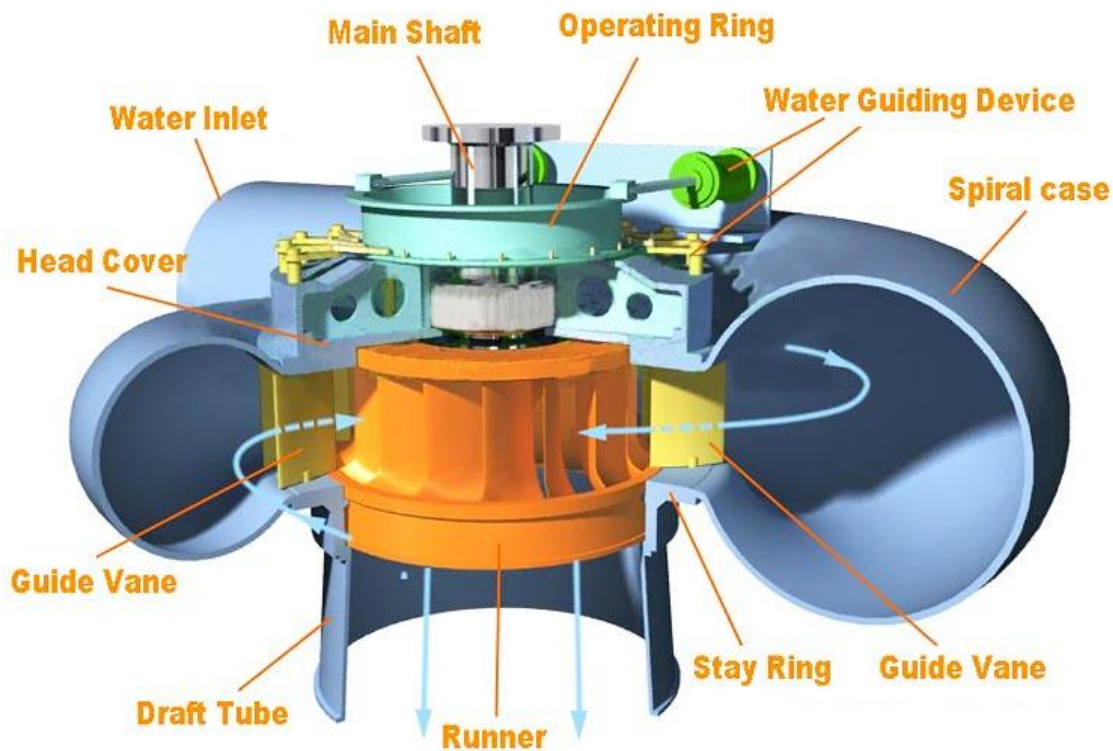
Ο στρόβιλος τύπου Francis εφευρέθηκε από τον Αμερικανό μηχανικό Βρετανικής καταγωγής James Francis στα μέσα του περασμένου αιώνα. Ο υδροστρόβιλος Francis είναι στρόβιλος μικτής ροής με ακτινική εισοδο και αξονική έξοδο. Το νερό εισέρχεται στη σπείρα ακτινικά και στη έπειτα προσδίδει την ενέργεια του στα καμπύλα πτερύγια και εξέρχεται αξονικά, (Εικόνα 2.24).



Εικόνα 2.24 Στρόβιλος τύπου Francis

Στην είσοδο του νερού από το κέλυφος του στροφείου συναντώνται καθοδηγά πτερύγια για την διευθύνση της ροής, ενώ υπάρχουν και στρεφόμενα/ρυθμιζόμενα πτερύγια τα οποία καλυτερεύουν τις γωνίες εισροής στον υδροστρόβιλο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής.

Ο υδροστρόβιλος είναι ολοκληρωτικά τοποθετημένος κάτω από την επιφάνεια του νερού και καταλαμβάνει ελάχιστο χώρο, ενώ είναι ικανός να περιστρέφεται σε υψηλές στροφές ανά λεπτό. Το σπειροειδές κέλυφος καθιστά ικανή την ομοιόμορφη κατανομή της ροής στον υδροστρόβιλο, αφού καθώς το νερό εισχωρεί μέσα στο κέλυφος, ένα μέρος εισέρχεται μέσα στον υδροστρόβιλο με αποτέλεσμα στη συνέχεια να πρέπει να γίνει αντίστοιχη μείωση διαμέτρου του σπειροειδούς κελύφους για τη διατήρηση σταθερής ροής. Συνήθως, άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος αλλά σε μικρότερες μηχανές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οριζόντιος.



Francis Turbine

Εικόνα 2.25 Διαμήκης τομή στροβίλου Francis

Στον στρόβιλο Francis το νερό περνάει πρώτα μέσα από σταθερά κατευθυντικά (οδηγά) περυσία τα οποία βρίσκονται στο δακτύλιο του κελύφους και ακτινικά με φορά από την περιφέρεια προς το κέντρο. Τα κατευθυντικά περυσία διατάσσονται περιμετρικά σε μία στεφάνη που επιπλέον συνεισφέρει στην ενίσχυση της μηχανικής αντοχής και της στιβαρότητας του σπειροειδούς κελύφους που αποτελεί το ογκωδέστερο τμήμα της μηχανής που υπόκειται στη μεγαλύτερη από όλα τα άλλα στατική πίεση. Παράλληλα, δια μέσω των περυσίων κατεύθυνσης επιτυγχάνεται η σμίκρυνση των ογκου του κελύφους το οποίο διαμορφώνεται με μεγαλύτερη γωνία της σπείρας ώστε να προσδίνεται στο υγρό μεγαλύτερη συστροφή από την απαιτούμενη. Η επιπλέον τιμή της συστροφής αφαιρείται από τη στεφάνη των οδηγητικών περυσίων τα οποία είναι τοποθετημένη σε περιοχή σύγκλισης της ροής, δηλαδή μειώνεται ο κίνδυνος αποκολλησης της. Το νερό διέρχεται μέσα από μια σειρά ρυθμιστικών περυσίων που διατάσσονται μεταξύ της στεφάνης των οδηγητικών περυσίων και της διατομής εισόδου του στροφείου, δηλαδή περυσίων περιμετρικά του στροφείου που έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης και ομοιόμορφης περιστροφής μέσω εξωτερικού μηχανισμού. Τα ρυθμιστικά περυσία διαμορφώνουν την τελική τιμή της συστροφής, δηλαδή της περιφερειακής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας στην είσοδο του στροφείου.

Η περιστροφική κίνηση των περυσίων ρύθμισης, εκτός από τη αλλαγή της γωνιάς κλίσης της απόλυτης ταχύτητας επιτρέπει τη αλλαγή του κένου μεταξύ δύο συνεχόμενων περυσίων, με αποτέλεσμα τη αλλαγή της παροχής και άρα της ισχύος εξόδου του υδροστροβίλου, για

σταθερή περιστροφική ταχύτητα και διαθέσιμο υδραυλικό ύψος πτώσης. Επομένως, τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι μία διάταξη ρύθμισης του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Τα ρυθμιστικά πτερύγια και οι στροφείς τους στις περισσότερες εφαρμογές φτιαγμένα από χυτοχάλυβα ή σφυρήλατο χάλυβα.

Ο αριθμός των πτερυγίων του στροφείου Francis ορίζεται συνήθως περιττός (π.χ. 11, 13 ή 15) για να περιοριστεί ή να εκμηδενιστεί ο κίνδυνος φαινομένων συντονισμού και ταλαντώσεων λόγω του άρτιου αριθμού πτερυγίων ρύθμισης. Με σταθερό τον αριθμό των πτερυγίων του στροφείου Francis, όσο ελατώνεται η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, το στροφείο γίνεται όλο και περισσότερο μικτής ροής. Η πλήμνη του στροφείου υδροστροβίλου Francis κατασκευάζεται συνήθως ολόσωμη (αποτελεί ένα χυτό τεμάχιο). Το υλικό της είναι συνήθως χρωμιούχος χάλυβας. Τα πτερύγια συγκολλούνται στην πλήμνη και τη στεφάνη.

Οι περισσότεροι υδροστροβίλοι στον κόσμο είναι τύπου Francis, ενώ οι μεγαλύτεροι από αυτούς έχουν ισχύ που φτάνει τα 500 MW με κυμαινόμενη απόδοση από 90-95 % [].

Υδροστροβίλοι Αντίδρασης (τύπου Kaplan)

Το όνομα του οφείλεται στον Αυστριακό καθηγητή Victor Kaplan που πρώτος κατασκεύασε ένα τέτοιο υδροστροβίλο στις αρχές του 20ου αιώνα. Ο υδροστροβίλος Kaplan παρουσιάζει την ίδια εμφάνιση και έχει την ίδια λειτουργία με προπέλα.. (Εικόνα 2.26). Ο στροβίλος Kaplan είναι ένας υδροστροβίλος καθαρά αξονικής ροής. Οι στροβίλοι αξονικής ροής χρησιμοποιούνται ιδανικά στην περίπτωση εκμετάλλευσης μικρών υδραυλικών πτώσεων, όπου οι δυνάμεις παρουσιάζονται μειωμένες, με στόχο τη ελάττωση των υδραυλικών απωλειών τριβής αλλά και του κόστους της μηχανής, ενώ οι φέρουσες επιφάνειες των πτερυγίων (στις οποίες αναπτύσσονται οι ροπές και δυνάμεις) μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό. Έτσι το στροφείο μπορεί να έχει τη μορφή προπέλας. Τα πτερύγια του στροφείου μπορεί να είναι από τρία έως οκτώ, έχουν μορφή προβόλου και στηρίζονται μόνο στην πλήμνη μαζί με την οποία περιστρέφονται και στην οποία μεταδίδουν την κινητήρια ροπή.



Εικόνα 2.26 Στροφείο υδροστροβίλου Kaplan

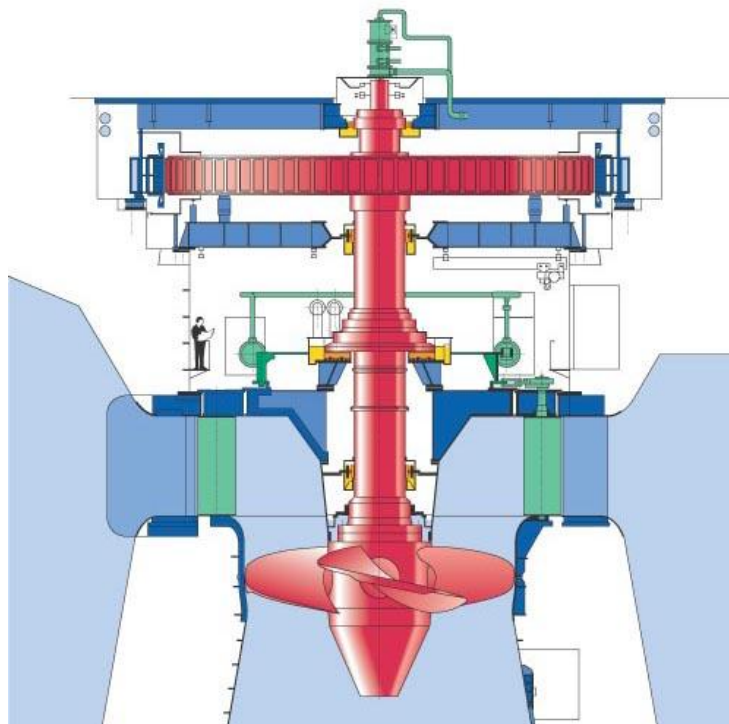
Υπάρχει δυνατότητα αλλαγής της θέσης των πτερυγίων αυτών γύρω από τον εαυτό τους, ακόμα και όταν το στροφείο βρίσκεται σε περιστροφή. Για την περιστροφή τους

χρησιμοποιείται υδραυλικός σερβοκινητήρας που ενσωματώνεται είτε στο εσωτερικό της πλήμνης, είτε στο τέλος του άξονα του στροφείου. Η κατασκευαστική αυτή δυνατότητα εφαρμόζεται συνήθως για μεγάλους υδροστρόβιλους Kaplan. Για μικρούς υδροστρόβιλους συνηθίζεται η κατασκευή στροφείων με σταθερά (μη περιστρεφόμενα) πτερύγια με στόχο τη ελάττωση του κόστους, αλλά και την ελάττωση του εύρους λειτουργίας του υδροστρόβιλου. Η δυνατότητα περιστροφής των πτερυγίων μεγαλώνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος και τα κατασκευαστικά στοιχεία της μηχανής, αλλά, παρέχει στον υδροστρόβιλο το πλεονέκτημα της λειτουργίας με υψηλές αποδοσεις σε εκτεταμένη περιοχή λειτουργίας, δηλαδή ακόμη και με σημαντική διακύμανση της υδραυλικής πτώσης.

Για ύψη πτώσης μικρότερα των 25 μέτρων, δηλαδή για μονάδες αξονικής ροής, το κέλυφος κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα στις περισσότερες περιπτώσεις και έχει ορθογωνικές διατομές ο υπολογισμός των οποίων γίνεται έτσι ώστε η μέση ταχύτητα της ροής να είναι τρεις περίπου φορές μικρότερες από ότι στην περίπτωση του μεταλλικού σπειροειδούς κελύφους, λόγω της μεγαλύτερης ευαισθησίας του σκυροδέματος στην μηχανική διάβρωση.

Ο στρόβιλος Kaplan μπορεί να περιστρέφεται σε πολύ υψηλό ειδικό αριθμό στροφών, πράγμα που τον χαρακτηρίζει αποδοτικό για υψηλούς ρυθμούς ροής νερού, με μεσαία έως χαμηλά ύψη πτώσης κάτω των 80 μέτρων.

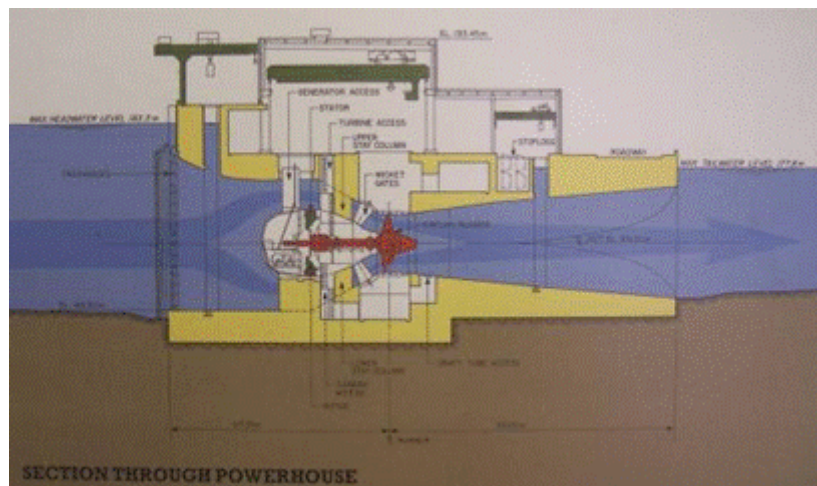
Ο άξονας του στροφείου είναι δυνατόν να είναι τοποθετημένος είτε κατακόρυφα (κλασσική διαμόρφωση) (Εικόνα 2.27), είτε οριζόντια ή με κλίση.



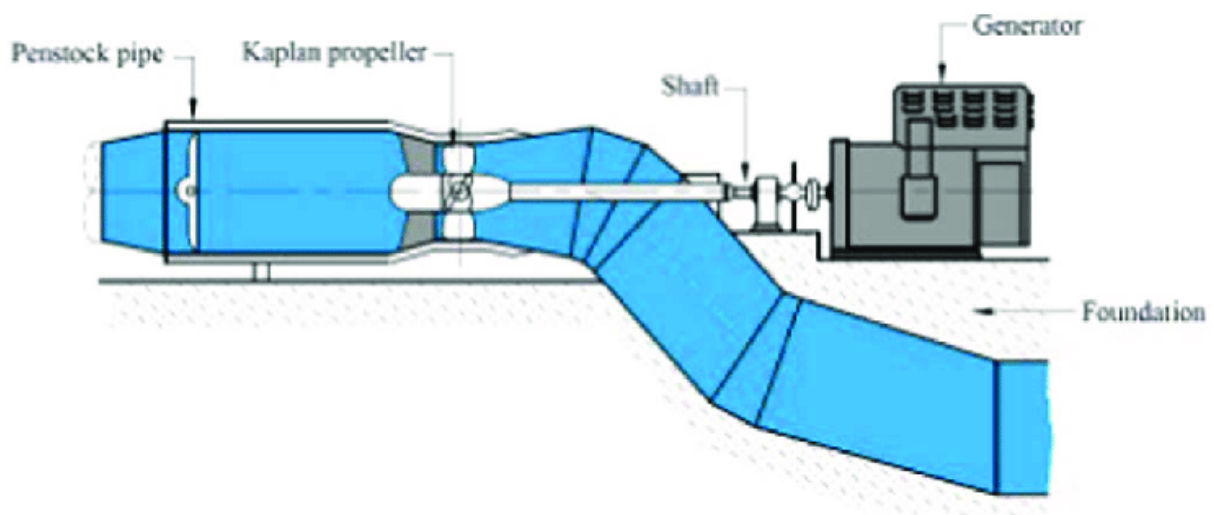
Εικόνα 2.27 Διαμήκης τομή υδροστρόβιλου Kaplan

Για χαμηλές τιμές της υδραυλικής πτώσης (< 10 μέτρων), έναντι της συνήθους διαμόρφωσης αξονικής ροής υδροστρόβιλου Kaplan συναντώνται δύο παραλλαγές, ο βολβοειδής ή

σφαιρικός (bulb) ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό αξονοσυμμετρικού βολβού που περιρρέεται από τη ροή (Εικόνα 2.28) και ο σωληνωτός (tube) (Εικόνα 2.29) υδροστρόβιλος Kaplan. Κύριο χαρακτηριστικό και των δύο είναι ότι η ροή στο τμήμα εισόδου γίνεται κατά την αξονική (και συνολικού όγκου, των όχι ακτινική) διεύθυνση. Από έν άλλη, πρέπει να αντιμετωπιστεί ένα κατασκευαστικό πρόβλημα: ο άξονας του στροφείου ο οποίος συνδέεται με την γεννήτρια, βρίσκεται στο εσωτερικό της ροής. Αυτό αντιμετωπίζεται στον μεν βολβοειδή με την τοποθέτηση και της γεννήτριας στο εσωτερικό του βολβού, ενώ τα καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας να διέρχονται από υδατοστεγές φρεάτιο (Εικόνα 2.28), στο δε σωληνωτό ο άξονας περιστροφής βγαίνει από το σώμα της μηχανής μέσω καμπύλης που διαμορφώνεται ανάντη ή κατάντη του στροφείου για να κουμπώσει με τη γεννήτρια που βρίσκεται στο εξωτερικά του αγωγού, (Εικόνα 2.29).



