



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Διερεύνηση ρυθμιστικής λειτουργίας Μικρού
Υδροηλεκτρικού Έργου με δεξαμενή
αποθήκευσης»*

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Κορίνα Κωνσταντίνα Δρακάκη,
Διπλωματούχα Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ (2021)

Επιβλέπων

Γεώργιος Ι. Τσεκούρας,
Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής,
Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών
Μηχανικών

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

*Στον αγαπημένο μου θείο, Μανώλη Σακκαδάκη
που το χωράφι δεν είναι ίδιο χωρίς αυτόν*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευρετήριο Εικόνων	3
Ευρετήριο Πινάκων	5
Πρόλογος	6
Περίληψη	7
1 Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στον ρόλο της αποθήκευσης	1
1.1 Ευρωπαϊκοί Στόχοι-REPowerEU	1
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά συμβατικών και μη πηγών ενέργειας	5
1.3 Κατηγορίες πηγών ενέργειας	6
1.4 Ετήσιες καταγραφές παραγωγής ενέργειας	8
1.5 Μοντέλα πρόγνωσης παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ	12
2 Σημασία έργων αποθήκευσης ενέργειας σε συμβατικές μονάδες παραγωγής	14
2.1 Σημασία έργων αποθήκευσης ενέργειας σε κλασικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	14
2.2 Καμπύλη ζήτησης και η επίδραση της αποθήκευσης	14
3 Οι επικρατέστερες μορφές αποθήκευσης και τα χαρακτηριστικά τους	17
3.1 Εισαγωγή στα μέσα αποθήκευσης	17
3.2 Κατηγορίες διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα αξιοποίησης της αποθηκευμένης ισχύος	17
3.3 Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας	18
3.4 Απώλειες που συνοδεύουν ένα σύστημα αποθήκευσης	21
3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αποθήκευσης	21
4 Υδροηλεκτρική ενέργεια	23
4.1 Ιστορική αναδρομή από τους υδρόμυλους στους υδροστροβίλους	23
4.2 Γενική διάταξη και συνιστώσες συστήματος παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργεια	23
4.3 Διαχωρισμός υδροηλεκτρικών έργων ανά ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά	25

4.4	Περιγραφή των κύριων συνιστωσών ενός ΥΗΕ.....	28
4.5	Ροή ενέργειας.....	30
5	Υδροστροβίλοι, χαρακτηριστικά μεγέθη και καμπύλες απόδοσης	37
5.1	Εισαγωγή στους Υδροστροβίλους.....	37
5.2	Τύποι στροβίλων.....	37
5.3	Επιλογή στροβίλου	39
5.4	Βαθμός απόδοσης στροβίλου	41
5.5	Βέλτιστος εύρος λειτουργίας στροβίλων	44
5.6	Αναλυτική σχέση βαθμού απόδοσης	45
6	Case Study: Προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης σε υφιστάμενο Μικρό Υδροηλεκτρικό Σταθμό	47
6.1	Παρουσίαση υφιστάμενου σταθμού και των συστημάτων του	47
6.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικρού υδροηλεκτρικού	51
6.3	Ιστορικές καταγραφές υδατικού δυναμικού	53
7	Παρουσίαση έρευνας και αναλυτική περιγραφή αλγόριθμου	56
7.1	Ανάπτυξη ερευνητικού θέματος	56
7.2	Δεδομένα εισόδου.....	56
7.3	Περιγραφή ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας μΥΗΕ με παράλληλη τοποθέτηση και λειτουργία δεξαμενής αποθήκευσης	57
8	Αποτελέσματα	64
8.1	Σενάρια προς εξέταση.....	64
8.2	Περιγραφή σεναρίων, ανάλυση αποτελεσμάτων και οικονομικών	65
8.3	Οικονομοτεχνική ανάλυση και Συμπεράσματα.....	69
9	Συμπεράσματα και μεταγενέστερα βήματα προς ανάπτυξη	74
10	Παράθεση κώδικα σε γλώσσα MATLAB	75
11	Βιβλιογραφία	81

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 1-1 Ποσοστό παραγόμενης ενέργειας μέσω ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος ΕΕ για τα έτη 2020 και 2021	2
Εικ. 1-2 Ποσοστά παραγόμενης ενέργειας μέσω ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος ΕΕ για το έτος 2020	2
Εικ. 1-3 Ποσοστά παραγόμενης ενέργειας μέσω ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος ΕΕ για το έτος 2021	3
Εικ. 1-4 Πρόβλεψη ικανοποίησης στόχου παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ μέχρι το 2030, γραμμικά μεταβαλλόμενη από το 2020	4
Εικ. 1-5 Βασικά επιτεύγματα από το σχέδιο RERowerEU.....	5
Εικ. 1-6 Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας	6
Εικ. 1-7 Κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως ανά πηγή προέλευσης από το 1965 έως το 2022	9
Εικ. 1-8 Μερίδιο κατανάλωσης ΑΠΕ παγκοσμίως από το 1965 έως το 2021.....	10
Εικ. 1-9 Μερίδιο κατανάλωσης ΑΠΕ παγκοσμίως για το 2022	11
Εικ. 1-10 Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως για το έτος 2022	11
Εικ. 1-11 Εξέλιξη τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου για τα νοικοκυριά, από το 2008 έως το 2022	12
Εικ. 2-1 Καμπύλη ζήτησης κατά τη διάρκεια μια ημέρας και κατανομή της σε φορτία βάσης και αιχμής με σενάρια αποθήκευσης και μη των περισσειών ποσοτήτων.	15
Εικ. 3-1 Υβριδικό πάρκο ανεμογεννητριών και αντλησιοταμίευσης.	18
Εικ. 3-2 Υβριδικό σύστημα Αντλησιοταμίευσης Ικαρίας.	19
Εικ. 3-3 Υβριδική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ, Ανεμογεννήτριας, Αντλησιοταμίευσης και βιοαερίου μαζί με λοιπές συνοδευόμενες εγκαταστάσεις (Μετασχηματιστής, γεννήτρια, Στρόβιλος).....	19
Εικ. 3-4 Φωτοβολταϊκό πάρκο με σύστημα μπαταριών.	20
Εικ. 3-5 Gannawarra, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας φωτοβολταϊκού πάρκου (μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης στην Αυστραλία).....	20
Εικ. 3-6 Αναπαράσταση των απωλειών που συνεπάγεται η αποθήκευση της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη καθώς και η επαναφορά της στην αρχική της μορφή.....	21
Εικ. 4-1: Κατάντη μεγάλων φραγμάτων (Storage facility) μΥΗΕ	26
Εικ. 4-2 Επί του ρου του ποταμού (Run-off-river) μΥΗΕ.....	27
Εικ. 4-3 Εντός του ρου (In stream) μΥΗΕ.....	27
Εικ. 4-4 Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστροβίλου δράσεως	32
Εικ. 4-5 Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστροβίλου αντιδράσεως.....	32
Εικ. 4-6 Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστροβίλου αντιδράσεως και διώρυγα απαγωγής.....	33
Εικ. 5-1 Διάφοροι τύποι υδροστροβίλων, από τα αριστερά προς τα δεξιά: Pelton, Francis, Cross-Flow, Turgo, Kaplan.	38
Εικ. 5-2 Διάγραμμα επιλογής τύπου υδροστροβίλου συναρτήσει του ύψους πτώσης H (m) και της παροχής Q (m ³ /s)	40
Εικ. 5-3 Διαγράμματα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων στροβίλων Francis οριζόντιου άξονα, σπειροειδούς κελύφους.....	41
Εικ. 5-4 Τυπικές καμπύλες βαθμού απόδοσης συναρτήσει του λόγου παροχή/ ονομαστική παροχή, για διάφορους τύπους στροβίλου	42
Εικ. 5-5 Παράδειγμα εύρεσης βέλτιστου βαθμού απόδοσης, δεδομένου του καθαρού ύψους πτώσης και της ονομαστικής παροχής.....	43

Εικ. 5-6 Βαθμός απόδοσης στροβίλου αναλυτικής φόρμουλας(διακεκομμένες γραμμές) και από κατασκευαστές (συνεχόμενες γραμμές), συναρτήσει του λόγου παροχής προς ονομαστικής παροχής, για διάφορους τύπους στροβίλου	46
Εικ. 6-1 Κάτοψη μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου συγκριτικά με τον ποταμό Αχελώο	48
Εικ. 6-2 Κάτοψη μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου.....	49
Εικ. 6-3 Θέση υδροληψίας, φράγματος και είσοδος αγωγού μΥΗΕ	50
Εικ. 6-4 Θέση σταθμού παραγωγής μΥΗΕ.....	50
Εικ. 6-5 Καμπύλη ολικού βαθμού απόδοσης και αναλυτική σχέση	53
Εικ. 6-6 Γράφημα παραγωγής ενέργειας μΥΗΕ για τα έτη 2011-2022.....	53
Εικ. 6-7 Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών ποταμού και ωφέλιμων παροχών για τα έτη 2017-2022 (επάνω), Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών ποταμού του μήνα Ιανουαρίου 2018 και εύρη λειτουργίας στροβίλου (κάτω) .	54
Εικ. 6-8 Καμπύλη διάρκειας παροχής	55
Εικ. 7-1 Διάγραμμα χρονοσειρών παροχών Ιανουαρίου έως Απριλίου 2018: (1) ποταμού, (2) στροβίλου σεναρίου ScD , (3) στροβίλου υφιστάμενης εγκατάστασης- χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης, (4) μέγιστης παροχής λειτουργίας στροβίλου, (5) ελάχιστης παροχής λειτουργίας στροβίλου και (6) ονομαστικής παροχής λειτουργίας στροβίλου	61
Εικ. 7-2 Διάγραμμα χρονοσειρών παροχών Ιουνίου 2018: (1) ποταμού, (2) στροβίλου σεναρίου ScD , (3) στροβίλου υφιστάμενης εγκατάστασης- χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης και (4) ελάχιστης παροχής λειτουργίας στροβίλου	62
Εικ. 8-1 Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) για κάθε σενάριο, για περιπτώσεις ευαισθησίας I και II.	71
Εικ. 8-2 Διάγραμμα λόγου οφέλους-κόστους (B/C) για κάθε σενάριο, για περιπτώσεις ευαισθησίας I και II	71
Εικ. 8-3 Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (EBA) για κάθε σενάριο, για περιπτώσεις ευαισθησίας I και II	72

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πιν. 4-1 Κατάταξη ΥΗΕ σύμφωνα με την παραγόμενη ισχύ	25
Πιν. 4-2 Σημεία μετάβασης της γεωμετρίας στα επιμέρους τμήματα ενός ΥΗΕ και οι αντίστοιχες μεταβολές των τιμών του συντελεστή k	35
Πιν. 5-1 Τυπικά εύρη βαθμού απόδοσης για διάφορους τύπους στροβίλων	43
Πιν. 5-2 Τυπικές τιμές των λόγων q_{min}/q_{nom} και q_{max}/q_{nom} για διάφορους τύπους στροβίλων	45
Πιν. 6-1 Γεωγραφικές συντεταγμένες εγκαταστάσεων μΥΗΕ	51
Πιν. 6-2 Βαθμός απόδοσης στροβίλου συναρτήσει της παροχής	52
Πιν. 6-3 Βαθμός απόδοσης γεννήτριας για συντελεστές ισχύος $\cos\phi$ 1 και 0.85	52
Πιν. 6-4 Συνολικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της παροχής	52
Πιν. 8-1 Όγκοι δεξαμενής αποθήκευσης για τα επτά σενάρια που μελετήθηκαν.....	64
Πιν. 8-2 Όγκοι δεξαμενής αποθήκευσης για τα επτά σενάρια που μελετήθηκαν.....	65
Πιν. 8-3 Χαρακτηριστικά δεξαμενών αποθήκευσης ανά σενάριο	65
Πιν. 8-4 Αποτελέσματα παραχθείσας ενέργειας ανά σενάριο και σύγκριση με την υφιστάμενη.....	67
Πιν. 8-5 Μοναδιαία κόστη κατασκευαστικών μεγεθών δεξαμενών	67
Πιν. 8-6 Υπολογισμοί κατασκευαστικών μεγεθών δεξαμενών ανά σενάριο	68
Πιν. 8-7 Κόστη εγκατάστασης δεξαμενών ανά σενάριο	68
Πιν. 8-8 Οικονομικοί δείκτες ανά σενάριο, περίπτωση ευαισθησίας I	70
Πιν. 8-9 Οικονομικοί δείκτες ανά σενάριο, περίπτωση ευαισθησίας II	70

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

*«Δεν υπάρχουν ιδέες,
υπάρχουν μονάχα άνθρωποι που κουβαλούν τις ιδέες,
κι αυτές παίρνουν το μπόι του ανθρώπου που τις κουβαλάει.»*

Νίκος Καζαντζάκης

Με την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησα σε ένα ακόμα ακαδημαϊκό μου ταξίδι. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με στήριξε και σε αυτόν μου τον αγώνα, σε όλη τη διάρκειά του, δίνοντάς μου κουράγιο και δύναμη. Χωρίς τη βοήθειά τους, σε αυτά τα πρώτα μου βήματα, δεν θα είχα καταφέρει να φτάσω μέχρι εδώ.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την ψυχή μου τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Τσεκούρα Γεώργιο, που με την καθοδήγηση, το αμέτρητο ενδιαφέρον και κουράγιο του κατάφερα να αναπτύξω ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, να προχωρήσω ένα βήμα παρακάτω τις γνώσεις μου και να καταρτιστώ ακόμα παραπάνω γύρω από το ερευνητικό μου αντικείμενο.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τη χαρά μου, που ακόμα και σε αυτό το κεφάλαιο των σπουδών μου είχα δίπλα μου τον Καθηγητή και Επιβλέποντα της προπτυχιακής μου εργασίας, κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, από τον οποίο και πήρα το χρίσμα των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων.

Χωρίς αυτούς τους δύο Καθηγητές δίπλα μου, κατευθύνοντας και παρακινώντας με να πετύχω τους ακαδημαϊκούς μου στόχους, οι σπουδές μου δεν θα ήταν το ίδιο, ούτε οι στιγμές χαράς και περηφάνειας.

Σε κάθε μου νέο βήμα θα θυμάμαι τους πρώτους καθηγητές που πίστεψαν στις ικανότητές μου και θέλησαν να πάμε την έρευνα ένα μικρό βήμα παραπέρα, μαζί.

Σας ευχαριστώ θερμά για τη στήριξη, το ενδιαφέρον και τον χρόνο που μου αφιερώσατε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Δημήτρη Ε. Παπαντώνη, για τα στοιχεία που με μεγάλη προθυμία μου παρέθεσε, καθώς και για το συγγραφικό του έργο που και στις δυο μου διπλωματικές το είχα σαν οδηγό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ελληνική Περίληψη

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία με τίτλο «Διερεύνηση ρυθμιστικής λειτουργίας Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου με δεξαμενή αποθήκευσης» μελετήθηκε η βελτίωση της απόδοσης υφιστάμενης εγκατάστασης *Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου (ΜΥΗΕ)* υπό την προσθήκη *δεξαμενής αποθήκευσης*.

Το παραπάνω ερευνητικό αντικείμενο, εμφανίζει αρκετό ενδιαφέρον, καθώς τα ΜΥΗΕ είναι έργα που λειτουργούν εκμεταλλευόμενα τη διερχόμενη παροχή του ποταμού, με αποτέλεσμα η παραγωγή ενέργειας να είναι μη ελεγχόμενη. Η μόνη δεξαμενή στην οποία το νερό συγκεντρώνεται παροδικά πριν να διέλθει από τους στροβίλους είναι η δεξαμενή φόρτισης, με σκοπό τη λειτουργία του αγωγού προσαγωγής υπό πίεση. Πρόκειται δηλαδή για μια “δεξαμενή αποθήκευσης” του αναγκαίου όγκου νερού για την αντιμετώπιση των μεταβατικών φαινομένων, χωρίς να συνεπάγεται ότι συμβάλλει στην ελεγχόμενη ταμίευση και διέλευση της παροχής από του στροβίλους.

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω λειτουργίας τους, οι παροχές οι οποίες είναι μικρότερες από το q_{min} , χάνονται αναξιοποίητες, καθώς για αυτές τις τιμές οι στρόβιλοι δεν μπορούν να παράγουν ενέργεια. Το ίδιο συμβαίνει και για τις παροχές που είναι μεγαλύτερες του q_{max} , όπου η διαφορά ($q_t - q_{max}$) δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και να προσφέρει παραπάνω ισχύ. Στην περίπτωση που σε ένα ΜΥΗΕ προστεθεί μια δεξαμενή αποθήκευσης ημερήσιας ρύθμισης, θα μπορούν να αποθηκεύονται οι παραπάνω ποσότητες που υπό άλλες συνθήκες θα χανόντουσαν. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να ελέγχεται η παροχή που περνάει στους στροβίλους με σκοπό την εξασφάλιση της ονομαστικής παροχής κατά το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα.

Έχοντας ως γνώμονα το παραπάνω ερευνητικό αντικείμενο, αξιοποιώντας τα ιστορικά δεδομένα ημερήσιων παροχών υφιστάμενου run-off-river ΜΥΗΕ, επί του ποταμού Πλατανιά (παραπόταμου του Αχελώου), διαμορφώθηκαν συνολικά 11 σενάρια διαφορετικών όγκων δεξαμενών αποθήκευσης, καθένα από τα οποία εκφράστηκε ως ποσοστό του μέσου ημερήσιου όγκου που διέρχεται από τις εγκαταστάσεις του ΜΥΗΕ. Σε κάθε σενάριο, έγινε εφαρμογή του *ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας* του ΜΥΗΕ με αποθήκευση, ο οποίος διαμορφώθηκε σε περιβάλλον γλώσσας MATLAB, με σκοπό τον υπολογισμό της νέας αυξημένης παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος εστίαζε στα εύρη διερχόμενων παροχών που υπό την υφιστάμενη λειτουργία του ΜΥΗΕ χάνονται αναξιοποίητα. Δηλαδή για παροχές εκτός του εύρους λειτουργίας του στροβίλου. Ο ρυθμιστικός κανόνας λειτουργίας εκτός από τη βέλτιστη αξιοποίηση της *δεξαμενής αποθήκευσης*, έλαβε υπόψη του και τους ελάχιστους χρόνους λειτουργίας και μη λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, προσομοιώνοντας όσο το δυνατό ρεαλιστικότερα την αναβαθμισμένη λειτουργία του.

Έπειτα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σενάριο, ακολούθησε ο προσδιορισμός των τεχνοοικονομικών τους απαιτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, κάθε σενάριο εξετάστηκε ως μια πιθανή επένδυση, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κατασκευής τους και το πλεόνασμα σε όφελος από την παραγωγή ενέργειας με ταυτόχρονη αποθήκευση.

Σκοπός ήταν να βρεθεί η οικονομικά και ενεργειακά βέλτιστη λύση, ανάμεσα στα εξεταζόμενα σενάρια, δηλαδή η λύση που με το χαμηλότερο δυνατό κόστος δίνει τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, άρα και

κέρδος. Βασικοί δείκτες που αξιοποιήθηκαν για το χαρακτηρισμό της πιο βιώσιμης επένδυσης, ήταν η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ).

Αγγλική Περίληψη

In this Master's Thesis, with title "Investigation of the regulative operation of a Small Hydropower Plant with storage tank", the improvement of the performance of an existing *Small Hydropower Plant (SHPP)* under the addition of a *storage tank* was studied.

The above research subject is of great interest as SHPs are plants that operate by exploiting the passing flow of the river, resulting to uncontrolled energy production. The only tank in which water is being collected temporally, before passing through the turbines, is the forebay tank, which purpose is to ensure under pressure conditions of the penstock's operation. In other words, it is a "storage tank" that deals with transitional phenomena, without implying that it contributes to the controlled storage and passage of the supply discharge, through the turbines.

As a result of operation rule of SHPPs, when the incoming flows of the river is less than the minimum, q_{min} , discharge that the turbines can operate, that amount goes unexploited, as for these values the turbines cannot produce energy. The same applies to incoming flows that are greater than the maximum discharge, q_{max} , that the turbines can produce, where the difference ($q_t - q_{max}$) cannot offer more power. On the contrary, if a storage tank with daily regulation, is added to the existing SHPP, the above ranges of incoming flows, that would otherwise be lost, can be stored and be exploited later. In this way, the flow passing through the turbines can be controlled in order to ensure the nominal flow rate for the longest possible time.

Taking into account the above research proposal, by processing the historical daily flow data of the existing run-off-river Argiri Hydropower Plant, on the Plataniotias River (tributary of the Acheloos), a total of 11 scenarios of different volumes of storage tanks were formulated, each of which was expressed as a percentage of the average daily volume passing through the facilities of the Hydropower Plant. In each scenario, the regulatory rule for the operation of the SHPP *with storage*, was developed in a MATLAB language environment and applied, in order to calculate the new increased energy production. Specifically, the algorithm focused on the ranges of incoming flows that under the current operation of the SHPP are lost unused. That is, for inflows outside the operating range of the turbine. The regulatory rule of operation, in addition to the optimal utilization of the storage tank, also took into account the minimum operating times and non-operation times of the electromechanical equipment, in order for the new optimized operation to be simulating as realistically as possible.

Then, according to the results obtained for each scenario, their techno-economic requirements were calculated. More specifically, each scenario was considered as a possible investment, taking into account their construction costs and the surplus in benefit from energy production due to the addition of storage. The aim was to find the economically and energy-optimal solution, among the examined scenarios, i.e., the solution that at the lowest possible cost gives the largest energy production and therefore profit. Key Performance Indicators which were used to characterize *the most sustainable investment* are the *Net Present Value (NPV)* and *Internal Rate of Return (IRR)*.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΡΟΛΟ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

1.1 ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ-REPOWEREU

Τα τελευταία χρόνια σημαντικές συζητήσεις και ριζικές αλλαγές έχουν γίνει γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έχει σημειωθεί εκτεταμένη ανάπτυξη των εγκαταστάσεων εφαρμογής τους και αξιοποίησής τους, από τα Κράτη Μέλη, ιδίως μετά από την εφαρμογή της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Η παραπάνω Οδηγία αποτέλεσε νομοθετική πράξη μέσω της οποίας ορίστηκε ένα κοινό πλαίσιο προώθησης της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με σκοπό την ικανοποίηση των τριών παρακάτω στόχων, έως το 2020:

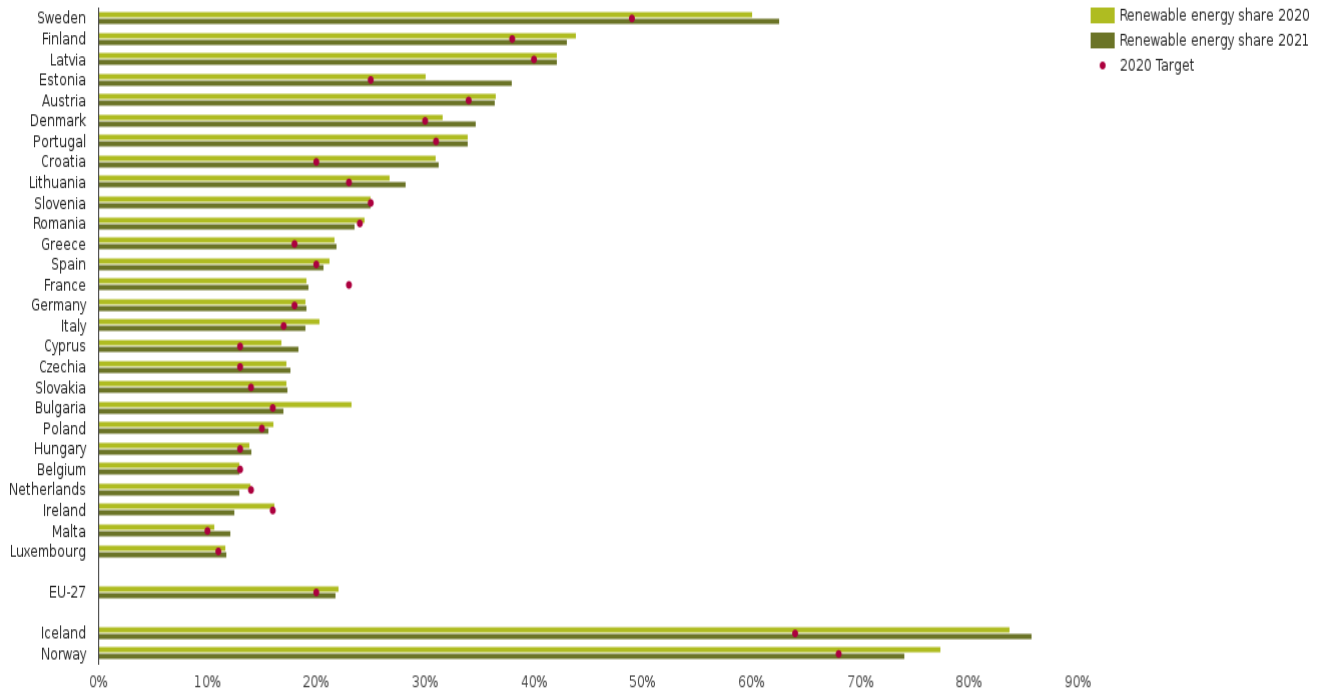
- α. 20% μείωση των ρύπων του θερμοκηπίου της ΕΕ
- β. 20% αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της ΕΕ
- γ. 20% παραγόμενης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ΑΠΕ

Οι παραπάνω στόχοι κατάφεραν όχι μόνο να επιτευχθούν από την ΕΕ, αλλά και να ξεπεραστούν, μέχρι το 2020, καθώς το ποσοστό της ενέργειας που παράχθηκε από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) το 2020 έφτασε το 22,1%, υπερβαίνοντας κατά 2%, το ποσοστό στόχου της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ.¹

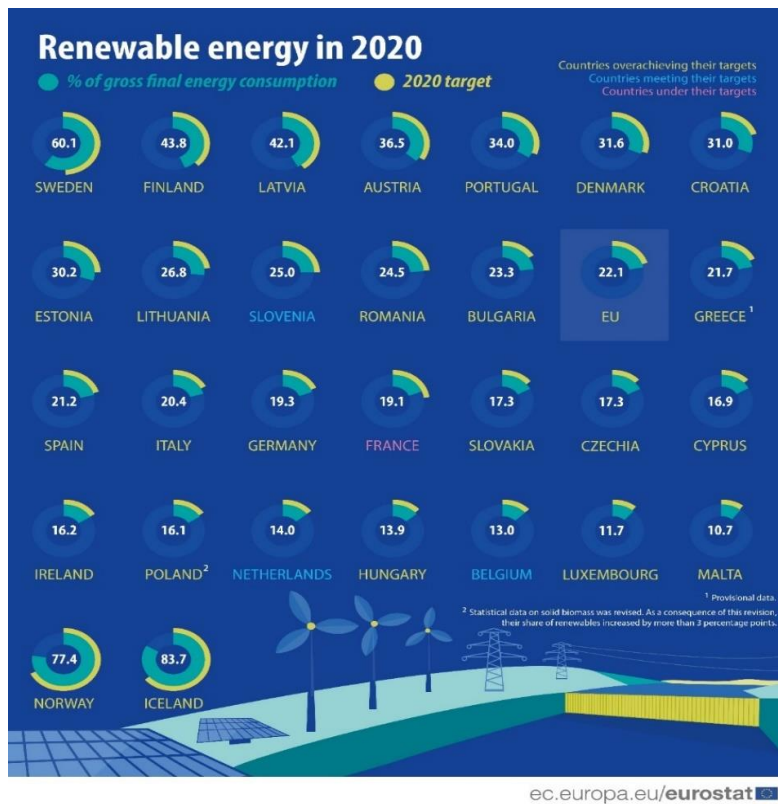
Το 2021 σημειώθηκε μικρή πτώση του ποσοστού εκμετάλλευσης ΑΠΕ με συμμετοχή 21,8%, η οποία αποδίδεται στη λήξη της καραντίνας λόγω του Covid-19 και την επαναφορά των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άρα και της ζήτησης ενέργειας, σε φυσιολογικούς ρυθμούς, συγκριτικά με τις χαμηλές καταναλώσεις του 2020.