Εικόνα 2.28 ΥΗΣ με βολβοειδής υδροστρόβιλος Kaplan



Εικόνα 2.29 Διαμήκης τομή σωληνωτού ΥΗΣ Kaplan

Οι σωληνωτοί υδροστρόβιλοι κατασκευάζονται για ισχύς μέχρι 10MW επειδή, όπως αναμένεται λόγω της αλλαγής της διεύθυνσης της ροής, ο ολικός βαθμός απόδοσης σε αυτούς είναι μικρότερος από ότι του αντίστοιχου βολβοειδούς. Όμως το κόστος του βολβοειδούς υδροστρόβιλου είναι υψηλότερο από αυτό του αντίστοιχου σωληνωτού λόγω της μεγαλύτερης δυσκολίας της χτίσης (ανάγκη στεγανότητας, μικρός όγκος γεννήτριας και

ψύξης της, δυνατότητα επίσκεψης κ.λπ.). Στους σωληνωτούς και βολβοειδείς υδροστρόβιλους απουσιάζει το σπειροειδές κέλυφος και η στεφάνη των οδηγητικών περυγίων τοποθετείται είτε κωνικά είτε αξονικά. Κατά συνέπεια τα περύγια της στεφάνης δεν μπορούν πλέον να είναι κυλινδρικές επιφάνειες.

Η σύνδεση των μεγάλων υδροστροβίλων Kaplan γίνεται απευθείας με τη γεννήτρια, ενώ η σύνδεση μικρών (σωληνωτών και βολβοειδών) με τη γεννήτρια γίνεται μέσω συστήματος αύξησης του αριθμού στροφών της γεννήτριας, με στόχο την ελαχιστοποίηση του όγκου (και του κόστους) της γεννήτριας

Επειδή μετά από την έξοδο του νερού από την φτερωτή αυτό εξακολουθεί να έχει ακόμα το 60% της ενέργειας που είχε πριν εισέλθει στην περωτή, γι' αυτό και είναι απαραίτητη η τοποθέτηση, ειδικά μελετημένου, κατάλληλου διαχύτη για να αυξηθεί το ποσό της εκμεταλλεζόμενης ενεργείας.

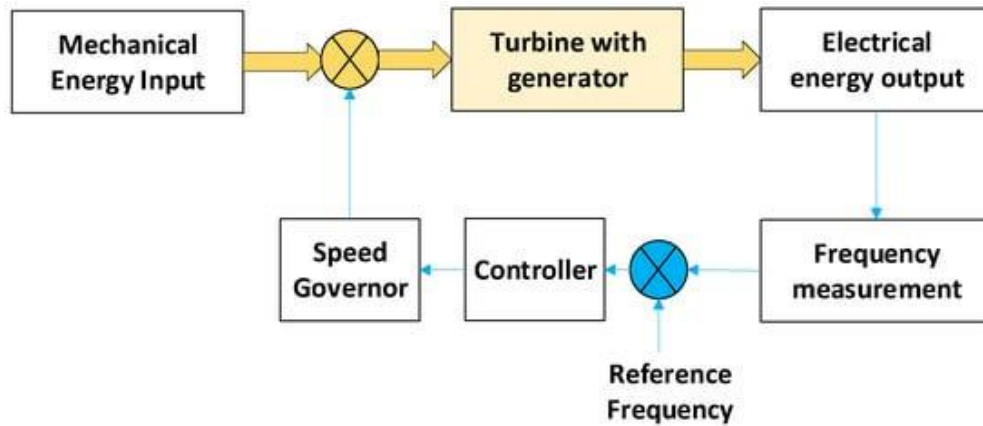
Με την επιλογή του κατάλληλου διαχύτη επιτυγχάνεται η ελάττωση της κινητικής ενέργειας του νερού μέχρι 1-2% του ειδικού έργου που είχε αυτό πριν εισέλθει στο στροφείο. Μ' αυτόν τον τρόπο, ο ολικός βαθμός αποδόσεως του υδροστρόβιλου αυξάνεται σημαντικά. Ο αγωγός απαγωγής είναι ευθύγραμμος, κωνικός, κυκλικής διατομής μέχρι την έξοδό του και συνήθως κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα στην περίπτωση υδροστρόβιλων αξονικής ροής, οριζόντιου ή κεκλιμένου άξονα, όπως για σωληνωτούς και βολβοειδείς υδροστρόβιλους. Οι μεγαλύτεροι υδροστρόβιλοι Kaplan έχουν διάμετρο στροφείου που ξεπερνάει τα 12m, η δε ισχύ αυτών είναι μεγαλύτερη των 150MW.

Συστήματα Ελέγχου και Αυτοματισμοί

Καθώς οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας (ΜΥΣΠΗΕ) εξελίσσονται από χειροκίνητα συστήματα σε έξυπνα, διαχειρίσιμα από απόσταση περιουσιακά στοιχεία, ο ρόλος των συστημάτων ελέγχου και του αυτοματισμού καθίσταται ολοένα και πιο καθοριστικός. Αυτές οι τεχνολογίες όχι μόνο διασφαλίζουν την αποτελεσματική μετατροπή ενέργειας και τη σταθερότητα του δικτύου, αλλά και μειώνουν το λειτουργικό κόστος, βελτιώνουν την ασφάλεια και επιτρέπουν την απόκριση σε πραγματικό χρόνο στις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις και τις μεταβολές του φορτίου. Τα συστήματα ελέγχου στους ΜΥΗ περιλαμβάνουν μηχανικούς ρυθμιστές στροφών, προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές [Programmable Logic Controller (PLC)], ηλεκτρονικούς ελεγκτές φορτίου [Electronic Load Controller (ELC)] και, ολοένα και περισσότερο, συστήματα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων [Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)], τα οποία χρησιμεύουν για την απλοποίηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων από την εισαγωγή νερού έως την παροχή ισχύος.

Το πιο θεμελιώδες στοιχείο στον αυτοματισμό των ΜΥΣΠΗΕ είναι το σύστημα ρυθμιστή στροφών, το οποίο ρυθμίζει την ταχύτητα της τουρμπίνας ελέγχοντας τη ροή του νερού. Σε διαμορφώσεις σύγχρονων γεννητριών, ο ρυθμιστής στροφών διασφαλίζει ότι η γεννήτρια διατηρεί σταθερή ταχύτητα περιστροφής, συνήθως 1500 ή 3000 σ.α.λ. για δίκτυα 50 Hz, ανάλογα με τον αριθμό των πόλων. Τα παλαιότερα ΜΥΣΠΗΕ βασίζονταν σε μηχανικούς ρυθμιστές στροφών, όπως μηχανισμούς flyball, αλλά αυτοί έχουν σε μεγάλο βαθμό

αντικατασταθεί από ηλεκτρονικούς ρυθμιστές στροφών που χρησιμοποιούν αλγόριθμους ελέγχου PID και ανάδραση σε πραγματικό χρόνο για την ενεργοποίηση των οδηγών περυγίων ή των θέσεων των ακροφυσίων [1]. Αυτά τα συστήματα είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της σταθερότητας της συχνότητας, ειδικά όταν η μονάδα είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο ή λειτουργεί παράλληλα με άλλες γεννήτριες σε ένα μικροδίκτυο.

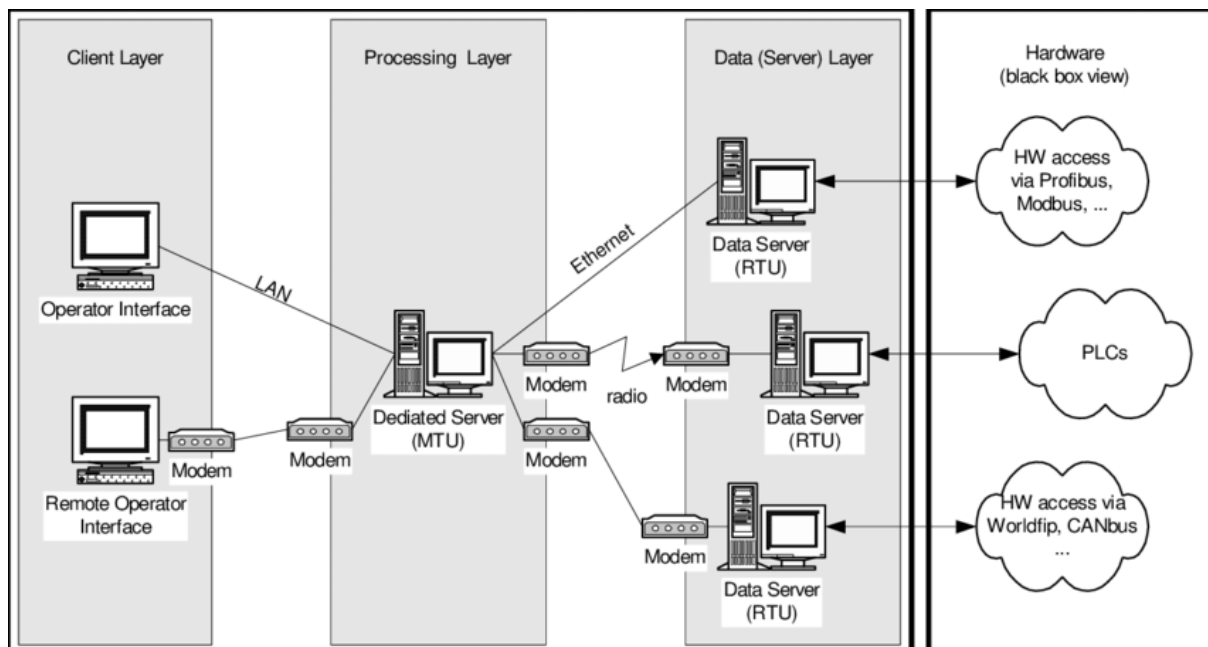


Εικόνα 2.30 Μηχανική και ηλεκτρική ισορροπία ροπής σε μια μονάδα παραγωγής

Συμπληρώνοντας το σύστημα ρυθμιστή στροφών, υπάρχουν οι πίνακες ελέγχου και οι ελεγκτές φορτίου που διαχειρίζονται την τάση, τη συχνότητα και την ποιότητα ισχύος. Αυτά περιλαμβάνουν αναλογικά και ψηφιακά εξαρτήματα - ρυθμιστές τάσης, διακόπτες κυκλώματος, ρελέ και συσκευές προστασίας μετασχηματιστών - που ανταποκρίνονται σε παροδικά συμβάντα όπως απόρριψη φορτίου, υπερένταση ή υποσυχνότητα. Σε αυτόνομα ΜΥΣΠΗΕ, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα ηλεκτροδότησης αγροτικών περιοχών, ένας Ηλεκτρονικός Ελεγκτής Φορτίου (ELC) χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση της συχνότητας εκτρέποντας την πλεονάζουσα ισχύ σε ένα φορτίο έρματος (συχνά έναν θερμαντήρα αντίστασης) όταν μειώνεται η ζήτηση των καταναλωτών. Αυτό διατηρεί ένα ισορροπημένο φορτίο στη γεννήτρια και αποτρέπει τις αιχμές τάσης ή τις αποκλίσεις συχνότητας, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά σε ευαίσθητες συσκευές ή στην ίδια τη γεννήτρια [2].

Οι σύγχρονοι ΜΥΣΠΗΕ ενσωματώνουν ολοένα και περισσότερο Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (PLC) για αλληλουχία και λογικό έλεγχο. Τα PLC επεξεργάζονται σήματα εισόδου από διάφορους αισθητήρες - όπως μετρητές ροής, μετατροπείς πίεσης, κωδικοποιητές ταχύτητας άξονα και αισθητήρες θερμοκρασίας - και εκτελούν λογική ελέγχου σε πραγματικό χρόνο για να ρυθμίζουν τις πύλες τουρμπίνας, να ξεκινούν ή να σταματούν τη γεννήτρια και να ενεργοποιούν τις αλληλοσυνδέσεις ασφαλείας. Τα PLC εκτιμώνται για την αξιοπιστία, την ευελιξία και τη συμβατότητά τους με μια σειρά βιομηχανικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας (Modbus, Profibus, κ.λπ.) [3]. Σε συστήματα με υψηλό μανομετρικό ύψος ή μεγάλους αγωγούς, τα PLC μπορούν επίσης να παρακολουθούν τη συμπεριφορά της δεξαμενής υπερχειλίσης και να ξεκινούν γρήγορες διακοπές λειτουργίας κατά τη διάρκεια συμβάντων υδραυλικού πλήγματος.

Μία από τις πιο μετασχηματιστικές τεχνολογίες στον έλεγχο μικρών υδροηλεκτρικών είναι το σύστημα SCADA (Εποπτικός Έλεγχος και Λήψη Δεδομένων). Το SCADA επιτρέπει την κεντρική ή απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο ενός ή πολλαπλών υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Παρέχει στους χειριστές μια γραφική διεπαφή που εμφανίζει ζωντανά δεδομένα σχετικά με τη στάθμη του νερού, τον ρυθμό ροής, την έξοδο της γεννήτριας και τους συναγερμούς του συστήματος. Η καταγραφή δεδομένων επιτρέπει την ανάλυση μετά το συμβάν, την ενεργειακή λογιστική και τον προγραμματισμό συντήρησης βάσει συνθηκών. Ορισμένες αρχιτεκτονικές SCADA περιλαμβάνουν επίσης ενσωμάτωση GIS και προγνωστική ανάλυση για τη βελτιστοποίηση της κατανομής σε πολλαπλά στοιχεία κατανομημένης παραγωγής [4]. Σε πολλά μικρά και μεσαία υδροηλεκτρικά εργοστάσια, το SCADA διευκολύνει την μη επιτηρούμενη λειτουργία, μειώνοντας την ανάγκη για προσωπικό επί τόπου και επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων και τις απομακρυσμένες επαναφορές.



Εικόνα 2.31 Παράδειγμα αρχιτεκτονικής ενός γενικού συστήματος SCADA

Καθώς οι ΜΥΣΠΗΕ ενσωματώνονται ολοένα και περισσότερο σε έξυπνα δίκτυα και υβριδικά συστήματα, ο ρόλος των συστημάτων ελέγχου επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει την απόκριση ζήτησης, τη ρύθμιση συχνότητας και τον συντονισμό της αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα, οι ρυθμιστές στροβίλων μπορούν να είναι εξοπλισμένοι με ρυθμίσεις ελέγχου πτώσης για να επιτρέπουν τη σταθεροποίηση συχνότητας σε αδύναμα δίκτυα. Σε ορισμένα προηγμένα μικροδίκτυα, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί συντονίζονται δυναμικά με ηλιακά φωτοβολταϊκά και αποθήκευση μπαταριών χρησιμοποιώντας κεντρικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας [Energy Management System (EMS)], τα οποία βασίζονται σε γρήγορα, αξιόπιστα δεδομένα από τον τοπικό ελεγκτή κάθε μονάδας [5].

Επιπλέον, οι τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) αρχίζουν να αναδιαμορφώνουν τον αυτοματισμό των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Τα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN) και η τηλεμετρία που βασίζεται στο GSM επιτρέπουν πλέον τη μετάδοση δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο από απομακρυσμένες ορεινές εγκαταστάσεις σε κεντρικούς διακομιστές cloud. Σε συνδυασμό με αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, αυτά τα δεδομένα υποστηρίζουν την προγνωστική συντήρηση εντοπίζοντας μη φυσιολογικά πρότυπα κραδασμών ή θερμικές τάσεις πριν από την εμφάνιση βλάβης. Αρκετά πιλοτικά έργα στο Νεπάλ και την Ινδονησία έχουν καταδείξει τη βιωσιμότητα μονάδων IoT χαμηλού κόστους για απομακρυσμένη διάγνωση και έλεγχο μικρο-υδροηλεκτρικής ενέργειας [6].