Παρακάτω στις εικόνες, **Εικ. 1-1** και **Εικ. 1-2**, παρουσιάζονται αναλυτικά, για κάθε χώρα, Κράτος Μέλος, της ΕΕ το ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ συγκριτικά με το στόχο για το 2020, καθώς και για το 2021.¹

¹ Πηγή : <https://www.eea.europa.eu/ims/share-of-energy-consumption-from>



Εικ. 1-1 Ποσοστό παραγόμενης ενέργειας μέσω ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος ΕΕ για τα έτη 2020 και 2021



Εικ. 1-2 Ποσοστά παραγόμενης ενέργειας μέσω ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος ΕΕ για το έτος 2020

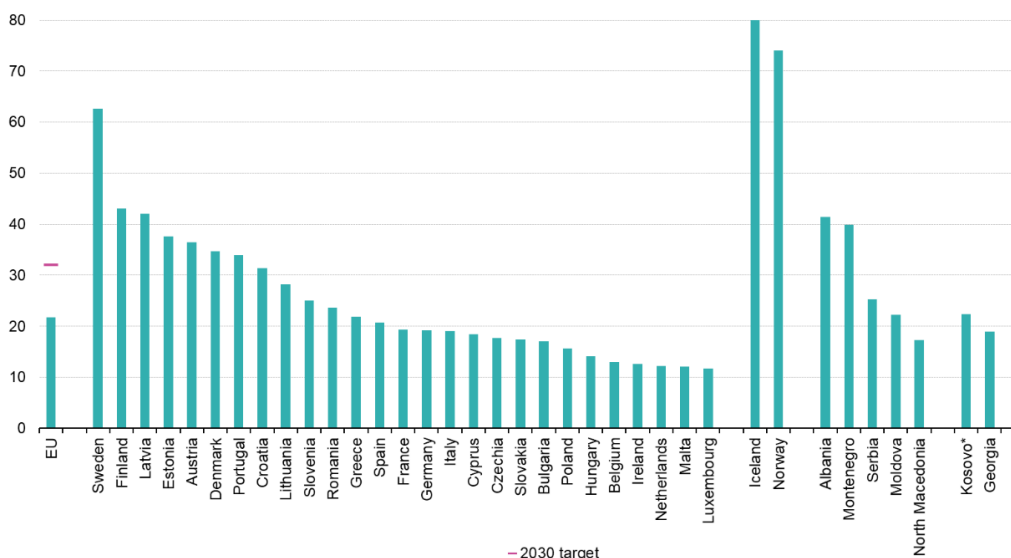
Συνέχεια των παραπάνω στόχων που έθεσε η Ευρωπαϊκή Ένωση για το 2020 και κατάφερε να φέρει εις πέρας, αποτελεί η Πράσινη Ευρωπαϊκή Συμφωνία (European Green Deal's) με ονομασία «Fit for 55» η οποία προτάθηκε τον Ιούλιο του 2021 και αποσκοπεί σε μια ουδέτερη κλιματική Ευρώπη έως το 2050 και συγκεκριμένα²:

- Μηδενικές εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου έως το 2050
- Οικονομική ανάπτυξη, με τη λιγότερη δυνατή χρήση πόρων (αποϋλοποίηση- *dematerialization*)
- Καθολική εφαρμογή των στόχων

Προκειμένου να γίνουν εφικτοί οι παραπάνω στόχοι, η ΕΕ έχει θέσει σαν ενδιάμεσο στόχο την μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου (CO₂) κατά 55% μέχρι το 2030³.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται σε μορφή γραφήματος, η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος για το 2021 συγκριτικά με τον στόχο για το 2030 (Εικ. 1-3) καθώς και από το 2005 έως το 2030 για την ΕΕ συνολικά (Εικ. 1-4).

Share of energy from renewable sources, 2021
(% of gross final energy consumption)

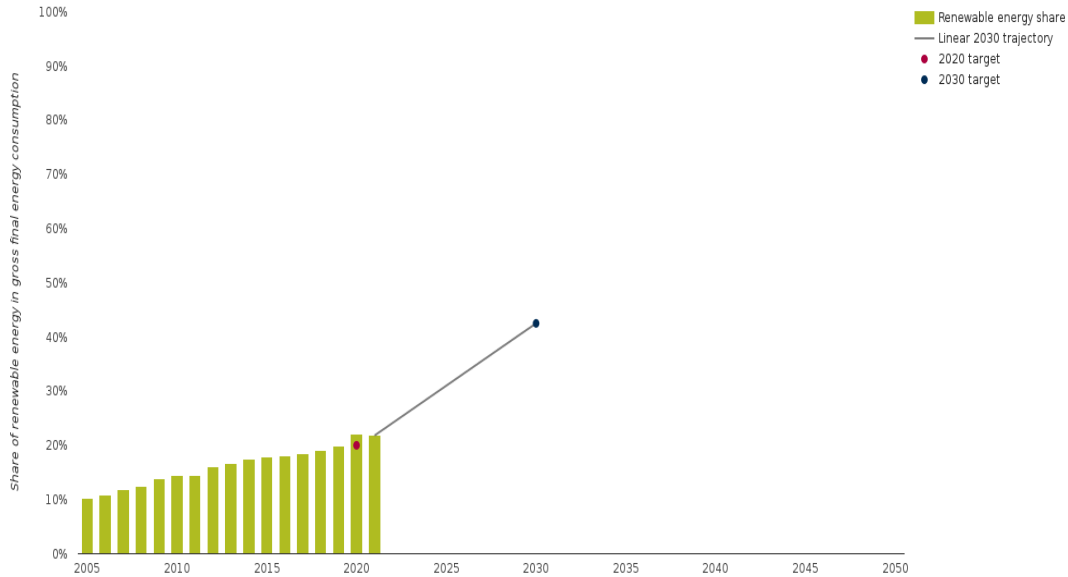


Εικ. 1-3 Ποσοστά παραγόμενης ενέργειας μέσω ΑΠΕ ανά Κράτος Μέλος ΕΕ για το έτος 2021⁴

² Πηγή: https://competition-policy.ec.europa.eu/sectors/energy-environment/european-green-deal_en

³ Πηγή: https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180208STO97442/cutting-eu-greenhouse-gas-emissions-national-targets-for-2030?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=greenhouse%20emissions&at_topic=Greenhouse&at_location=GR&gclid=Cj0KCQjwkqSIhDaARIsAFJANkgf2Q63Wdsi3rhjzkVqRTdS8I0bG09MYOzPYyFpkyp7cNEERMTI7z0aAv0wEALw_wcB

⁴ Πηγή: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics



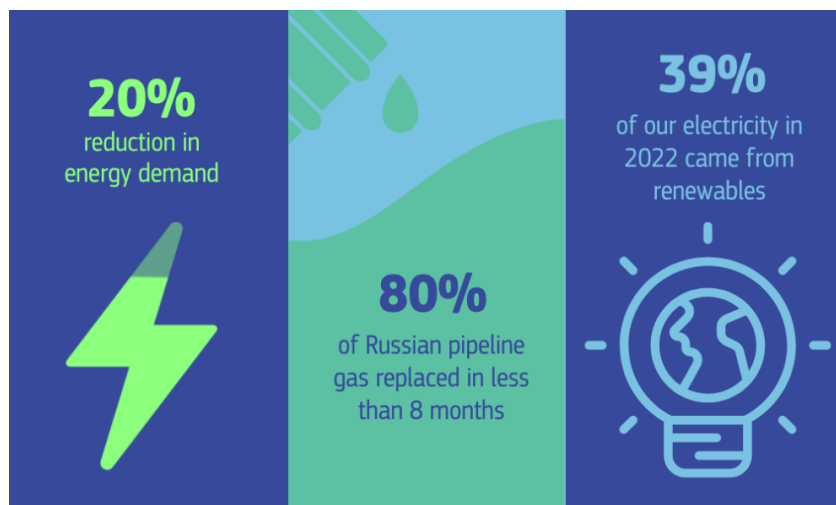
Εικ. 1-4 Πρόβλεψη ικανοποίησης στόχου παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ μέχρι το 2030, γραμμικά μεταβαλλόμενη από το 2020

Επιπλέον, ακόμη μια κομβική στιγμή για το ενεργειακό μέλλον της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των συνεπειών της ενεργειακής της εξάρτησης από μη Κράτη Μέλη, υπήρξε η πολεμική επίθεση της Ρωσίας προς την Ουκρανία (Φλεβάρης του 2022). Με την εισβολή των ρωσικών στρατευμάτων στην Ουκρανία διακόπηκε η εισαγωγή Φυσικού Αερίου από τη Ρωσία προς την κεντρική Ευρώπη (Nord Stream). Το παραπάνω επέφερε σημαντική αύξηση των τιμών τόσο του Φυσικού αερίου, όσο και του πετρελαίου, ως επακόλουθο, στην Ευρωπαϊκή αγορά. Ως απάντηση της παραπάνω ενεργειακής κρίσης, στις 18 Μαΐου 2022, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πήρε θέση με την πρόταση μιας νέας Πολιτικής για την ανεξαρτητοποίηση της ΕΕ από τα ρωσικά κοιτάσματα.

Πρόκειται για το Σχέδιο REPowerEU, το οποίο αποτελεί ένα νέο πακέτο νομοθεσίας και λεπτομερείς υποδείξεις στα Κράτη Μέλη, με σκοπό την επιτάχυνση της αδειοδότησης των ΑΠΕ, ώστε να επέλθει ταχύτερα η απεξάρτηση τόσο από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όσο και από τους ρωσικούς υδρογονάνθρακες. Με το REPowerEU, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποκτούν χαρακτήρα υπέρτατου δημόσιου συμφέροντος (*‘overriding public interest’*) που υπηρετούν τη δημόσια υγεία και ασφάλεια. Στο κείμενο της Επιτροπής αναφέρεται ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η στάθμιση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με άλλα συμφέροντα, όπως η προστασία της βιοποικιλότητας και των νερών, και επομένως η εγκατάστασή τους θα μπορεί, κατά περίπτωση, να λαμβάνει προτεραιότητα. Ο παραπάνω ρόλος των ΑΠΕ, σύμφωνα με τα όσα ορίζονται στο Σχέδιο REPowerEU έχει ισχύ έως ότου η ΕΕ φτάσει σε κλιματική ουδετερότητα.

Όπως παρουσιάζονται και στην παρακάτω εικόνα, **Εικ. 1-5**, τα κυριότερα επιτεύγματα που κατάφεραν να επέλθουν μέσω της εφαρμογής του σχεδίου REPowerEU είναι:

- Η μείωση της εξάρτησης της ΕΕ από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα.
- Εξοικονόμηση περίπου 20 % της ενέργειας που καταναλώνει η ΕΕ.
- Επιβολή ανώτατου ορίου τιμών για το αέριο και παγκόσμιου ανώτατου ορίου τιμών για το πετρέλαιο.
- Διπλασιασμός της επιπλέον ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας



Εικ. 1-5 Βασικά επιτεύγματα από το σχέδιο RERowerEU⁵

Γίνεται αντιληπτό, πόσο σημαντική είναι η τεχνολογία των ΑΠΕ καθώς και η συμβολή τους στην αυτονομία Κράτους Μέλους. Η εξέλιξη του επιστημονικού υπόβαθρου αυτών των τεχνολογιών αποτελεί ωστόσο σημαντική πρόκληση, καθώς πρόκειται για στροφή της ανθρωπότητας σε νέες μεθόδους παραγωγής ενέργειας, νέων πόρων προς εκμετάλλευση (νερό , αέρας, ήλιος κτλ.) αφήνοντας πίσω τις συμβατικές μορφές ενέργειας ως πηγές εφεδρείας.

1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ήδη από την 4^η χιλιετία π.Χ. είχαν ξεκινήσει να αξιοποιούνται από τους Αιγύπτιους για σκοπούς ναυσιπλοΐας (αιολική ενέργεια). Ευρέως διαδεδομένη υπήρξε και η χρήση ανεμόμυλων και νερόμυλων για την επεξεργασία σιτηρών. Γίνεται εμφανές ότι χωρίς την παροχή των πρωτογενών πηγών ενέργειας από το ίδιο το περιβάλλον ο άνθρωπος δεν θα μπορούσε να αναπτυχθεί, να δημιουργήσει και να σταματήσει να εξαρτάται μόνο από τη μυϊκή και ζωική δύναμη. Συνεπώς μπορεί η ραγδαία ανάπτυξη και εφαρμογή των ΑΠΕ να είναι μια νέα πρόκληση για τον σύγχρονο άνθρωπο, ωστόσο από πολύ παλιά είχε καταφέρει να τις κατανοήσει και να τις εκμεταλλευτεί.

Η νοημοσύνη του ανθρώπου σε συνδυασμό με το φυσικό πλούτο από τον οποίο απαρτίζεται η Γη, τόσο σε ορυκτά καύσιμα, όσο και σε ανανεώσιμες πηγές, κατάφεραν να τον οδηγήσουν στις πρώτες του εφευρέσεις (ανακάλυψη της φωτιάς-βιομάζα, ναυσιπλοΐα, υδρόμυλοι, νερόμυλοι) μέχρι το σήμερα, αλλά και το κοντινό μέλλον (φωτοβολταϊκά πάρκα, αιολικά πάρκο, έργα αντλησιοταμίευσης, χρήση μπαταριών, χρήση υδρογόνου ως πηγή καυσίμου).

Ωστόσο, αν και ήδη από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος είχε έρθει σε επαφή και είχε αναπτύξει σε ένα βαθμό έργα βασισμένα σε ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, οι απαιτήσεις και οι ανάγκες ζήτησης που καλούνται να καλυφθούν σήμερα σε ενέργεια, είναι σαφώς ασύγκριτα μεγαλύτερες.

⁵ Πηγή: [deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_el](https://ec.europa.eu/energy/en/deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_el)

1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι πρώτες ύλες από τις οποίες μπορεί να αντληθεί ενέργεια χωρίζονται σε δυο διακριτές ομάδες, τα ορυκτά καύσιμα και τις ανανεώσιμες πηγές. Τα ορυκτά καύσιμα συναντώνται στη φύση σε στερεή, υγρή, αέρια και πυρηνική μορφή. Μέχρι σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα ή αλλιώς οι συμβατικές μορφές ενέργειας που έχουν αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο είναι οι ακόλουθες:

(α) Άνθρακας, (β) Πετρέλαιο, (γ) Φυσικό αέριο, (δ) Ουράνιο

Από την άλλη, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας αποτελούν υποκατηγορίες των τεσσάρων στοιχείων της φύσης (ήλιος, άνεμος, νερό, γη) και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (**Εικ. 1-6**):

**(α) Ηλιακή, (β) Αιολική, (γ) Υδραυλική, (δ) Βιομάζα, (ε) Γεωθερμική,
(στ) Θαλάσσια**



Εικ. 1-6 Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας⁶

Κύρια διαφορά μεταξύ συμβατικών και μη συμβατικών μορφών ενέργειας αποτελεί ότι στις πρώτες κατά την παραγωγή έργου, η ύλη χάνει την αρχική της υπόσταση και μετατρέπεται σε παραπροϊόντα, τα οποία πρέπει να επεξεργασθούν, ώστε να διατεθούν με ασφάλεια στον περιβάλλον. Επιπρόσθετα, οι συμβατικές πηγές ενέργειας προέρχονται από ορυκτά των οποίων η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη.

⁶ Πηγή: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>

Έχοντας στηριχθεί κυρίως σε συμβατικές μορφές ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τόσα χρόνια, πλέον γεννάται η ανάγκη για αντικατάστασή τους, όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα, από ανανεώσιμες πηγές.

Αξίζει να σημειωθεί πως, τα έργα που συνοδεύουν τις ΑΠΕ ενδέχεται κατά την εφαρμογή τους να αποτελέσουν σημαντική παρέμβαση επί του φυσικού τοπίου και των ζώντων οργανισμών που φιλοξενούνται σε αυτόν. Ο άνθρωπος οφείλει να μελετήσει τις νέες πηγές σε βάθος και να ερευνήσει τις επιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν κατά την αξιοποίηση και εφαρμογή τους.

Για παράδειγμα, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό των αγροτικών τεμαχίων και των γόνιμων εκτάσεων. Ωστόσο μέσω της διεξαγωγής κατάλληλης έρευνας έχει προκύψει ότι η λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάρκων και των καλλιεργήσιμων εκτάσεων μπορεί να συνυπάρξουν, περιορίζοντας έτσι το ποσοστό των μη διαθέσιμων εκτάσεων⁷.

Επιπλέον, επέκταση των αιολικών πάρκων κοντά ή και εντός προστατευόμενων περιοχών Natura 2000 μπορεί να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμα αποτελέσματα όσον αφορά τα οικοσυστήματα και τους βιότοπους που χρήζουν προστασία και διαφύλαξη. Για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητο να έχουν εξαρχής πραγματοποιηθεί κατάλληλες Ειδικές Περιβαλλοντικές Μελέτες (ΕΠΜ) ή εμπειρισταωμένες μελέτες επιπτώσεων και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων. Συγκεκριμένα για τη χώρα μας, έχει επέλθει ανάγκη δημιουργίας νέου χωροταξικού πλαισίου για τις ΑΠΕ, έπειτα από τις προειδοποιήσεις της Κομισιόν για συμμόρφωση της χώρας με τον κανονισμό για τις περιοχές NATURA σύμφωνα με την Οδηγία 92/43/EEC⁸.

Τέλος ακόμα και στα υδροηλεκτρικά έργα μικρής κλίμακας χωρίς τη συνοδεία ταμιευτήρα, εάν δεν ληφθούν μέτρα για την εξασφάλιση ασφαλούς διέλευσης των ψαριών από τη θέση υδροληψίας, το οικοσύστημα που έχει αναπτυχθεί στην περιοχή της εγκατάστασης απειλείται. Για αυτό τον λόγο έργα, όπως οι ιχθυόσκαλες, συνοδεύουν την εγκατάσταση του σταθμού, με σκοπό την προστασία του βιότοπου που φιλοξενείται.

Μέσω των παραπάνω παραδειγμάτων γίνεται εμφανές ότι κάθε τεχνολογία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, τόσο για την ανθρωπότητα όσο και για τη βιοποικιλότητα, νέες τροποποιήσεις και μεθοδολογίες πρέπει να εφαρμόζονται.

Παραγωγή ενέργειας μπορεί να προκύψει εξίσου και από τις μη ανανεώσιμες και από τις ανανεώσιμες πηγές, μέσω των κατάλληλων μέσων εκμετάλλευσης και μετατροπής της πρωτογενούς ύλης σε αξιοποιήσιμη μορφή.

Ωστόσο η πρώτη ύλη των ΑΠΕ για παραγωγή είναι αέναη, εν αντιθέσει με την περιορισμένη φύση των ορυκτών πόρων. Η άμεση εξάρτησή τους, όμως των ΑΠΕ, από το κλίμα και τα καιρικά φαινόμενα αυξάνει την αβεβαιότητα ως προς το παραγόμενο ποσό ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, περιορίζεται η μέγιστη εφικτή απόδοση που μπορεί να έχει μια εγκατάσταση που καλύπτει τις ανάγκες της μόνο με ΑΠΕ. Προκειμένου να υπάρξει βέλτιστη διαχείριση του ενεργειακού δυναμικού ΑΠΕ (π.χ. αιολικού, ηλιακού και υδροδυναμικού), η αποθήκευση θα πρέπει να λάβει κύριο ρόλο σε συνδυασμό με ένα ποικίλο μείγμα πηγών ενέργειας.

⁷ Πηγή: *Multidimensional Role of Agrovoltatics in Era of EU Green Deal: Current Status and Analysis of Water–Energy–Food–Land Dependencies* Aikaterini Roxani, Athanasios Zisos, Georgia-Konstantina Sakki and Andreas Efstratiadis

⁸ Πηγή: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/inf_23_525

Υποπάργραφος: *Nature protection: Commission calls on GREECE to comply with EU law when planning wind farm projects*

1.4 ΕΤΗΣΙΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

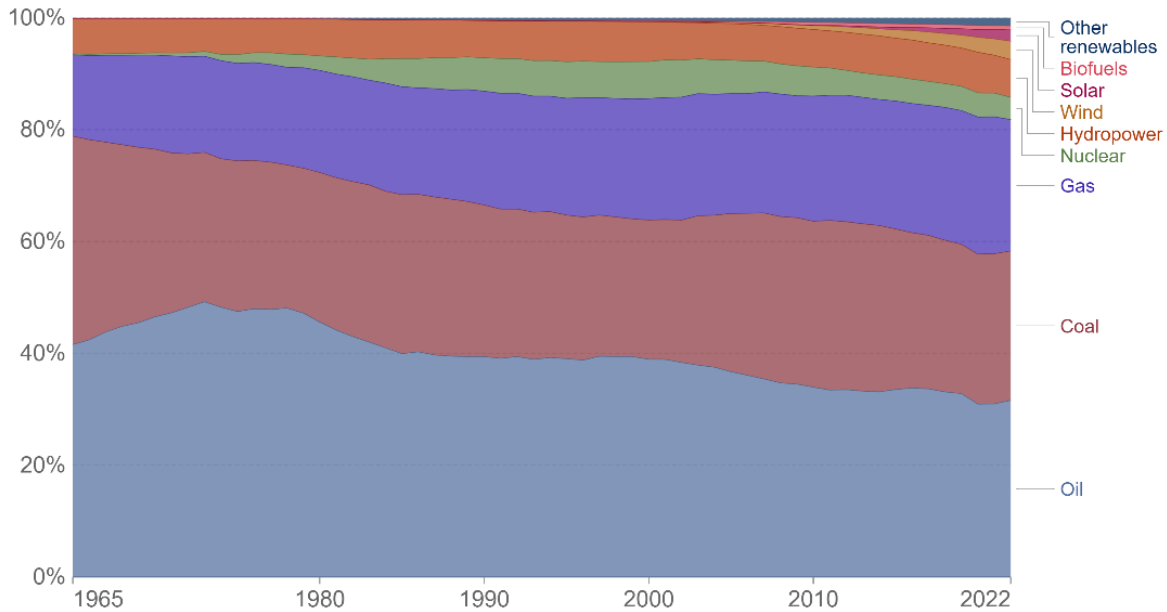
Μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων παρουσιάζονται οι ιστορικές καταγραφές παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως ανά πηγή προέλευσης (ΑΠΕ, Φυσικό αέριο, Ορυκτά καύσιμα) από το 1965 έως και το 2022.

Συγκεκριμένα στην **Εικ. 1-7**, γίνεται εμφανής ο κυρίαρχος ρόλος των ορυκτών καυσίμων στο μείγμα καθώς και σταδιακή επέκταση της χρήσης των εναλλακτικών μορφών ενέργειας με την πάροδο των ετών. Ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα μέχρι σήμερα σημειώνουν τετραπλάσια χρήση στο μείγμα (Coal, Gas, Oil) συγκριτικά με τα υδροηλεκτρικά (Hydropower). Έπειτα σε ποσοστό συμμετοχής ακολουθούν πυρηνικά (Nuclear) τα αιολικά (Wind), ηλιακά (Solar) και τα βιοκαύσιμα (Biofuels). Στην εικόνα, **Εικ. 1-8** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραγωγής ενέργειας από το 1965 έως το 2021 αποκλειστικά από ΑΠΕ, ενώ στις εικόνες, **Εικ. 1-9** και **Εικ. 1-10** παρουσιάζονται σχηματικά σε μορφή χάρτη τα ποσοστά παραγωγής ΑΠΕ και η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από Υδροηλεκτρικά παγκοσμίως για το έτος 2022, αντίστοιχα.

Energy consumption by source, World

Our World in Data

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.



Source: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

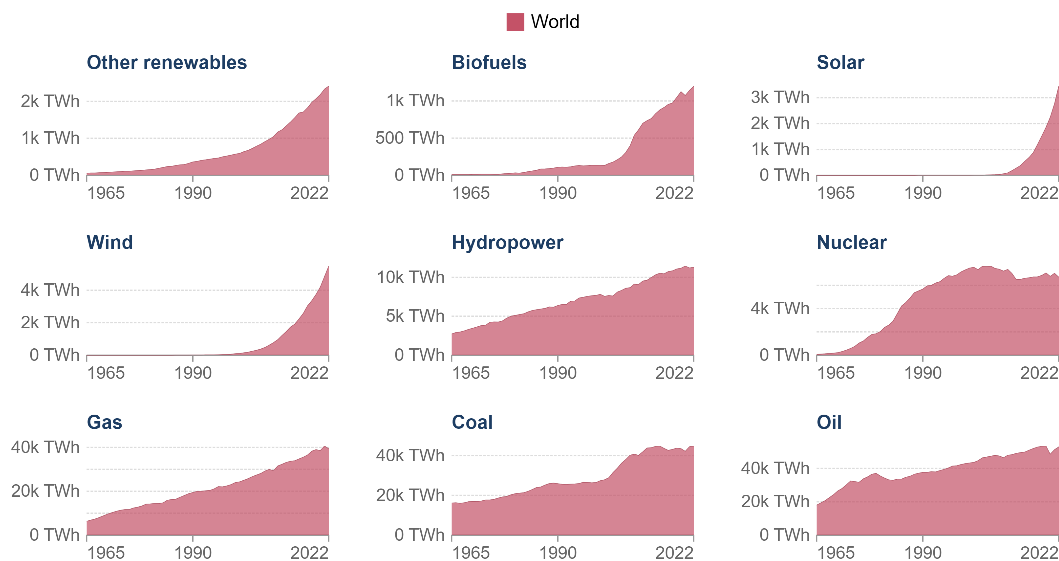
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.

Energy consumption by source, World

Our World in Data

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.



Source: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

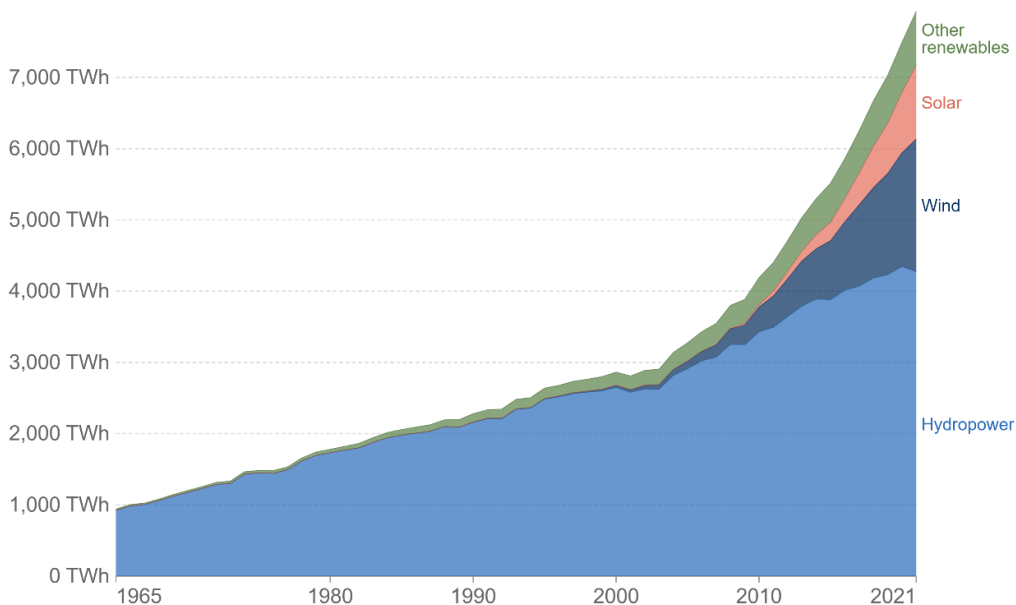
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.

Εικ. 1-7 Κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως ανά πηγή προέλευσης από το 1965 έως το 2022

Renewable energy generation, World

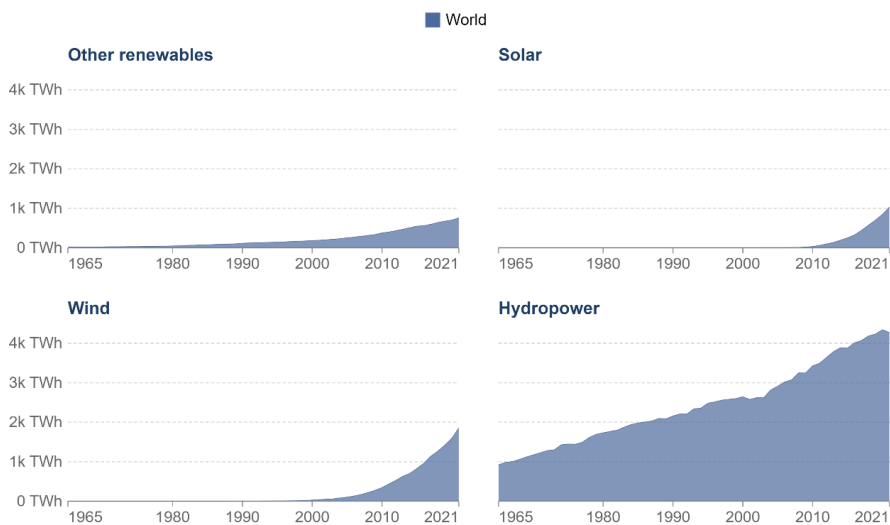
Our World in Data



Source: Statistical Review of World Energy - BP (2022) OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY
 Note: 'Other renewables' refers to renewable sources including geothermal, biomass, waste, wave and tidal. Traditional biomass is not included.

Renewable energy generation, World

Our World in Data

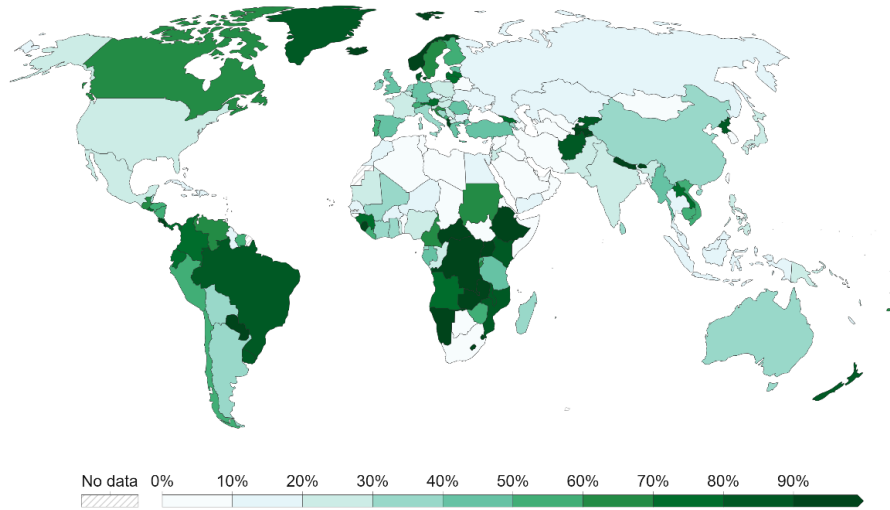


Source: Statistical Review of World Energy - BP (2022) OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY
 Note: 'Other renewables' refers to renewable sources including geothermal, biomass, waste, wave and tidal. Traditional biomass is not included.

Εικ. 1-8 Μερίδιο κατανάλωσης ΑΠΕ παγκοσμίως από το 1965 έως το 2021

Share of electricity production from renewables, 2022

Renewables include electricity production from hydropower, solar, wind, biomass & waste, geothermal, wave, and tidal sources.

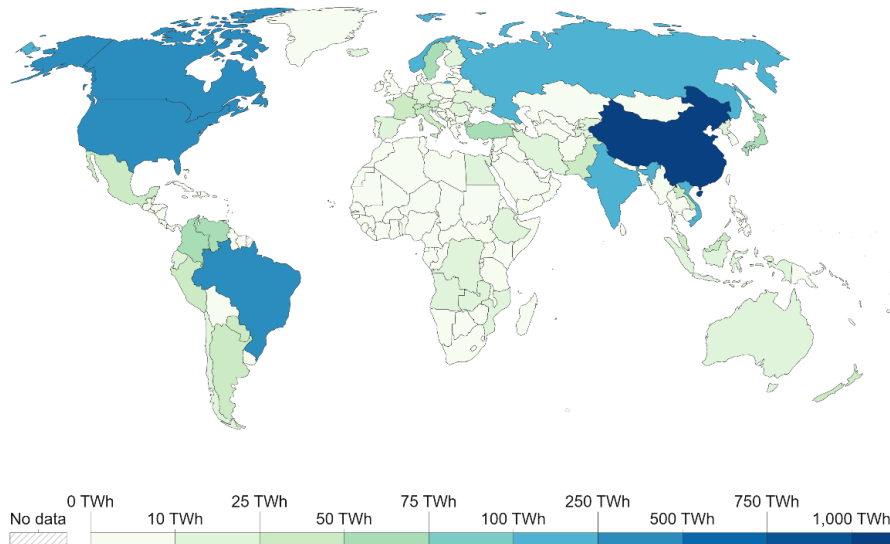


Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2022); Ember; Our World in Data based on Ember's European Electricity Review (2022).
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Εικ. 1-9 Μερίδιο κατανάλωσης ΑΠΕ παγκοσμίως για το 2022

Hydropower generation, 2022

Annual hydropower generation is measured in terawatt-hours (TWh).



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy; Ember

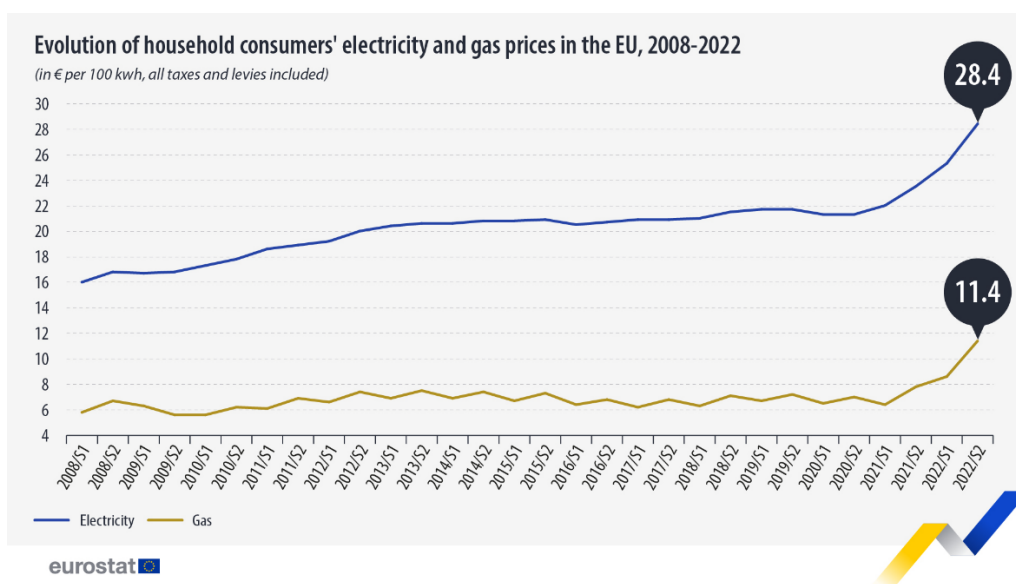
OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Εικ. 1-10 Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως για το έτος 2022

Τέλος, παρακάτω η εικόνα **Εικ. 1-11** παρουσιάζει σε μορφή γραφήματος την εξέλιξη των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου για τα νοικοκυριά, από το 2008 έως το 2022. Συγκεκριμένα,

όπως φαίνεται και από το γράφημα, το δεύτερο εξάμηνο του 2022, οι μέσες τιμές οικιακής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ συνέχισαν να παρουσιάζουν απότομη αύξηση σε σύγκριση με την ίδια περίοδο του 2021, από 23,5 € ανά 100 kWh σε 28,4 € ανά 100 kWh. Οι μέσες τιμές του φυσικού αερίου αυξήθηκαν επίσης σε σύγκριση με την ίδια περίοδο το 2021 από 7,8 € ανά 100 kWh σε 11,4 € ανά 100 kWh το δεύτερο εξάμηνο του 2022. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές είναι οι υψηλότερες στο ρεκόρ της Eurostat.⁹ Το παραπάνω φαινόμενο είχε ήδη ξεκινήσει πριν από τη ρωσική εισβολή στην Ουκρανία, αλλά εκτοξεύτηκε στα ύψη μέχρι το δεύτερο εξάμηνο του 2022.

Οι τιμές του ηλεκτρισμού και του φυσικού αερίου κατά τις αρχές του 2023 άρχισαν να σταθεροποιούνται εν μέρει λόγω πολιτικών και παρεμβάσεων των κυβερνήσεων της ΕΕ, όπως την εφαρμογή του Σχεδίου REPowerEU, αλλά και διαφόρων μέτρων, όπως μείωση φόρων και τελών, προσωρινές φορολογικές απαλλαγές στους καταναλωτές, ανώτατα όρια τιμών, παροχή κατ' αποκοπή ποσού στήριξης ή κατανομή κουπονιών στους τελικούς καταναλωτές, καθώς μέσω της εφαρμογής ρυθμιζόμενων τιμών σε κάποιες χώρες.



Εικ. 1-11 Εξέλιξη τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου για τα νοικοκυριά, από το 2008 έως το 2022

1.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΠΕ

Η πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) παίζει καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό και στη διαχείριση του ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς και διανομής καθώς και στην προμήθεια ενέργειας. Όσον αφορά τον ρόλο των μοντέλων πρόγνωσης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, τόσο η αιολική, όσο η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια εξαρτώνται από καιρικά φαινόμενα των οποίων η εμφάνιση και η έντασή τους αποτελούν στοχαστικές μεταβλητές χωροχρονικά μεταβαλλόμενες. Οι παραπάνω μεταβλητές μπορούν να προσεγγιστούν από κατάλληλα μοντέλα, ωστόσο αυτό θα συνεπάγεται την προσθήκη επιπλέον αβεβαιότητας που εισάγεται από το ίδιο το μοντέλο.¹⁰ Ωστόσο, η αξιοποίηση μεγάλης διάρκειας δεδομένων (ανεμολογικών, ηλιακής ακτινοβολίας και

⁹ Πηγή : <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20230426-2>

¹⁰ Πηγή: Κ.-Κ. Drakaki, *Optimizing the management of small hydroelectric plants: from the synergetic operation of the turbine system to day-ahead energy forecasting*, Diploma thesis, 88 pages, Department of Water Resources and Environmental Engineering – National Technical University of Athens, Νοέμβριος 2021.

βροχοπτώσεων-παροχών) μπορεί να οδηγήσει σε όλο και αποδοτικότερα μοντέλα πρόγνωσης των καιρικών φαινομένων, μικρότερης αβεβαιότητας, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία της παραγόμενης ενέργειας από τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις.

Παρακάτω, αναφέρονται ορισμένες από τις κυρίαρχες μεθόδους πρόβλεψης μελλοντικών καιρικών φαινομένων και παραγωγής και ζήτησης ενέργειας:

1. Μετεωρολογικές Προβλέψεις: Οι μετεωρολογικές πληροφορίες, όπως η ηλιοφάνεια, η άνεμος, η θερμοκρασία και άλλοι μετεωρολογικοί παράγοντες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν την παραγωγή ηλιακής και αιολικής ενέργειας.
2. Δεδομένα Ιστορικής Παραγωγής: Οι παρατηρήσεις καταναλώσεων και παραγωγής ενέργειας από παλαιότερα έτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθούν προγνώσεις για τη μελλοντική παραγωγή.
3. Μοντέλα Πρόβλεψης: Σύνθετες μαθηματικές μοντελοποιήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν την παραγωγή ΑΠΕ με βάση την επίδραση των διαφόρων παραγόντων, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, η εποχή του χρόνου και άλλοι παράγοντες.
4. Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση: Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπτύξουν προγνωστικά μοντέλα τόσο των καιρικών φαινομένων όσο και της παραγόμενης ενέργειας, καθώς σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι η συνεχής βελτιστοποίησή τους με την παράλληλη είσοδο νέων δεδομένων.

Η πρόβλεψη της παραγωγής ΑΠΕ είναι σημαντική για την αποτελεσματική διαχείριση του ηλεκτρικού δικτύου και την εξισορρόπηση της παραγωγής και της ζήτησης ενέργειας. Επιπλέον, βοηθά στη μείωση της ανάγκης για συμβατικές πηγές ενέργειας και στην προώθηση της βιωσιμότητας του ενεργειακού τομέα.

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί η αβεβαιότητα που συνοδεύει την παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, εκτός από την ανάπτυξη βέλτιστων μοντέλων πρόγνωσης ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η αποθήκευση. Με την παράλληλη αποθήκευση σε έργα ΑΠΕ, επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση των διακυμάνσεων στην παραγωγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές, όπως ο άνεμος και ο ηλιακός φωτισμός. Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας συμβάλει στην αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η ανεπαρκής παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές κατά τη διάρκεια περιόδων απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας ή ανέμου, και βοηθά στη διασφάλιση της ανθεκτικότητας και αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου. Στα επόμενα κεφάλαια, αναλύεται ο ρόλος της αποθήκευσης, οι διατάξεις που τη συνοδεύουν καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που επιφυλάσσει.

2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι μεγάλοι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες τεχνικές ιδιαιτερότητες στον τρόπο λειτουργίας και αξιοποίησής τους. Καταρχήν, έχουν ως ρόλο την κάλυψη του φορτίου βάσης, καθώς απαιτείται συγκεκριμένος χρόνος προετοιμασίας θέρμανσης των εγκαταστάσεων για την έναρξη της παραγωγής, θέτοντας μη εφικτή την άμεση απόκρισή τους στα φορτία αιχμής. Επιπρόσθετα, σε περιόδους χαμηλής ζήτησης παραγωγής ενέργειας, όπως είναι οι βραδινές ώρες, οι θερμοκοί σταθμοί δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο για λόγους ασφαλείας των εγκαταστάσεων και μηχανημάτων. Ως αποτέλεσμα, εκείνες τις χρονικές περιόδους θα πρέπει ο σταθμός να βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Η αποθήκευση αυτών των ποσοτήτων μπορεί να φανεί σημαντικά επωφελής, ιδίως σε περιόδους εμφάνισης αιχμών του φορτίου, όπου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπό άλλες συνθήκες η εγκατάσταση δεν θα μπορούσε να εξυπηρετήσει αυτήν την επιπλέον ζήτηση.

Συγκεκριμένα, η ενεργειακή αποθήκευση κυρίως σε μια μεγάλη ενεργειακή μονάδα μπορεί να συμβάλλει στη:

- a. Μείωση των ενεργειακών αναγκών από άλλες πηγές παραγωγής (όπως μεγάλα Υδροηλεκτρικά) όταν εμφανίζονται τα φορτία αιχμής
- b. Μείωση του χρόνου ή του ρυθμού υστέρησης μεταξύ διάθεσης και ζήτησης ενέργειας,
- c. Βελτίωση της απόδοσης της λειτουργίας της εγκατάστασης.

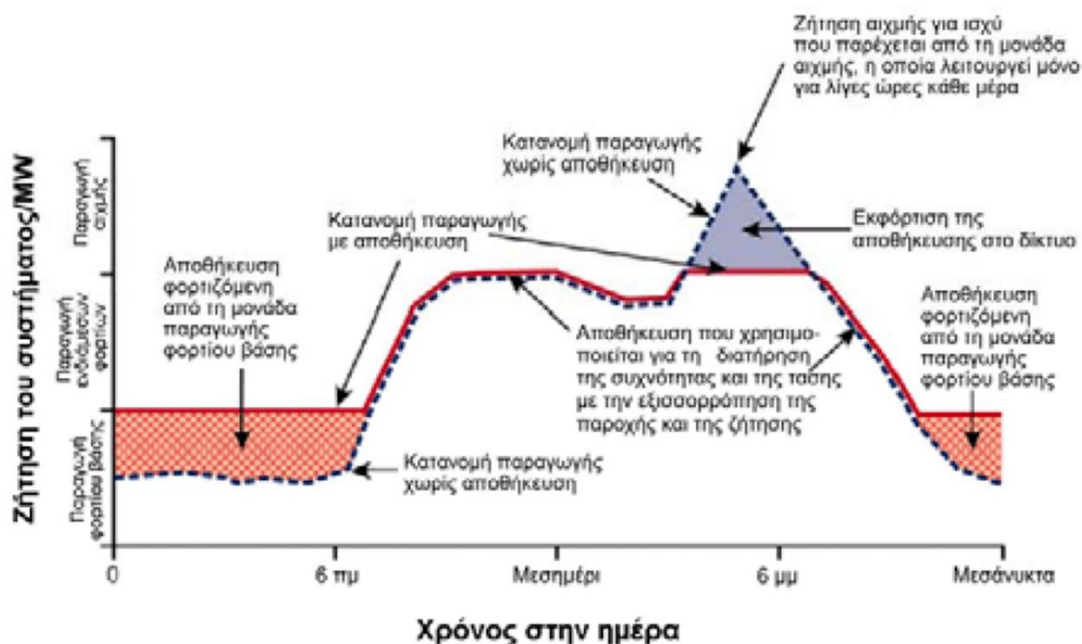
2.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΛΑΣΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα έργο ΑΠΕ μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοσή του και να περιορίσει την αβεβαιότητα που θα χαρακτήριζε την αναμενόμενη παραγωγή ενέργειάς του, τόσο μέσω αξιόπιστων μοντέλων πρόγνωσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όσο και με ταυτόχρονη χρήση έργων αποθήκευσης. Τα έργα αποθήκευσης μπορούν να εξασφαλίσουν τόσο την αποθήκευση ποσοτήτων παραγόμενης ενέργειας, ώστε να αξιοποιηθούν ώρες υψηλότερης ζήτησης (ώρες αιχμής), όσο και την αποθήκευση πλεονασμάτων ενέργειας, όταν η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση (π.χ. ώρες υψηλών ανέμων, βροχοπτώσεων και ώρες μεσημεριού). Μάλιστα, όταν η συμμετοχή της αιολικής και ηλιακής ενέργειας αρχίζει να πλησιάζει κάποια όρια πέρα από τα οποία η διείσδυσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο θα προκαλέσει αστάθεια, η αποθήκευση γίνεται απαραίτητη για την ασφάλεια του δικτύου και της ποιότητας του ηλεκτρικού ρεύματος που φτάνει στους καταναλωτές.

2.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η καμπύλη ζήτησης, ή αλλιώς η καμπύλη φορτίου, κατά τη διάρκεια μιας μέσης αντιπροσωπευτικής ημέρας, μπορεί να περιγράψει συνοπτικά τις μεταβολές που σημειώνονται στη ζήτηση της ενέργειας από τους καταναλωτές καθώς και τον βαθμό των διακυμάνσεων αυτών. Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, είτε πρόκειται για ένα ισχυρά διασυνδεδεμένο δίκτυο (ηπειρωτική χώρα) είτε για ένα αυτόνομο (μεγάλης ή μικρότερης ισχύος, όπως συμβαίνει στα μη διασυνδεδεμένα νησιά), κάθε χρονική στιγμή πρέπει να ικανοποιείται το ισοζύγιο της ισχύος. Το ισοζύγιο ισχύος αναφέρεται στην παραγόμενη ποσότητα

ενέργειας από τις μονάδες παραγωγής και στη ζητούμενη ποσότητα από τους καταναλωτές. Η σχέση ανάμεσα στα παραπάνω μεγέθη πρέπει να βρίσκεται πάντοτε σε ισορροπία, προκειμένου το δίκτυο να μην χαρακτηρίζεται από αστάθειες και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αξιοπιστία. Ωστόσο, όσο αξιόπιστο και σταθερό και αν είναι ένα δίκτυο, πάντα θα υπάρχουν απώλειες, έχοντας ως αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να πρέπει να υπερέχει από εκείνη που απορροφάται από τους καταναλωτές. Όσο μικρότερη αυτή η διαφορά τόσο καλύτερα σχεδιασμένο το δίκτυο, με λιγότερες απώλειες και λιγότερη παραγόμενη ενέργεια που χάνεται αναξιοποίητη.



Εικ. 2-1 Καμπύλη ζήτησης κατά τη διάρκεια μια ημέρας και κατανομή της σε φορτία βάσης και αιχμής με σεναρία αποθήκευσης και μη των περισσειών ποσοτήτων¹¹.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται δυο πιθανές καμπύλες, με ταυτόχρονη λειτουργία αποθήκευσης (συνεχόμενη κόκκινη καμπύλη) και χωρίς αποθήκευση (διακεκομμένη μπλε καμπύλη). Όπως απεικονίζεται και παραπάνω, στην περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης αποθήκευσης η περίσσεια ενέργειας δεν μένει ανεκμετάλλευτη, αντιθέτως αποθηκεύεται τις ώρες που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο, καθώς η ζήτηση είναι λιγότερη από την παραγωγή, και προσφέρεται στο δίκτυο όταν το φορτίο σημειώνει αιχμή. Γίνεται, λοιπόν, εμφανές ο περιβαλλοντικά ωφέλιμος χαρακτήρας της αποθήκευσης.

Συνοπτικά, σύμφωνα με όσα λέχθηκαν παραπάνω ¹¹ συμπεραίνεται ότι τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να συμβάλλουν στα εξής :

1. Κάλυψη των αιχμών ζήτησης
2. Εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου

¹¹Πηγή: Σημειώσεις «Αποθήκευση ενέργειας 1 -Εισαγωγή», Γεώργιος Τσεκούρας

3. Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο ως εξομαλυντικός παράγοντας για την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης
4. Βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μεταφοράς και διανομής
5. Μείωση των αναγκών ενίσχυσης του δικτύου μεταφοράς και διανομής
6. Συμβολή στη μείωση τιμολογίων
7. Υψηλή αξιοπιστία και ποιότητα παρεχόμενης ενέργειας
8. Βέλτιστη εκμετάλλευση ΑΠΕ
9. Σημαντική ενίσχυση του βαθμού διείσδυσης και ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής
10. Ενίσχυση ενεργειακής αυτονομίας

Στη συνέχεια θα αναλυθούν εκτενέστερα οι διάφορες εναλλακτικές μορφές αποθήκευσης καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που συνοδεύουν την κάθε μία.

3 ΟΙ ΕΠΙΚΡΑΤΕΣΤΕΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Τα έργα αποθήκευσης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τις προδιαγραφές της εγκατάστασης, το επιθυμητό κόστος της επένδυσης και η διάρκεια απόσβεσης, καθώς και τη βέλτιστη χωροθέτηση του έργου. Συνοπτικά τα έργα αποθήκευσης που εφαρμόζονται είναι τα ακόλουθα :

- Συσσωρευτές – Μπαταρίες (Batteries)
- Υπερπυκνωτές (Super capacitors)
- Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα (SMES)
- Συστήματα αντλησιοταμίευσης (Pumped hydro)
- Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES)
- Σφόνδυλοι (Flywheels)
- Μπαταρίες ροής (Flow batteries)
- Τεχνολογίες υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου –Fuel cells)
- Θερμική αποθήκευση ενέργειας (Thermal energy storage)

3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΙΚΟ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Οι χρονικές περίοδοι χρήσης των αποθηκευτικών διατάξεων χωρίζουν τα διάφορα είδη αποθήκευσης σε διαφορετικές κατηγορίες. Συγκεκριμένα διακρίνονται στις ακόλουθες τρεις:

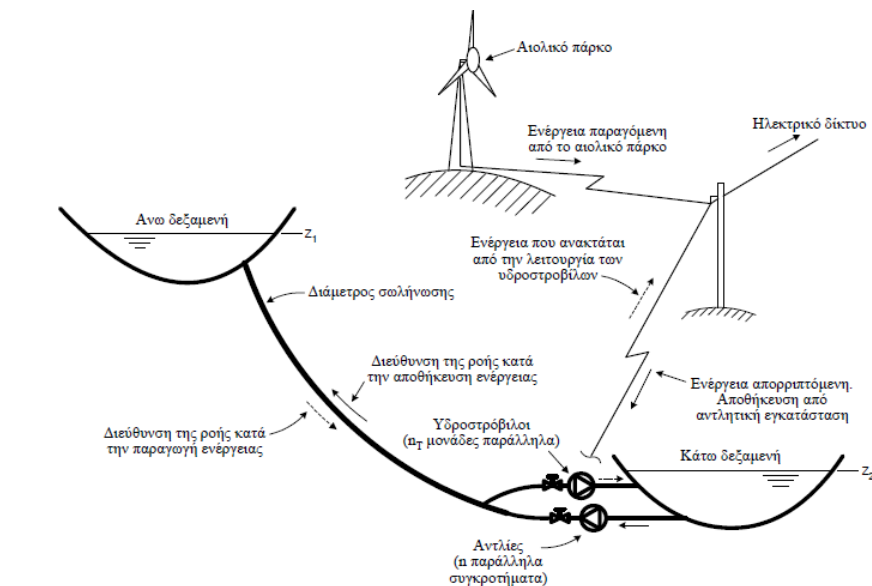
1. **Βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης.** Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά). Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η παροχή αδιάλειπτης παροχής ισχύος και ευστάθειας λειτουργίας ΣΗΕ.
2. **Μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης.** Αφορά διατάξεις που χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η διαχείριση ΑΠΕ, η ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.
3. **Μακροπρόθεσμης αποθήκευσης.** Αφορά διατάξεις αποθήκευσης από αρκετές ώρες μέχρι βδομάδα και μήνες. Κυρίως χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής ή την ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης

Ανάλογα με τις ανάγκες και τον τρόπο λειτουργίας του έργου και του φορτίου που καλείται να εξυπηρετήσει εφαρμόζονται ανάλογα συστήματα αποθήκευσης.

3.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

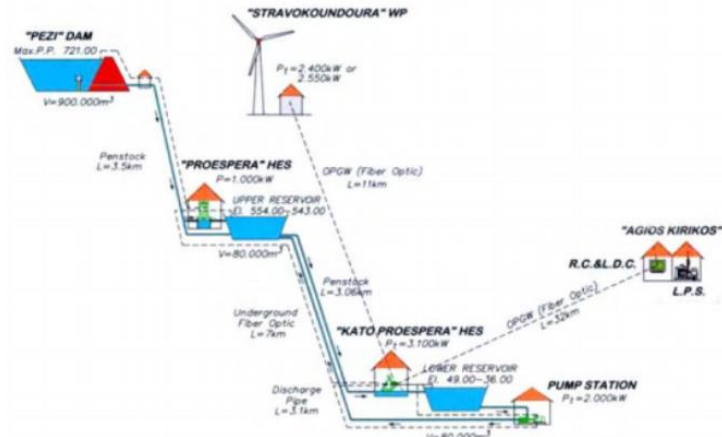
Παρακάτω απεικονίζονται ορισμένες εγκαταστάσεις ΑΠΕ συνοδευόμενες από μέσα αποθήκευσης. Όπως φαίνεται και στις εικόνες, τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα μπορούν να αποθηκεύσουν μέρος της παραγόμενης ενέργειάς τους μέσω μπαταριών. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ) μπορούν είτε να συνοδεύονται από μπαταρίες αποθηκεύοντας μέρος της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγουν, είτε να αποθηκεύουν σε γειτονική δεξαμενή όγκο νερού και να το αξιοποιούν όποτε κρίνεται οικονομικά αποδοτικότερο σύμφωνα με την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας, η οποία εξαρτάται από τον διερχόμενο όγκο νερού από τους υδροστροβίλους, καθώς και την εκάστοτε τιμολόγηση της ενέργειας.

Τα υβριδικά πάρκα από την άλλη μπορούν να λειτουργήσουν συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω. Συγκεκριμένα, σε ένα υβριδικό πάρκο, όπως αυτό της Ικαρίας, οι ανεμογεννήτριες παράγουν ισχύ και τη δίνουν στο σύστημα ανάλογα με τις ανάγκες του, τυχόντα πλεονάσματα στέλνονται προς τις αντλίες του αντλησιοταμιευτικού, ώστε να μπορούν να στείλουν νερό στις άνω δεξαμενές και να αποθηκευτεί επιπλέον όγκος νερού, το οποίου το δυναμικό θα αξιοποιηθεί, όταν το επιβάλει η ζήτηση¹². Ως αποτέλεσμα επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή μείωση σπατάλης περισσειας ενέργειας.

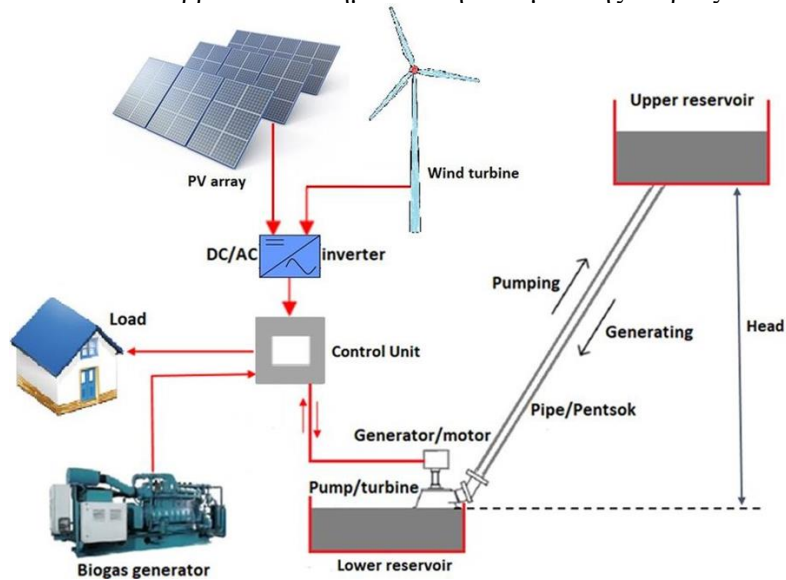


Εικ. 3-1 Υβριδικό πάρκο ανεμογεννητριών και αντλησιοταμίευσης¹².

¹²Πηγή: Σημειώσεις «Αποθήκευση ενέργειας 2 -Αντλησιοταμίευση», Γεώργιος Τσεκούρας



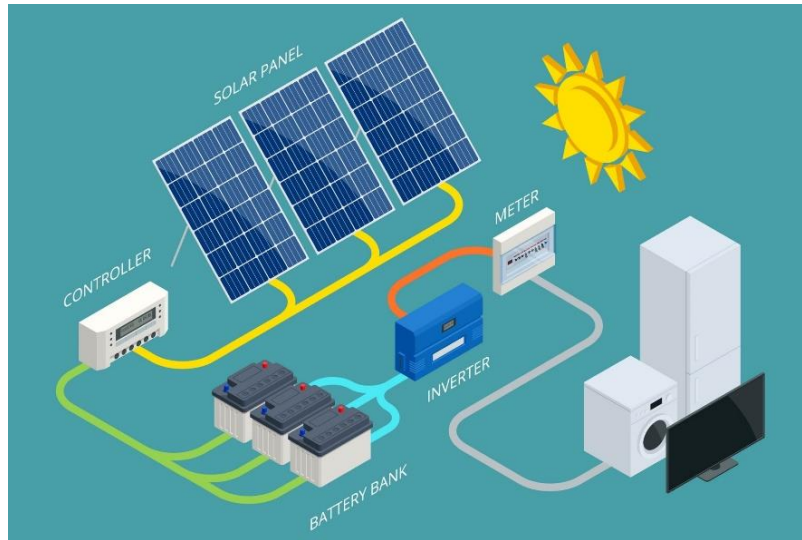
Εικ. 3-2 Υβριδικό σύστημα Αντλησιοταμίευσης Ικαρίας¹³.



Εικ. 3-3 Υβριδική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ, Ανεμογεννήτριας, Αντλησιοταμίευσης και βιοαερίου μαζί με λοιπές συνοδευόμενες εγκαταστάσεις (Μετασχηματιστής, γεννήτρια, Στρόβιλος)¹⁴.

¹³ Πηγή: http://environtechical.blogspot.com/2014/03/blog-post_29.html

¹⁴ Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/The-schematic-diagram-of-the-hybrid-renewable-energy-system_fig3_328068861



Εικ. 3-4 Φωτοβολταϊκό πάρκο με σύστημα μπαταριών¹⁵.



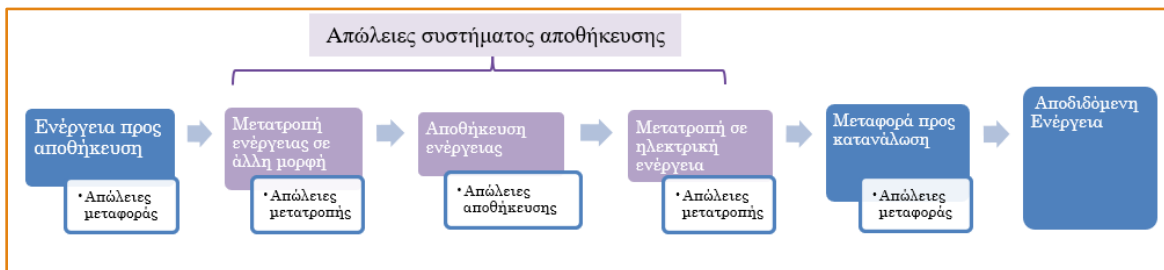
Εικ. 3-5 Gannawarra, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας φωτοβολταϊκού πάρκου (μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης στην Αυστραλία)¹⁶.