Συνοψίζοντας, τα συστήματα ελέγχου και ο αυτοματισμός είναι απαραίτητα για τη σύγχρονη λειτουργία των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Εξασφαλίζουν ασφαλή, αποτελεσματική και συνεχή παραγωγή, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την ανθρώπινη παρέμβαση. Καθώς το ενεργειακό τοπίο εξελίσσεται προς την κατανεμημένη παραγωγή και τα πιο έξυπνα δίκτυα, αυτά τα συστήματα θα διαδραματίσουν έναν ολοένα και πιο στρατηγικό ρόλο στο να επιτρέψουν στις ΜΥΗ να παρέχουν όχι μόνο ενέργεια αλλά και βοηθητικές υπηρεσίες, όπως η σταθεροποίηση του δικτύου και η απομακρυσμένη ηλεκτροδότηση.

Ανάλυση Αποδοτικότητας και Απόδοσης

Ορισμός Αποδοτικότητας

Η απόδοση σε μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΜΥΣΠΗΕ) αντικατοπτρίζει το πόσο καλά το σύστημα μετατρέπει τη δυναμική ενέργεια του ρέοντος νερού σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Αυτός ο μετασχηματισμός περιλαμβάνει πολλαπλούς ενεργειακούς τομείς: η υδραυλική (ρευστή) ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσω στροβίλων, η οποία μετά αλλάζει σε ηλεκτρική ενέργεια από γεννήτριες. Επομένως, η συνολική απόδοση της μονάδας είναι το γινόμενο αρκετών αποδόσεων υποσυστημάτων.

- Η υδραυλική απόδοση (η_h) αντιπροσωπεύει την ικανότητα του υδραυλικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής, του αγωγού και του στροβίλου, να μεταλλάζει την ενέργεια του κινούμενου νερού σε περιστροφική μηχανική ενέργεια. Οι απώλειες εδώ μπορεί να προκύψουν από αναταράξεις, ακατάλληλο σχεδιασμό ακροφυσίων ή κακή ευθυγράμμιση ροής.
- Η μηχανική απόδοση (η_m) λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ενέργειας μεταξύ του περιστρεφόμενου άξονα του στροβίλου και της γεννήτριας. Μερικοί από τους παράγοντες που είναι ικανοί να μειώσουν την μηχανική απόδοση ενός σταθμού είναι η τριβή στα ρουλεμάν, οι κακές ευθυγραμμίσεις και οι μηχανικοί κραδασμοί συνήθως.
- Η ηλεκτρική απόδοση (η_e) καταγράφει πόσο αποτελεσματικά η γεννήτρια μετατρέπει την περιστροφική ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ. Παράγοντες όπως οι απώλειες χαλκού, η μαγνητική υστέρηση, τα δινορρεύματα και η ποιότητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων επηρεάζουν αυτό το στάδιο.

Η ολική απόδοση του σταθμού (η_{total}) είναι επομένως το γινόμενο αυτών των υποσυστημάτων:

$$\eta_{total} = \eta_h \times \eta_m \times \eta_e$$

Στους σύγχρονους ΜΥΣΠΗΕ, αυτή η τιμή κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 60% και 85%, ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις λειτουργικές πρακτικές.

Τυπικά Εύρη Απόδοσης και Απώλειες

Μελέτες έχουν δείξει ότι οι micro-υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις συχνά εμφανίζουν συνολική απόδοση 60-70%, ενώ τα μεγαλύτερα, καλά σχεδιασμένα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα μπορούν να ξεπεράσουν το 80% υπό βέλτιστες συνθήκες. Η απόδοση δεν είναι στατική αλλά ποικίλλει ανάλογα με τον ρυθμό ροής, το ύψος της κεφαλής, τον τύπο τουρμπίνας και τις συνθήκες φορτίου.

Οι υδραυλικές απώλειες συνήθως προκύπτουν στον αγωγό (λόγω τριβής), στο ακροφύσιο (λόγω στροβιλισμού) και στη διεπαφή του στρόβιλου. Αυτές οι απώλειες μειώνουν την ικανότητα του νερού να μεταδίδει κινητική ενέργεια στον στρόβιλο.

Οι μηχανικές απώλειες αποδίδονται στην τριβή στους άξονες, τα ρουλεμάν και τις τσιμούχες. Ενώ συνήθως είναι μικρές (περίπου 1–3%), γίνονται σημαντικές εάν το σύστημα δεν συντηρείται σωστά ή δεν είναι ευθυγραμμισμένο.

Ηλεκτρικές απώλειες συμβαίνουν σε γεννήτριες και μετασχηματιστές. Αυτές περιλαμβάνουν απώλειες χαλκού (απώλειες I^2R στις περιελίξεις) και απώλειες σιδήρου (λόγω μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων στους πυρήνες). Σε χαμηλά φορτία, αυτές οι απώλειες επηρεάζουν δυσανάλογα την απόδοση.

Μια πειραματική μελέτη από τους Delgado et al. (2023) διερεύνησε ένα micro-υδροηλεκτρικό σύστημα με υδροστρόβιλο τύπου Pelton και ισχύος 10 kW. Υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας - συγκεκριμένα με τα ακροφύσια ανοιγμένα στο 50%, ηλεκτρικό φορτίο 3 kW και ταχύτητες άξονα που υπερέβαιναν τις 400 σ.α.λ. - το σύστημα πέτυχε υδραυλική απόδοση 72% και συνολική απόδοση 64,8%. Ωστόσο, η απόδοση μειώθηκε σημαντικά σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής (π.χ., 150 σ.α.λ.), συνοδευόμενη από διακυμάνσεις τάσης και μηχανικούς κραδασμούς λόγω της κακής αλληλεπίδρασης μεταξύ του πίδακα νερού (jet) και των σκαφιδίων του στρόβιλου [7].

Ρύθμιση ροής και αντιστοίχιση φορτίου

Στους ΜΥΣΠΗΕ, η ροή του ποταμού μπορεί να παρουσιάζει εποχιακές ή ακόμη και ημερήσιες διακυμάνσεις. Η αποτελεσματική ρύθμιση της ροής είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών και τη διασφάλιση σταθερής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ρύθμιση επιτυγχάνεται συνήθως χρησιμοποιώντας μηχανικά και ηλεκτρονικά συστήματα.

Στους υδροστροβίλους τύπου Kaplan, χρησιμοποιούνται ρυθμιζόμενα οδηγία πτερύγια για την εποπτεία της παροχής του νερού και τη διατήρηση της βέλτιστης ταχύτητας της τουρμπίνας. Οι τουρμπίνες Pelton ρυθμίζουν τη ροή ρυθμίζοντας τα ανοίγματα των ακροφυσίων. Αυτά τα μηχανικά μέσα συχνά συμπληρώνονται από ηλεκτρονικούς ελεγκτές φορτίου (ELC), οι οποίοι απορροφούν την υπερβολική ισχύ και βοηθούν στη σταθεροποίηση απομονωμένων συστημάτων.

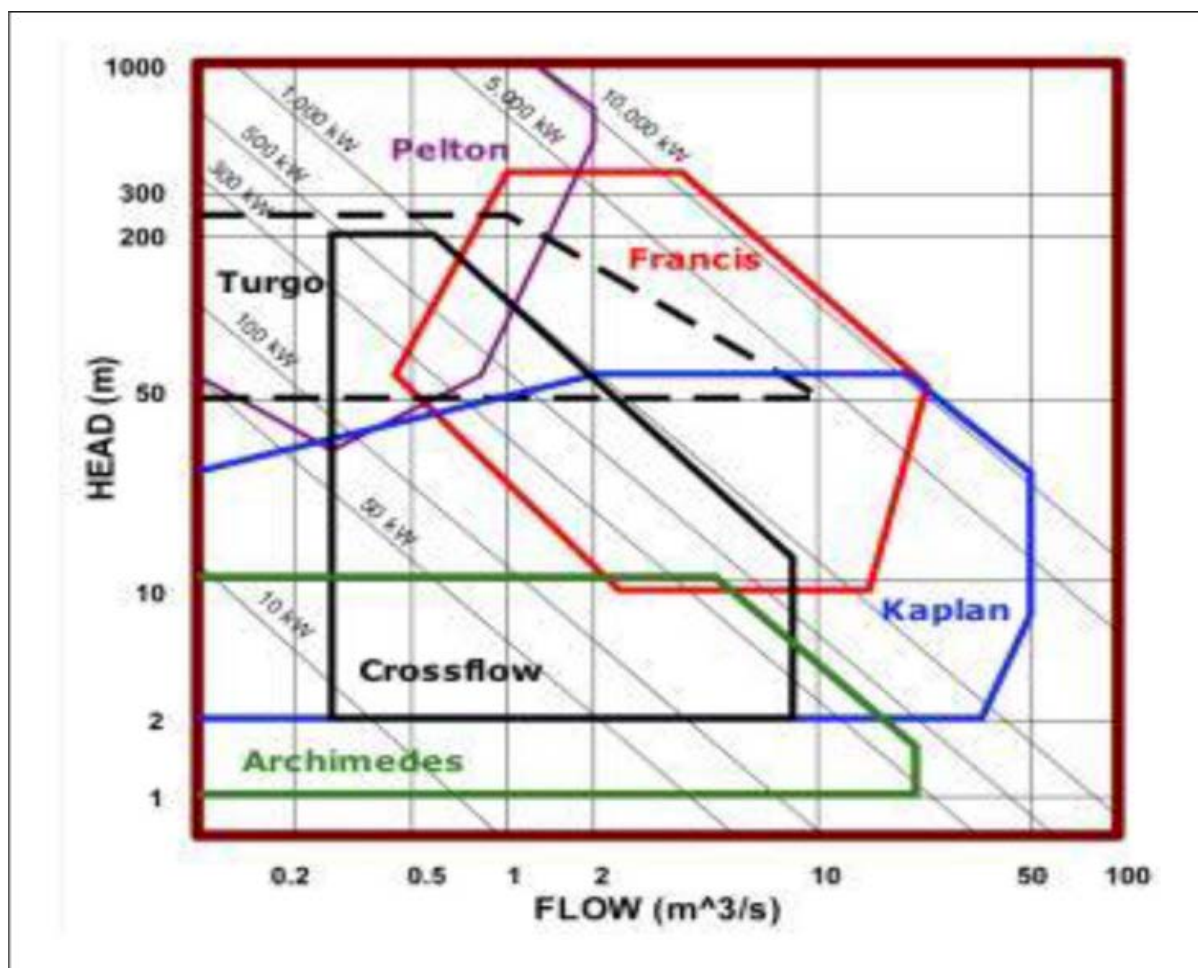
Τα συστήματα μετάδοσης κίνησης μεταβλητής ταχύτητας [Variable Speed Drives (VSDs)] προσφέρουν ένα ακόμη επίπεδο βελτιστοποίησης, επιτρέποντας στην τουρμπίνα και τη γεννήτρια να λειτουργούν σε ταχύτητες που αντιστοιχούν στην στιγμιαία υδραυλική ισχύ. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει την απόδοση υπό συνθήκες μερικού φορτίου, αλλά και αυξάνει χρονικά τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού ελαχιστοποιώντας την καταπόνηση.



Εικόνα 3.1 Παράδειγμα DC VSD

Τεχνικές Βελτιστοποίησης

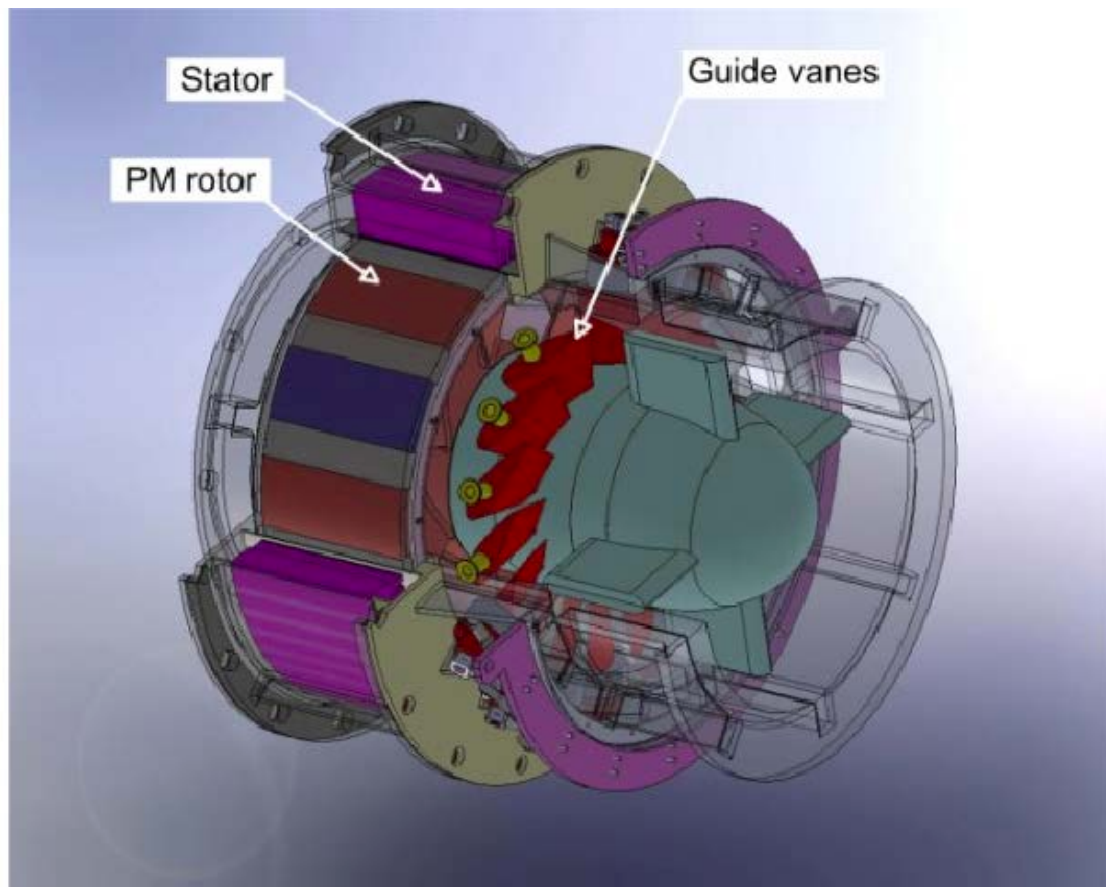
Η βελτιστοποίηση της απόδοσης στα ΜΥΗ περιλαμβάνει τόσο την επιλογή υλικού όσο και τη διαμόρφωση του συστήματος. Μία από τις πιο αποτελεσματικές επιλογές είναι η επιλογή ενός κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου με βάση τα δεδομένα ροής και μανομετρικού ύψους που αφορούν συγκεκριμένα την τοποθεσία. Η μη ευθυγράμμιση μεταξύ αυτών των παραγόντων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες ενέργειας.



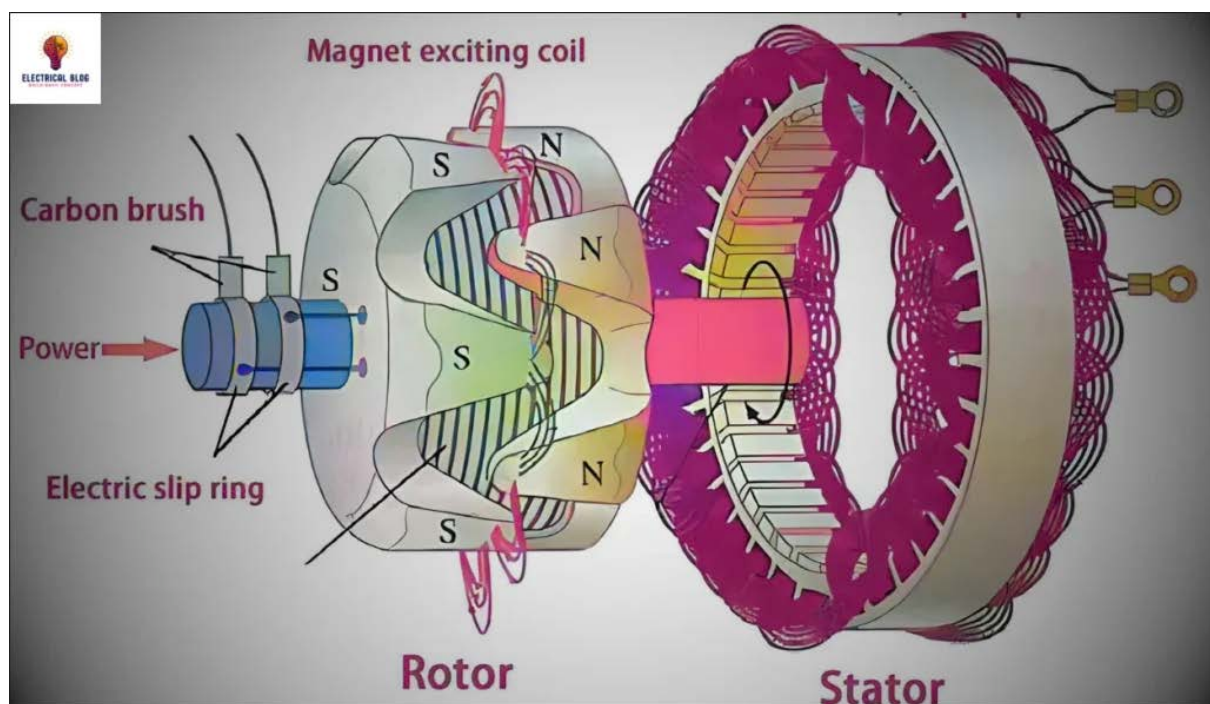
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα επιλογής για υδροηλεκτρικούς στροβίλους.