¹⁵ Πηγή: <https://www.spaceflightpower.com/is-solar-panel-draining-battery-at-night/>

¹⁶ Πηγή: <https://www.clpgroup.com/en/about/our-business/assets-and-services/australia/gannawarra-battery-storage-system.html>

3.4 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΟΔΕΥΟΥΝ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Ωστόσο, όποια μορφή αποθήκευσης και εάν επιλεγθεί, θα συνοδεύεται από ορισμένες απώλειες ανάλογες του μέσου αποθήκευσης. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που δεν μπορεί να αποθηκευτεί και είναι απαραίτητο η στιγμή της παραγωγής της να συνοδεύεται σχεδόν ακαριαία με τη στιγμή κατανάλωσής της. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το παραπάνω κύριο μειονέκτημα της, μετατρέπεται σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας ικανή να αποθηκευτεί και να αξιοποιηθεί, όταν είναι απαραίτητο, εφόσον πάλι μετατραπεί σε ηλεκτρική μορφή. Ωστόσο οι αναγκαίες συνοδευόμενες μεταβολές έχουν σαν αποτέλεσμα το τελικό ποσό ενέργειας να είναι μειωμένο σε σχέση με την αρχική ποσότητα. Συγκεκριμένα στην ακόλουθη εικόνα **Εικ. 3-6, Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** παρουσιάζονται οι απομειώσεις που συνεπάγονται σε κάθε μετατροπή, μεταφορά και αποθήκευση της ενέργειας. Οι παρακάτω απώλειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη εφαρμογής ενός συστήματος αποθήκευσης, καθώς ενδέχεται σε συνάρτηση με το οικονομικό κόστος της εγκατάστασης να καθορίσει τη βέλטיστα οικονομοτεχνικά λύση ως προς τον σχεδιασμό της εγκατάστασης και την επιλογή ή όχι του μέσου αποθήκευσης.



Εικ. 3-6 Αναπαράσταση των απωλειών που συνεπάγεται η αποθήκευση της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη καθώς και η επαναφορά της στην αρχική της μορφή.

3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η αποθήκευση χαρακτηρίζεται από σημαντικά οφέλη. Στις μέρες μας με την όλο και συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η χρήση της αποθήκευσης αποκτά ακόμα μεγαλύτερη αξία εγκαθιδρύοντας τη θέση της στα επόμενα έτη ως αναγκαία για την αξιόπιστη και βέλτιστη λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής, αλλά και του δικτύου. Ωστόσο, ένα σύστημα αποθήκευσης δεν παύει να χαρακτηρίζεται και από συγκεκριμένα μειονεκτήματα, τα περισσότερα εκ των οποίων οφείλονται στο ότι είναι μια τεχνολογία που συνεχώς αναπτύσσεται και βελτιώνεται ώστε να συναντήσει τις σημερινές ανάγκες.

Πιο αναλυτικά, ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης είναι ότι:

- συμβάλλει στην ευελιξία, στην αξιοπιστία και στην αποδοτικότητα του δικτύου.
- εξυπηρετεί την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς περίσσεια ενέργειας ώρες υπερπαραγωγής που, υπό άλλες συνθήκες θα έμενε αναξιοποίητη πλέον αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται, όταν η παραγωγή εμφανίζει έλλειμμα.
- σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπου η ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (π.χ. αιολική ενέργεια), τα συστήματα αποθήκευσης είναι απαραίτητα για την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.
- στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, επίσης είναι απαραίτητη η αποθήκευση καθώς όλο και περισσότερες διασυνδέσεις ΑΠΕ εντάσσονται στο σύστημα παραγωγής. Εάν δεν συνοδεύονται οι

παραπάνω εγκαταστάσεις από αποθήκευση, τίθενται θέματα διακινδύνευσης της ευστάθειας του συστήματος. Η αποθήκευση της ενέργειας σε συνδυασμό με την ορθολογική διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών αποτελούν τη βέλτιστη διαχειριστική λύση.

Ωστόσο, ορισμένα από τα μειονεκτήματα που μπορούν να συνοδεύουν ένα έργο αποθήκευσης είναι:

- το υψηλό κόστος κτήσης και εγκατάστασης
- οι επιπλέον απώλειες μεταφοράς, μετατροπής και αποθήκευσης, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα στην εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος,
- δεν μπορούν να χαρακτηρισθούν ως "ώριμες τεχνολογίες", καθώς αρκετά από τα υφιστάμενα συστήματα εμφανίζουν σημαντικά περιθώρια εξέλιξης,
- αλλά και ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συχνά συνοδεύουν την εγκατάσταση ενός μεγάλης κλίμακας συστήματος αποθήκευσης είναι σημαντικές.

Η συνεχόμενη ανάπτυξη και διείσδυση των έργων ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα τόσο της Ευρώπης όσο και της ίδιας της χώρας καθώς και η διαρκής προώθησή της με στόχο την ανεξαρτητοποίηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, προϋποθέτει και την ταυτόχρονη ανάπτυξη, διείσδυση και προώθηση των έργων αποθήκευσης, καθώς όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, τα έργα ΑΠΕ προκειμένου να μπορέσουν να λειτουργήσουν ως έργα βάσης χρειάζεται η αβεβαιότητα που τα συνοδεύει να εξαλειφθεί. Η αποθήκευση μπορεί να συμβάλει στο παραπάνω ωστόσο η τεχνολογία που τη συνοδεύει απαιτεί ακόμα ορισμένα βήματα προς βελτίωση.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην πρώτη μορφή ενέργειας ΑΠΕ με ταυτόχρονη αποθήκευση, την υδροηλεκτρική, όπου με την παράλληλη χρήση ταμιευτήρα μπορεί να εξαλείψει σε ένα βαθμό, τη διαφορά μεταξύ των αυξομειώσεων των καιρικών φαινομένων με τη συνεχή ζήτηση.

4 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΥΔΡΟΜΥΛΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Η αξιοποίηση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού αποτελεί μια από τις παλιότερες μεθόδους για την παραγωγή έργου. Πρώτη μηχανή με κινητήρια δύναμη το νερό υπήρξε ο νερόμυλος ή αλλιώς υδρόμυλος (water mill), που πρωτοεμφανίστηκε στην αρχαία Ελλάδα και Ρώμη για σκοπούς αλέσματος. Στη συνέχεια, από τον 5^ο έως και τον 18^ο αιώνα, οι υδρόμυλοι εξελίχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στη βιομηχανία παραγωγής και επεξεργασίας υφασμάτων ρούχων και σιτηρών. Ο Βρετανός Πολιτικός Μηχανικός John Smeaton (1724-1792) έπαιξε σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του σχεδιασμού των υδρόμυλων, προσδίδοντάς τους μεγαλύτερη αξιοπιστία και ικανότητα παραγωγής με μεγαλύτερη απόδοση. Μάλιστα, η καινοτομία που κατάφερε να αναπτύξει ο Smeaton μέσω των επανειλημμένων πειραμάτων του γύρω από τους υδρόμυλους, υπήρξε ένα από τα εναύσματα της Βιομηχανικής Επανάστασης.

Ωστόσο, με τη Βιομηχανική Επανάσταση, ακολούθησε η χρήση μηχανών μεγαλύτερης ισχύος οι οποίες, για να λειτουργήσουν, απαιτούσαν κινητήριες μηχανές μεγαλύτερης απόδοσης από του κλασικού υδρόμυλου. Το 1827 αιώνα οι υδροστρόβιλοι (water turbines) έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση, με την παρουσίαση της πρώτης «τουρμπίνας» από τον Γάλλο μηχανικό Benoît Fourneyron (1802-1867). Το παραπάνω αποτέλεσε ορόσημο στην εξέλιξη των υδρομηχανών, καθώς οι υδροστρόβιλοι έχοντας μεγαλύτερη απόδοση από τους παραδοσιακούς υδρόμυλους, μπόρεσαν να συναντήσουν τις ανάγκες της ταχέως αναπτυσσόμενης βιομηχανίας, μετατρέποντας της υδραυλική ενέργεια σε περιστροφική κινητική, πιο αποδοτικά. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα άρχισαν οι πρώτες εφαρμογές της υδραυλικής ενέργειας για σκοπούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πρώτο υδροηλεκτρικό έργο φτιάχτηκε στις ΗΠΑ (Appleton, Wisconsin) το 1882, με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες οδο φωτισμού. Από έκτοτε και μετά, η ανάπτυξη των υδροηλεκτρικών έργων επεκτάθηκε με μεγάλες ταχύτητες, καθώς γινόταν ολοένα ευρέως αποδεκτά τα οφέλη της εκμετάλλευσης της υδραυλικής ενέργειας για σκοπούς ηλεκτροπαραγωγής. Σε διάφορα μέρη του κόσμου άρχισαν να κτίζονται μεγάλα υδροηλεκτρικά με τη συνοδεία φραγμάτων, με ορισμένα από τα μεγαλύτερα παγκοσμίως να είναι: το Hoover Dam στις ΗΠΑ (χωρητικότητα ταμιευτήρα 35.200 km³), το Three Gorges Dam (χωρητικότητα ταμιευτήρα 39.3 km³) στην Κίνα και το Aswan High Dam στην Αίγυπτο (χωρητικότητα ταμιευτήρα 132 km³). Εκτός από τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συμμετείχαν και μικρά υδροηλεκτρικά, τα οποία αντικατέστησαν τους παλιούς νερόμυλους που χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη μιας περιοχής ή μιας βιομηχανίας.

4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διάδοση της υδραυλικής και κατ' επέκτασης υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά τους αιώνες, τόσο με την εξέλιξη των υδρομηχανών όσο και με την κατασκευή έργων μικρής και μεγάλης κλίμακας για τη διαχείρισή της, οφείλεται στην αμεσότητα και διαχειριστική ευελιξία που μπορεί να εξασφαλίσει το νερό κατά την αποθήκευσή και μετέπειτα εκμετάλλευσή του ή ακόμα και κατά τη ροή απόληψή του, για την παραγωγή ενέργειας. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί περιλαμβάνουν στρόβιλους και γεννήτριες, που

εκμεταλλεύονται την υδροδυναμική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική, η οποία στη συνέχεια τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο και από εκεί διαμοιράζεται στα νοικοκυριά, στις βιομηχανίες και διάφορες αστικές εγκαταστάσεις.

Η υδραυλική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με ποικίλους τρόπους με διαφορετικούς συνδυασμούς φυσικών ανάγλυφων και διαθέσιμου υδρολογικού δυναμικού, με την προϋπόθεση ότι τα έργα που συνοδεύουν το εκάστοτε υδροηλεκτρικό, έχουν προσαρμοστεί βέλτιστα στις ιδιαιτερότητες που οι παραπάνω δυο μεταβλητές εισάγουν στο πρόβλημα σχεδιασμού και ανάπτυξης του.

Μακροσκοπικά, ένα υδροηλεκτρικό έργο απαιτεί τη συνεργασία διαφορετικών κλάδων μηχανικών, όπως συμβαίνει και στα περισσότερα μεγάλης σημασίας έργα. Κύριο ρόλο, ιδίως στα μεγάλα υδροηλεκτρικά, έχει ο πολιτικός μηχανικός του οποίου ευθύνη είναι η μελέτη και η διερεύνηση της αξιοποιήσιμης επιφανειακής απορροής, καθώς και ο σχεδιασμός των έργων συγκέντρωσης (π.χ. διώρυγες), αποθήκευσης (π.χ. ταμιευτήρες), διαχείρισης (π.χ. δεξαμενές καθίζησης, αγωγοί προσαγωγής κ.α.) και απαγωγής της προς τη φυσική κοίτη (π.χ. διώρυγα φυγής). Επιπλέον των παραπάνω έργων, ο πολιτικός μηχανικός είναι υπεύθυνος για την κατασκευή των έργων στέγασης του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που αποτελούν τον σταθμό του υδροηλεκτρικού έργου. Ο σταθμός μπορεί να είναι είτε υπέργειος, είτε υπόγειος. Η επιλογή της θέσης του σταθμού εξαρτάται από την αναγκαία στάθμη στην οποία πρέπει να βρίσκονται οι υδροστροβίλοι για να αποφευχθούν φαινόμενα σπηλαίωσης, αλλά και από την εκάστοτε μορφολογία του εδάφους. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω καθιστά το πρόβλημα να είναι οικονομοτεχνικής φύσεως.

Στη συνέχεια ακολουθεί η συμβολή του ηλεκτρολόγου και μηχανολόγου μηχανικού στην επιλογή του αντίστοιχου εξοπλισμού. Συγκεκριμένα η επιλογή του κατάλληλου υδροστροβίλου (είτε πρόκειται για έναν είτε για περισσότερο από έναν), της ή των γεννητριών, του ή των μετασχηματιστών, των απαραίτητων αυτοματισμών, των ηλεκτρικών πινάκων και των επιπρόσθετων βοηθητικών εξοπλισμών, όπως των γερανογεφυρών.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασική μεταβλητή του προβλήματος σχεδιασμού ενός υδροηλεκτρικού έργου αποτελεί το διαθέσιμο υδραυλικό δυναμικό στην επιλεγείσα θέση. Η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο νερό καλείται υδροδυναμική και θα αξιοποιηθεί από τον μηχανολογικό εξοπλισμό, τον υδροστροβίλο, μέσω της μετατροπής της σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Η υδροδυναμική ενέργεια πριν μετατραπεί σε μηχανική έχει αλλάξει μορφή σε υδραυλική και κινητική μέσω της πτώσης του νερού από μια υψηλότερη θέση προς μια χαμηλότερη πριν συναντήσει τον υδροστροβίλο. Όσο μεγαλύτερη η υψομετρική διαφορά που καλείται να καλύψει το υγρό, τόσο μεγαλύτερη και η παραγόμενη ενέργεια.

Η μεταφορά του νερού από μια υψηλότερη προς μια χαμηλότερη στάθμη επιτυγχάνεται με τον αγωγό προσαγωγής. Από εκείνον με τη συνοδεία κατάλληλων βαλβίδων ελέγχου το νερό εισέρχεται προς τον υδροστροβίλο και η υδροδυναμική ενέργεια που διέθεται αρχικά το υγρό καταλήγει σε μηχανική ενέργεια μείον τις προκύπτουσες απώλειες λόγω τριβής (γραμμικές/ μήκος αγωγού, τοπικές/ γεωμετρικές αλλαγές αγωγού). Στη συνέχεια προκειμένου να γίνεται άμεση η μεταφορά της ενέργειας προς τους καταναλωτές επιλέγεται η μηχανική ενέργεια να μετατρέπεται στιγμιαία σε ηλεκτρική μέσω γεννήτριας, η οποία είναι κατ' ευθείαν συζευγμένη με την άτρακτο του υδροστροβίλου. Έπειτα μέσω του δικτύου μεταφοράς και των μετασχηματιστών που έχουν επίσης συμπεριληφθεί ως απαραίτητος ηλεκτρολογικός εξοπλισμός του έργου, η παραγόμενη ενέργεια οδηγείται προς την κατανάλωση. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, η τάση του ρεύματος μετατρέπεται σε υψηλή μέσω κατάλληλων μετασχηματιστών.

4.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΑΝΑ ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Ένα υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να διαφέρει από ένα άλλο σε διάφορα σημεία τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά. Ο πιο συχνός διαχωρισμός αναφέρεται ως προς τη μέγιστη δυνατή ή και την ονομαστική (που είναι ένα ποσοστό της μέγιστης) ισχύ που επιτρέπεται να παραχθεί. Συγκεκριμένα, τα μεγάλα υδροηλεκτρικά μπορούν να παράγουν όση ισχύ επιθυμούν χωρίς κάποιο νομικό περιορισμό. Βέβαια, όσο μεγαλύτερη η παραγόμενη ισχύ, τόσο μεγαλύτερο και το κόστος της κατασκευής λόγω μεγαλύτερων διαστάσεων του έργου, των εξοπλισμών κτλ. Από την άλλη για τα μικρά υδροηλεκτρικά η ελληνική νομοθεσία (Ν. 3468/06) ορίζει μέγιστη παραγωγή μέχρι και 15 MW ισχύος προς εκμετάλλευση. Το παραπάνω όριο δεν είναι σταθερό, αλλά διαφέρει ανά κράτος και πολιτική που έχει υιοθετηθεί. Πρόκειται για μια τιμή που τίθεται ως όριο και μπορεί να κυμαίνεται σε διάφορα εύρη, χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του Καναδά, της Κίνας και της Νέας Ζηλανδίας όπου το όριο ισούται με 50 MW, των ΗΠΑ και διαφόρων χωρών της Νότιας Αμερικής, όπου ισούται με 30 MW, αλλά και πολλών Ευρωπαϊκών κρατών, όπως της Ελλάδας, όπου η τιμή του ορίου μπορεί να μην ξεπερνά τα 15 MW.

Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στο όριο του διαχωρισμού ενός μικρού από ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό αποσκοπούν σε λόγους κυρίως ποιοτικούς και όχι τόσο ποσοτικούς, καθώς το όριο της επιτρεπόμενης παραγόμενης ισχύος επηρεάζει την επιλογή του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, άρα και τη διαμόρφωση και αξιοποίηση του ΥΗΕ. Στα μικρά υδροηλεκτρικά ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός είναι τυποποιημένης μορφής σε σχέση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά, παράμετρος η οποία τα καθιστά πιο προσιτά ως προς το κόστος, τον χρόνο παράδοσης και την αξιοπιστία του εξοπλισμού. Αναλυτικότερα για την τυποποίηση του εξοπλισμού στα μΥΗΕ θα αναπτυχθεί στην παράγραφο 4.4.

Εκτός της κατηγορίας των μικρών υδροηλεκτρικών, η διακριτοποίηση των ΥΗΕ συνεχίζεται και σε μικρότερης κλίμακας έργων, τα οποία παρουσιάζονται συνολικώς στον παρακάτω πίνακα Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.. Αντίστοιχα με το όριο για τον ορισμό ενός μΥΗΕ και στις λοιπές περιπτώσεις (mini, micro και pico) τα εύρη των τιμών με βάση τις οποίες κατατάσσονται τα ΥΗΕ σε επιμέρους κατηγορίες, δεν είναι απόλυτα. Συγκεκριμένα, ανά κράτη εμφανίζονται αποκλίσεις στα επιτρεπόμενα εύρη ισχύος, οι οποίες οφείλονται τόσο στις διαδικασίες αδειοδότησης, όσο και στις προδιαγραφές σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο της εκάστοτε χώρας.

Πιν. 4-1 Κατάταξη ΥΗΕ σύμφωνα με την παραγόμενη ισχύ

Κατηγορία	Εύρος ισχύος
Small (Greece)	15-1 MW
Mini	0,1-1 MW
Micro	5-100 kW
Pico	<5 kW

Επιπρόσθετα από το εύρος ισχύος, τα μΥΗΕ διαχωρίζονται μεταξύ τους και ως προς τον τρόπο εκμετάλλευσης και διαχείρισης του υδρολογικού δυναμικού, αλλά και από τη θέση που έχει εφαρμοστεί ο εξοπλισμός. Οι κυριότερες κατηγορίες που εκπροσωπούνται σε έργα τόσο παγκοσμίως, όσο και στον ελλαδικό χώρο είναι τα ακόλουθα:

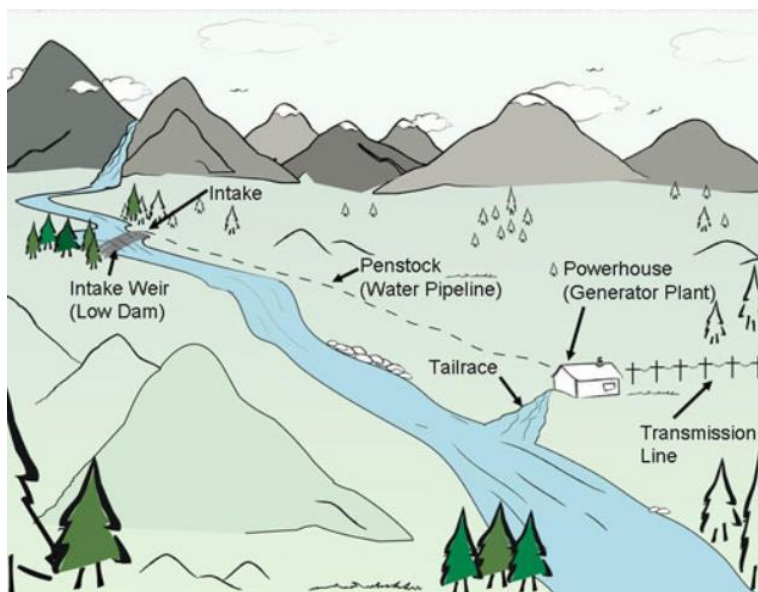
- **Κατάντη μεγάλων φραγμάτων (Storage facility) μΥΗΕ.** Τέτοια μΥΗΕ βρίσκονται στον κατάντη πόδα μεγάλων φραγμάτων και εκμεταλλεύονται την περιβαλλοντική παροχή για παραγωγή ενέργειας, λίγο πριν ελευθερωθεί στο υδάτινο σώμα.



Εικ. 4-1: Κατάντη μεγάλων φραγμάτων (Storage facility) μΥΗΕ¹⁷

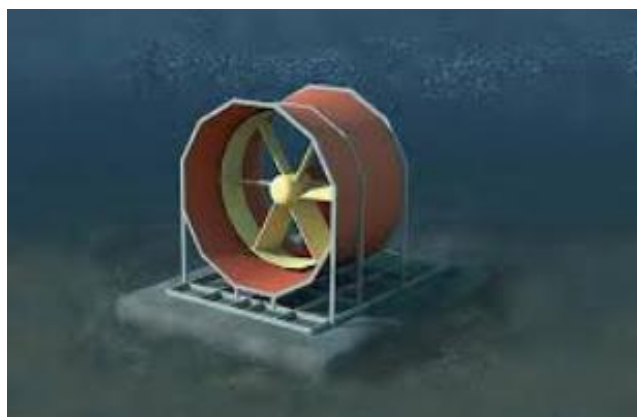
- **Επί του ρου του ποταμού (Run-off-river) μΥΗΕ.** Σε αυτήν την περίπτωση ο εξοπλισμός εκμεταλλεύεται το υδάτινο δυναμικό κατά μήκος της ροής του ποταμού χωρίς την παρουσία αποθήκευσης. Έργα που συνοδεύουν την παραπάνω κατάταξη είναι οι διώρυγες, οι δεξαμενές καθίζησης και φόρτισης, ο αγωγός προσαγωγής και φυγής, καθώς και ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Τέτοια κατηγορία μΥΗΕ είναι και η πιο συνήθης, καθώς δεν απαιτείται η ύπαρξη μεγάλων φραγμάτων, επομένως υπάρχει πληθώρα θέσεων εφαρμογής προς εκμετάλλευση, ενώ ταυτόχρονα το φυσικό ανάγλυφο της περιοχής δεν δέχεται σημαντικές επεμβάσεις.

¹⁷ Πηγή: <https://ppcr.gr/el/hydroelectric/stratos-ii-agrinio>



Εικ. 4-2 Επί του ρου του ποταμού (Run-off-river) μΥΗΕ¹⁸

- **Εντός του ρου (In stream) μΥΗΕ.** Μια σπανιότερη εκδοχή μΥΗΕ που εφαρμόζεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας την ταχύτητα της κίνησης των ρευμάτων εντός του ρου του ποταμού.



Εικ. 4-3 Εντός του ρου (In stream) μΥΗΕ¹⁹

Τέλος, ένας επιπλέον διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών έργων αφορά το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος, το οποίο καθορίζει την τάξη μεγέθους τόσο της παραγόμενης ενέργειας, όσο και της στατικής πίεσης στον αγωγό προσαγωγής και στο τμήμα εισόδου του/ ή και των υδροστροβίλου/-ων. Η υδραυλική πτώση σε συνδυασμό με την τάξη μεγέθους του διαθέσιμου υδραυλικού δυναμικού καθορίζουν τον τύπο

¹⁸ Πηγή: <https://galaxyscience.weebly.com/run-off-river-hydropower-facilities.html>

¹⁹ Πηγή: <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/file-hydrokinetic-2021.pdf>

υδροτροβίλου που αρμόζει καλύτερα στο έργο. Οι κατηγορίες που διακρίνονται τα ΥΗΕ, αναλόγως το ύψος πτώσης, είναι οι ακόλουθες τρεις:

- i. Μικρού ύψους, για ύψος πτώσης $H < 20$ m
- ii. Μεσαίου ύψους, για ύψος πτώσης $20 \text{ m} < H < 150$ m
- iii. Μεγάλου ύψους, για ύψος πτώσης $H > 150$ m

Όσο μεγαλύτερο το διαθέσιμο υψόμετρο προς εκμετάλλευση, τόσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να παραχθεί. Για μια σταθερή τιμή της παροχής όσο μεγαλύτερο το ύψος πτώσης, τόσο μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί χωρίς σημαντική αύξηση των διαστάσεων του αγωγού προσαγωγής, του οποίου η διάμετρος εξαρτάται κυρίως από τη διερχόμενη παροχή. Συνεπώς υπάρχουν διαθέσιμες δυο πιθανές θέσεις εγκατάστασης ενός ΥΗΕ εκ των οποίων η μια χαρακτηρίζεται από μεγάλες παροχές και μικρά ύψη πτώσης, ενώ η άλλη από μεγάλα ύψη πτώσης και μικρές παροχές, είναι αρκετά πιθανό η δεύτερη εναλλακτική να οδηγήσει σε οικονομικότερη ανάλυση εξαιτίας των μικρότερων διαστάσεων του αγωγού πτώσης που εκείνη συνεπάγεται. Ωστόσο, το διαθέσιμο ύψος πτώσης καθορίζεται από το εκάστοτε ανάγλυφο της περιοχής μελέτης και όπως είναι φυσικό, τα μεγάλα ύψη πτώσης συναντώνται κυρίως σε ορεινά ανάγλυφα απομακρυσμένων περιοχών, το οποίο συνεπάγεται περιοχές απομακρυσμένες από το δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται το κόστος των γραμμών σύνδεσης του υδροηλεκτρικού σταθμού με το κύριο δίκτυο για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, να είναι αρκετά υψηλό. Αντιθέτως, για τα ΥΗΕ μικρότερου ύψους πτώσης το ύψος της επένδυσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ενδέχεται να είναι υψηλότερο, ενώ το κόστος των εργασιών σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο να είναι μικρότερο, συγκριτικά με τα ορεινά ΥΗΕ. Ο λόγος για τον οποίο ισχύει αυτό είναι ότι κατά κανόνα, τα ΥΗΕ μικρού ύψους βρίσκονται πλησίον πεδινών και κατοικημένων εκτάσεων, συνεπώς καθίσταται ευκολότερη η πρόσβαση σε υφιστάμενο δίκτυο.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω το κόστος ενός ΥΗΕ και η απόδοση μιας επένδυσης εξαρτάται από έναν συνδυασμό παραμέτρων και προκειμένου να εξαχθεί μια εκτίμηση της βέλτιστα οικονομικής λύσης, θα πρέπει να έχουν ληφθεί όλα υπόψη. Επιπλέον, οι παραπάνω διαχωρισμοί των υδροηλεκτρικών έργων ανά μεγέθη παραγόμενης ισχύος, ανά τάξη ύψους πτώσης και ανά κατασκευαστική εφαρμογή αποτελούν μερικές τυπικές διατάξεις των έργων αυτών. Ωστόσο, κάθε μελέτη και κάθε θέση εφαρμογής που εξετάζεται εισάγει νέες μεταβλητές στο πρόβλημα σχεδιασμού λόγω των ιδιαιτεροτήτων που μπορεί να χαρακτηρίζουν το εκάστοτε ανάγλυφο της περιοχής και ως επακόλουθο την εκάστοτε λεκάνη απορροής. Σκοπός του μελετητή εξετάζει μεμονωμένα κάθε πρόβλημα, με τις όποιες δυσκολίες αυτό συνεπάγεται έχοντας ως γνώμονα την οικονομικότερη και ασφαλέστερη λύση.

4.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΕΝΟΣ ΥΗΕ

Τα μέρη που απαρτίζουν ένα ΥΗΕ αποτελούνται από μια σειρά έργων πολιτικού μηχανικού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Το κυριότερο και πιο σύνθετο έργο τόσο σε κλίμακα, όσο και σε διαδικασία αποτελεί η δημιουργία του ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας ή αλλιώς δεξαμενή αποθήκευσης αποτελεί μέρος των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων και σκοπός του είναι να δημιουργήσει μια τεχνητή λίμνη στη βέλτιστη, τοπογραφικά, θέση για την αξιοποίηση του υδάτινου δυναμικού που συγκεντρώνεται, προερχόμενη από τη φυσική κοίτη του υδατορεύματος. Η επιλογή της θέσης κατασκευής του φράγματος αποτελεί σημαντική παράμετρος προς διερεύνηση κατά τη διεξαγωγή της προμελέτης και καθορίζει την απόδοση της επένδυσης του έργου. Κύριο πλεονέκτημα της δημιουργίας του ταμιευτήρα αποτελεί η ευελιξία που παρέχεται στον διαχειριστή του έργου, καθώς η αποθήκευση του υδάτινου όγκου έχει ως

αποτέλεσμα να μπορεί να αξιοποιηθεί ανεξαρτήτως, ως ένα βαθμό, από τη φυσική παροχή. Χάρης αυτού του στοιχείου, τα μεγάλα υδροηλεκτρικά συνεισφέρουν κατά κύριο ρόλο στην κάλυψη των αιχμών του δικτύου.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά, ωστόσο, λόγω των κατασκευαστικών τους παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν, δεν έχουν ως ρόλο την κάλυψη των αιχμών του δικτύου. Ο ταμιευτήρας που ενδέχεται να συνοδεύει ορισμένα μΥΗΕ, αποσκοπεί στην εξασφάλιση ομαλών συνθηκών στην υδροληψία, ώστε να μην εισέρχονται φερτά υλικά στο σύστημα προσαγωγής ή και αέρα, καθώς μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση του μηχανολογικού εξοπλισμού. Συνεπώς, στα μΥΗΕ η αποθήκευση δεν αποτελεί κύριος στόχος της λειτουργίας τους, παράμετρος η οποία τα καθιστά ευκολότερα στον σχεδιασμό και την κατασκευή, αλλά και οικονομικότερα. Δεξαμενή φόρτισης μπορεί ωστόσο να υπάρξει κατά την κατασκευή ενός μΥΗΕ, ανάντη του αγωγού προαγωγής, με σκοπό όμως την εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών πίεσης εντός του αγωγού.

Επιπλέον στα ΥΗΕ συναντούνται τις ακόλουθες εγκαταστάσεις:

- **Εκχειλιστής** (σε μεγάλα και σε μικρά ΥΗΕ). Ο εκχειλιστής, ή αλλιώς υπερχειλιστής (όταν δεν συνοδεύεται από θυροφράγματα), είναι η κατασκευαστική διάταξη μέσω της οποίας διοχετεύεται η πλημμυρική παροχή, όταν η στάθμη του νερού, πάει να ξεπεράσει τη στάση του φράγματος.
- **Έργα εκτροπής ή σήραγγα εκτροπής** (σε μεγάλα ΥΗΕ). Είναι τα έργα που έχουν σκοπό τη διοχέτευση της φυσικής παροχής τους υδατορεύματος μακριά από τον χώρο των εργασιών μέχρι να ολοκληρωθούν.
- **Εκκενωτής πυθμένα** (σε μεγάλα ΥΗΕ). Ο εκκενωτής πυθμένα είναι υπεύθυνος για την εκκένωση του ταμιευτήρα σε έκτακτη ανάγκη ή για λόγους συντήρησης. Επίσης, από τον εκκενωτή διοχετεύεται η περιβαλλοντική παροχή για τη συντήρηση της δίαιτας του ποταμού.
- **Δεξαμενή εξάμωσης** (σε μικρά ΥΗΕ). Η δεξαμενή εξάμωσης αφαιρεί από τη ροή του ρευστού τα αιωρούμενα σωματίδια πριν εισέλθει στη διώρυγα ή τον αγωγό προσαγωγής. Πρόκειται για κόκκους άμμου που εάν δεν αφαιρεθούν και οδηγηθούν στους υδροστροβίλους θα οδηγήσουν στην πρόωρη διάβρωσή τους, η τάξη της οποίας είναι τόσο εντονότερη όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της ροής και όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα του ρευστού σε τέτοια σωματίδια.

Επιπλέον έργα που συνοδεύουν ένα ΥΗΕ είναι τα κανάλια ή διώρυγες, οι σήραγγες (μόνο σε μεγάλα ΥΗΕ), δεξαμενές φόρτισης, αγωγός προσαγωγής ή πτώσεως, βάνες ελέγχου της ροής, θυροφράγματα, αγωγός και διώρυγα φυγής (απαγωγής). Ενδεχομένως σε μεγάλα ΥΗΕ, να υπάρχει και πύργος ανάπαλσης με σκοπό την προστασία του αγωγού προσαγωγής από υπερπίεσεις και υποπίεσεις που συναντώνται κατά το μεταβατικό φαινόμενο εκκίνησης ή απόρριψης φορτίου των υδροστροβίλων, γνωστό και ως υδραυλικό πλήγμα.

Στη συνέχεια των παραπάνω έργων ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση της εκτρεπόμενης ροής μέσω αυτών και τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ρευστού σε μηχανική και έπειτα σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα ο εξοπλισμός περιλαμβάνει :

- Υδροστροβίλους
- Ρυθμιστές στροφών
- Ηλεκτρογεννήτριες
- Μετασχηματιστές
- Ηλεκτρικούς πίνακες
- Ασφαλειοαποζεύκτες
- Βοηθητικό εξοπλισμό (ανυψωτικά μηχανήματα-γερανογέφυρες κ.α.)
- Σύστημα πεπιεσμένου ελαίου και αέρα
- Αυτοματισμούς

Οι ηλεκτρογεννήτριες είναι απευθείας συνδεδεμένες με τον υδροστρόβιλο, στην ίδια άτρακτο. Οι μετασχηματιστές μεταβάλλουν την τάση του ρεύματος σε υψηλή ή μέση, αναλόγως το τμήμα του δικτύου που διατρέχει, με σκοπό τη μεταφορά της ενέργειας με τις λιγότερες απώλειες. Το πλήθος των μονάδων υδροστροβίλων, γεννητριών και μετασχηματιστών εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ του έργου. Όταν πρόκειται για παραπάνω από μια μονάδα υδροστροβίλων, μπορεί να επιλεγθεί ένας συνδυασμός διαφορετικών τύπων με σκοπό την κάλυψη μεγαλύτερου εύρους παροχών, καθώς αναλόγως με τον τύπο του στροβίλου μεταβάλλεται και το εύρος παροχών προς αξιοποίηση με σημαντικό βαθμό απόδοσης. Η παραπάνω παρατήρηση αφορά κυρίως τα μΥΗΕ όπου η ροή που διέρχεται από τους στροβίλους εξαρτάται άμεσα από τη φυσική παροχή σε αντίθεση με τα μεγάλα ΥΗΕ όπου λόγω του ταμειυτήρα η διερχόμενη παροχή είναι σταθερή και ελέγξιμη. Ανεξαρτήτως αν οι υδροστρόβιλοι είναι ίδιου ή διαφορετικού τύπου ή αν πρόκειται για μεγάλο ή μικρό ΥΗΕ, η παρουσία παραπάνω του ενός στροβίλου δημιουργεί μια επιπρόσθετη ασφάλεια σε συνθήκες εφεδρείας στην περίπτωση που κάποιος από αυτούς χρήζει συντήρηση.

4.5 ΡΟΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η λειτουργία μιας Υδροηλεκτρικής εγκατάστασης βασίζεται στη διαδοχική μετατροπή της ενέργειας, που βρίσκεται αποθηκευμένη μέσα στο υγρό (υδραυλική ενέργεια), σε άλλες μορφές. Η ενέργεια ως έννοια αποτελεί την ικανότητα που έχει ένα σώμα ή ένα σύστημα να παράγει έργο. Στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών, το φυσικό σύστημα δεν αποτελεί άλλο από το νερό. Αρχικά, καθώς το υγρό διατρέχει τον αγωγό προσαγωγής γίνεται αναφορά στην υδραυλική ενέργεια (μηχανική ενέργεια), έπειτα, μετατρέπεται σε κινητική-περιστροφική (κίνηση των στροβίλων και της γεννήτριας) και τελικά σε ηλεκτρική.

Συγκεκριμένα, το ρευστό είτε όταν βρίσκεται αρχικά αποθηκευμένο σε έναν ταμειυτήρα, είτε σε μια δεξαμενή φόρτισης, εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς που κατέχει συγκριτικά με τη θέση των στροβίλων, αποκτά δυναμική ενέργεια ($U = mgH = \rho gVH = \gamma VH$), προς εκμετάλλευση. Η πυκνότητα του ρευστού, $\rho = m/V$, και η βαρυτική επιτάχυνση g , είναι μεγέθη σταθερά, και το γινόμενο τους ισούται με το ειδικό βάρος γ . Τα μεταβαλλόμενα μεγέθη στην παραπάνω σχέση είναι η υψομετρική διαφορά H και ο διερχόμενος όγκος του ρευστού V τα οποία καθορίζουν το μέγεθος της εκμεταλλεύσιμης ενέργειας.

Ωστόσο το μέγεθος U αντιπροσωπεύει τη θεωρητική δυναμική ενέργεια, καθώς η πραγματική δυναμική ενέργεια, που εν τέλει αξιοποιείται από τον σταθμό παραγωγής, είναι μειωμένη της θεωρητικής κατά ένα

ποσοστό που αποτελεί τις απώλειες. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες θεμελιώδεις σχέσεις που περιγράφουν τη ροή της ενέργειας του ρευστού σε διαδοχικές φάσεις, με τελικό σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή.

- **Θεωρητική ισχύς:**

$$P_{theor} = \frac{U}{T} = \gamma V H / T = \gamma Q H \quad (\text{Εξ.1})$$

Όπου,

$\gamma = \rho g$, το ειδικό βάρος του νερού (9,81 KN/m³)

Q (m³/sec), η παροχή που διέρχεται από τους στροβίλους

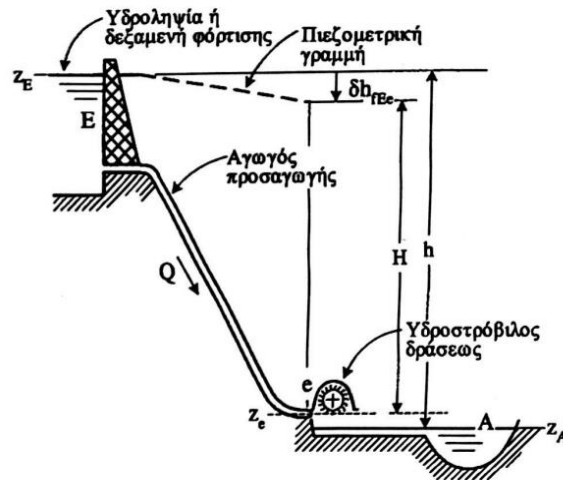
$H = h_a - h_k$ (m), η υψομετρική διαφορά μεταξύ του ανάντη ενεργειακού υψομέτρου (στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα ή στη δεξαμενή φόρτισης) και του κατόντη ενεργειακού υψομέτρου (στάθμη στη διώρυγα φυγής ή στο υδατόρευμα)

Η ισχύς αποτελεί τον ρυθμό μεταβολής της ενέργειας, επομένως ισούται με τον λόγο της ενέργειας προς τον χρόνο μεταβολής (T).

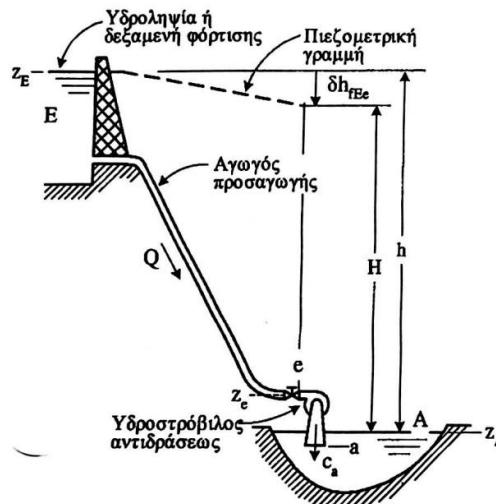
Η στάθμη κατόντη εξαρτάται από τον τύπο του στροβίλου που απαρτίζεται ο σταθμός παραγωγής.

Συγκεκριμένα σε **στροβίλους δράσης-μερικής προσβολής**-(π.χ. Pelton) η εκροή νερού πραγματοποιείται στην ατμόσφαιρα μέσω ακροφυσίου. Ως αποτέλεσμα στάθμη εξόδου ορίζεται το κατόντη πέρας του ακροφυσίου, το οποίο παραμένει σταθερό και δεν μεταβάλλεται συναρτήσει της παροχής. Το παραπάνω γίνεται εμφανές στην εικόνα **Εικ. 4-4**, όπου το z_e αναπαριστά τη στάθμη εξόδου από τον υδροστρόβιλο, κατόντη και η z_A τη στάθμη του υδατορεύματος, όπου η παροχή οδηγείται στη φυσική της ροή.

Αντιθέτως αν πρόκειται για **στροβίλους αντιδράσεως-ολικής προσβολής**- (π.χ. Francis) όπου λειτουργούν υπό μεταβαλλόμενη στατική πίεση του υγρού καθώς ρέει εντός του δρομέα, το υψόμετρο εξόδου εξαρτάται από τη στάθμη του νερού στην έξοδο εντός της διώρυγας φυγής, η οποία μεταβάλλεται καθώς εξαρτάται μεταξύ άλλων και από τη διερχόμενη παροχή από τους στροβίλους. Παρακάτω στις εικόνες **Εικ. 4-5** και **Εικ. 4-6** παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία ενός ΥΗΕ με στρόβιλο αντίδρασης με απευθείας εκροή στην κοίτη του ποταμού ή μέσω διώρυγας απαγωγής αντίστοιχα. Η διάταξη στην εικόνα, **Εικ. 4-6** όπου το νερό εκρέει από τον υδροστρόβιλο στη δεξαμενή φυγής η οποία βρίσκεται σε υψηλότερη θέση από τη φυσική κοίτη του ποταμού, εξασφαλίζει την προστασία της εγκατάστασης σε περιόδους πλημμυρικών επεισοδίων. Ωστόσο στην εν λόγω διάταξη, κατά το σχεδιασμό του υδροστροβίλου και της διώρυγας απαγωγής, η στάθμη τοποθέτησης του στροβίλου θα πρέπει να μην ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη ως προς τη στάθμη της διώρυγας ($z_a - z_A$) < Δz_{max} , ώστε να αποτραπούν φαινόμενα σπηλαίωσης.



Εικ. 4-4 Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου δράσεως²⁰



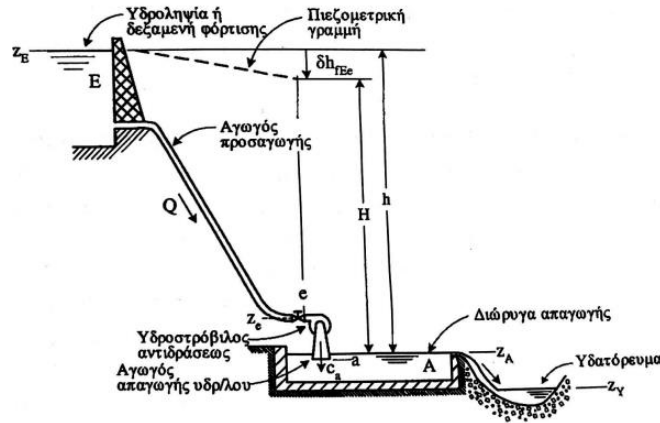
Εικ. 4-5 Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου αντιδράσεως²¹

²⁰ Πηγή : Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα, Αθήνα 2016, Εκδόσεις Τσότρας,

Σχήμα 3.5β σελ. 75

²¹ Πηγή : Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα, Αθήνα 2016, Εκδόσεις Τσότρας,

Σχήμα 3.5α σελ. 75



Εικ. 4-6 Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροτροβίλου αντιδράσεως και διώρυγα απαγωγής²²

- **Ακαθάριστο ύψος πτώσης:** Το μέγεθος που περιγράφει τη μέγιστη δυνατή αξιοποιήσιμη υψομετρική διαφορά ονομάζεται ακαθάριστο ύψος πτώσης και ισούται με την υψομετρική διαφορά μεταξύ τη μέγιστη στάθμη ανάντη και της ελάχιστης στάθμης κατόντη.

$$H_g = h_{\alpha_{max}} - h_{\kappa_{min}} \quad (\text{Εξ.2})$$

- **Πραγματική ισχύς:**

$$P(t)_{real} = \eta(t) \gamma Q(t) H_n(t) \quad (\text{Εξ.3})$$

Όπου,

η , ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας παραγωγής (συμπεριλαμβανομένου το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας, των στροβίλων και του μετασχηματιστή)

H_n (m), το καθαρό ύψος πτώσης αν από το H αφαιρεθούν οι απώλειες, το οποίο εξαρτάται από τη διερχόμενη παροχή Q και το διαθέσιμο ύψος H , τη χρονική στιγμή t . Το καθαρό ύψος πτώσης εκφράζει το πραγματικό δυναμικό που καταφέρνει να φτάσει τους υδροστροβίλους και να αξιοποιηθεί.

- **Υδραυλικές απώλειες:** Οι υδραυλικές απώλειες, δη στο σύστημα προσαγωγής (σήραγγα ή διώρυγα, αγωγό προσαγωγής) είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής. Οι συνολικές υδραυλικές απώλειες είναι άθροισμα δυο επιμέρους υδραυλικών απωλειών, των γραμμικών και των τοπικών. Όπως υπονοείται από την ονομασία τους, οι γραμμικές απώλειες οφείλονται στις

²²Πηγή :Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα, Αθήνα 2016, Εκδόσεις Τσότρας, Σχήμα 3.5γ σελ.75

τριβές που δέχεται η ροή κατά τη διέλευση του ρευστού κατά μήκος του αγωγού προσαγωγής οδηγώντας σε μείωση της ενέργειας καθώς απελευθερώνεται ως θερμότητα. Οι σημειακές, τοπικές αλλαγές στη γεωμετρία του αγωγού και της δεξαμενής φόρτισης, επίσης οδηγούν σε απώλειες ενέργειας, οι οποίες ονομάζονται τοπικές.

Ο τύπος των συνολικών απωλειών όσον αφορά τα έργα μεταφοράς της ροής που τους στροβίλους είναι ο ακόλουθος:

$$\delta h = kQ^2 = \delta h_f + \delta h_l = JL + kV^2/2g \quad (\text{Εξ.4})$$

Όπου,

δh_f , γραμμικές απώλειες

δh_l , τοπικές απώλειες

JL , είναι το γινόμενο της κλίσης J της γραμμής ενέργειας επί το μήκος L του αγωγού

V , η ταχύτητα του ρευστού

k , ο συντελεστής τοπικών απωλειών, εξαρτώμενος από τη γεωμετρία. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του συντελεστή, τόσο μεγαλύτερη η μεταβολή της γεωμετρίας, άρα και περισσότερες απώλειες. Η μεταβολή της γεωμετρίας συσχετίζεται με το πόσο αιχμηρή ή στρογγυλεμένη είναι η μεταβατική ζώνη, δηλαδή εξαρτάται άμεσα από τον κατασκευαστικό σχεδιασμό και ως επακόλουθο από το σχήμα που έχει δοθεί στο σημείο της μετάβασης.

Ο συντελεστής τοπικών απωλειών ή εναλλακτικά ο συντελεστής σχήματος σε ΥΗΕ ποσοτικοποιεί τις απώλειες που προκύπτουν στις μεταβάσεις στις εξής περιπτώσεις (δίνονται και αντίστοιχες σύνηθες τιμές ανά περίπτωση)²³:

²³ Πηγή: “Renewable Energy & Hydroelectric Work 8th semester, School of Civil Engineering”
A. Efstratiadis, I. Tsoukalas, G.-K. Sakki, N. Mamassis & D. Koutsoyiannis, Department of Water Resources & Environmental Engineering, NTUA, Academic year 2020-21,

Πιν. 4-2 Σημεία μετάβασης της γεωμετρίας στα επιμέρους τμήματα ενός ΥΗΕ και οι αντίστοιχες μεταβολές των τιμών του συντελεστή k

Χαρακτηρισμός μετάβασης	Τιμή συντελεστή k
Δεξαμενή υδροληψίας	$k \sim 0.04$
Έξοδος σε διώρυγα φυγής (απαγωγής)	$k \sim 1$
Εσχάρες	$k \sim 0.10-0.15$
Συστολές ($D_1 > D_2$)	$k \sim 0.08$
Γωνίες	$k \sim 0.10$
Σφαιρική βαλβίδα (πλήρως ανοιχτή)	$k \sim 0.05$
Σφαιρική βαλβίδα (1/2 ανοιχτή)	$k \sim 2.1$
Διαφραγματική βαλβίδα (πλήρως ανοιχτή)	$k \sim 2.3$
Διαφραγματική βαλβίδα (1/2 ανοιχτή)	$k \sim 4.3$
Γωνιακή βαλβίδα (πλήρως ανοιχτή)	$k \sim 2$
Συρταρωτή βαλβίδα (πλήρως ανοιχτή)	$k \sim 0.15$
Συρταρωτή βαλβίδα (1/2 ανοιχτή)	$k \sim 2.1$

Συνεπώς, οι υδραυλικές απώλειες εξαρτώνται από:

1. την παροχή που διέρχεται από τα συστήματα προσαγωγής
 2. το υλικό του αγωγού
 3. τη γήρανση του αγωγού-που περιγράφεται από το χαρακτηριστικό μέγεθος της τραχύτητας
 4. τις γεωμετρικές αλλαγές όπως οι μεταβολές της διατομής του αγωγού (στένωση ή διαπλάτυνση) και οι αλλαγές διεύθυνσης (στροφές)
 5. επιπλέον κατασκευαστικά μέσα, όπως εσχάρες απομάκρυνσης των φερτών
- **Βαθμός απόδοσης :** Ο βαθμός απόδοσης δηλώνει το πόσο διαφέρει η πραγματική ισχύς από τη θεωρητική. Η πραγματική ισχύς είναι κατά ένα ποσοστό μικρότερη της θεωρητικής και αυτό οφείλεται στις διάφορες απώλειες που συναντάει το ρευστό από την υδροληψία μέχρι και τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι απώλειες που οδηγούν στην παραπάνω μείωση είναι:
 - a. **Υδραυλικές απώλειες** (σύστημα προσαγωγής του ρευστού), δη
 - b. **Μηχανικές απώλειες**, που αφορούν το ποσό της ενέργειας που δεν κατάφερε να αξιοποιήσει ο υδροστρόβιλος και απελευθερώνεται ως κινητική ενέργεια εντός της κοίτης του ποταμού ή της δεξαμενής απαγωγής/φυγής, $c_a^2/2g$, όπου c_a^2 η ταχύτητα

εξόδου του ρευστού από τον υδροστόβιλο διαμέσου του αγωγού απαγωγής (για στροβίλου αντίδρασης)

- c. **Ηλεκτρικές απώλειες**, που αντιπροσωπεύουν τις απώλειες εντός της γεννήτριας και του μετασχηματιστή

Ο **συνολικό βαθμός απόδοσης** ισούται με το παρακάτω γινόμενο :

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{HYDR}\eta_{TUR}\eta_G\eta_{TR} = P(t)_{real} / P_{theor}$$

Όπου,

η_{HYDR} , υδραυλικές απώλειες αγωγού,

η_{TUR} , μηχανικές απώλειες στροβίλου,

$\eta_G\eta_{TR}$, ηλεκτρικές απώλειες γεννήτριας και μετασχηματιστή,

και πρόκειται για μέγεθος μικρότερο της μονάδας.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υδρομηχανές ή αλλιώς υδροστροβίλοι. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι στροβίλων που συναντώνται τόσο σε μεγάλα όσο και σε μικρά υδροηλεκτρικά, τα χαρακτηριστικά και τεχνικά μεγέθη που τους χαρακτηρίζουν, ο τρόπος λειτουργίας τους καθώς και πρόσφατες αναλύσεις που έχουν γίνει ως προς την αναπαράσταση των καμπυλών του βαθμού απόδοσης των στροβίλων μέσω της ανάπτυξης αναλυτικής φόρμουλας.

5 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΥΣ

Ο υδροστρόβιλος δεν είναι τίποτα άλλο από μια περιστροφική μηχανή, η οποία μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια (κινητική και δυναμική) σε περιστροφική (μηχανική). Η περιστροφή μεταβιβάζεται από τα πτερύγια του στροβίλου προς τον άξονα, οποίος συνδέεται με μια γεννήτρια. Έπειτα η περιστροφική αυτή κίνηση οδηγεί στη δημιουργία κατάλληλων συζευγμένων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μέσω πηνίων που βρίσκονται εντός της γεννήτριας και από εκεί μέσω ενός μετασχηματιστή, ο οποίος ανυψώνει την τάση, για μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά, η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στους χρήστες μέσω του δικτύου μεταφοράς και διανομής.

Κατά τον σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού έργου, οι υδροστρόβιλοι και ο υπόλοιπος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός που τους συνοδεύει, βρίσκονται εγκατεστημένοι στον σταθμό παραγωγής (power house). Ο σταθμός παραγωγής, ανάλογα με τον τύπο του υδροηλεκτρικού (μεγάλο ή μικρό υδροηλεκτρικό) μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες πιθανές θέσεις.

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση σε μεγάλα υδροηλεκτρικά με ταμίευση, είναι ο σταθμός παραγωγής να βρίσκεται στον πόδα του φράγματος, και ένας αγωγός σχετικά μικρού μήκους να διοχετεύει την παροχή από τον ταμιευτήρα προς τους στροβίλους. Υπό αυτές τις συνθήκες σχεδιασμού, εφόσον είναι εφικτό και αποδοτικό ενεργειακά, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες τριβής καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η μέγιστη απόδοση του έργου προβλέπεται με την επέκταση του αγωγού αρκετά κατάντη, ώστε να εκμεταλλευτεί την υψομετρική διαφορά που το ανάγλυφο του προσφέρει, καθιστώντας τη δεύτερη επιλογή ως πλέον κατάλληλη. Προφανώς, μια τέτοια διάταξη είναι οικονομικά αποδοτική μόνο όταν η κλίση του εδάφους είναι σημαντική και ικανή να υπερβαίνει τις γραμμικές απώλειες σε όλο το μήκος του αγωγού. Αυτό το σενάριο κυριαρχεί όταν πρόκειται για μικρό υδροηλεκτρικό έργο όπου η αποθήκευση είναι σπάνια ή και μικρού βαθμού.

5.2 ΤΥΠΟΙ ΣΤΡΟΒΙΩΝ

Οι στρόβιλοι που συνήθως συναντώνται στα υδροηλεκτρικά έργα, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον βαθμό αντιδράσεως (re), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της πτώσης της στατικής πίεσης στον δρομέα, προς την πτώση της στατικής πίεσης στο στάδιο του στροβίλου. Συγκεκριμένα οι υδροστρόβιλοι χωρίζονται στους:

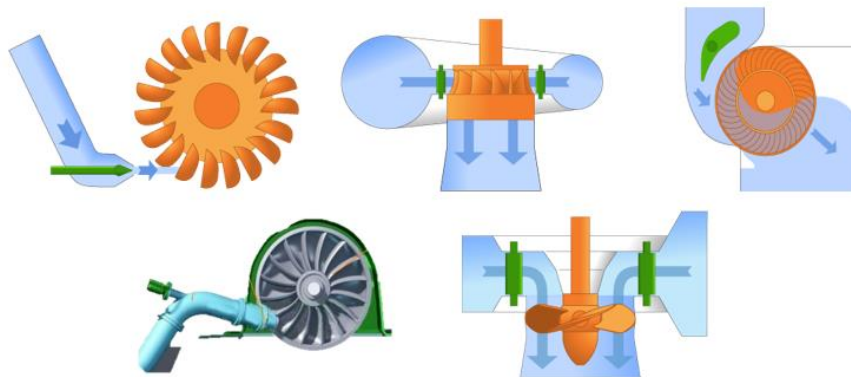
i. **δράσεως**, $re=0$, (π.χ. Pelton, Cross-flow, Turgo), οι οποίοι χαρακτηρίζονται και ως υδροστρόβιλοι μερικής προσβολής καθώς η επίδραση της προσπίπτουσας παροχής είναι μερική, ενεργοποιώντας ένα συγκεκριμένο τμήμα του δρομέα. Οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι κατάλληλοι για μεγάλα ύψη πτώσης και μικρές παροχές, ο μηχανισμός λειτουργίας τους βασίζεται στην κινητική ενέργεια που μεταφέρεται από το υγρό στα πτερύγια του δρομέα μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων ακροφυσίων.

ii. **αντιδράσεως**, $re=1$, (π.χ. Francis, Kaplan, Deriaz, Bulb), ή αλλιώς ολικής προσβολής, ο οποίος λειτουργεί υπό πίεση, καθώς ολόκληρος ο θάλαμος του δρομέα καλύπτεται από το υγρό. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως, σε αντίθεση με τους στροβίλους δράσεως, βρίσκουν εφαρμογή σε μικρότερα ύψη πτώσης με μεγαλύτερες παροχές.

Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζονται τα κύρια μηχανολογικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου στροβίλου.

Ο στρόβιλος **Pelton**, ο οποίος πρωτάθηκε από τον Αμερικανό μηχανικό Lester Allan Pelton το 1889, βασίζεται στη φιλοσοφία του παραδοσιακού νερόμυλου (overshot water wheel). Από το 1767 ήταν γνωστό ότι για να υπάρχει η μέγιστη απόδοση στην παραγωγή ισχύος, το νερό πρέπει να εισέρχεται στον τροχό με μεγάλη ορμή και να εξέρχεται με αμελητέα ταχύτητα. Σύμφωνα με την παραπάνω αρχή, ένας τροχός Pelton εξάγει πίδακες νερού υψηλής ταχύτητας, οι οποίοι αναδύονται μέσω των μπεκ (ο αριθμός τους μπορεί να κυμαίνεται από ένα έως έξι) σε ατμοσφαιρική πίεση, και χτυπούν το κέντρο του κάθε σκαφιδίου, διαχωρίζοντας έπειτα τη δέσμη του νερού σε δυο μέρη. Στη συνέχεια, οι δύο χωριστές δέσμες ρέουν κατά μήκος της εσωτερικής καμπύλης των σκαφιδίων και φεύγουν προς την αντίθετη κατεύθυνση από την οποία εισήλθαν. Ο λόγος που εντός των σκαφιδίων, η δέσμη του νερού επιλέγεται να διαχωριστεί, είναι ώστε να μπορεί το νερό να προσδώσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της κινητικής του ενέργειας στον τροχό και η ενέργεια με την οποία θα απομακρυνθεί, να είναι όσο το δυνατόν απομειωμένη.