Πρώτον, η ενσωμάτωση του στροβίλου και της γεννήτριας σε ένα συμπαγές υδροηλεκτρικό σύνολο —όπως διερευνήθηκε από τους Węgiel et al. (2016)— μπορεί να μειώσει τη μηχανική πολυπλοκότητα και να βελτιώσει την απόδοση ελαχιστοποιώντας τις απώλειες σύζευξης. Η χρήση σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη [Permanent Magnet Synchronous Generators(PMSGs)] έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα ωφέλιμη, παρέχοντας πιο σταθερή και υψηλότερη απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας σε σύγκριση με τις συμβατικές επαγωγικές γεννήτριες [8].

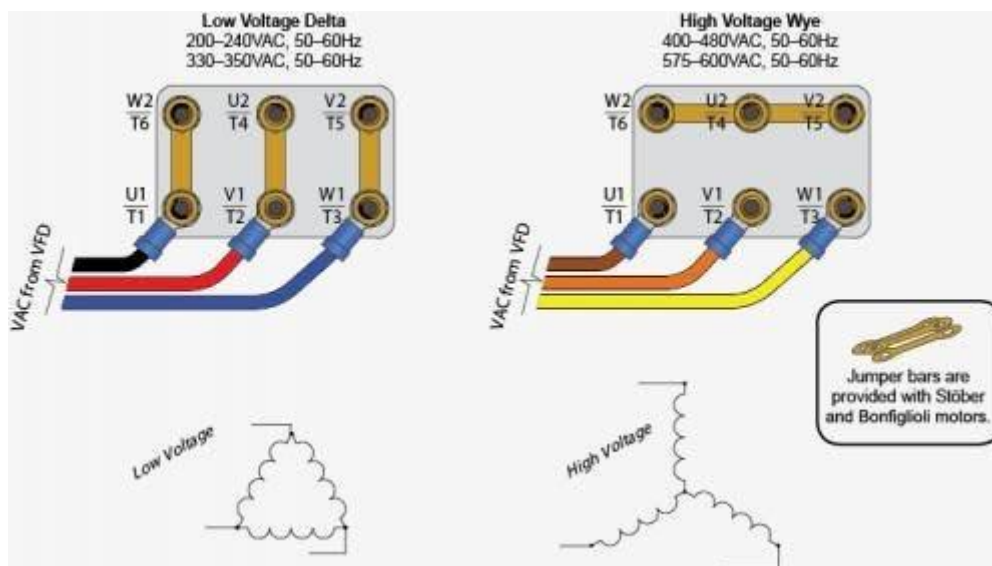
Η λειτουργία χαμηλού φορτίου παρουσιάζει μια μοναδική πρόκληση, ιδιαίτερα σε συστήματα ροής ποταμών κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Οι Rubes και Cervinka (2017) απέδειξαν ότι η εναλλαγή της καλωδίωσης της γεννήτριας από διαμόρφωση δέλτα σε διαμόρφωση αστέρα μειώνει τόσο τις απώλειες σιδήρου στον στάτορα όσο και τις απώλειες χαλκού. Αυτή η απλή παρέμβαση αύξησε την απόδοση του πειραματικού ΜΥΣ τους από κάτω από 80% σε περίπου 86% κατά τη λειτουργία χαμηλής ισχύος [9].



Εικόνα 3.3 Απεικόνιση ενσωματωμένης διάταξης στροβίλου/γεννήτριας



Εικόνα 3.4 Απεικόνιση σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη

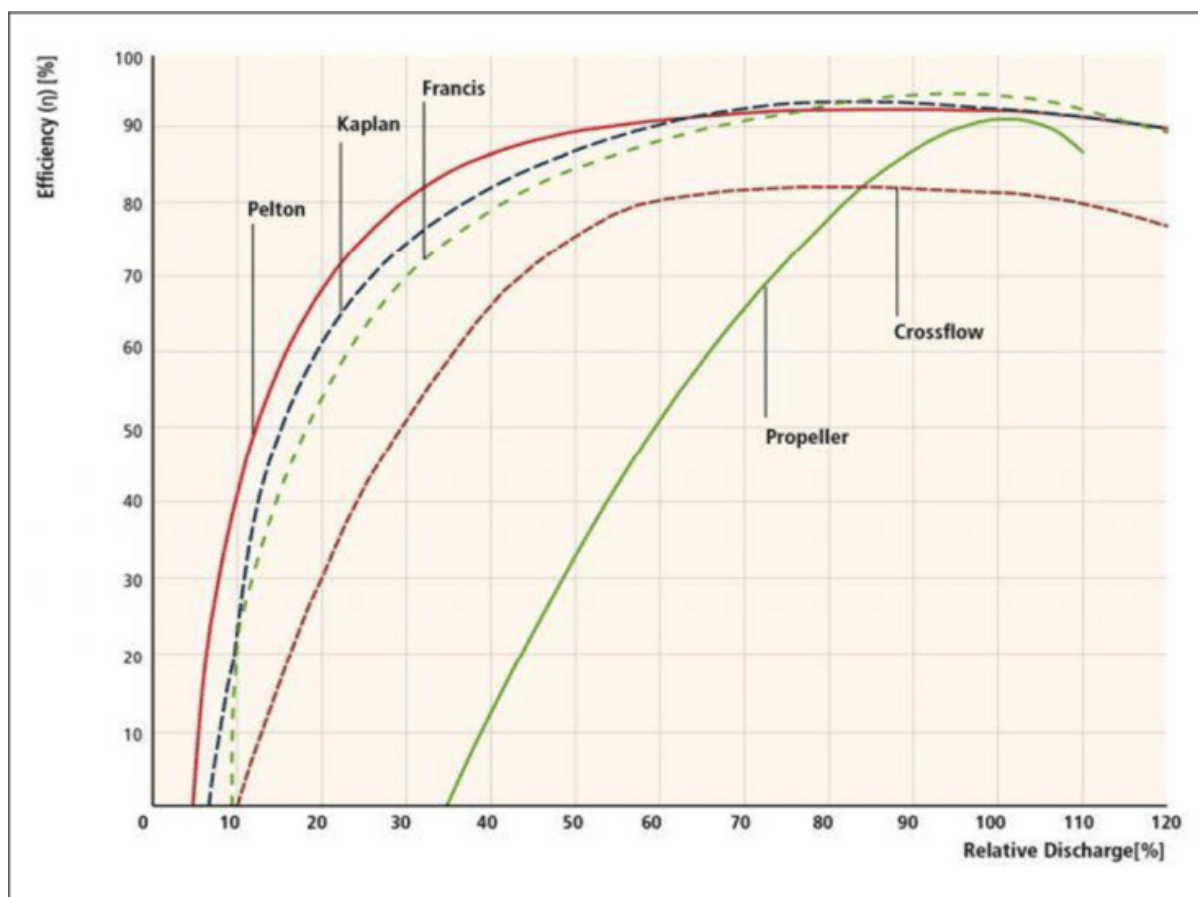


Εικόνα 3.5 Απεικόνιση συνδεσμολογιών δέλτα (αριστερά) και αστέρα (δεξιά)

Συγκριτικά παραδείγματα περιπτώσεων

Μια λεπτομερής σύγκριση επιλεγμένων μελετών περίπτωσης καταδεικνύει την ποικιλομορφία στον σχεδιασμό και τα αποτελέσματα απόδοσης των ΜΥΣΠΗΕ:

- Στο Μεξικό, οι Delgado κ.α. (2023) μελέτησαν ένα σύστημα εξοπλισμένο με στρόβιλο Pelton ισχύος 10 kW. Λειτουργώντας υπό μέτριο φορτίο, πέτυχε μέγιστη συνολική απόδοση 64,8%. Ωστόσο, παρατηρήθηκε αστάθεια του συστήματος σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας, επηρεάζοντας την τάση εξόδου και την απόδοση του στροβίλου.
- Στην Πολωνία, οι Węgiel κ.α. (2016) υλοποίησαν ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό ισχύος 150 kW χρησιμοποιώντας ενσωματωμένο στρόβιλο με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Το σύστημα πέτυχε απόδοση μετατροπής που ξεπερνούσε το 96% σε ισχύ άνω των 40 kW. Η συμπερίληψη μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος επέτρεψε τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας, βελτιώνοντας τη συνολική ευελιξία του συστήματος.
- Στην Τσεχία, οι Rubes και Cervinka (2017) διερεύνησαν τις βελτιώσεις στην απόδοση σε ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό (~50 kW). Αναδιαμορφώνοντας την μορφή περιέλιξης της επαγωγικής γεννήτριας και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες αδράνειας, βελτίωσαν την απόδοση κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλής ροής σε απόδοση 86%.



Εικόνα 3.6 Τυπικές καμπύλες απόδοσης για διαφορετικούς τύπους υδροηλεκτρικών στροβίλων.

Μελέτες Περιπτώσεων

Κριτήρια Επιλογής και Αιτιολόγηση

Για να διασφαλιστεί μια ολοκληρωμένη και ουσιαστική σύγκριση των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΜΥΣΠΗΕ), τα κριτήρια επιλογής ορίστηκαν προσεκτικά με βάση τεχνικές, γεωγραφικές και πρακτικές παραμέτρους. Πρώτα απ' όλα, κάθε επιλεγμένο έργο λειτουργεί κάτω από το όριο των 10 MW, τηρώντας τον διεθνή ορισμό των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Αυτή η διάκριση είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για την κανονιστική ταξινόμηση, αλλά και επειδή επηρεάζει σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και τις απαιτήσεις ενσωμάτωσης.

Δεύτερον, δόθηκε προτεραιότητα στη γεωγραφική ποικιλομορφία, ώστε να καταγραφεί ο τρόπος λειτουργίας των ΜΥΣΠΗΕ σε διαφορετικά κοινωνικοπολιτικά, τοπογραφικά και υδρολογικά πλαίσια. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του πώς οι τοπικοί παράγοντες, όπως η συμμετοχή της κοινότητας, τα κανονιστικά πλαίσια και οι κλιματικές συνθήκες, επηρεάζουν τα αποτελέσματα του έργου.

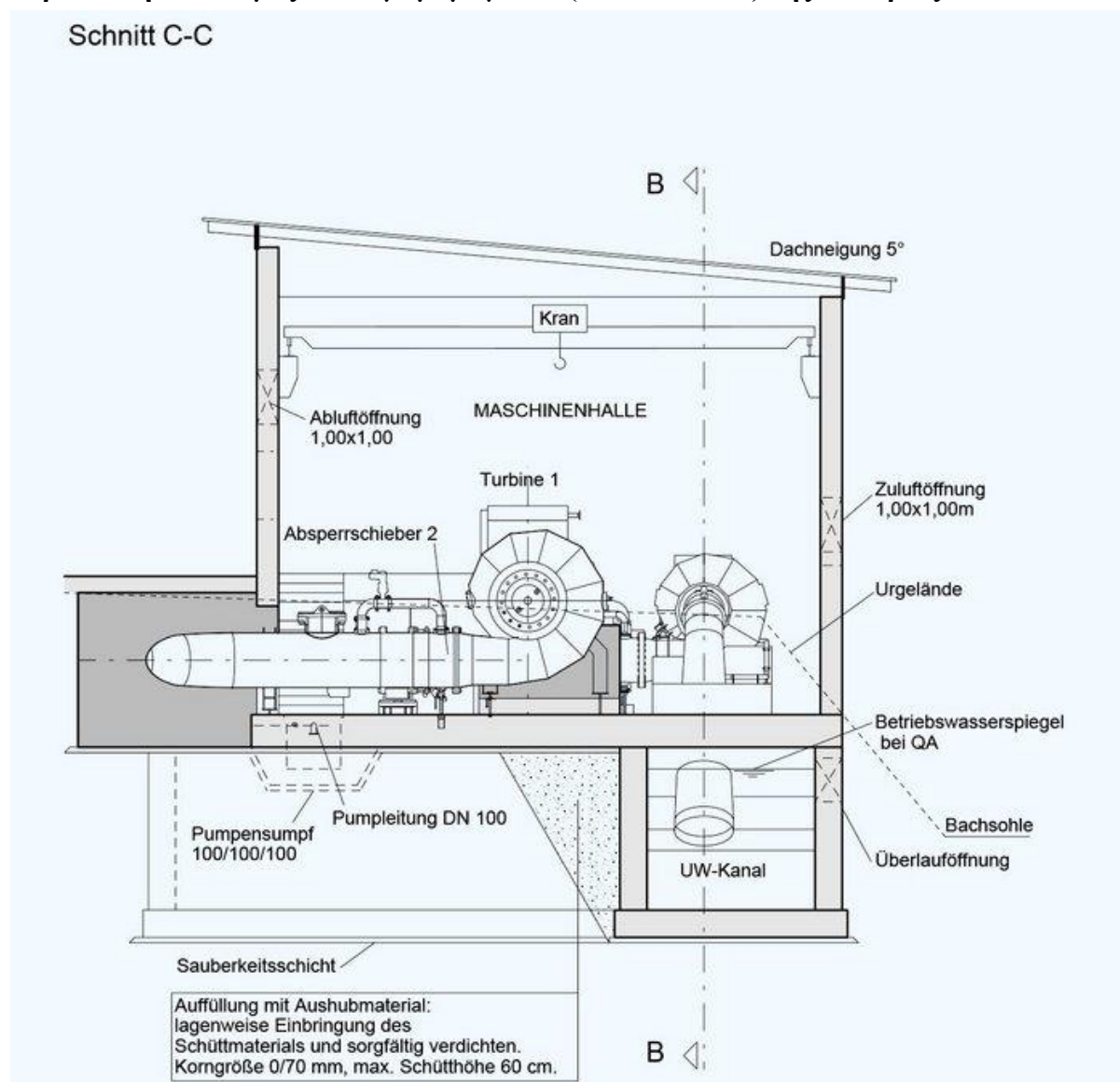
Τρίτον, δόθηκε προτίμηση σε συστήματα που βασίζονται σε ρέοντα ρέματα (συστήματα ροής) και κανάλια, τα οποία κυριαρχούν στον τομέα των μικρών υδροηλεκτρικών έργων λόγω του μειωμένου περιβαλλοντικού τους αντίκτυπου και της απλότητας στον σχεδιασμό.

Επιπλέον, τα έργα επιλέχθηκαν με βάση τη διαθεσιμότητα δεδομένων, ώστε να καταστεί δυνατή η διεξοδική τεχνική και επιχειρησιακή ανάλυση.

Τέλος, επιλέχθηκαν περιπτώσεις που αντικατοπτρίζουν ένα φάσμα τεχνολογιών στροβίλων, ρυθμών ροής και συνθηκών ύψους, επιτρέποντας μια πιο λεπτομερή κατανόηση της απόδοσης των ΜΥΣΠΗΕ υπό ποικίλες συνθήκες.

Οι επιλεγμένες μελέτες περίπτωσης είναι: ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός στο Κγείσμπγκουκα (Kremsbrücke) της Αυστρίας και δύο μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί στο Σουνταρίτζαλ (Sundarikal) και στο Ντουαρί Κολά (Dwari Khola) του Νεπάλ. Κάθε ένα από αυτά αποτελεί παράδειγμα μιας ξεχωριστής εφαρμογής μικρών υδροηλεκτρικών έργων σε ένα μοναδικό περιβάλλον.

Περίπτωση I: Σταθμός στο Κγείσμπγκουκα (Kremsbrücke) της Αυστρίας



Εικόνα 4.1 Κτίσμα στέγασης στροβίλου του σταθμού

Αυτός ο μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός που βρίσκεται στην αλπική περιοχή Κγείσμπγκουκα (Kremsbrücke) της Αυστρίας, 939,7 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η κατασκευή του οποίου τελειωσε το Δεκέμβριο του 2017 μετά από 7 μήνες, είναι

ένα σύστημα ροής και καταδεικνύει πώς η σύγχρονη μηχανική μπορεί να συνυπάρχει με την οικολογική ευαισθησία. Ο ίδιος ο σταθμός παραγωγής ενέργειας είναι εξοπλισμένος με δύο κάθετους στροβίλους Francis με δυναμικότητα απόδοσης 5,3 m³ ανά δευτερόλεπτο και ισχύ εξόδου 2.780 kW και διαθέτει βελτιωμένα συστήματα αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένου του SCADA για απομακρυσμένη παρακολούθηση. Ο σταθμός λειτουργεί στον ποταμό Lieser, αξιοποιώντας ένα ύψος πτώσης περίπου 30 έως 50 μέτρων. Αυτό το μέτρια υψηλό ύψος πτώσης, σε συνδυασμό με μια σχετικά σταθερή αλπική ροή, επιτρέπει τη συνεπή παραγωγή ενέργειας με ελάχιστη αποθήκευση.

Αυτό που διαφοροποιεί το Kremsbrücke είναι η ολοκληρωμένη προσέγγισή του στην περιβαλλοντική συμμόρφωση. Το κτίσμα που στεγάζει τον στρόβιλο κατασκευάστηκε μέσα σε μια στενή χαράδρα, ελαχιστοποιώντας την οπτική και οικολογική διείσδυση. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει ιχθυόσκαλα μήκους 40 μέτρων για τη διευκόλυνση της υδρόβιας βιοποικιλότητας και παγίδα άμμου για τον μετριασμό της φθοράς των ιζημάτων στις τουρμπίνες - και τα δύο απαιτούνται ολόένα και περισσότερο βάσει της αυστριακής νομοθεσίας για τα ύδατα. Η παραγόμενη ενέργεια τροφοδοτεί το περιφερειακό δίκτυο μέσω σύγχρονων γεννητριών, με συστήματα μετασχηματιστών που προσαρμόζουν την τάση για μεταφορά. Το σύστημα διαθέτει εύρος απόδοσης 85-90%, υποστηριζόμενο από στιβαρό σχεδιασμό και ευνοϊκή υδρολογία. Το Kremsbrücke χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς στα ευρωπαϊκά μικρά υδροηλεκτρικά έργα για την εξισορρόπηση της τεχνικής απόδοσης με την οικολογική διαχείριση.

Από την άνοιξη του 2018, μπορούν να παραχθούν 12,5 εκατομμύρια kWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Αυτό αντιστοιχεί σε μια μέση κατανάλωση 3.500 νοικοκυριών [10].

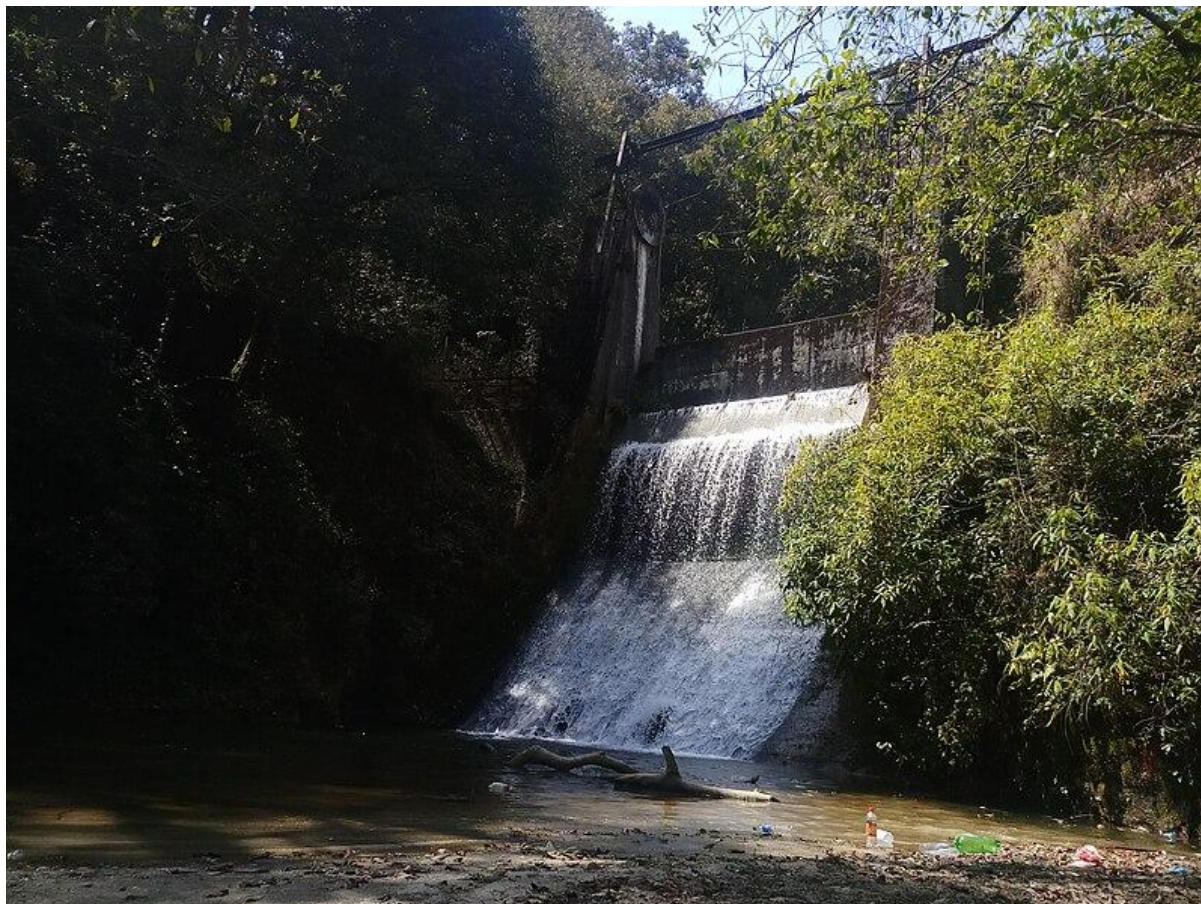
Περίπτωση II: Σταθμός στο Σουνταρίτζαλ (Sundarijal) του Νεπάλ

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Sundarijal, που βρίσκεται στην περιοχή Κατμαντού (Kathmandu) του Νεπάλ, είναι μια ιστορική και πολιτιστικά σημαντική εγκατάσταση. Αρχικά να κατασκευάζεται το 1939 και ολοκληρώθηκε 12 χρόνια αργότερα το 1946. Κατασκευάστηκε με επιχορήγηση από τη βρετανική κυβέρνηση [11]. Ήταν από τις πρώτες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις του Νεπάλ και έκτοτε έχει υποστεί σημαντικό εκσυγχρονισμό.

Σήμερα λειτουργεί με εγκατεστημένη ισχύ 640 kW, αντλώντας νερό από δύο παραποτάμους, τον Nagmati και τον Syalmati, οι οποίοι διοχετεύονται μέσω ενός καναλιού 1,6 χλμ. από τον Syalmati και 300 μέτρων από τον Nagmati σε μια δεξαμενή εξισορρόπησης. Από εκεί, το νερό κατευθύνεται στον σταθμό παραγωγής ενέργειας, μέσω ενός αγωγού μήκους 1386 μέτρων και διαμέτρου 45 εκατοστών όπου λειτουργούν δύο οριζόντιοι στρόβιλοι Pelton (320 kW έκαστος) στις 900 σ.α.λ, υπό υψηλό μανομετρικό ύψος 216 μέτρων και συνδυασμένη ροή περίπου 0,66 m³/s [11].

Το Sundarijal αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του πώς τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα μπορούν να εξυπηρετήσουν διττό σκοπό. Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το δίκτυο του Κατμαντού, το έργο παρέχει επίσης νερό για οικιακή και γεωργική χρήση. Αυτή η πολυλειτουργική μονάδα κοινής ωφέλειας ενισχύει την αξία της για την κοινότητα. Παρόλο που η απόδοση του έργου είναι ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή του Kremsbrücke λόγω παλαιότερων υποδομών και τοπικών περιορισμών συντήρησης, εξακολουθεί να επιτυγχάνει μια αξιοσέβαστη εκτιμώμενη απόδοση συστήματος 75-85%. Η μονάδα διαχειρίζεται από την κοινότητα, προσφέροντας ευκαιρίες απασχόλησης και ιδιοκτησίας

στους κατοίκους της περιοχής. Αντιμετωπίζει τις τυπικές προκλήσεις των μικροηλεκτρικών έργων σε ορεινές περιοχές - όπως η καθίζηση, η συσσώρευση υπολειμμάτων και η φθορά του εξοπλισμού - αλλά συνεχίζει να λειτουργεί αξιόπιστα, παράγοντας περίπου 4,77 GWh ετησίως. Η διαρκής σημασία του υπογραμμίζει τη σκοπιμότητα και τον αντίκτυπο των micro-υδροηλεκτρικών έργων σε αναπτυσσόμενα περιβάλλοντα.



Εικόνα 4.2 Σταθμός στο Σουνταρίτζαλ (Sundarijal) του Νεπάλ

Περίπτωση III: Σταθμός Ντουαρί Κολά (Dwari Khola) του Νεπάλ

Ο μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός Dwari Khola αποτελεί μια πιο πρόσφατη προσθήκη στο ενεργειακό τοπίο του Νεπάλ, ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία στην περιοχή Dailekh το 2017. Με ισχύ 3,75 MW, βρίσκεται στην ανώτερη κατηγορία των μικρότερων υδροηλεκτρικών σταθμών και αξιοποιεί ένα αξιοσημείωτα υψηλό μανομετρικό ύψος 450 μέτρων με ροή σχεδιασμού περίπου 1,58 m³/s. Η πιθανή χρήση στροβίλων Pelton, γνωστών για την υψηλή τους απόδοση σε συνθήκες υψηλού μανομετρικού ύψους και χαμηλής ροής, επιτρέπει στον σταθμό να λειτουργεί με απόδοση κοντά στο 90%.

Σε αντίθεση με τον σταθμό Sundarijal που διαχειρίζεται η κοινότητα, ο σταθμός Dwari Khola κατασκευάστηκε από την Bhugol Energy Development Company Pvt Ltd, έναν ανεξάρτητο παραγωγό ενέργειας [Independent Power Producer (IPP)] του Νεπάλ και τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια το εθνικό δίκτυο βάσει μακροπρόθεσμης συμφωνίας αγοράς ενέργειας με την Αρχή Ηλεκτρισμού του Νεπάλ. Το έργο αποτελεί παράδειγμα της στροφής προς τη συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη Νότια Ασία. Αν και τεχνικά επιτυχημένο, το έργο αντιμετώπισε κοινωνική αντίσταση κατά τις φάσεις απόκτησης

της γης και κατασκευής, γεγονός που υπογραμμίζει ένα κοινό εμπόδιο για τις υποδομές υπό την ηγεσία ανεξάρτητων παραγωγών στις αγροτικές περιοχές. Λειτουργικά, επωφελείται από σύγχρονα συστήματα ελέγχου και απότομη υδραυλική κλίση, επιτρέποντας τη λειτουργία του όλο το χρόνο. Η ενσωμάτωσή του στο δίκτυο συμβάλλει σημαντικά στην τοπική ενεργειακή αξιοπιστία και η απόδοσή του συνεχίζει να επικυρώνει τη χρήση μικρών υδροηλεκτρικών σε συνθήκες υψηλού υψομέτρου στα Ιμαλάια.



Εικόνα 4.3 Τμήμα του σταθμού Dwari Khola



Εικόνα 4.4 Τμήμα αγωγού του σταθμού Dwari Khola

Συγκριτικός Πίνακας

Σταθμός	Ικανότητα (kW)	Υ.Δ. (m)	Ροή (m³/s)	Στόβιλος	Αποδοτικότητα	Σύνδεση σε δίκτυο
Kremsbrücke (Αυστρία)	~2000	~30–50	~1	Κάθετος στρόβιλος	~85–90%	Ναι
Sundarjal (Νεπάλ)	640	216	0.66	Οριζόντιος Pelton	~75–85%	Ναι
Dwari Khola (Νεπάλ)	3750	450.4	1.58	Pelton	~88–90%	Ναι

Συγκριτική Ανάλυση και Ερμηνεία

Συγκρίνοντας αυτά τα τρία έργα, προκύπτουν διάφορα μοτίβα. Ο αυστριακός σταθμός, με το μέτριο ύψος πτώσης και τον πρωτοποριακό σχεδιασμό του, καταδεικνύει πώς ακόμη και ένα σύστημα 2 MW μπορεί να είναι εξαιρετικά αποδοτικό και περιβαλλοντικά συμβατό. Αντίθετα, ο σταθμός Sundarjal καταδεικνύει τον ζωτικό κοινωνικοοικονομικό ρόλο που διαδραματίζουν οι μικρο-υδροηλεκτρικές μονάδες στις αναπτυσσόμενες χώρες, προσφέροντας ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια, νερό και απασχόληση. Αν και η απόδοσή του είναι ελαφρώς χαμηλότερη, προσφέρει εξαιρετική αξία για την κοινότητα.

Ο σταθμός Dwari Khola αντιπροσωπεύει ένα υβρίδιο των δύο: τεχνικά προηγμένο και ιδιωτικά χρηματοδοτούμενο, επιτυγχάνει υψηλή απόδοση και σταθερή συνεισφορά στο δίκτυο, αλλά δεν διαθέτει την προσέγγιση που ενσωματώνεται στην κοινότητα όπως ο σταθμός Sundarjal. Τονίζει επίσης τη σημασία της συμμετοχής των ενδιαφερόμενων μερών, ιδίως σε οικολογικά και κοινωνικά ευαίσθητες ζώνες.

Και στις τρεις εγκαταστάσεις, η συσχέτιση μεταξύ υδραυλικής υψομετρικής διαφοράς και απόδοσης είναι εμφανής — τα συστήματα υψηλότερης υψομετρικής διαφοράς (Dwari Khola και Sundarjal) τείνουν να χρησιμοποιούν υδροστροβίλους Pelton και να επιτυγχάνουν καλύτερες μετρήσεις απόδοσης. Και οι τρεις εγκαταστάσεις αντιμετωπίζουν επαναλαμβανόμενες λειτουργικές προκλήσεις, όπως η καθίζηση και τα υπολείμματα, αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικές στρατηγικές μετριασμού με βάση την διαθέσιμη τεχνολογία και την ικανότητα συντήρησης.

Συνοπτικά, αυτές οι μελέτες περίπτωσης παρέχουν μια πλούσια διατομή του τοπίου των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών, που κυμαίνεται από υπερσύγχρονες ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις έως ανθεκτικά μικροδίκτυα των Ιμαλαΐων. Μαζί, υπογραμμίζουν την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και τις δυνατότητες των ΜΥΣΠΗΕ να εξυπηρετούν τόσο βιομηχανικά δίκτυα όσο και απομονωμένες αγροτικές κοινότητες με βιώσιμους και ευαίσθητους στην τοποθεσία τρόπους.

Ενσωμάτωση στο Δίκτυο

Επισκόπηση Προκλήσεων και Σημασίας

Η ενσωμάτωση των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών (ΜΥΣΠΗΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα στην αποτελεσματική και αξιόπιστη αξιοποίηση των αποκεντρωμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε αντίθεση με τους μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς που συνήθως συμβάλλουν σε λειτουργίες του κεντρικού δικτύου, οι ΜΥΣΠΗΕ βρίσκονται συχνά σε αγροτικές ή ημι-αστικές περιοχές και χαρακτηρίζονται από μεταβλητούς ρυθμούς ροής, μέτριες δυνατότητες και λιγότερο στιβαρή υποδομή. Αυτά

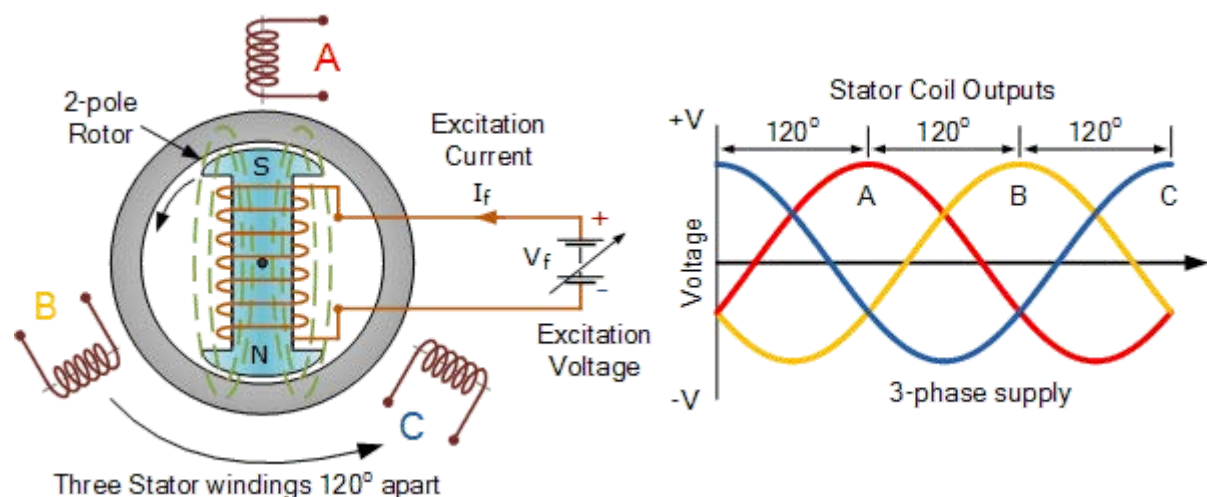
τα χαρακτηριστικά θέτουν μοναδικές τεχνικές προκλήσεις και απαιτούν εξειδικευμένες στρατηγικές για την ηλεκτρική διασύνδεση, τον έλεγχο και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

Τύποι γεννητριών και διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος

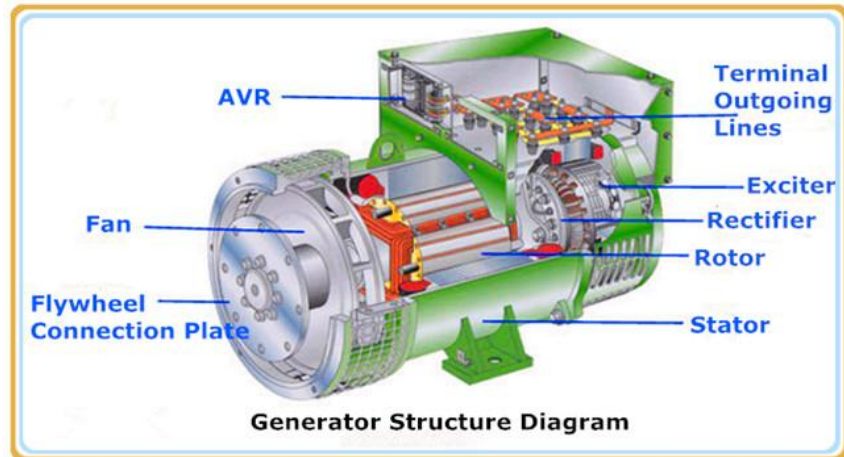
Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν συνήθως είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες, ή εναλλάκτες, είναι γεννήτριες AC με την ίδια ταχύτητα του ρότορα με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτορα. Είναι οι πίο συχνά χρησιμοποιούμενοι εναλλάκτες και χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ενέργειας από όλες τις μορφές (υδροηλεκτρικά, θερμικά, πυρηνικά). Σύμφωνα με τη δομή τους χωρίζονται σε περιστρεφόμενο μαγνητικού πεδίου και περιστρεφόμενου οπλισμού, από τις οποίες αυτές που έχουν ρότορα τύπου προεξέχοντα πόλου χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικές εφαρμογές [12]. Γεννήτριες τέτοιου τύπου μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο υψηλής τάσης χωρίς την ανάγκη μετασχηματιστή, η ταχύτητα τους παραμένει πάντα σταθερή ασχέτως του φορτίου και είναι πιο σταθερές σε εφαρμογές με μεταβλητή [13]. Εκεί που υστερούν, όμως σε σχέση με τις ασύγχρονες, είναι στο υψηλό κόστος και τα πολύπλοκα συστήματα διέγερσης και συστήματα προστασίας.