Μέχρι το 1960, οι στρόβιλοι τύπου Pelton ήταν οριζόντιου άξονα με μέγιστο αριθμό ακροφυσίων τα δύο, στη συνέχεια οι στρόβιλοι άρχισαν να εξοπλίζονται με επιπλέον ακροφύσια, καθώς διαπιστώθηκε η βελτίωση της αποδοσής τους με την παράλληλη αύξηση του πλήθους των ακροφυσίων, ιδίως μέχρι τα έξι ακροφύσια (ώστε να μη δρουν αρνητικά στη μεταξύ τους αλληλεπίδραση).



Εικ. 5-1 Διάφοροι τύποι υδροστροβίλων, από τα αριστερά προς τα δεξιά: Pelton, Francis, Cross-Flow, Turgo, Kaplan.²⁴

Οι στρόβιλοι τύπου **Francis** υπήρξαν οι πρώτες τουρμπίνες ακτινικής ροής. Σχεδιάστηκαν από τον Αμερικάνο επιστήμονα James Francis, το 1920. Όσον αφορά τη λειτουργία του στροβίλου, το νερό εισέρχεται με υψηλή πίεση ακτινικά στην τουρμπίνα, προσπίπτοντας δηλαδή κάθετα στον άξονα περιστροφής της. Μόλις το νερό διατρέξει τον στρόβιλο, εξέρχεται από αυτόν αξονικά, δηλαδή παράλληλα με τον άξονα περιστροφής του μέσω του σωλήνα εκροής προς τη διάφυγα φυγής. Η παραπάνω διάταξη κατά την έξοδο του νερού έχει διαμορφωθεί με σκοπό τη μείωση της ταχύτητας του νερού ώστε να αξιοποιηθεί η μέγιστη ενέργεια από το νερό που εισέρχεται. Τα πτερύγια του στροβίλου Francis είναι ειδικά διαμορφωμένα, ώστε, καθώς το νερό προσπίπτει πάνω τους, να δίδεται ώθηση σε αυτά και να αρχίσουν την περιστροφή. Εκτός από τη δύναμη ώθησης, η κίνηση των πτερυγίων εξασφαλίζεται και με τη δράση- αντίδραση που προκαλείται στα πτερύγια του δρομέα από την κίνηση του νερού κατά την

²⁴ Πηγή: <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines>

είσοδο και έξοδό του από τον δρομέα. Ο στρόβιλος **Turgo** έχει παρόμοια λειτουργία με τον Pelton με κύρια διαφορά τη γωνία υπό την οποία η δέσμη προσπίπτει στον δρομέα (της τάξεως των 20°).

Στην περίπτωση των **Cross-flow** στροβίλων, το νερό διατρέχει τον στρόβιλο σε δύο φάσεις: στο άνω τμήμα του δρομέα καθώς εισέρχεται στον στρόβιλο και κάτω μέρος του στροβίλου κατά την έξοδό του. Η διέλευση του νερού από τον στρόβιλο σε δύο φάσεις, εξασφαλίζει επιπλέον απόδοση καθώς και αποτελεί ένα είδος αυτοκαθαρισμού της τουρμπίνας από τυχόν φύλλα, μικρά κλαδιά κτλ που ενδέχεται να έχουν παγιδευτεί στο εσωτερικό του δρομέα. Ακόμα ένα πλεονέκτημα των Cross-flow στροβίλων, είναι το πλατό του βαθμού απόδοσης που εξασφαλίζεται σε σημαντικά μεγάλο εύρος παροχών.

Τέλος ο στρόβιλος **Kaplan** είναι ο συνηθέστερος τύπος στροβίλου για την εξυπηρέτηση σημαντικού εύρους συνδυασμών υψηλών παροχών με χαμηλά ύψη πτώσης. Χαρακτηριστικό αυτού του στροβίλου είναι το σχήμα του που θυμίζει προπέλα. Η δέσμη του νερού εισέρχεται κατά την αξονική διεύθυνση, ώστε να μειώνεται ο συνολικός όγκος, οι υδραυλικές απώλειες και το αντίστοιχο κόστος του έργου. Άλλοι γνωστοί τύποι στροβίλων με μορφή προπέλας είναι ο Bulb, ο Straflo, ο S-type Kaplan και ο Deriaz. Καθένας από αυτούς έχει διαφορετικό εύρος λειτουργίας και η εκάστοτε επιλογή τους ποικίλει ανάλογα με την αντίστοιχη θέση εφαρμογής. Παραπάνω στην εικόνα, **Εικ. 5-1**, παρουσιάζονται σχηματικά διάφοροι τύποι στροβίλων.

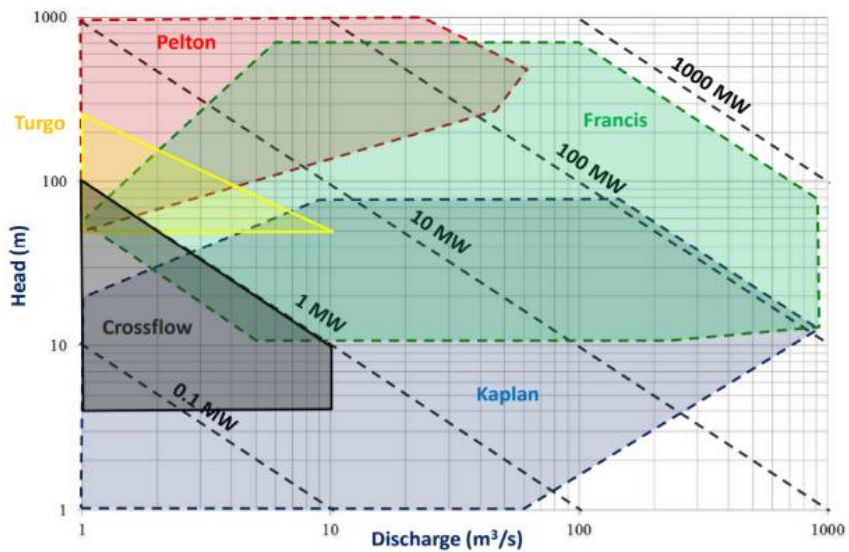
5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος στροβίλου για μια δεδομένη θέση εγκατάστασης, η οποία εκμεταλλεύεται το υδατικό δυναμικό ενός ποταμού, είναι απαραίτητη η γνώση δυο βασικών μεταβλητών, του υψόμετρου H (Head) και της παροχής σχεδιασμού Q (Discharge). Η πρώτη μεταβλητή εξαρτάται από το ανάγλυφο της περιοχής και είναι το σχετικό μέγεθος από το σημείο υδροληψίας έως τον σταθμό παραγωγής. Η δεύτερη μεταβλητή εξαρτάται από τη δυναμικότητα του ποταμού και το ύψος από το οποίο γίνεται η υδροληψία, καθώς όσο πιο κατάντη γίνεται, τόσο μεγαλύτερη παροχή μπορεί να ρέει (αλλά με μείωση του διαθέσιμου υψόμετρου). Τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν από την επεξεργασία της γεωγραφικής θέσης της περιοχής σχεδιασμού και από την ανάλυση των ιστορικών δεδομένων παροχής, επιλέγοντας την παροχή σχεδιασμού, που συνήθως είναι ένα νούμερο κοντά στην παροχή με 50-60% πιθανότητα εμφάνισης τον χρόνο.

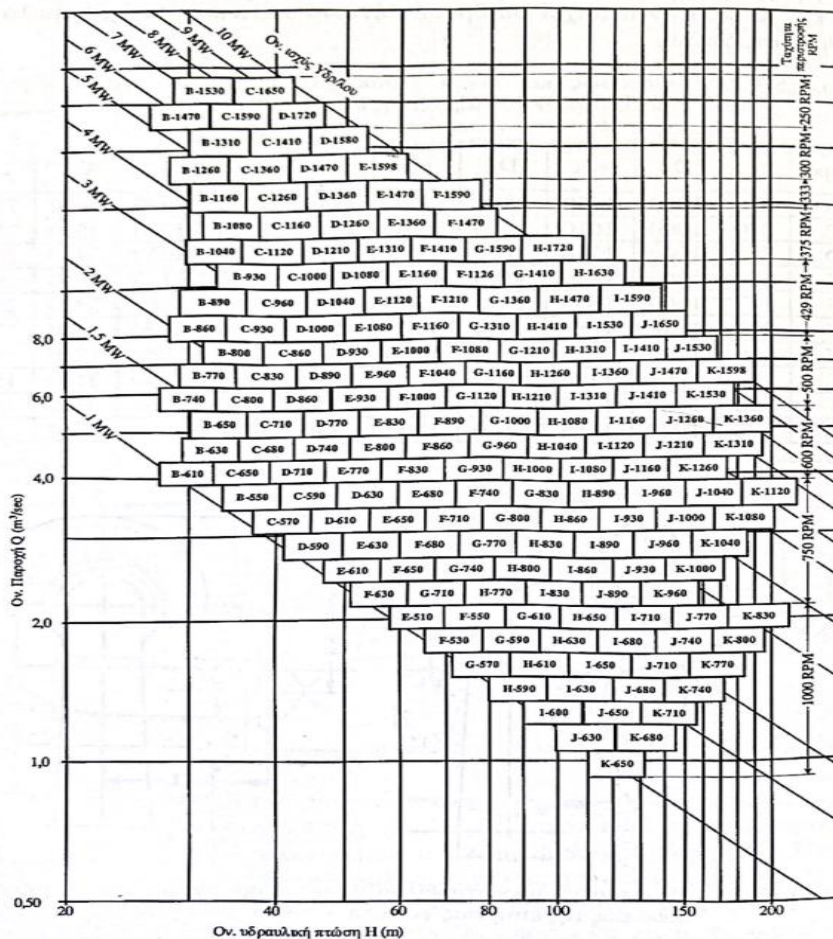
Αφότου εκτιμηθούν τα παραπάνω μεγέθη, χρησιμοποιούνται διαγράμματα σαν αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα **Εικ. 5-2**, στο οποίο συσχετίζει την παροχή και το ύψος πτώσης με το κατάλληλο τύπο στροβίλου προς εφαρμογή. Σύμφωνα με το γράφημα της παραπάνω εικόνας, για μικρές τιμές παροχών συνοδευόμενες από μεγάλα ύψη πτώσης, επιλέγονται οι στρόβιλοι δράσεως (π.χ. Pelton). Από την άλλη, οι στρόβιλοι αντιδράσεως (π.χ. Francis) βρίσκουν εφαρμογή σε μεγαλύτερο εύρος παροχών, για μικρότερα ύψη πτώσης. Οι στρόβιλοι τύπου προπέλας (π.χ. Kaplan), είναι κατάλληλοι σε κοινά εύρη παροχών με τους αντιδράσεως, αλλά για ακόμα μικρότερα ύψη πτώσης. Στην περίπτωση που το ύψος πτώσης και η παροχή σχεδιασμού ικανοποιούνται από παραπάνω από ένα στρόβιλο, η τελική επιλογή του τύπου του στροβίλου επηρεάζεται από επιμέρους παραμέτρους. Για παράδειγμα από τη διακύμανση που σημειώνει η παροχή μέσα στο έτος, από οικονομοτεχνικές παραμέτρους σχεδιασμού, από την εκάστοτε τεχνογνωσία, καθώς και από τη διαθεσιμότητα του αντίστοιχου στροβίλου στην αγορά.

Στη συνέχεια αφότου βρεθεί ο βέλτιστος τύπος στροβίλου, προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο που η βιομηχανία έχει προς διάθεση, αξιοποιούνται κατάλληλα διαγράμματα που οι ίδιοι οι κατασκευαστές προσκομίζουν. Ένα τέτοιο γράφημα της εταιρείας Toshiba παρουσιάζεται παρακάτω, στην εικόνα, **Εικ. 5-3** στο οποίο ανάλογα με τον συνδυασμό της ονομαστικής υδραυλικής πτώσης H και

της ονομαστικής παροχής Q , προτείνεται το βέλτιστο μοντέλο από τους τυποποιημένους στροβίλους Francis οριζόντιου άξονα, σπειροειδούς κελύφους που είναι κατασκευαστικά διαθέσιμοι.



Εικ. 5-2 Διάγραμμα επιλογής τύπου υδροστροβίλου συναρτήσει του ύψους πτώσης H (m) και της παροχής Q (m^3/s)²³



Εικ. 5-3 Διαγράμματα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων στροβίλων Francis οριζώντιου άξονα, σπειροειδούς κελύφους²⁵

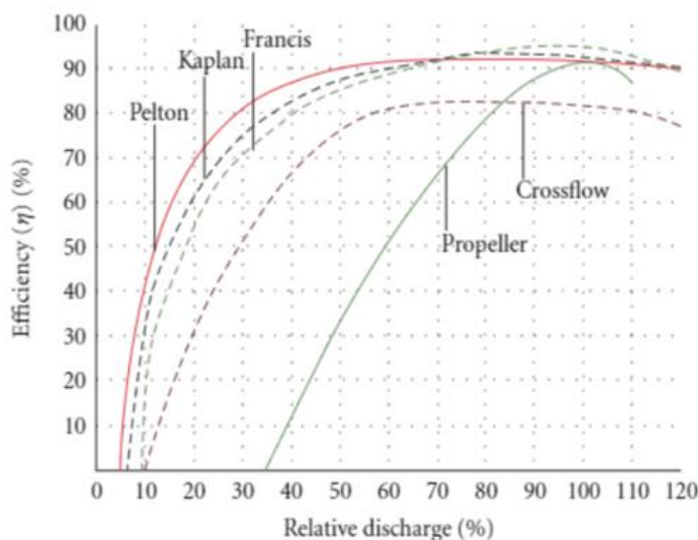
5.4 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Ο ολικός βαθμός απόδοσης ενός στροβίλου η_T , ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ισχύος από τον στρόβιλο, προς την ισχύ που εισήλθε στον στρόβιλο. Ο βαθμός απόδοσης είναι πάντοτε μικρότερος από τη μονάδα, λόγω των απωλειών εντός της τουρμπίνας. Ανάλογα με τον τύπο του στροβίλου, η καμπύλη του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της παροχής ποικίλει (βλ Εικ. 5-4). Συνήθη εύρη στα οποία κυμαίνεται ο βαθμός απόδοσης από την ελάχιστη έως τη μέγιστη παροχή είναι 80-95%.

Όπως προαναφέρθηκε, ο βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται συναρτήσει της διερχόμενης παροχής και μάλιστα μη γραμμικά. Όταν το ύψος πτώσης δεν είναι σταθερό, ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται και από αυτό το μέγεθος. Η μη γραμμική σχέση μεταξύ του βαθμού απόδοσης και της παροχής εκφράζεται με τις καμπύλες του βαθμού απόδοσης σε αντίστοιχα διαγράμματα, όπως στην εικόνα, Εικ. 5-4, και παρέχονται από τους κατασκευαστές. Συγκεκριμένα, στο παρακάτω γράφημα συσχετίζεται ο βαθμός απόδοσης

²⁵ Πηγή : Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα, Αθήνα 2016, Εκδόσεις Τσότρας, Σχήμα 5.33, σελ.248

διαφόρων τύπων στροβίλων $\eta(\%)$, με τον λόγο της διερχόμενης παροχής προς την ονομαστική παροχή q/q_{nom} .



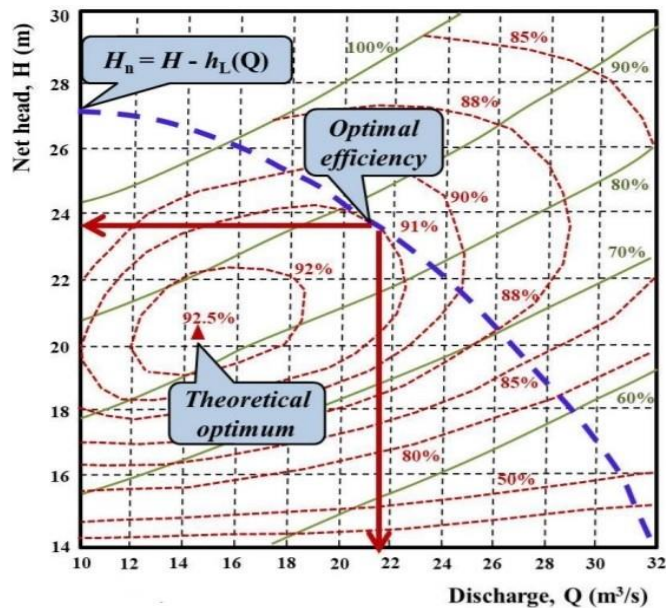
Εικ. 5-4 Τυπικές καμπύλες βαθμού απόδοσης συναρτήσει του λόγου παροχής/ ονομαστική παροχή, για διάφορους τύπους στροβίλου²⁶

Τυπικά εύρη βαθμού απόδοσης ανά τύπο στροβίλου παρουσιάζονται και στον παρακάτω πίνακα, **Πιν. 5-1**. Όπως γίνεται εμφανές από την εικόνα, **Εικ. 5-4**, οι στροβίλοι τύπου Pelton, Kaplan και Cross-flow, είναι ικανοί να λειτουργήσουν με τον ονομαστικό βαθμό απόδοσής τους (τον μέγιστο δηλαδή) σε μεγάλο εύρος παροχών, σε αντίθεση με τους στροβίλους τύπου Francis και Propeller. Οι στροβίλοι Pelton πετυχαίνουν την παραπάνω απόδοση καθώς μπορούν να διατηρούν σταθερή την ταχύτητα με την οποία η δέσμη του νερού προσκρούει τα σκαφίδια, με τους ελιγμούς της βελόνας εντός των μπεκ. Επιπλέον οι στροβίλοι Kaplan, υπερέχουν από τους στροβίλους Propeller, εξαιτίας της ικανότητας του να ρυθμίζει τη γωνία του οδηγών πτερυγίων με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Οι Cross-flow στροβίλοι, λειτουργούν σε μεγάλο εύρος q/q_{nom} με μέγιστη απόδοση, αλλά δεν μπορούν να ξεπεράσουν τους Pelton, λόγω του υψηλότερου επιπέδου απόδοσης που οι τελευταίοι επιτυγχάνουν.

²⁶Πηγή : Chiyembekezo S. Kaunda, Cuthbert Z. Kimambo, Torbjørn K Nielsen *Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa*, DOI: 10.5402/2012/132606

Πιν. 5-1 Τυπικά εύρη βαθμού απόδοσης για διάφορους τύπους στροβίλων

Τύπος στροβίλου	Βαθμός απόδοσης
Pelton	0.880-0.920
Cross-flow	0.800-0.840
Turgo	0.800-0.870
Francis	0.910-0.945
Deriaz	0.910-0.940
Kaplan	0.910-0.945
Bulb	0.900-0.940



Εικ. 5-5 Παράδειγμα εύρεσης βέλτιστου βαθμού απόδοσης, δεδομένου του καθαρού ύψους πτώσης και της ονομαστικής παροχής²³

Ο μέγιστος και ο ελάχιστος βαθμός απόδοσης ενός στροβίλου εξαρτάται από τον τύπο του στροβίλου, το μέγεθος και τα κριτήρια σχεδιασμού του εκάστοτε κατασκευαστή. Συγκεκριμένα, για τους στροβίλους δράσεως (π.χ. Pelton, Cross Flow) το μέγεθος δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα εύρη του βαθμού απόδοσης, και για αυτό θεωρούνται σταθερά. Από την άλλη, στους στροβίλους αντιδράσεως (π.χ. Francis, Kaplan) κυμαίνεται ανάλογα την ονομαστική τους ισχύ και δεν μπορεί να θεωρηθούν σταθερά εύρη εμφάνισης.

Παραπάνω στην εικόνα, **Εικ. 5-5** παρουσιάζεται ένα γράφημα γνωστό και ως hill chart, στο οποίο εκφράζεται η σχέση μεταξύ του καθαρού ύψους πτώσης, της ονομαστικής παροχής και των ισουψών

καμπυλών του βαθμού απόδοσης. Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από το σημείο τομής των (Discharge, Net Head) και της ισουψούς.

5.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΥΡΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Όπως γίνεται εμφανές και από το παραπάνω διάγραμμα της τυπικής καμπύλης απόδοσης στην εικόνα, **Εικ. 5-4**, κάθε στρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει σε ένα συγκεκριμένο εύρος παροχών. Ανάλογα με τον εκάστοτε τύπο στρόβιλου, ενέργεια μπορεί να παραχθεί μόνο για το εύρος παροχών που βρίσκονται ανάμεσα στην ελάχιστη, q_{min} , και τη μέγιστη, q_{max} παροχή. Η ονομαστική παροχή του στρόβιλου, q_{nom} , ορίζεται ως η παροχή του στρόβιλου στην οποία μεγιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης, και δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q_{nom} = P / \gamma \eta_{max} h_n \quad (\text{Εξ.5})$$

Όπου:

η_{max} , ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που μπορεί να λειτουργήσει ο στρόβιλος,

γ , το ειδικό βάρος του νερού (9.81 KN/m³),

h_n , το καθαρό ύψος πτώσης (m), το οποίο ισούται με το ύψος πτώσης αν αφαιρεθούν οι υδραυλικές απώλειες (γραμμικές και τοπικές) που εξαρτώνται από τη διερχόμενη παροχή και τα χαρακτηριστικά του αγωγού (τραχύτητα, μήκος, διάμετρος, γεωμετρικές μεταβολές).

Η ελάχιστη παροχή λειτουργίας του υδροστρόβιλου εξαρτάται από τον τύπο της εκάστοτε τουρμπίνας αλλά και από τον κατασκευαστή. Εκφράζεται ως ένα ποσοστό της ονομαστικής παροχής, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$q_{min} = \theta q_{nom} \quad (\text{Εξ.6})$$

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή θ , ανά τύπο στρόβιλου παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα **Πίν. 5-1**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ονομαστική παροχή, q_{nom} που αναφέρθηκε παραπάνω (Εξ.5) δεν αποτελεί αναγκαστικά και τη μέγιστη παροχή, q_{max} . Αντιθέτως, ο στρόβιλος είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί και για παροχές μεγαλύτερες από την ονομαστική, περίπου 15% παραπάνω. Ανάλογα τον τύπο στρόβιλου, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να μειώνεται έντονα ή πιο ομαλά έως και ελάχιστα, καθώς οι παροχές αυξάνονται από την ονομαστική προς τη μέγιστη.

Μερικά τυπικά εύρη στα οποία κυμαίνονται τα μεγέθη, q_{nom} , q_{max} και q_{min} παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα **Πίν. 5-2**.

Πιν. 5-2 Τυπικές τιμές των λόγων q_{min}/q_{nom} και q_{max}/q_{nom} για διάφορους τύπους στροβίλων

Τύπος Τουρμπίνας	q_{min}/q_{nom}	q_{max}/q_{nom}
Pelton	0.1087	1.15
Francis	0.5	1.15
Cross Flow	0.285	1.15
Kaplan	0.1242	1.15

5.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Μια πιο ευέλικτη και αποδοτική μέθοδος καθορισμού του βαθμού απόδοσης, μπορεί να σχηματιστεί αν εκμεταλλευόμενοι δειγματικές τιμές του ζεύγους (q, η_T) , εξαχθεί η καμπύλη απόδοσης που επαληθεύει τις παραπάνω τιμές μέσω τις βοήθειας σταθερών παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο σε κάθε βήμα, για κάθε παροχή θα είναι εφικτός ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης με την εφαρμογή μιας μαθηματικής αναλυτικής σχέσης. Η παραπάνω μέθοδος παρουσιάστηκε από τη Sakki (2020)²⁷ και Sakki et al. (2021)²⁸. Στην παρακάτω φόρμουλα, οι παράμετροι a και b είναι θετικές παράμετροι σχήματος οι οποίες σε συμφωνία με τις ανάλογες μεταβλητές η_{max} και η_{min} καθιστούν δυνατή τη διαμόρφωση της καμπύλης του βαθμού απόδοσης από δειγματοληπτικές τιμές (q, η_T) .

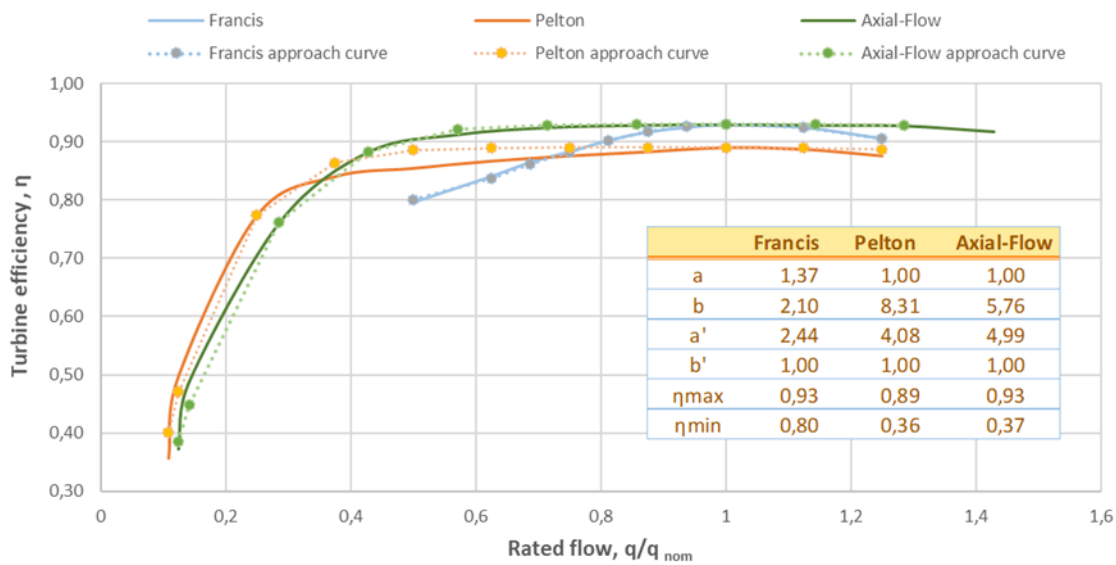
$$\eta_T = \eta_{min} + \left(1 - \left(1 - \left(\frac{q}{q_{nom}} - \theta \right)^a \right)^b \right) (\eta_{max} - \eta_{min}) \quad (\text{Εξ.7})$$

Η παραπάνω φόρμουλα βοηθάει στον καθορισμό της σχέσης μεταξύ του βαθμού απόδοσης του στροβίλου, η_T και της παροχής q , λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τα χαρακτηριστικά του στροβίλου ως προς το μέγεθος και τον τύπο $(\eta_{max}, \eta_{min}, \theta, a, b)$. Το κατώτερο όριο της παραπάνω σχέσης (Εξ.7) είναι (q_{min}, η_{min}) , ενώ το ανώτερο (q_{nom}, η_{max}) .

Στο παρακάτω διάγραμμα, στην εικονά **Εικ. 5-6**, παρουσιάζονται τρεις διαφορετικοί τύποι στροβίλων και οι καμπύλες του βαθμού απόδοσής τους, σύμφωνα με τον κατασκευαστή (συνεχόμενες γραμμές). Στο ίδιο γράφημα παρουσιάζονται και οι τρεις προσεγγίσεις κάθε μίας από τις παραπάνω καμπύλες (με διακεκομμένες) από την εφαρμογή της αναλυτικής φόρμουλας (Εξ.7) με τις εκάστοτε παραμέτρους σχήματος.

²⁷ Πηγή : Sakki, G.-K., Tsoukalas, I., and Efstratiadis, A.: A reverse engineering approach across small hydropower plants: a hidden treasure of hydrological data?, Hydrol. Sci. J., <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2000992>, 2021a.

²⁸ Πηγή : Sakki, G.-K., Tsoukalas, I., P. Kossieris, and Efstratiadis, A.: A dilemma of small hydropower plants: Design with uncertainty or uncertainty within design?, EGU General Assembly 2021, online, EGU21-2398, European Geosciences Union, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2398>, 2021b



Εικ. 5-6 Βαθμός απόδοσης στροβίλου αναλυτικής φόρμουλας(διακεκομμένες γραμμές) και από κατασκευαστές (συνεχόμενες γραμμές), συναρτήσει του λόγου παροχής προς ονομαστικής παροχής, για διάφορους τύπους στροβίλου

Μετά από την αναλυτική περιγραφή της υδροηλεκτρικής ενέργειας, των υδροστροβίλων, του ρόλου της αποθήκευσης καθώς και της σημασίας της ανάπτυξης έργων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, παρουσιάζεται στη συνέχεια το Case Study της παρούσας εργασίας, στο οποίο μελετάται, για ένα μικρό run-off-river Υδροηλεκτρικό της Θεσσαλίας, το όφελος ενδεχόμενης αποθήκευσης μέρους του διερχόμενου υδατικού δυναμικού, το οποίο υπό την υφιστάμενη λειτουργία του φεύγει αναξιοποίητο.