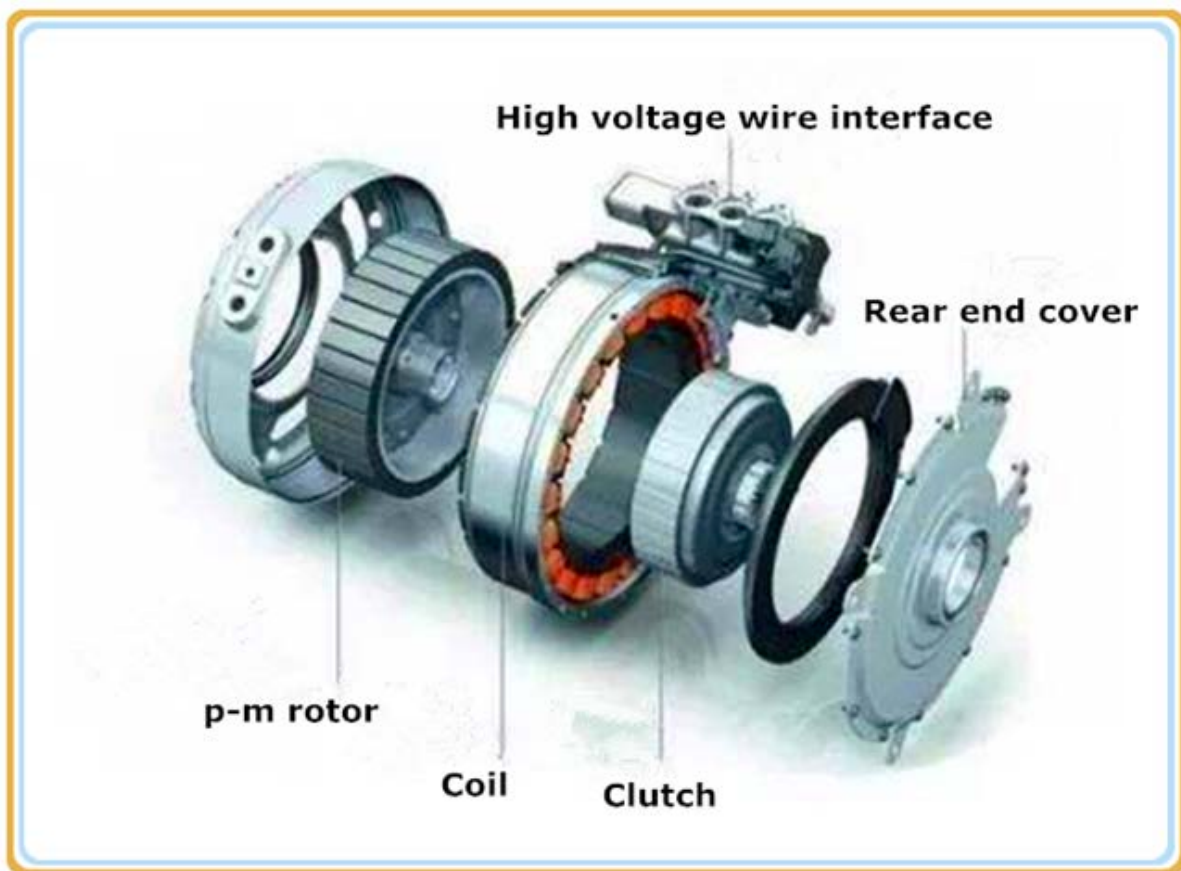
Από την άλλη πλευρά, στις ασύγχρονες γεννήτριες, που συχνά αναφέρονται ως επαγωγικές γεννήτριες, η περιστροφή του ρότορα υστερεί σε σχέση με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτός ο τύπος γεννήτριας έχει απλούστερη και πίο στιβαρή κατασκευή, δεν χρειάζεται ρύθμιση τάσης, πολύπλοκη συντήρηση, ξεχωριστό κύκλωμα για τη λειτουργία του και έχει υψηλότερη λειτουργική απόδοση [13]. Παρόλα αυτά, λόγω της διαφοράς της περιστροφικής ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου, η απόδοση της ρύθμισης της ταχύτητας είναι κακή. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς καθώς και σε αιολικούς σταθμούς [12].



Εικόνα 5.2 Παράδειγμα λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας



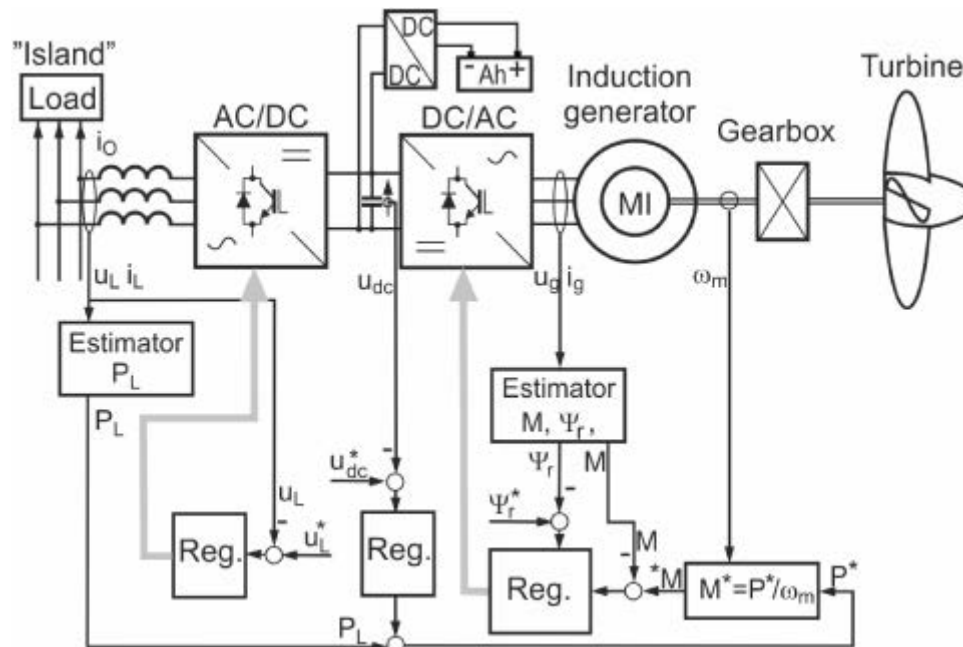
Εικόνα 5.2 Διάγραμμα δομής σύγχρονης γεννήτριας



Εικόνα 5.3 Διάγραμμα δομής επαγωγικής γεννήτριας

Για τη διαχείριση της πολυπλοκότητας της διασύνδεσης του δικτύου, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί βασίζονται όλο και περισσότερο σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, ιδιαίτερα σε συστήματα που χρησιμοποιούν λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας. Αυτοί οι μετατροπείς - συνήθως τύπου AC-DC-AC - επιτρέπουν την αποσύνδεση της ταχύτητας της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου. Αυτό όχι μόνο επιτρέπει τη βέλτιστη λειτουργία του στροβίλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ροής, αλλά βοηθά επίσης στη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας σε σταθερό επίπεδο στο σημείο διασύνδεσης του

δικτύου. Τέτοιες διατάξεις είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικές σε μονάδες ροής όπου η ροή του νερού είναι μεταβλητή. Για παράδειγμα, οι προηγμένες τοπολογίες μετατροπών, όπως οι back-to-back μετατροπείς πηγής τάσης [voltage source converters (VSC)], έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στην ομαλή μετάβαση μεταξύ απομονωμένων και συνδεδεμένων στο δίκτυο λειτουργιών. Επιπλέον, αυτοί οι μετατροπείς μπορούν να λειτουργήσουν ως ενεργά φίλτρα, διορθώνοντας τον συντελεστή ισχύος και μετριάζοντας τις αρμονικές.



Εικόνα 5.4 Διάγραμμα μετατροπέα AC/DC/AC

Συστήματα ελέγχου και στρατηγικές βασισμένες σε ΤΝΔ

Πέρα από το υλικό, εξελιγμένα σχήματα ελέγχου είναι απαραίτητα για τη επίτευξη της σταθερότητας και της απόδοσης του συστήματος. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί ελεγκτές που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη, ιδιαίτερα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ), για τη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος και την ενίσχυση της παροδικής απόκρισης σε μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Αυτοί οι ελεγκτές λειτουργούν μαθαίνοντας τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και κάνοντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο για να διατηρούν τις λειτουργικές παραμέτρους εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Στο πλαίσιο ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού 2 MW που χρησιμοποιεί μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας [Doubly Fed Induction Generator (DFIG)], τα ΤΝΔ έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη ρύθμιση της ενεργού όσο και της αέργου ισχύος, τον έλεγχο της τάσης σύνδεσης DC και την προσαρμοστική απόκριση σε διακυμάνσεις φορτίου και σφάλματα. Οι προσομοιώσεις στο χρονικό πεδίο επιβεβαιώνουν ότι οι ελεγκτές ΤΝΔ ξεπερνούν τους συμβατικούς ελεγκτές που βασίζονται σε PI, ιδιαίτερα στον χειρισμό ξαφνικών διαταραχών και μη γραμμικών συνθηκών φορτίου [14].

Κανονιστικά Πρότυπα και Συμμόρφωση με τον Κώδικα Δικτύου

Οι κώδικες και τα πρότυπα δικτύου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της σκοπιμότητας και της νομιμότητας των διασυνδέσεων υδροηλεκτρικών σταθμών-δικτύου. Ρυθμιστικοί φορείς όπως το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών [Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)] και η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή [International Electrotechnical Commission (IEC)] παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές που περιγράφουν τις τεχνικές προδιαγραφές για τη συμμόρφωση με το δίκτυο. Τα IEEE 1547 και IEC 62116, για παράδειγμα, ορίζουν απαιτήσεις για προστασία κατά της νησιδοποίησης, ανοχές τάσης και συχνότητας και επιτρεπόμενα επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, πολλές χώρες έχουν εισαγάγει μηχανισμούς πολιτικής όπως τιμολόγια τροφοδοσίας και συστήματα πράσινων πιστοποιητικών για να δώσουν κίνητρα για την ανάπτυξη μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Αυτά τα πλαίσια όχι μόνο προωθούν την απορρόφηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά και καθορίζουν τα λειτουργικά όρια εντός των οποίων πρέπει να λειτουργούν οι ΜΥΣΠΗΕ. Η συμμόρφωση συχνά περιλαμβάνει την ενσωμάτωση προστασιών ρελέ, διακοπών αποσύνδεσης δικτύου και συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο για να διασφαλιστεί ο συγχρονισμός και η ασφαλής αποσύνδεση κατά τη διάρκεια βλαβών δικτύου.



Εικόνα 5.5 (αριστερά) Λογότυπο της IEEE

Εικόνα 5.6 (δεξιά) Λογότυπο της IEC

Λειτουργικές Προκλήσεις και Υβριδικές Λύσεις

Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα, η ενσωμάτωση των ΜΥΣΠΗΕ στα υπάρχοντα δίκτυα είναι γεμάτη προκλήσεις. Η μεταβλητότητα της ροής του νερού -ειδικά σε εποχιακά ποτάμια- έχει ως αποτέλεσμα διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, οι οποίες μπορούν να επιβαρύνουν τις λειτουργίες του δικτύου εάν δεν αντιμετωπιστούν σωστά. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις τάσης, η αστάθεια συχνότητας και η ανεπαρκής υποστήριξη έργου ισχύος είναι συνηθισμένα

προβλήματα, ιδιαίτερα σε συστήματα που χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες χωρίς επαρκή αντιστάθμιση. Για τον μετριασμό αυτών των προκλήσεων, οι υβριδικές διαμορφώσεις που συνδυάζουν ΜΥΣΠΗΕ με άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια ή η αποθήκευση σε μπαταρίες, κερδίζουν δημοτικότητα. Αυτά τα υβριδικά συστήματα παρέχουν ένα ρυθμιστικό πλαίσιο έναντι της μεταβλητότητας της παραγωγής, ενισχύουν την ανθεκτικότητα του δικτύου και διασφαλίζουν μια πιο σταθερή παροχή ρεύματος. Επιπλέον, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να απορροφήσουν την υπερβολική παραγωγή κατά τις ώρες εκτός αιχμής και να εκφορτίσουν κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης, βελτιστοποιώντας έτσι το προφίλ φορτίου.

Μελέτες Περιπτώσεων και Παραδείγματα Ανάπτυξης

Παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο καταδεικνύουν περαιτέρω την ποικιλομορφία και την προσαρμοστικότητα των στρατηγικών ενσωμάτωσης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών στο δίκτυο. Στη Ρουμανία, αναπτύχθηκε ένα προηγμένο σύστημα μικροδικτύου που ενσωματώνει ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό εξοπλισμένο με στρόβιλο Francis 45 kW με μια γεννήτρια ντίζελ 7 kW, μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση 1,3 kW και μια κυψέλη καυσίμου 1,3 kW. Αυτό το σύστημα, συνδεδεμένο μέσω ενός μετασχηματιστή 0,4 kV, λειτουργεί με ενεργό φιλτράρισμα και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο για τη διαχείριση μη γραμμικών φορτίων και τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με το δίκτυο [15].

Μια άλλη αξιοσημείωτη περίπτωση είναι το έργο Casa da Seda στην Πορτογαλία, όπου δύο συνδεδεμένοι στο δίκτυο pico-υδροστρόβιλοι - ένας προπέλα χαμηλής πίεσης και ένας υδραυλικός τροχός - ενσωματώθηκαν σε ένα έξυπνο μικροδίκτυο που τροφοδοτεί ένα μουσείο. Αυτές οι στρόβιλοι διασυνδέθηκαν χρησιμοποιώντας εμπορικά διαθέσιμους φωτοβολταϊκούς μετατροπείς, αναδεικνύοντας την ευελιξία της μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικής ενέργειας σε αστικά καταναμεμημένα ενεργειακά συστήματα [16].

Οι προσεγγίσεις ενσωμάτωσης δεν είναι μονολιθικές, αλλά προσαρμόζονται στο λειτουργικό πλαίσιο, την διαθέσιμη υποδομή και το κανονιστικό περιβάλλον. Είτε μέσω εξελιγμένων ρυθμίσεων DFIG ελεγχόμενων από ΤΝΔ είτε μέσω απλουστερών γεννητριών επαγωγής με αντιστάθμιση πυκνωτή, ο στόχος παραμένει ο ίδιος: η παροχή σταθερής, καθαρής και αποδοτικής ενέργειας στο δίκτυο. Με τις συνεχείς εξελίξεις στα ηλεκτρονικά ισχύος, τους αλγόριθμους ελέγχου και την εναρμόνιση των κανονισμών, το μέλλον της ενσωμάτωσης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών στο δίκτυο φαίνεται πολλά υποσχόμενο.

Εφαρμογές πέρα του δικτύου

Ηλεκτροδότηση εκτός δικτύου και αγροτική ανάπτυξη

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΣΠΗΕ) έχουν διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην επέκταση της πρόσβασης σε ηλεκτρική ενέργεια σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η επέκταση του δικτύου είναι τεχνικά ή οικονομικά ανέφικτη. Σε χώρες όπως το Νεπάλ, η Ινδία και οι Φιλιππίνες, τα micro- και mini-υδροηλεκτρικά συστήματα χρησιμεύουν ως η ραχοκοκαλιά της ηλεκτροδότησης των αγροτικών περιοχών, τροφοδοτώντας κατοικίες, σχολεία, ιατρικά κέντρα και μικρές επιχειρήσεις. Αυτά τα συστήματα συχνά λειτουργούν σε

απομονωμένα μικροδίκτυα ή ως αυτόνομες εγκαταστάσεις, αξιοποιώντας αξιόπιστες πηγές νερού σε ορεινό ή λοφώδες έδαφος.

Μελέτες περιπτώσεων δείχνουν ότι τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα μπορούν να επιτρέψουν παραγωγικές χρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας — όπως η άλεση σιτηρών, η ψύξη και η πρόσβαση στις τεχνολογίες πληροφόρησης και επικοινωνίας — δημιουργώντας έτσι εισόδημα και ενισχύοντας την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη. Η χαμηλή συντήρηση και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους τα καθιστούν ελκυστικά σε περιοχές όπου η τεχνική ικανότητα είναι περιορισμένη.