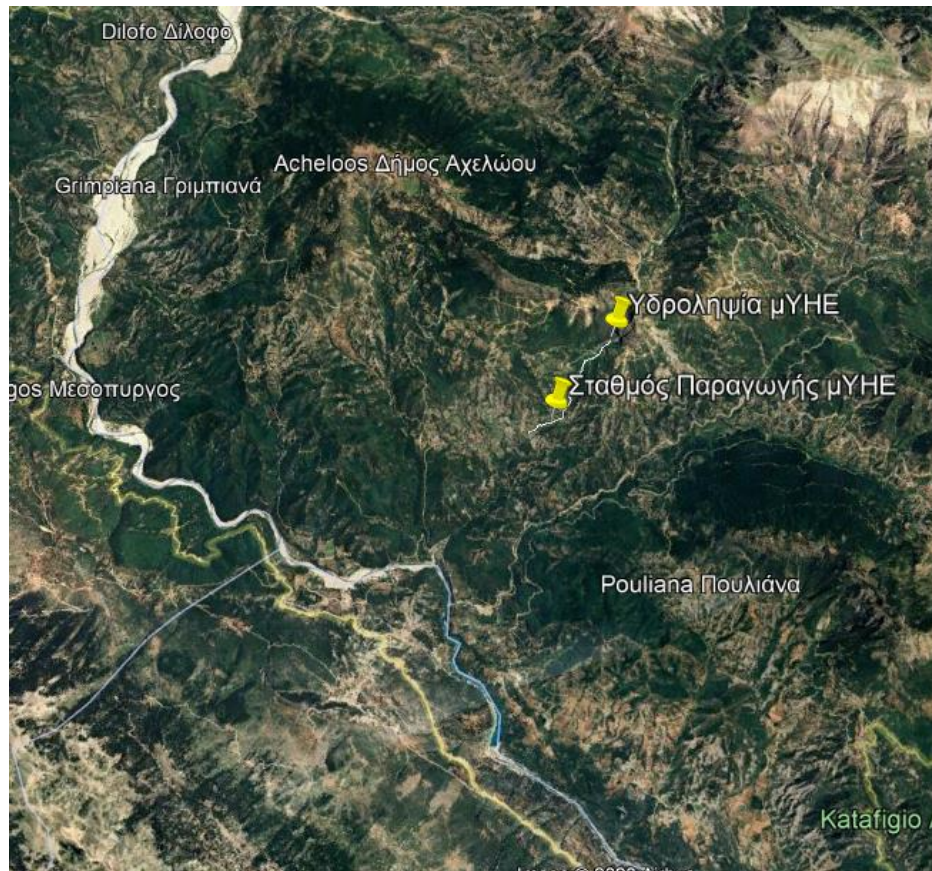
6 CASE STUDY: ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΜΙΚΡΟ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ

6.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

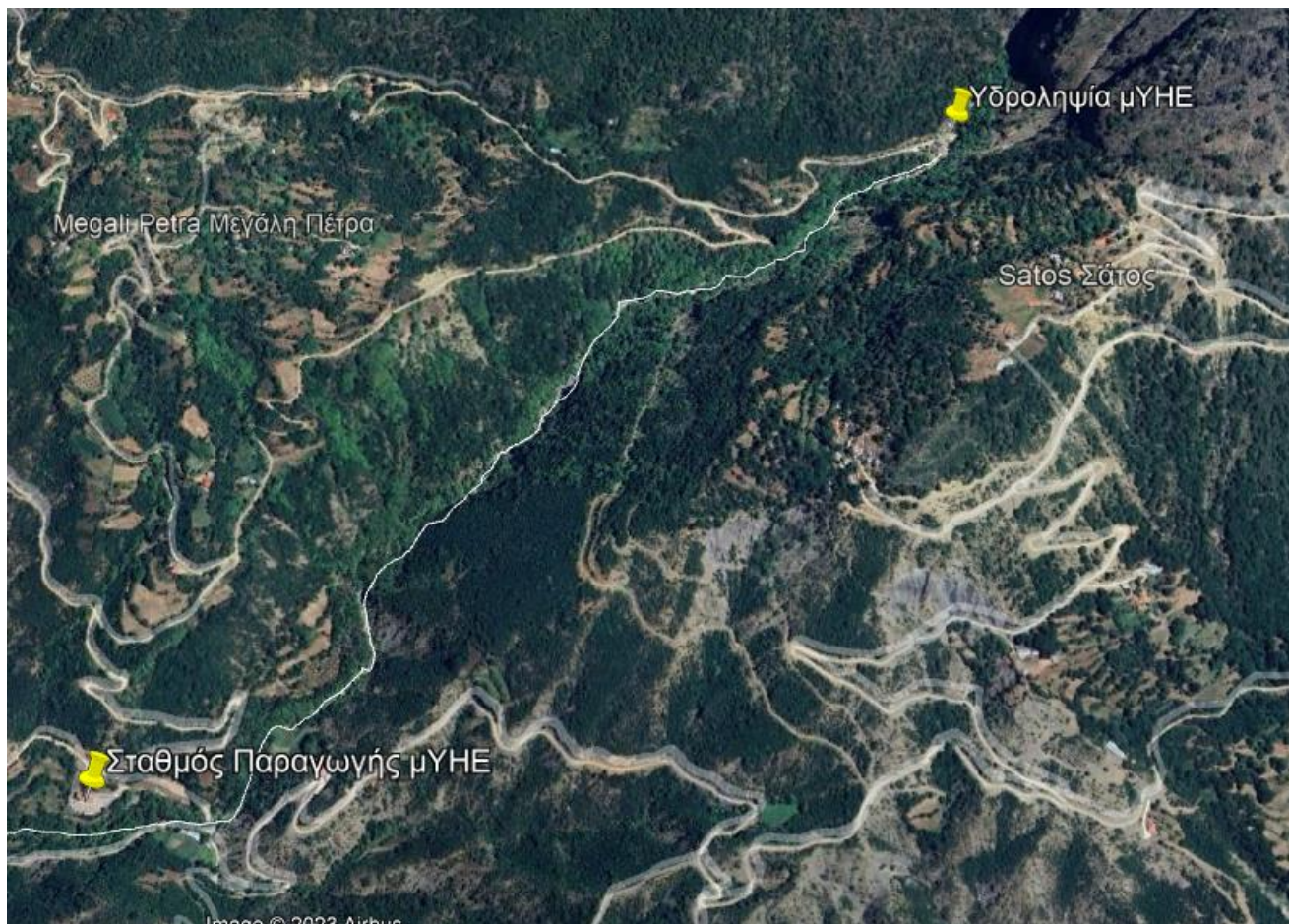
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε υφιστάμενο run-off-river μικρό Υδροηλεκτρικό στο Δήμο Αργιθέας, στην περιφερειακή ενότητα Καρδίτσα. Το μικρό υδροηλεκτρικό εκμεταλλεύεται το υδάτινο δυναμικό ενός παραπόταμου του Αχελώου, του ποταμού Πλατανιά. Το εν λόγω υδροηλεκτρικό έργο απαρτίζεται από τις παρακάτω εγκαταστάσεις:

1. Φράγμα
2. Αυτόματες Εσχάρες καθαρισμού
3. Εξαμμωτές
4. Δεξαμενή φόρτισης
5. Αγωγό
6. Σταθμό Παραγωγής
7. Διώρυγα φυγής

Παρακάτω στις εικόνες **Εικ. 6-1**, **Εικ. 6-2**, **Εικ. 6-3** και **Εικ. 6-4** παρουσιάζονται από το περιβάλλον Google Earth, η σχετική γεωγραφική θέση του υδροηλεκτρικού, η εγκατάσταση της υδροληψίας, του φράγματος και της εισόδου του αγωγού καθώς και ο σταθμός παραγωγής. Επιπλέον στον πίνακα, **Πιν. 6-1**, καταγράφονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των παραπάνω εγκαταστάσεων.



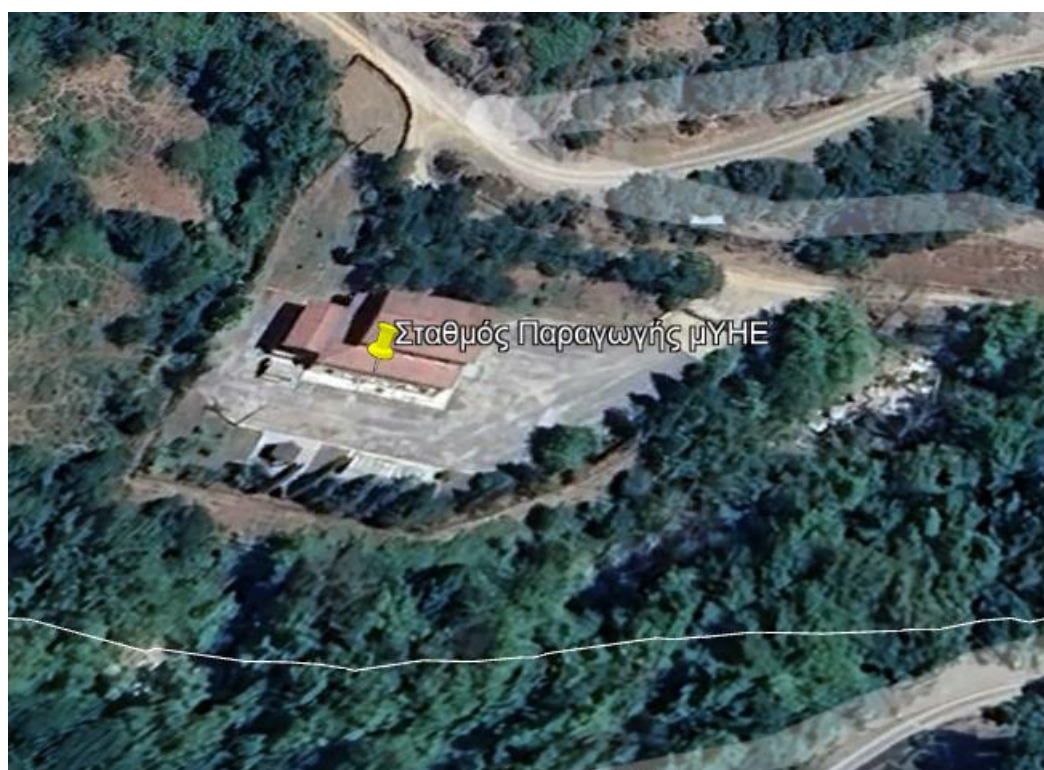
Εικ. 6-1 Κάτοψη μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου συγκριτικά με τον ποταμό Αχελώο



Εικ. 6-2 Κάτοψη μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου



Εικ. 6-3 Θέση υδροληψίας, φράγματος και είσοδος αγωγού μΥΗΕ



Εικ. 6-4 Θέση σταθμού παραγωγής μΥΗΕ

Πιν. 6-1 Γεωγραφικές συντεταγμένες εγκαταστάσεων μΥΗΕ

Εγκατάσταση	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Υψόμετρο
Φράγμα	39°11'04.3''	021°26'22.6''	698 m
Είσοδος αγωγού	39°11'03.9''	021°26'21.0''	
Σταθμός Παραγωγής	39°10'39.8''	021°25'28.9''	388 m

6.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ

Το υφιστάμενο μΥΗΕ αποτελείται από έναν στρόβιλο τύπου Pelton ονομαστικής παροχής 6.904 MW, με 6 ακροφύσια. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της υδροληψίας και του σταθμού παραγωγής ισούται με 310 m, ενώ το καθαρό ύψος πτώσης λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες έχει θεωρηθεί 300 m. Η ελάχιστη παροχή από την οποία και πέρα μπορεί να παράγει ενέργεια ο στρόβιλος ισούται με 0.27 m³/s, ενώ η μέγιστη παροχή πέρα από την οποία ο στρόβιλος δεν μπορεί να δώσει παραπάνω ισχύ, είναι 2.4 m³/s.

Επιπλέον, περιλαμβάνει μια σύγχρονη γεννήτρια με ονομαστική φαινόμενη ισχύ 7,893 kVA, ονομαστική ενεργό ισχύ 6,709 kW, συχνότητα 50 Hz και επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0.85. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας προέκυψε ως μέσος όρος των τιμών που δίνονται από τον κατασκευαστή (Πιν. 6-1), και ίσος με 0.9618. Ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή θεωρήθηκε επίσης σταθερός και ίσος με 0.99. Παρακάτω στους πίνακες Πιν. 6-2 και Πιν. 6-3 δίνονται ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου καθώς και του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος. Αξιοποιώντας τις εν λόγω χαρακτηριστικές τιμές του συνολικού βαθμού απόδοσης, προκύπτει μια αναλυτική σχέση συναρτήσεως της εκάστοτε αξιοποιήσιμης παροχής, όπως παρουσιάζεται στο γράφημα στην Εικ. 6-5.

Πιν. 6-2 Βαθμός απόδοσης στροβίλου συναρτήσει της παροχής

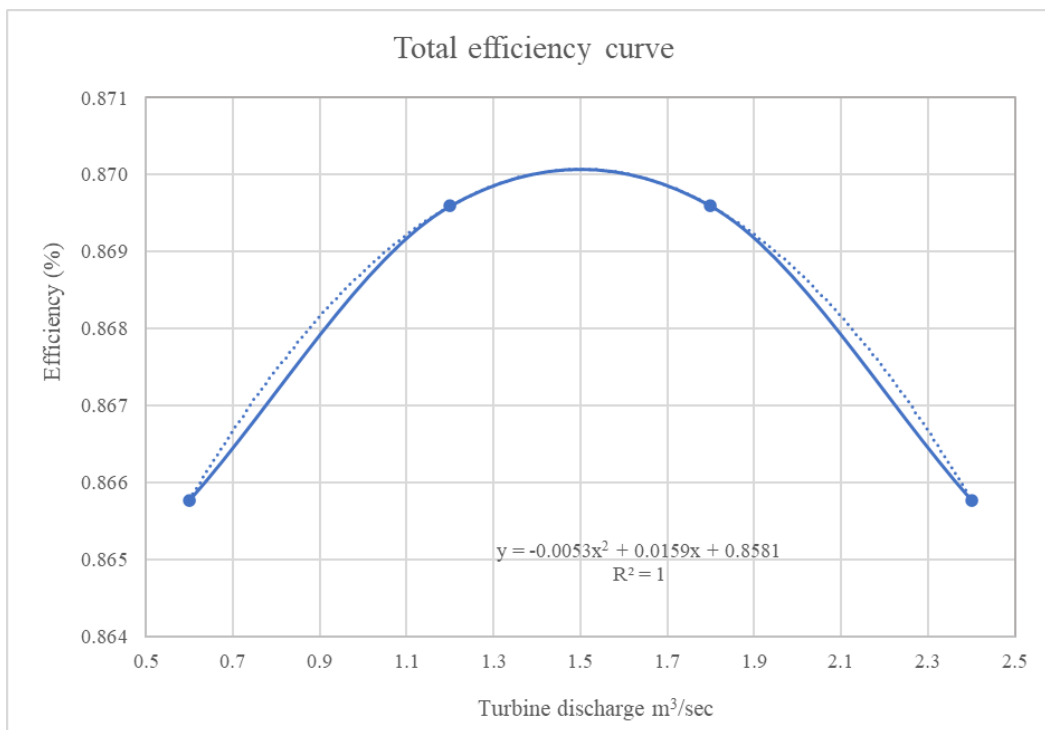
Q (m ³ /sec)	Βαθμός απόδοσης στροβίλου
2.4	0.906
1.8	0.91
1.2	0.91
0.6	0.906

Πιν. 6-3 Βαθμός απόδοσης γεννήτριας για συντελεστές ισχύος cosφ 1 και 0.85

Ποσοστό Ονομαστικής ισχύος εξόδου	Βαθμός απόδοσης γεννήτριας για επαγωγικό Cos φ= 1.0	Βαθμός απόδοσης γεννήτριας για επαγωγικό Cos φ = 0.85
100 %	97.80%	97.30%
75 %	97.50%	97.10%
50 %	96.70%	96.40%
25 %	94.10%	93.90%

Πιν. 6-4 Συνολικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της παροχής

Q (m ³ /sec)	Συνολικός βαθμός απόδοσης
2.4	86.6%
1.8	87.0%
1.2	87.0%
0.6	86.6%



Εικ. 6-5 Καμπύλη ολικού βαθμού απόδοσης και αναλυτική σχέση

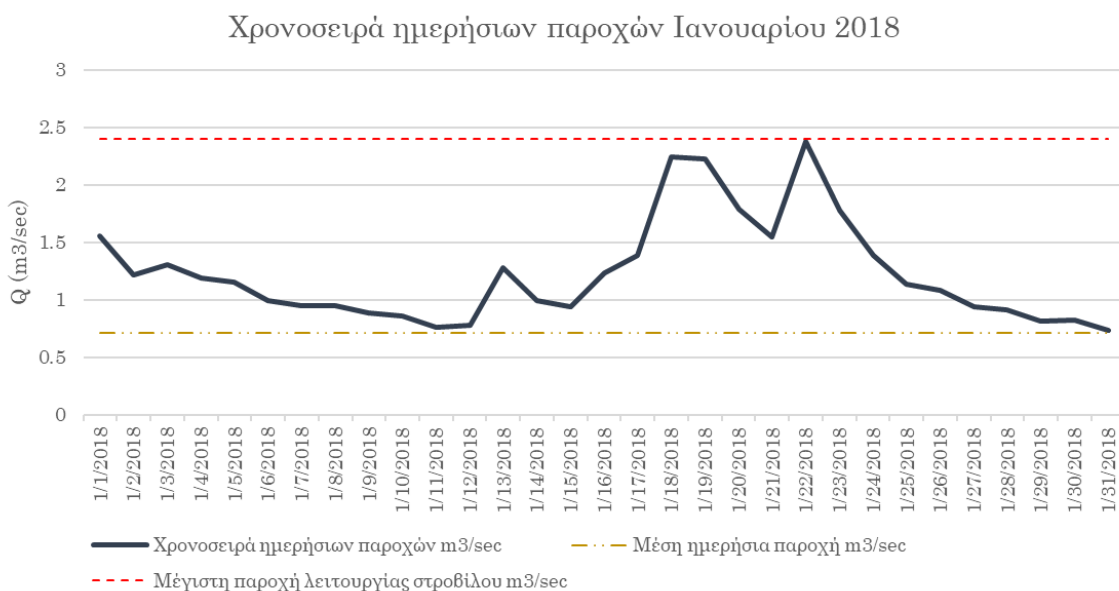
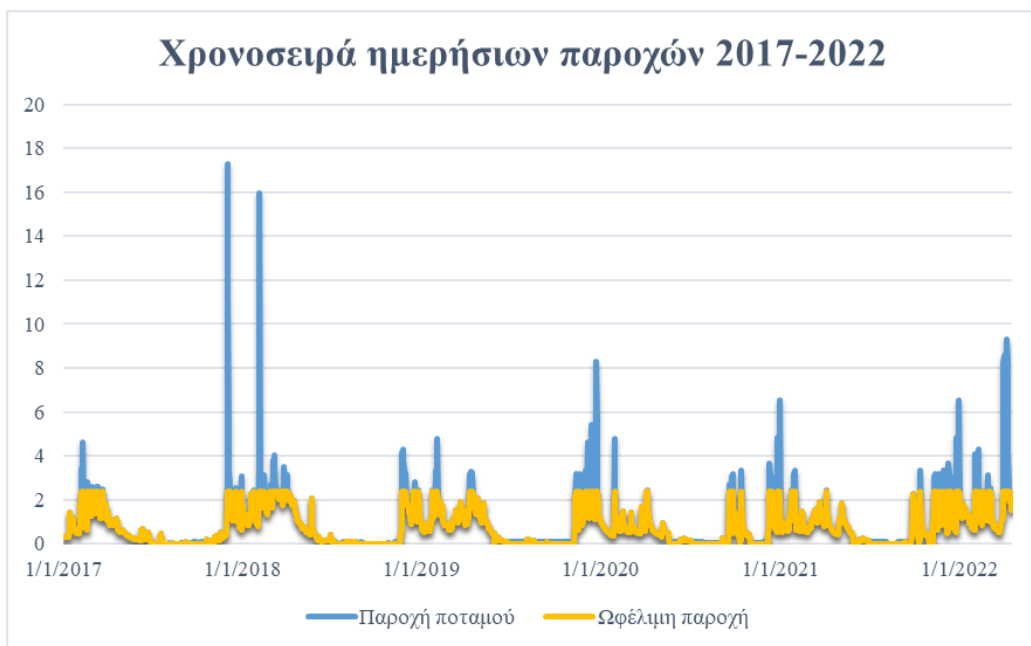
6.3 ΙΣΤΟΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Για το υδροηλεκτρικό υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μηνιαίων παροχών από τον Μάρτιο του 2011 μέχρι και το 2022, **Εικ. 6-6**. Το πρώτο έτος η εγκατάσταση λειτούργησε με περιορισμένη απόδοση καθώς βρισκόταν σε μεταβατικό στάδιο. Εκτός από τις μηνιαίες παροχές, καταγεγραμμένες υπήρχαν και οι ημερήσιες παροχές από το έτος 2017 και μετά, οι οποίες και αξιοποιήθηκαν από την εν λόγω εργασία καθώς το μικρότερο βήμα των δεδομένων διευκολύνει τη διακριτοποίηση των τιμών σε ωριαίες, που απαιτείται για την ανάλυση που εφαρμόζεται παρακάτω. Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 13.6 GWh.

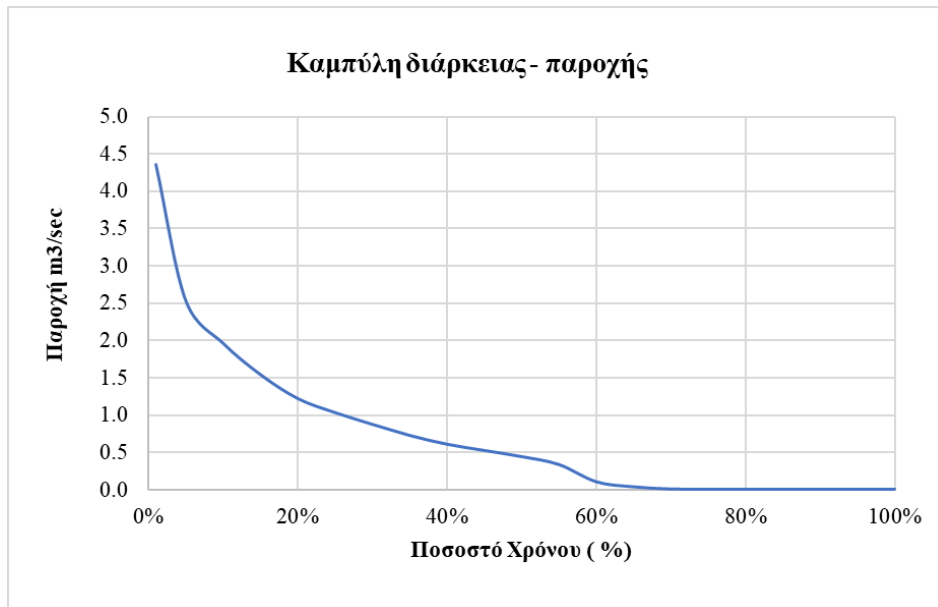


Εικ. 6-6 Γράφημα παραγωγής ενέργειας μΥΗΕ για τα έτη 2011-2022

Από τις διαθέσιμες καταγραφές των ημερήσιων παροχών (2017-2022) προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα που παρουσιάζονται στις εικόνες, **Εικ. 6-7** και **Εικ. 6-8**. Συγκεκριμένα στην εικόνα, **Εικ. 6-7** φαίνεται η χρονοσειρά ημερήσιων παροχών για τα έτη 2017 έως και 2022 και του μήνα Ιανουαρίου 2018, καθώς και επισημαίνονται αξιοποιήσιμες παροχές από την εγκατάσταση των στροβίλων σύμφωνα με το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας τους. Στην εικόνα, **Εικ. 6-8**, φαίνεται το γράφημα της καμπύλης διάρκειας παροχής, από το οποίο προκύπτει ότι το 50% του χρόνου η παροχή που μπορεί να αξιοποιήσει το μΥΗΕ είναι λίγο μεγαλύτερη από 0.5 m³/sec.



Εικ. 6-7 Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών ποταμού και ωφέλιμων παροχών για τα έτη 2017-2022 (επάνω), Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών ποταμού του μήνα Ιανουαρίου 2018 και εύρη λειτουργίας στροβίλου (κάτω)



Εικ. 6-8 Καμπύλη διάρκειας παροχής

Στη συνέχεια στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας σύμφωνα με τον οποίο λειτουργεί η δεξαμενή αποθήκευσης σε συνεργασία με τον στρόβιλο για τη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον αναλύονται οι παραδοχές και οι οριακές συνθήκες υπό τις οποίες το πρόγραμμα λειτουργήσει.

7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

7.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει πως η προσθήκη ταμίευσης σε ένα υφιστάμενο μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο μπορεί να αυξήσει το όφελος του σε παραγωγή ενέργειας. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα σε αντίθεση με τα μεγάλα, δεν διατηρούν σταθερή τη διερχόμενη παροχή από τους στροβίλους, καθώς εκμεταλλεύονται τη διερχόμενη παροχή χωρίς να υπάρχει κάποιος τρόπος ρύθμισής της. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω λειτουργίας τους, οι παροχές οι οποίες είναι μικρότερες από το q_{min} , χάνονται αναξιοποίητες, καθώς για αυτές τις τιμές οι στροβίλοι δεν μπορούν να παράγουν ενέργεια. Το ίδιο συμβαίνει και για τις παροχές που είναι μεγαλύτερες του q_{max} , όπου η διαφορά ($q_t - q_{max}$) δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και να προσφέρει παραπάνω ισχύ. Στην περίπτωση που σε ένα μΥΗΕ προστεθεί μια δεξαμενή αποθήκευσης ημερήσιας ρύθμισης, θα μπορούν να αποθηκεύονται οι παραπάνω ποσότητες που υπό άλλες συνθήκες θα χανόντουσαν. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να ελέγχεται η παροχή που περνάει στους στροβίλους με σκοπό την εξασφάλιση της ονομαστικής παροχής κατά το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα.

7.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Όπως έχει αναλυθεί και στο **Κεφάλαιο 6**, το υφιστάμενο μικρό Υδροηλεκτρικό έργο το οποίο εξετάστηκε βρίσκεται στον ποταμό Πλατανιά, στην περιοχή της Καρδίτσας. Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για την παραπάνω ανάλυση είναι οι ημερήσιες καταγραφές παροχών για τα έτη 2017 έως και 2021. Από τις ημερήσιες καταγραφές παροχών αφαιρέθηκε το ποσοστό της περιβαλλοντικής παροχής, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το ωφέλιμο μέρος της παροχής για τους επόμενους υπολογισμούς. Η περιβαλλοντική παροχή λήφθηκε υπόψη ως η μέγιστη τιμή των τριών παρακάτω μεγεθών:

1. 30% της μέσης παροχής των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου,
2. 50% της μέσης παροχής του Σεπτεμβρίου,
3. 30 lt/sec,

Τα ημερήσια δεδομένα για την περίοδο 2017 έως 2021, έδωσαν ως μέγιστη τιμή, και άρα ως περιβαλλοντική παροχή, το 50% της μέσης παροχής του Σεπτεμβρίου, η οποία ισούται με $0.1492 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Οι ημερήσιες παροχές, q_t , διακριτοποιήθηκαν σε ωριαίες θεωρώντας πως κατά τη διάρκεια του 24ώρου οι παροχές ανάμεσα σε δύο ημέρες μεταβάλλονται γραμμικά. Το ωριαίο βήμα ήταν προτιμότερο για τη συγκεκριμένη ανάλυση, καθώς η ρύθμιση της δεξαμενής αποθήκευσης σε ημερήσια βάση και ο καθορισμός του όγκου της, απαιτεί τα δεδομένα εισόδου να είναι τουλάχιστον κατά μια χρονική τάξη μικρότερα. Αξιοποιώντας τις ωριαίες παροχές δημιουργήθηκε αλγόριθμος, ο οποίος εξετάζει διάφορα σενάρια (Sc_i) όγκου δεξαμενής ($V_{tank,max,i}$) για καθένα από τα οποία υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια ($E_i = \eta_{q,i} * H_i * \gamma * q_t/t_i$) σύμφωνα με έναν προτεινόμενο ρυθμιστικό κανόνα λειτουργίας.

Οι γραμμικές και τοπικές απώλειες του αγωγού θεωρήθηκαν σταθερές και ίσες με 10 m. Το καθαρό ύψος πτώσης (H_i) θεωρήθηκε, για απλούστευση, σταθερό και ίσο με το καθαρό ύψος πτώσης της υφιστάμενης εγκατάστασης, 300 m. Ο ολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος, $\eta_{q,i}$, εκφράζεται από την εξίσωση (Εξ.8), όπως έχει αναλυθεί στο **Κεφάλαιο 6, Εικ. 6-5**.

$$\eta_{q,i} = -0.0053 * q_t^2 + 0.0159 * q_t + 0.8581\eta_T \quad (\text{Εξ.8})$$

Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται αναλυτικά ο ρυθμιστικός κανόνας λειτουργίας του υφιστάμενου μικρού υδροηλεκτρικού έργου με την προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης νερού. Σκοπός της δεξαμενής, κυρίως, είναι να αποθηκεύει τις μικρές παροχές που υπό άλλες συνθήκες θα χανόντουσαν ανεκμετάλλευτες.