Αντληση νερού και αγροτικές εφαρμογές

Πέρα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι ΜΥΣΠΗΕ έχουν σημαντικές εφαρμογές μηχανικής ενέργειας, ιδιαίτερα στη γεωργία. Τα συστήματα μπορούν να συνδεθούν άμεσα με αντλίες νερού για άρδευση, ειδικά σε ΜΥΣΠΗΕ που βασίζονται σε κανάλια, όπου η ροή είναι προβλέψιμη και διαχειριζόμενη. Στην Ινδία, για παράδειγμα, μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις στην κορυφή του καναλιού χρησιμοποιούνται για σκοπούς σαν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για να βοηθήσουν σε συστήματα άρδευσης με βαρύτητα ή ανυψούμενα, μειώνοντας την εξάρτηση από τις αντλίες ντίζελ και διασφαλίζοντας τη συνέργεια νερού-ενέργειας.

Η άμεση χρήση μηχανικής ισχύος (π.χ. αντλίες με άξονα) από στροβίλους εξαλείφει την ανάγκη για ενδιάμεση μετατροπή, αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες μετάδοσης.

Υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο ως μέρος υβριδικών ενεργειακών συστημάτων, σε συνδυασμό με ηλιακά φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες. Τέτοιες διαμορφώσεις είναι ιδανικές για μικροδίκτυα σε απομονωμένες κοινότητες ή βιομηχανικές ζώνες. Ο υβριδισμός επιτρέπει σε κάθε τεχνολογία να αντισταθμίζει την ασυνέχεια ή τις αναντιστοιχίες φορτίου της άλλης.

Στο Λάκναου (Lucknow) της Ινδίας, ένα προτεινόμενο υβριδικό σύστημα ενσωμάτωσε ηλιακά φωτοβολταϊκά (13,9 kW), αιολικά (9 kW), δεξαμενή υδρογόνου (10 kW) και κυψέλες καυσίμου (10 kW) με μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Το προκύπτον σύστημα πέτυχε ένα 100% ανανεώσιμο κλάσμα, καλύπτει τη ζήτηση φορτίου 52 kWh/ημέρα και μείωσε το επίπεδο κόστους ενέργειας [cost of energy (COE)] στα 0,241 \$/kWh [17].

Στον Καναδά, παρόμοιες μελέτες έδειξαν ότι ενώ τα μικροδίκτυα που βασίζονται σε μπαταρίες προσφέρουν επί του παρόντος χαμηλότερο κόστος ενέργειας (0,36 \$/kWh), τα συστήματα που ενσωματώνουν το υδρογόνο παρέχουν μακροπρόθεσμα οφέλη στην χωρητικότητα αποθήκευσης και στο δυναμικό απαλλαγής από τον άνθρακα, με COE περίπου 0,57 \$/kWh [18].

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για υβριδισμό λόγω των υψηλών συντελεστών χωρητικότητας και της προβλέψιμης παραγωγής τους. Ενώ η ηλιακή

και η αιολική ενέργεια είναι μεταβλητές, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παρέχουν σταθερό βασικό φορτίο, ενισχύοντας τη σταθερότητα του δικτύου. Η εποχιακή συμπληρωματικότητά τους είναι επίσης χρήσιμη — σε πολλές περιοχές, η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει αιχμές κατά τις βροχερές περιόδους, ενώ η ηλιακή ενέργεια αποδίδει καλύτερα σε περιόδους ξηρασίας, καθιστώντας τις υβριδικές διατάξεις εγγενώς ανθεκτικές.

Παραγωγή “πράσινου” υδρογόνου

Το υδρογόνο, ως το πιο συχνά συναντώμενο στοιχείο του περιοδικού πίνακα στη φύση, έχει ενσωματωθεί σε πληθώρα χρήσεων τη τελευταία δεκαετία, τόσο ως μέσο παραγωγής ενέργειας και ως καύσιμο σε επιβατικά οχήματα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι απόκτησης του, όπως αναμόρφωση μεθανίου με ατμό και πυρόλυση μεθανίου, διαδικασίες όμως που αφήνουν πίσω κατάλοιπα, αλλά η πιο περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος είναι η ηλεκτρόλυση νερού. Το πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο όμως είναι ότι το νερό, λόγω της σταθερής σύνθεσης του, χρειάζεται μεγάλη ποσότητα ρεύματος (1,23 V) για να διασπαστεί σε άτομα υδρογόνου και οξυγόνου και, άμα αυτή η ενέργεια δεν προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, τα οικολογικά οφέλη του αντισταθμίζονται από τις εκπομπές.

High Carbon			Low Carbon	
Grey Hydrogen	Blue Hydrogen	Turquoise Hydrogen	Green Hydrogen	Pink Hydrogen
Made using steam methane reforming. Produces carbon monoxide and CO ₂	Made using carbon capture and storage. Reduces greenhouse gasses released	Made using methane pyrolysis. Produces solid carbon instead of CO ₂	Made using electrolysis by renewable energy. Zero Carbon emissions	Made using electrolysis by nuclear power.

Εικόνα 6.1 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου

Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια από τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια μπορεί να διοχετευθεί στην παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, παρέχοντας έναν καθαρό, αποθηκευτικό φορέα ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα πολύτιμο σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ή όταν η τροφοδοσία του δικτύου είναι περιορισμένη. Το υδρογόνο μπορεί αργότερα να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας κυψέλες καυσίμου ή να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικούς ή μεταφορικούς τομείς.

Σε μια μελέτη προσομοίωσης στη βορειοδυτική ακτή της Σαουδικής Αραβίας, η ενσωμάτωση δεξαμενών υδρογόνου και κυψελών καυσίμου σε ένα υβριδικό σύστημα (φωτοβολταϊκά + αιολικά + μπαταρίες) οδήγησε σε κόστος ενέργειας της τάξης των 0,60–0,72 \$/kWh, ανάλογα με την παρουσία μπαταρίας. Το εφεδρικό σύστημα υδρογόνου βελτίωσε την αξιοπιστία και επέτρεψε τη μακροχρόνια αποθήκευση [19].

Μια άλλη μελέτη τόνισε τον ρόλο των μικροδικτύων που βασίζονται στο υδρογόνο στην Ινδία, δείχνοντας πώς οι κυψέλες καυσίμου και οι δεξαμενές υδρογόνου θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά το καθαρό παρόν κόστος [net present cost (NPC)] και να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα [20].

Ενσωμάτωση σε Έξυπνα Μικροδίκτυα

Καθώς το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα μετατοπίζεται προς αποκεντρωμένα, έξυπνα δίκτυα, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να χρησιμεύσουν ως σταθεροί πάροχοι βασικού φορτίου εντός έξυπνων μικροδικτύων. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων μικροδικτύων AC/DC που ενσωματώνουν φωτοβολταϊκά, ηλεκτρόλυση υδρογόνου, κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες αποθήκευσης. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν έξυπνους ελεγκτές για τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης ενέργειας με βάση τις προβλέψεις φορτίου και παραγωγής [21].

Αυτά τα έξυπνα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΜΗΣΠΗΕ) για τη διατήρηση της παροχής βασικού φορτίου, ενώ άλλα ανανεώσιμα στοιχεία καλύπτουν την αιχμή ή την κυμαινόμενη ζήτηση, επιτρέποντας πλήρη ενεργειακή αυτονομία σε αγροτικά ή νησιωτικά περιβάλλοντα.

Περιβαλλοντικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις

Η ανάπτυξη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών σε εφαρμογές εκτός δικτύου ή υβριδικές παρέχει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Πρώτον, η μειωμένη εξάρτηση από γεννήτριες που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα όπως πετρέλαιο, βενζίνη ή φυσικό αέριο βοηθά σε μεγάλο βαθμό στον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα λόγω της ελάχιστης εκτροπής νερού και χρήσης γης. Επιπλέον, η αποκέντρωση του δικτύου ηλεκτροδότησης και η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κάνει το δίκτυο λιγότερο φορτωμένο, κάνει την επισκευή διαφόρων βλαβών πιο άμεση και λιγότερο χρονοβόρα καθώς και η ύπαρξη πολλών διαφορετικών μικρών σταθμών δημιουργούν ευκαιρίες απασχόλησης τόσο για τη συντήρηση τους όσο για τη παροχή συνοδευτικών υπηρεσιών.

Παρόλ' αυτά, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν όπως οικολογικές επιπτώσεις στα ενδιαιτήματα των ποταμών και στη μετανάστευση των ψαριών, εργασίες όπως συντήρηση και άλλες παρόμοιες και εξίσου απαραίτητες είναι πιθανόν να παρουσιάσουν ένα βαθμό δυσκολίας ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους και ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές και η ικανότητα διαχείρισης της κοινότητας για μακροπρόθεσμη λειτουργία μπορεί να είναι ασταθής. Η ενσωμάτωση προτύπων περιβαλλοντικής ροής, η εκπαίδευση της κοινότητας και η οικολογική παρακολούθηση μπορούν να μετριάσουν αυτές τις ανησυχίες.

Τεχνολογικές και Πολιτικές Τάσεις

Οι πρόσφατες καινοτομίες ενισχύουν την ανάπτυξη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Η μικρογράφηση τουρμπίνας επιτρέπει την ανάπτυξη σε τοποθεσίες με πολύ χαμηλό ύψος πτώσης. Η ύπαρξη προκατασκευασμένων αρθρωτών μονάδων απλοποιούν την εγκατάσταση. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση μέσω του διαδικτύου επιτρέπει την προγνωστική συντήρηση του σταθμού και άλλων μερών του. Πλαίσια πολιτικής, όπως τα τιμολόγια τροφοδοσίας, οι επιδοτήσεις κεφαλαίου και τα προγράμματα πιστώσεων άνθρακα, υποστηρίζουν ολοένα και περισσότερο τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κυβερνητικές υπηρεσίες παρέχουν τεχνική βοήθεια για μελέτες σκοπιμότητας και εκπαίδευση της κοινότητας.

Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές

Περιβαλλοντικές και οικολογικές ανησυχίες

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΜΥΣΠΗΕ), παρόλο που γενικά προκαλούν λιγότερες αναταράξεις σε σύγκριση με τα υδροηλεκτρικά έργα μεγάλης κλίμακας, εξακολουθούν να θέτουν αξιοσημείωτες οικολογικές προκλήσεις. Το πιο έντονο περιβαλλοντικό ζήτημα είναι η διατάραξη των ποτάμιων οικοσυστημάτων. Ακόμη και οι σταθμοί ροής, οι οποίοι λειτουργούν χωρίς μεγάλες δεξαμενές, μπορούν να επηρεάσουν την υδρόβια βιοποικιλότητα μεταβάλλοντας την υδρολογία των ρεμάτων, μειώνοντας τη μεταφορά ιζημάτων και εμποδίζοντας τις μεταναστευτικές οδούς των ψαριών. Οι σωρευτικές επιπτώσεις από πολλαπλούς σταθμούς εντός μιας λεκάνης απορροής ποταμού μπορεί να ανταγωνίζονται ή και να υπερβαίνουν εκείνες ενός μόνο μεγάλου φράγματος, ειδικά όταν ο κατακερματισμός του οικοσυστήματος δεν αντιμετωπίζεται σωστά.

Ο μετριασμός αυτών των επιπτώσεων απαιτεί στρατηγικό σχεδιασμό και καινοτόμες τεχνολογίες. Η χρήση φιλικών προς τα ψάρια στροβίλων, ιχθυοδιαδρόμων που μοιάζουν με τη φύση και συστημάτων παράκαμψης ιζημάτων μπορεί να μετριάσει το οικολογικό στρες. Οι εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΕΠΕ) καθίστανται απαραίτητα εργαλεία για τους κατασκευαστές έργων για τον εντοπισμό, την πρόβλεψη και τη διαχείριση περιβαλλοντικών κινδύνων που αφορούν συγκεκριμένες τοποθεσίες. Επιπλέον, οι προσαρμοστικές πρακτικές διαχείρισης —όπου τα συστήματα παρακολουθούνται και προσαρμόζονται μετά τη θέση σε λειτουργία— συνιστώνται ολοένα και περισσότερο από τους περιβαλλοντικούς ρυθμιστικούς φορείς.

Κλιματική Αλλαγή και Υδρολογική Μεταβλητότητα

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια αυξανόμενη απειλή για την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Καθώς τα πρότυπα βροχοπτώσεων μεταβάλλονται και η δυναμική της τήξης του χιονιού αλλάζει, τα υδάτινα καθεστώτα από τα οποία εξαρτώνται οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί γίνονται ολοένα και πιο απρόβλεπτα. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας [International Energy Agency (IEA)] ανέφερε ότι το 2022, η παγκόσμια παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε σημαντικά λόγω σοβαρών ξηρασιών, με μειώσεις που κυμαίνονταν από 5% έως 19% σε χώρες όπως η Κίνα, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Βραζιλία [22].

Αυτή η μεταβλητότητα αμφισβητεί την παραδοσιακή υπόθεση της σταθερής διαθεσιμότητας νερού και απαιτεί σχεδιασμούς ανθεκτικούς στην κλιματική αλλαγή. Η εφαρμογή συστημάτων υδρολογικής πρόβλεψης υψηλής ανάλυσης και η χρήση στροβίλων μεταβλητής ταχύτητας μπορούν να ενισχύσουν την προσαρμοστικότητα. Επιπλέον, ο σχεδιασμός των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών για αποτελεσματική λειτουργία υπό μια σειρά συνθηκών ροής διασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη επιχειρησιακή βιωσιμότητα. Σύμφωνα με πρόσφατα μοντέλα, οι συντελεστές χωρητικότητας των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών ενδέχεται να μειωθούν κατά 10-15% σε ορισμένες περιοχές της Νότιας Ασίας, εκτός εάν εφαρμοστούν προσαρμοστικά μέτρα.

Πολιτική, Χρηματοδότηση και Δυναμική της Αγοράς

Παρά τα αποδεδειγμένα οφέλη και την ωριμότητά τους, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν σημαντικά θεσμικά και οικονομικά εμπόδια. Η διαδικασία αδειοδότησης για μικρά υδροηλεκτρικά έργα συχνά περιλαμβάνει την αντιμετώπιση πολλαπλών γραφειοκρατικών επιπέδων, ειδικά σε περιοχές όπου οι κανονισμοί για το νερό, το περιβάλλον και την ενέργεια διαχειρίζονται ξεχωριστές υπηρεσίες. Αυτή η διοικητική πολυπλοκότητα καθυστερεί τα χρονοδιαγράμματα των έργων και αυξάνει το κόστος συναλλαγών.

Από οικονομικής άποψης, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί δυσκολεύονται να ανταγωνιστούν την ηλιακή και την αιολική ενέργεια όσον αφορά το αρχικό κόστος και την ελκυστικότητα των επενδύσεων. Η παγκόσμια αγορά των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών αποτιμήθηκε σε περίπου 2,77 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2024, με τις προβλέψεις να δείχνουν σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 3,3%, που ενδεχομένως θα φτάσει τα 3,6 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ έως το 2032 [23]. Ωστόσο, τα πραγματικά ποσοστά ανάπτυξης παραμένουν περιφερειακά ασύμμετρα. Η περιοχή Ασίας-Ειρηνικού κυριαρχεί στην παγκόσμια αγορά με εκτιμώμενο μερίδιο 37%, με επικεφαλής την Κίνα, την Ινδία και τη Νοτιοανατολική Ασία. Αντίθετα, η Αφρική και η Λατινική Αμερική βλέπουν αυξημένο ενδιαφέρον για τους μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς ως μέσο ηλεκτροδότησης των αγροτικών και περιαστικών περιοχών.

Παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο περιλαμβάνουν τον μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό Mbakaou (1,48 MW) στο Καμερούν, ο οποίος κόστισε περίπου 6,8 εκατομμύρια ευρώ και τώρα τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια πάνω από 40.000 άτομα, και το σύμπλεγμα έργων Nyagak στην Ουγκάντα, το οποίο υποστηρίζεται από αναπτυξιακές τράπεζες και Ευρωπαίους εταίρους [24][25].

Το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [levelized cost of electricity (LCOE)] για τα ΜΥΗ κυμαίνεται από 0,02 έως 0,10 δολάρια ΗΠΑ/kWh, καθιστώντας το ανταγωνιστικό με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδίως σε περιοχές όπου οι υδρολογικοί πόροι είναι άφθονοι [26].

Ψηφιοποίηση, IoT και απομακρυσμένη παρακολούθηση

Η ενσωμάτωση των ψηφιακών τεχνολογιών φέρνει επανάσταση στην επιχειρησιακή αποδοτικότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών (ΜΥΣΠΗΕ). Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις ενσωματώνουν όλο και περισσότερο συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων [Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)], αισθητήρες Διαδικτύου των Πραγμάτων [Internet of Thing (IoT)] και δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης για την παρακολούθηση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι τεχνολογίες διευκολύνουν την προγνωστική συντήρηση, βελτιστοποιούν τη χρήση της ροής και επιτρέπουν την απομακρυσμένη διάγνωση, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος και τον χρόνο διακοπής λειτουργίας έως και 30%.

Ωστόσο, η ψηφιοποίηση εισάγει νέα τρωτά σημεία, ιδίως στην κυβερνοασφάλεια. Καθώς οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί γίνονται πιο συνδεδεμένοι, πρέπει επίσης να είναι πιο ανθεκτικές σε κυβερνοεπιθέσεις και αστοχίες λογισμικού. Επιπλέον, η επιτυχής ανάπτυξη ψηφιακών λύσεων απαιτεί εκπαιδευμένο προσωπικό, το οποίο μπορεί να αποτελέσει περιορισμό σε αγροτικές ή σε περιοχές με περιορισμένους πόρους.

Μελλοντική κατεύθυνση έρευνας και καινοτομίας

Οι μελλοντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών και στις στρατηγικές ανάπτυξης επικεντρώνονται στην προσαρμοστικότητα, την αρθρωτή κατασκευή και την ενσωμάτωση με άλλα ανανεώσιμα συστήματα. Μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες τάσεις είναι η υβριδοποίηση - ο συνδυασμός των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών με ηλιακή ή αιολική ενέργεια για την αντιστάθμιση της διακοπτόμενης λειτουργίας και την ενίσχυση της αξιοπιστίας του δικτύου. Μια μελέτη του 2025 από τους Catarino et al. παρουσίασε μια μονάδα ροής ποταμού στη βόρεια Πορτογαλία που λειτουργεί μέσα σε ένα εικονικό υβριδικό ηλιακό-αιολικό-υδροηλεκτρικό σύστημα, μετριάζοντας αποτελεσματικά τις διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου [27].

Οι προκατασκευασμένοι και αρθρωτοί μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί κερδίζουν έδαφος λόγω των μειωμένων χρονοδιαγραμμάτων κατασκευής τους και της καταλληλότητάς τους για ανάπτυξη σε απομακρυσμένα ή απαιτητικά από άποψη εφοδιαστικής περιβάλλοντα. Οι υδροκινητικοί στρόβιλοι και τα υδροηλεκτρικά συστήματα εντός αγωγών, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από το ρέον νερό σε υπάρχουσες υποδομές, όπως τα κανάλια άρδευσης ή οι δημοτικοί αγωγοί, αναδύονται επίσης ως εναλλακτικές λύσεις χαμηλού αντίκτυπου.

Ένα άλλο μέτωπο είναι η ενσωμάτωση των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών στην παραγωγή “πράσινου” υδρογόνου. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να τροφοδοτήσουν μονάδες ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου, προσφέροντας μια νέα ροή εσόδων και ενισχύοντας την πρόταση αξίας των μικρών υδροηλεκτρικών συστημάτων.

Η τεχνητή νοημοσύνη (TN) και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης διερευνώνται για τη βελτιστοποίηση της κατανομής ροής σε πραγματικό χρόνο, την προγνωστική συντήρηση και την βελτιωμένη πρόβλεψη. Αυτές οι καινοτομίες μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την ευελιξία και την ανθεκτικότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών σε μελλοντικά περιβάλλοντα έξυπνων δικτύων.

Ανάλυση ενδιαφερόμενων μερών και περιφέρειας

Η επιτυχής ανάπτυξη και η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών (ΜΥΣΠΗΕ) εξαρτώνται από τις συντονισμένες προσπάθειες πολλαπλών ενδιαφερόμενων μερών. Οι κυβερνήσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό των τιμολογίων, στην προσφορά κινήτρων και στην απλοποίηση των ρυθμιστικών διαδικασιών. Οι ιδιώτες κατασκευαστές παρέχουν κεφάλαια και τεχνική εμπειρογνωμοσύνη, ενώ οι τοπικές κοινότητες διασφαλίζουν την κοινωνική άδεια και τη συνάφεια με το πλαίσιο. Τα διεθνή χρηματοπιστωτικά ιδρύματα και οι αναπτυξιακοί οργανισμοί είναι καθοριστικοί για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου των έργων και τη διευκόλυνση της μεταφοράς γνώσης.

Σε περιφερειακό επίπεδο, το τοπίο των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών είναι ετερογενές. Στην Ασία, οι κυβερνήσεις προσφέρουν ισχυρή υποστήριξη μέσω επιδοτήσεων και προγραμμάτων ηλεκτροδότησης. Αντίθετα, η Αφρική και η Λατινική Αμερική χαρακτηρίζονται από υπανάπτυκτη υποδομή δικτύου, αλλά υψηλό δυναμικό για εφαρμογές μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών εκτός δικτύου. Η Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική, με την ώριμη υποδομή τους, επικεντρώνονται στην αναβάθμιση και τον εκσυγχρονισμό των υφιστάμενων μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών χρησιμοποιώντας ψηφιακές και οικολογικές αναβαθμίσεις.

Συμπέρασμα

Η μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί βρίσκονται στο σημείο τομής της παράδοσης και της καινοτομίας. Προσφέρει μια ώριμη, σταθερή και περιβαλλοντικά προσαρμόσιμη πηγή ενέργειας, ιδιαίτερα κατάλληλη για τα αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα του μέλλοντος. Ωστόσο, για να διατηρήσουν και να επεκτείνουν τη σημασία τους, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα πρέπει να εξελιχθούν — υιοθετώντας ψηφιακά εργαλεία, ενσωματώνοντας τα σε υβριδικά συστήματα και προσαρμοζόμενα στις κλιματικές και κανονιστικές αλλαγές. Οι στρατηγικές επενδύσεις στην έρευνα, τη μεταρρύθμιση πολιτικής και τον συντονισμό των ενδιαφερόμενων μερών θα είναι το κλειδί για την πλήρη απελευθέρωση του δυναμικού των μικροηλεκτρικών έργων σε ένα απαλλαγμένο από άνθρακα και ανθεκτικό ενεργειακό μέλλον.

Συμπεράσματα

Σύνοψη Ευρημάτων

Αυτή η πτυχιακή εργασία διερεύνησε συστηματικά τις τεχνικές, λειτουργικές και πρακτικές διαστάσεις των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΜΥΣΠΗΕ), με έμφαση στη βιωσιμότητά τους ως αποκεντρωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 2, καθορίστηκε η τεχνολογική βάση των ΜΥΣΠΗΕ, περιγράφοντας λεπτομερώς τον σχεδιασμό και τη λειτουργικότητα βασικών εξαρτημάτων, όπως οι τουρμπίνες, οι γεννήτριες και τα συστήματα ελέγχου. Κατηγοριοποιήθηκαν οι ΜΥΣΠΗΕ σε πολύ μικρές, μίνι και μικρής κλίμακας μονάδες, δίνοντας έμφαση στον τρόπο με τον οποίο η επιλογή του συστήματος επηρεάζεται από παράγοντες που αφορούν συγκεκριμένα την τοποθεσία, όπως το μανομετρικό ύψος, η παροχή και η γεωγραφία.

Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώθηκε στην αποδοτικότητα του συστήματος, όπου αποδείχθηκε ότι η απόδοση των ΜΥΣΠΗΕ εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος, την επιλογή τουρμπίνας, τις στρατηγικές ελέγχου λειτουργίας και την εποχιακή διαθεσιμότητα νερού. Οι τυπικές συνολικές αποδόσεις κυμαίνονται από 60% έως 85% και διάφορες βελτιστοποιήσεις σχεδιασμού και τεχνολογίες ελέγχου μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συνέπεια της παραγωγής και την οικονομική βιωσιμότητα.

Στο Κεφάλαιο 4, μελέτες περιπτώσεων από τον πραγματικό κόσμο κατέδειξαν πώς τα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα αποδίδουν σε διαφορετικά περιβαλλοντικά, κανονιστικά και οικονομικά πλαίσια. Παραδείγματα από την περιοχή των Άλπεων, τη Νοτιοανατολική Ασία και τη Βόρεια Αμερική ανέδειξαν ποικίλες περιπτώσεις χρήσης — από την ηλεκτροδότηση αγροτικών κοινοτήτων έως την ενίσχυση των περιφερειακών δικτύων. Αυτές οι περιπτώσεις αποκάλυψαν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τον σχεδιασμό έργων, τις απαιτήσεις συντήρησης και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα.

Το Κεφάλαιο 5 ασχολήθηκε με τον τρόπο ενσωμάτωσης των ΜΥΣΠΗΕ στα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Διερευνήθηκαν τεχνικές απαιτήσεις όπως ο συγχρονισμός, η ρύθμιση τάσης και η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, παράλληλα με θεσμικά πλαίσια όπως ο συμψηφισμός μετρήσεων και τα feed-in tariffs. Ενώ οι ΜΥΣΠΗΕ συμβάλλουν αξιόπιστα στην ενέργεια βασικού φορτίου σε ορισμένα πλαίσια, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις στην εναρμόνισή τους με τις διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα συστήματα έξυπνων δικτύων.

Το Κεφάλαιο 6 επέκτεινε τη συζήτηση πέρα από τους παραδοσιακούς ρόλους τροφοδοσίας από το δίκτυο, παρουσιάζοντας οι ΜΥΣΠΗΕ σε εφαρμογές εκτός δικτύου, υβριδικές διαμορφώσεις με ηλιακά φωτοβολταϊκά και μπαταρίες, ακόμη και παραγωγή υδρογόνου. Αυτά τα παραδείγματα τόνισαν την προσαρμοστική ευελιξία των ΜΥΣΠΗΕ σε συνδυασμό με αναδυόμενες τεχνολογίες.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 7 περιγράφηκαν οι βασικές προκλήσεις — από τις οικολογικές επιπτώσεις και την ιζηματογένεση έως την κλιματική μεταβλητότητα και την αδράνεια πολιτικής. Επίσης, προσδιόρισε πιθανές καινοτομίες όπως η τηλεπαρακολούθηση, τα ψηφιακά δίδυμα και τα προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου για τη βελτίωση της απόδοσης των ΜΥΗ.

Τελικές σκέψεις

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί βρίσκονται σε μια κρίσιμη καμπή στις παγκόσμιες ενεργειακές μεταβάσεις. Ενώ η ανάπτυξή τους είναι ώριμη σε πολλές περιοχές, ο ρόλος τους εξελίσσεται με την έλευση αποκεντρωμένων, έξυπνων ενεργειακών συστημάτων. Η σχετικά σταθερή παραγωγή τους, η μεγάλη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι δυνατότητες τοπικής εφαρμογής δίνουν στις μικροηλεκτρικές μονάδες ένα πλεονέκτημα στην ανθεκτικότητα και την ενεργειακή ανεξαρτησία με βάση την κοινότητα.

Ωστόσο, για να μπορέσουν οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί να αναπτυχθούν ουσιαστικά στο δίκτυο του 21ου αιώνα, η ανάπτυξή τους πρέπει να εναρμονιστεί με την οικολογική διαχείριση, τη συμβατότητα με έξυπνα δίκτυα και την υβριδική ενσωμάτωση. Η πρόκληση

δεν αφορά πλέον μόνο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας — αλλά την παροχή της με βιώσιμο, δίκαιο και προσαρμοστικό τρόπο σε ένα ολοένα και πιο δυναμικό ενεργειακό τοπίο.

Συστάσεις για μελλοντική εργασία

Αρκετοί πολλά υποσχόμενοι τομείς χρήζουν περαιτέρω έρευνας:

- Ψηφιοποίηση των ΜΥΣΠΗΕ: Περισσότερες μελέτες θα πρέπει να αξιολογήσουν πώς το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η συντήρηση μέσω τεχνητής νοημοσύνης και η ανάλυση σε πραγματικό χρόνο μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία των ΜΥΣΠΗΕ και να παρατείνουν τη μακροζωία του συστήματος.
- Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας: Μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να διερευνήσουν βέλτιστες διαμορφώσεις για εγκαταστάσεις ΜΥΣΠΗΕ + ηλιακής ενέργειας + μπαταριών σε ποικίλα κλίματα.
- Ανθεκτικότητα στο κλίμα: Η λεπτομερής μοντελοποίηση της μεταβλητότητας της ροής υπό μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες θα είναι κρίσιμη για τον μελλοντικό σχεδιασμό ΜΥΣΠΗΕ.
- Καινοτομία Πολιτικής: Η έρευνα σε μοντέλα χρηματοδότησης, μηχανισμούς κινήτρων και κανονιστικά πλαίσια μπορεί να βοηθήσει στην απελευθέρωση του δυναμικού των ΜΥΣΠΗΕ σε υποαξιοποιημένες περιοχές.
- Τεχνικές Περιβαλλοντικού Μετριάσμου: Οι έρευνες για φιλικούς προς τα ψάρια στροβίλους, διαχείριση ιζημάτων και σχέδια χαμηλού αντίκτυπου είναι απαραίτητες για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Συμπερασματικά, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί προσφέρουν περισσότερα από απλά κιλοβάτ — αποτελούν ακρογωνιαίους λίθους στην οικοδόμηση ανθεκτικών, χαμηλών εκπομπών άνθρακα και κοινοτικά τροφοδοτούμενων ενεργειακών μελλοντικών σχεδίων. Η επιτυχής ανάπτυξή τους θα απαιτήσει διεπιστημονική συνεργασία, καινοτόμο μηχανική και υποστηρικτικά οικοσυστήματα πολιτικής.

Βιβλιογραφία

- [1] ESHA (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. European Small Hydropower Association.
- [2] Karki, R. et al. (2019). Remote Monitoring and Load Balancing in Isolated Micro-Hydro Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(2), 877–884.
- [3] Shah, R. & Singh, A. (2018). Automated control of micro-hydro plants using PLCs. *International Journal of Automation and Control*, 12(3), 299–315.
- [4] Mahir, N., & Idris, M. (2016). SCADA architectures in renewable energy systems. *IEEE Conference on Smart Grid Applications*.
- [5] World Bank (2020). *Integrating Small Hydro into Distributed Energy Systems: Technical Guidelines*.

- [6] Practical Action (2021). *Remote Monitoring of Micro Hydro in South Asia Using IoT*. Field Technical Brief.
- [7] Delgado-Currín, R. R., Calderón-Muñoz, W. R., Elicer-Cortes, J. C., & Hunter, R. (2023). *Experimental Study and Analysis of the Efficiency of a Micro Hydroelectric Power Plant for Different Cases of Variation of Electrical Power Consumption*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4523767>
- [8] Węgiel, T., Borkowski, D., & Liszka, D. (2016). *Efficiency analysis of an energy conversion system for a variable speed small hydropower plant*. 10, 00100. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20161000100>
- [9] Rubes, O., & Cervinka, D. (2017). Efficiency optimization of small hydro power plant in low power operation. *International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977518>
- [10] <https://worldofporr.com/en/172-2018/hydroelectric-power-plant-in-kremsbruecke/>
- [11] Kushwaha, R., Shiwakoti, G., Adhikari, N., Budathok, R., & Gupta, S. K. (2020). A Case Study of Sundarijal Micro Hydropower, Kathmandu, Nepal. *Journal of Water Resource Research and Development*, 3(1).
- [12] <https://www.diesलगeneratortech.com/generators/what-is-synchronous-generator.html>
- [13] <https://comercialmendez.es/en/blog/news/the-differences-between-asynchronous-generators-and-synchronous-generators-commercial-mendez>
- [14] Mishra, S., Gagrai, S. K., & Singh, M. (2019). An ANN Based Simulation and Control of Grid Integrated DFIG for 2 MW Small Hydro Power Plant. *International Conference on Signal Processing*. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2019.8711707>
- [15] Magureanu, R., Albu, M., Bostan, V., Dumitrescu, A.-M., Dimu, G., Popa, F., & Rotaru, M. (2008). Smart AC grid integrating dispersed small hydropower sources. *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 345–350. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2008.4602431>
- [16] Amzel, A. (2022). *Design of a smart microgrid with small-scale hydro generation: a practical case study*. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20220577>
- [17] Asghar, A., Kamal, M. M., & Ashraf, I. (2024). *Modeling and Performance Evaluation of a Microgrid Coupled to a Sustainable Hydrogen Energy Storage* (pp. 297–304). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6616-5_33
- [18] Yaïci, W., Entchev, E., Annuk, A., & Longo, M. (2023). *Optimal Design and Cost Analysis of Microgrid Hybrid Renewable Energy Systems with Hydrogen Production and Storage and Battery*. <https://doi.org/10.1109/eeeic/icpseurope57605.2023.10194861>
- [19] Alharthi, Y. Z. (2024). An Analysis of Hybrid Renewable Energy-Based Hydrogen Production and Power Supply for Off-Grid Systems. *Processes*, 12(6), 1201. <https://doi.org/10.3390/pr12061201>
- [20] Asghar, A., Kamal, M. M., & Ashraf, I. (2024). *Modeling and Performance Evaluation of a Microgrid Coupled to a Sustainable Hydrogen Energy Storage* (pp. 297–304). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6616-5_33

- [21] Wang, Y., Guo, S., Wu, H., Qi, Y., Liu, B., Wei, Z., Yang, S., Huang, W., & Xiang, W. (2019). *Off-grid AC and DC hybrid micro grid system and control method thereof*.
- [22] <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report-2023>
- [23] <https://www.fortunebusinessinsights.com/process-simulation-and-optimization-market-104937>
- [24] <https://www.get-invest.eu/market-information/cameroon/energy-sector/renewable-energy/>
- [25] <https://www.get-invest.eu/market-information/uganda/energy-sector/renewable-energy/>
- [26] <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
- [27] Catarino, I., Romão, I., & Estanqueiro, A. (2025). Hybrid Variable Renewable Power Plants: A Case Study of ROR Hydro Arbitrage. *Energies*, 18(3), 585. <https://doi.org/10.3390/en18030585>