7.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟΥ ΚΑΝΟΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΥΗΕ ΜΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Ο αλγόριθμος που περιγράφει τον ρυθμιστικό κανόνα λειτουργίας λαμβάνει υπόψη του δύο οριακές συνθήκες:

1. Τον **ελάχιστο χρόνο λειτουργίας** του στροβίλου ($t_{min,oper}$), προκειμένου η μέγιστη δυνατή συχνότητα εκκινήσεων να μην είναι υψηλότερη από εκείνη που συνιστά ο κατασκευαστής του στροβίλου, ώστε να αποφευχθεί η καταπόνησή του. Ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 25 min, για αυτό επιλέχθηκε ίσος με 30 min.
2. Τον **ελάχιστο χρόνο μη λειτουργίας** του στροβίλου (t_{min,no_oper}), προκειμένου η μέγιστη δυνατή συχνότητα εκκινήσεων να μην είναι υψηλότερη από εκείνη που συνιστά ο κατασκευαστής του ηλεκτροκινητήρα, ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανσή του²⁹. Συγκεκριμένα για τον συγκεκριμένο στρόβιλο σύμφωνα με τον Πίνακα της σελίδας 102²⁹, ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 5 min, για αυτό επιλέχθηκε ίσος με 10 min

Ο παρακάτω περιορισμός συνδέει το χρονικό βήμα των παροχών με το οποίο ρυθμίζεται η λειτουργία της δεξαμενής, συναρτήσει των χρονικών περιορισμών λειτουργίας και μη του στροβίλου :

$$\Delta t \geq t_{min,oper} + t_{min,no_oper} \quad (\text{Εξ.9})$$

Όπου,

$$\Delta t = 1 \text{ hr}$$

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από το ότι :

$$t_{min,oper} \leq \Delta t_{turb,operation} \text{ και } \Delta t - \Delta t_{turb,operation} > t_{min,no_oper} \quad (\text{Εξ.10})$$

Όπου,

²⁹ Πηγή : Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις, σωληνώσεις, αντλιοστάσιο, υδραυλικό πλήγμα, Αθήνα 2015, Εκδόσεις Τσότρας

$\Delta t_{turb,operation}$: το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο στρόβιλος παράγει ενέργεια.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω τρεις συνθήκες, ο ρυθμιστικός κανόνας λειτουργίας του μΥΗΕ με δεξαμενή αποθήκευσης διαμορφώνεται ως εξής:

I. Για την περίπτωση όπου $q_t > q_{min}$:

Η εγκατάσταση λειτουργεί ανεξαρτήτως της παρουσίας της δεξαμενής αποθήκευσης, εκμεταλλευόμενη τη διερχόμενη παροχή εντός του εύρους λειτουργίας του στροβίλου. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται δύο υποπεριπτώσεις:

- α. $q_t < q_{max}$, όπου η παροχή προς τον στρόβιλο, ισούται με το q_t , χωρίς να αποθηκεύεται ή να υπερχειλίζει κάποια ποσότητα,
- β. $q_t > q_{max}$, όπου η παροχή προς τον στρόβιλο, ισούται με το q_{max} , και η διαφορά $q_t - q_{max}$ αποθηκεύεται στη δεξαμενή, και αν ξεπεραστεί ο μέγιστος όγκος της δεξαμενής, υπερχειλίζει

II. Για την περίπτωση όπου $q_t < q_{min}$:

Η διερχόμενη παροχή του ποταμού αποθηκεύεται στη δεξαμενή και ο νέος όγκος ισούται με:

$$proxV_{q,t} = V_{t-1} + q_t * \Delta t$$

Ο στρόβιλος ρυθμίζεται ώστε να λειτουργεί με την ονομαστική παροχή $q_{turb} = q_{nom}$, για $\Delta t_{opt} = proxV_{q,t}/q_{nom}$. Το χρονικό διάστημα λειτουργίας του στροβίλου, Δt_{opt} , θα πρέπει να ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου.

Συγκεκριμένα,

- α. Εάν, $\Delta t_{opt} \geq t_{min,oper}$ και $\Delta t - \Delta t_{opt} \geq t_{min,no_oper}$, ο στρόβιλος λειτουργεί για με την ονομαστική παροχή $q_{turb} = q_{nom}$, για το χρονικό διάστημα Δt_{opt}
- β. Εάν, $\Delta t_{opt} < t_{min,oper}$, ο στρόβιλος δεν μπορεί να λειτουργήσει με την ονομαστική παροχή q_{nom} , αλλά λειτουργεί με την παροχή που μπορεί να του εξασφαλίσει τη συνθήκη ελάχιστου χρόνου λειτουργίας του στροβίλου. Συνεπώς, η παροχή που δύναται να εκμεταλλευτεί ο στρόβιλος ισούται με $q_{turb,potential} = proxV_{q,t}/\Delta t_{min,oper}$. Η οριακή συνθήκη, $\Delta t - \Delta t_{min,oper} \geq t_{min,no_oper}$, ικανοποιείται, σύμφωνα με τις τιμές που έχουν αποδοθεί στις παραπάνω μεταβλητές. Για $V_{q,t}$, ο τελικός όγκος της δεξαμενής, για $V_{tank,max}$, η μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής και για $spill_t$ ισχύει ότι:
 - i. Αν η $q_{turb,potential} > q_{min}$, τότε $q_{turb} = q_{turb,potential}$, $V_{q,t} = \min (proxV_{q,t} - q_{turb} * \Delta t_{min,oper} ; V_{tank,max})$ και $spill_t = \max \{0; (V_{q,t} - V_{tank,max})\}$

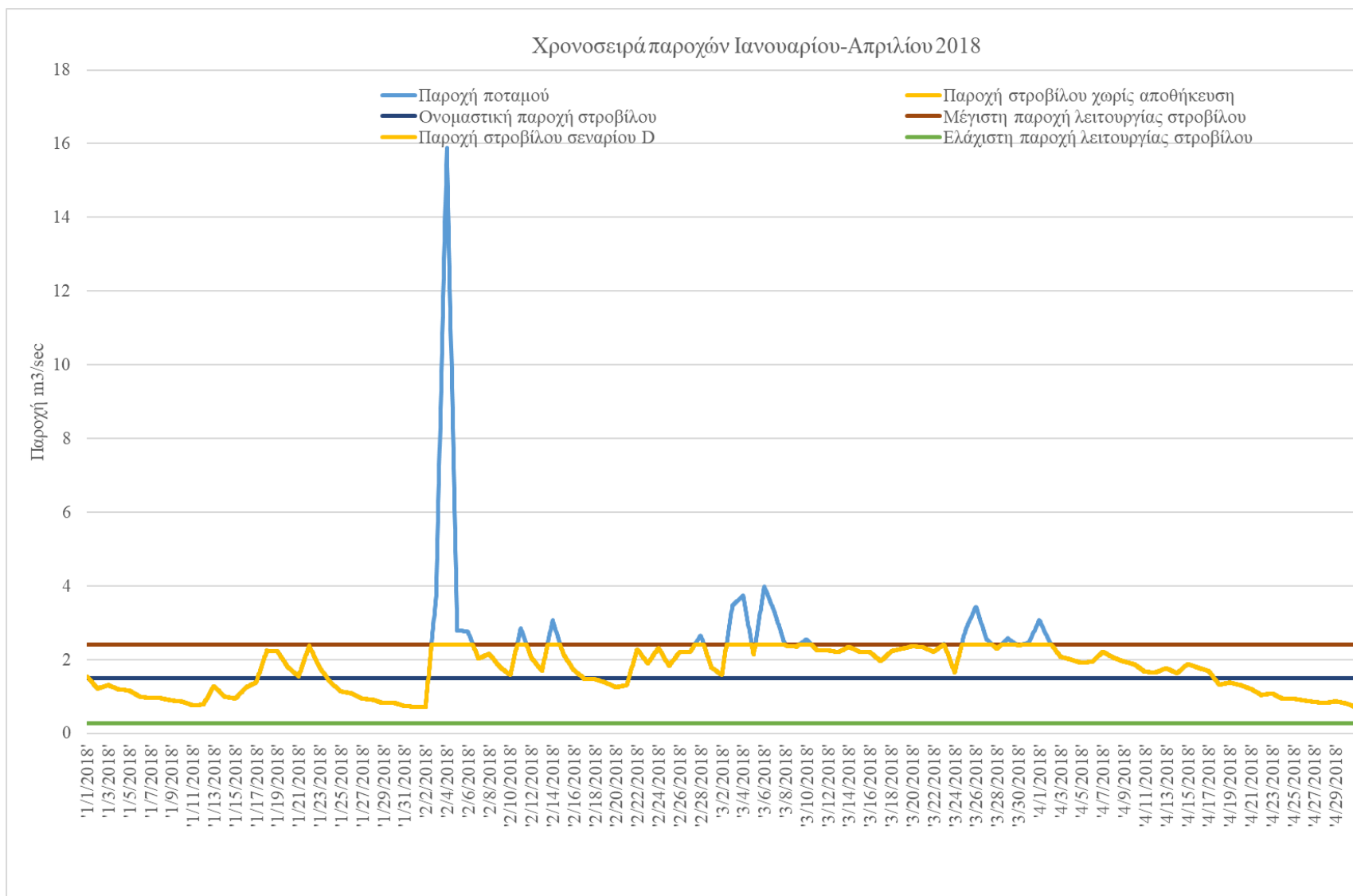
- ii. Αν η $q_{turb,potential} < q_{min}$, τότε $q_{turb} = 0$, $V_{q,t} = \min (proxV_{q,t} ; V_{tank,max})$ και $spill_t = \max \{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$
- γ. Εάν, $\Delta t - \Delta t_{opt} < t_{min,no_oper}$, τότε ο στρόβιλος ρυθμίζεται να λειτουργήσει για μικρότερο Δt_{opt} και μεγαλύτερη παροχή, έτσι ώστε $\Delta t_{opt}' = \Delta t - t_{min,no_oper}$. Συνεπώς, η παροχή που δύναται να εκμεταλλευτεί ο στρόβιλος ισούται με $q_{turb,potential} = proxV_{q,t}/\Delta t_{opt}'$. Η οριακή συνθήκη, $\Delta t_{opt}' \geq t_{min,oper}$, ικανοποιείται, σύμφωνα με την (Εξ.9) και την επιλογή του $\Delta t_{opt}'$. Για $V_{q,t}$, ο τελικός όγκος της δεξαμενής, για $V_{tank,max}$, η μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής και για $spill_t$ ισχύει ότι:
- i. Αν η $q_{turb,potential} > q_{max}$, τότε $q_{turb} = q_{max}$, $V_{q,t} = \min (proxV_{q,t} - q_{turb} * \Delta t_{opt}' ; V_{tank,max})$ και $spill_t = \max \{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$
- ii. Αν η $q_{turb,potential} < q_{min}$, τότε $q_{turb} = 0$, $V_{q,t} = \min (proxV_{q,t} ; V_{tank,max})$ και $spill_t = \max \{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$
- iii. Αν η $q_{min} < q_{turb,potential} < q_{max}$, τότε $q_{turb} = q_{turb,potential}$, $V_{q,t} = \min (proxV_{q,t} - q_{turb} * \Delta t_{opt}' ; V_{tank,max})$ και $spill_t = \max \{0; (q_t * dt - V_{q,t} - q_{turb} * dt)\}$

Παρακάτω στα διαγράμματα των εικόνων, **Εικ. 7-1** και **Εικ. 7-2** παρουσιάζονται δειγματικά για ένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν (βλ. Κεφάλαιο 8, υποενότητα 8.1) η εφαρμογή του παραπάνω ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας. Συγκεκριμένα στα διαγράμματα συγκρίνεται η λειτουργία του στροβίλου υπό τον ρυθμιστικό κανόνα λειτουργίας και τη συνοδεία της δεξαμενής αποθήκευσης με την υφιστάμενη λειτουργία του στροβίλου έχοντας ως μέγεθος προς αξιολόγηση τη διερχόμενη παροχή από το στρόβιλο. Η παραπάνω σύγκριση είχε ως επιπλέον παράμετρο την περίοδο εμφάνισης των παροχών, στην εικόνα, **Εικ. 7-1** εξετάζεται η επίδραση του προτεινόμενου ρυθμιστικού κανόνα για τους χειμερινούς και ανοιξιάτικους μήνες Ιανουάριο έως και Απρίλιο του 2018, όπου το υδατικό δυναμικό του ποταμού είναι σημαντικό και διαρκές, ενώ στην εικόνα, **Εικ. 7-2** εξετάστηκε το ίδιο, αλλά κατά τον θερινό μήνα Ιούνιο του 2018, όπου οι διερχόμενες παροχές του ποταμού είναι ισχνές και ο ρόλος της αποθήκευσης αποκτά σημασία.

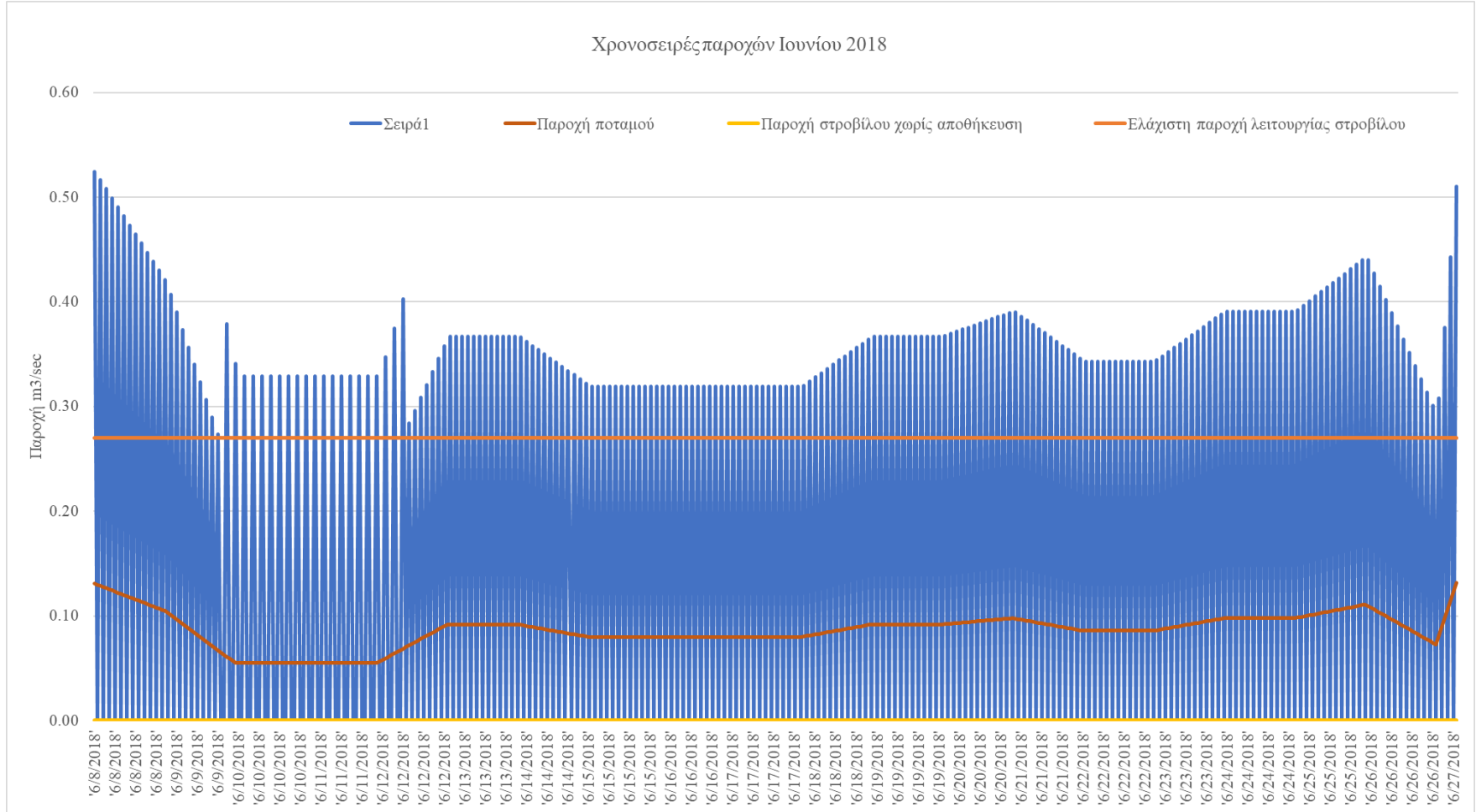
Στην πρώτη εικόνα, **Εικ. 7-1**, των υγρών μηνών, παρατηρείται ότι το σενάριο με αποθήκευση λειτουργεί όμοια με την υφιστάμενη εγκατάσταση όταν η διερχόμενη παροχή του ποταμού βρίσκεται εντός του εύρους λειτουργίας του στροβίλου. Όταν η διερχόμενη παροχή ξεπεράσει τη μέγιστη παροχή λειτουργίας του στροβίλου, τόσο το σενάριο με την αποθήκευση όσο και η υφιστάμενη εγκατάσταση λειτουργούν με το άνω όριο λειτουργίας.

Στη δεύτερη εικόνα, **Εικ. 7-2**, μελετάται ο θερινός μήνας Ιούνιος, όπου οι παροχές του ποταμού είναι πολύ χαμηλές και συχνά μικρότερες από την ελάχιστη τιμή λειτουργίας του στροβίλου, με αποτέλεσμα η υφιστάμενη εγκατάσταση να μην μπορεί κατά το μεγαλύτερο μέρος του μήνα, να παράγει ενέργεια. Ωστόσο, με την προσθήκη της δεξαμενής, για αυτά τα εύρη διερχόμενης παροχής, $q_t < q_{min}$, εφαρμόζεται η λειτουργία του ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας του συστήματος σύμφωνα με την

περίπτωση **II**, που αναπτύχθηκε παραπάνω. Όπως παρατηρείται, το μΥΗΕ παράγει ενέργεια ακόμα και εντός της περιόδου των ξηρών μηνών, καθώς η δεξαμενή της προσφέρει ρυθμιστική ευελιξία και βελτιστοποίηση στη διαχείριση των ελάχιστων πόρων του θέρους.



Εικ. 7-1 Διάγραμμα χρονοσειρών παροχών Ιανουαρίου έως Απριλίου 2018: (1) ποταμού, (2) στροβίλου σεναρίου SC_D , (3) στροβίλου υφιστάμενης εγκατάστασης- χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης, (4) μέγιστης παροχής λειτουργίας στροβίλου, (5) ελάχιστης παροχής λειτουργίας στροβίλου και (6) ονομαστικής παροχής λειτουργίας στροβίλου



Εικ. 7-2 Διάγραμμα χρονοσειρών παροχών Ιουνίου 2018: (1) ποταμού, (2) στροβίλου σεναρίου SC_D , (3) στροβίλου υφιστάμενης εγκατάστασης-χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης και (4) ελάχιστης παροχής λειτουργίας στροβίλου

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω ρυθμιστικού κανόνα για τα εναλλακτικά σενάρια ωφέλιμου όγκου $V_{tank,max}$, που εξετάστηκαν. Επιπλέον, για κάθε σενάριο υπολογίζονται τα οικονομικά μεγέθη που θα καθορίσουν τη βιωσιμότητά ή μη που τα διακρίνει ως επένδυση (Καθαρή Παρούσα Αξία, Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης, Λόγος Κόστους-Οφέλους, Κόστος επένδυσης, Λειτουργικά έξοδα). Η οικονομοτεχνική ανάλυση θα οδηγήσει στο γενικό συμπέρασμα αν όντως είναι βιώσιμη μια επένδυση προσθήκης δεξαμενής αποθήκευσης σε υφιστάμενη εγκατάσταση μΥΗΕ και αν ναι, απαντώντας ταυτόχρονα υπό ποιες συνθήκες σχεδιασμού.

8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗ

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.2 του Κεφαλαίου 7, εξετάστηκαν διαφορετικά πιθανά σενάρια (S_c_i) ωφέλιμου όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης ($V_{tank,max,i}$). Οι μέγιστοι ωφέλιμοι όγκοι της δεξαμενής αποθήκευσης προκύπτουν ως ποσοστό ($c \%$) του μέσου ημερήσιου όγκου του υδατορεύματος. Αρχικά τα σενάρια που εξετάστηκαν ήταν επτά στο πλήθος και στη συνέχεια η περιοχή βέλτιστου σεναρίου διακριτοποιήθηκε με την προσθήκη τεσσάρων επιπλέον σεναρίων. Για καθένα από τα σενάρια που μελετήθηκαν, εφαρμόστηκε ο ρυθμιστικός κανόνας λειτουργίας που αναπτύχθηκε στο **Κεφάλαιο 7**, ώστε να προκύψει νέα παραχθείσα ενέργεια ($E_i = \eta_{q,i} * H_i * \gamma * q_t/t_i$). Οι επτά πρώτοι ωφέλιμοι όγκοι της δεξαμενής αποθήκευσης που εξετάστηκαν, με σκοπό την εύρεση της περιοχής βέλτιστου σεναρίου, παρουσιάζονται στον πίνακα **Πιν. 8-1**.

Πιν. 8-1 Όγκοι δεξαμενής αποθήκευσης για τα επτά σενάρια που μελετήθηκαν

Σενάριο	Ποσοστό μέσου ημερήσιου όγκου υδατορεύματος	Μέγιστος ωφέλιμος όγκος δεξαμενής αποθήκευσης ($c * V_{daily,average}$)
S_{c_1}	$c \% = 2.5$	$V_{tank,max,i} = 1542 m^3$
S_{c_2}	$c \% = 5$	$V_{tank,max,i} = 3084 m^3$
S_{c_3}	$c \% = 10$	$V_{tank,max,i} = 6169 m^3$
S_{c_4}	$c \% = 15$	$V_{tank,max,i} = 9253 m^3$
S_{c_5}	$c \% = 20$	$V_{tank,max,i} = 12337 m^3$
S_{c_6}	$c \% = 25$	$V_{tank,max,i} = 15422 m^3$
S_{c_7}	$c \% = 50$	$V_{tank,max,i} = 30844 m^3$

Η περιοχή βέλτιστου σεναρίου βρέθηκε να είναι ανάμεσα στα σενάρια 1 και 2, δηλαδή των ποσοστών $c \% : 2.5$ έως 5 . Ανάμεσα στο παραπάνω εύρος και για ποσοστά μικρότερα του σεναρίου 1, έγιναν επιμέρους διακριτοποιήσεις των σεναρίων με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Τα επιπλέον σενάρια ωφέλιμων όγκων δεξαμενής αποθήκευσης, παρουσιάζονται στον πίνακα **Πιν. 8-2**.

Πιν. 8-2 Όγκοι δεξαμενής αποθήκευσης για τα επτά σενάρια που μελετήθηκαν

Σενάρια γύρω από την περιοχή βέλτιστου	Ποσοστό μέσου ημερήσιου όγκου υδατορεύματος	Μέγιστος ωφέλιμος όγκος δεξαμενής αποθήκευσης ($c * V_{daily,average}$)
Sc_A	$c \% = 0.5$	$V_{tank,max,i} = 308m^3$
Sc_B	$c \% = 1$	$V_{tank,max,i} = 617m^3$
Sc_C	$c \% = 1.5$	$V_{tank,max,i} = 925m^3$
Sc_D	$c \% = 3$	$V_{tank,max,i} = 1.851m^3$

Για κάθε σενάριο μελετάται διαφορετικής τάξης μεγέθους όγκος δεξαμενής. Όσον αφορά τις γεωμετρικές διαστάσεις, η δεξαμενή θεωρείται ορθογώνια με τετράγωνη βάση με εμβαδόν $20 * 20 m^2$. Ανάλογα τον εκάστοτε ωφέλιμο όγκο που επιλέγεται, τα χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται είναι το ύψος της ή των δεξαμενών (**H tank**) και το πλήθος (**No Tanks**) τους. Το ύψος της δεξαμενής επιλέχθηκε να μην ξεπερνάει τα 4,5 μέτρα για λόγους ευκολίας προσβασιμότητας, συντήρησης και κατασκευής. Παρακάτω στον πίνακα **Πιν. 8-3**, παρουσιάζονται τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ή των δεξαμενών ανά σενάριο προς εξέταση.

Πιν. 8-3 Χαρακτηριστικά δεξαμενών αποθήκευσης ανά σενάριο

Σενάριο	No Tanks	Htank (m)
Sc_A	1	1
Sc_B	1	2
Sc_C	1	3
Sc_1	1	4
Sc_D	2	2.5
Sc_2	2	4
Sc_3	4	4
Sc_4	6	4
Sc_5	7	4.5
Sc_6	9	4.5
Sc_7	18	4.5

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της παραχθείσας ενέργειας των 11 συνολικά σεναρίων, καθώς και το βέλτιστο σενάριο προς εφαρμογή. Επίσης, αναλύονται οι οικονομικοί δείκτες και τα κόστη που λήφθηκαν υπόψη κατά την αξιολόγηση της βιωσιμότητας της επένδυσης.

8.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

Σε κάθε ένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν, η εφαρμογή του ρυθμιστικού κανόνα με την προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης, επέφερε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας και των κερδών. Στον πίνακα **Πιν. 8-4**, υπάρχουν συγκεντρωμένες οι τιμές παραχθείσας ενέργειας της υφιστάμενης εγκατάστασης, ανά σενάριο με αποθήκευση, καθώς και το πλεόνασμα που προκύπτει από την εφαρμογή του κάθε σεναρίου. Όπως γίνεται εμφανές και από τον πίνακα **Πιν. 8-4**, τα τρία σενάρια με τη μεγαλύτερη διαφορά σε

πλεονάζουσα ενέργεια, είναι τα **Sc₅**, **Sc₆** και **Sc₇**, χωρίς όμως να συνεπάγεται ότι εξασφαλίζουν τη θέση της πιο βιώσιμης επένδυσης, καθώς μεγαλύτερος όγκος δεξαμενών συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος επένδυσης.

Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη δεξαμενής ή και δεξαμενών αποθήκευσης, προϋποθέτει τη διάθεση ορισμένου κεφαλαίου, ανάλογου του εκάστοτε όγκου που επιλέγεται. Σκοπός είναι να βρεθεί η οικονομικά και ενεργειακά βέλτιστη λύση, ανάμεσα στα εξεταζόμενα σενάρια, δηλαδή η λύση που με το χαμηλότερο δυνατό κόστος δίνει τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας άρα και κέρδος. Βασικοί δείκτες για να προκύψει το παραπάνω συμπέρασμα είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ). Προκειμένου να εξαχθούν οι παραπάνω δείκτες, πρέπει να υπολογισθεί το κόστος εγκατάστασης για κάθε σενάριο.

Η προσθήκη δεξαμενής (ή δεξαμενών) αποθήκευσης στο υφιστάμενο έργο προϋποθέτει τον υπολογισμό των κατασκευαστικών μεγεθών που συνοδεύουν την εγκατάστασή της(ή τους). Συγκεκριμένα, πρόκειται για δεξαμενή ή και δεξαμενές κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, με πάχος τοιχωμάτων 0.5 m και πάχος πυθμένα 0.6 m. Ο πυθμένας τους έχει εμβαδόν 20 * 20 m² και το ύψος ανά σενάριο δίνεται από τον πίνακα **Πιν. 8-3**. Επιπλέον εργασίες που κοστολογούνται είναι η προσθήκη εξυγιαντικής στρώσης από θραυστό υλικό λατομείου πάχους 0.5 m, στην περιοχή εγκατάστασης των δεξαμενών, καθώς και η προσθήκη στρώσης άοπλου σκυροδέματος καθαριότητας, πάχους 0.15 m. Παρακάτω στον πίνακα **Πιν. 8-5**, αναγράφονται τα μοναδιαία κόστη που λήφθηκαν υπόψη για κάθε ένα από τα παραπάνω. Στον πίνακα **Πιν. 8-6** έχουν υπολογισθεί και καταχωρηθεί για κάθε σενάριο οι ποσότητες που πρέπει να κοστολογηθούν κατά τα μοναδιαία κόστη. Από την εν λόγω αναλογία προκύπτει το μερικό κόστος της επένδυσης. Η τελική επένδυση καθορίζεται με την προσαύξηση του μερικού κόστους κατά την εξίσωση (Εξ.11):

$$\text{Τελικό κόστος επένδυσης} = \text{Μερικό κόστος επένδυσης} * 1,18 * 1,09 * 1,24 \quad (\text{Εξ.11})$$

Όπου,

- α. 18 %, ως γενικά έξοδα και όφελος του Εργολάβου
- β. 9% σε περίπτωση απρόβλεπτων εργασιών
- γ. 24% η προσθήκη του ΦΠΑ

Παρακάτω στον πίνακα **Πιν. 8-7** παρουσιάζονται τα οικονομικά μεγέθη της επένδυσης, ανά σενάριο.

Πιν. 8-4 Αποτελέσματα παραχθείσας ενέργειας ανά σενάριο και σύγκριση με την υφιστάμενη

Σενάριο	Ενέργεια Υφιστάμενης εγκατάστασης (kWh)	Ενέργεια με ταυτόχρονη αποθήκευση (kWh)	Πλεόνασμα παραγόμενης ενέργειας (kWh)
<i>Sc_A</i>	14,391,746	14,843,244	451,498
<i>Sc_B</i>	14,391,746	14,915,198	523,452
<i>Sc_C</i>	14,391,746	14,915,974	524,228
<i>Sc₁</i>	14,391,746	14,917,524	525,778
<i>Sc_D</i>	14,391,746	14,918,017	526,271
<i>Sc₂</i>	14,391,746	14,918,017	526,271
<i>Sc₃</i>	14,391,746	14,921,918	530,172
<i>Sc₄</i>	14,391,746	14,926,460	534,714
<i>Sc₅</i>	14,391,746	14,930,218	538,472
<i>Sc₆</i>	14,391,746	14,934,996	543,250
<i>Sc₇</i>	14,391,746	14,955,342	563,596

Πιν. 8-5 Μοναδιαία κόστη κατασκευαστικών μεγεθών δεξαμενών

Κόστος σκυροδέματος C25/30	Κόστος σκυροδέματος C12/15	Κόστος οπλισμού	Κόστος θραυστού υλικού λατομείου
95.5 €/m ³	79.5 €/m ³	0.94€/ kg	14.85 €/m ³

Πιν. 8-6 Υπολογισμοί κατασκευαστικών μεγεθών δεξαμενών ανά σενάριο

Σενάριο	Όγκος δεξαμενών (m ³)	Όγκος gross beton (m ³)	Όγκος εξυγιαντικής στρώσης (m ³)	Οπλισμός B500C kg (οπλισμός δεξαμενής 100 kg/m ³)
<i>Sc_A</i>	305.6	66.2	220.5	30,560.0
<i>Sc_B</i>	346.6	66.2	220.5	34,660.0
<i>Sc_C</i>	387.6	66.2	220.5	38,760.0
<i>Sc₁</i>	428.6	66.2	220.5	42,860
<i>Sc_D</i>	734.2	132.3	441.0	73,420.0
<i>Sc₂</i>	857.2	132.3	441.0	85,720
<i>Sc₃</i>	1,714.4	264.6	882.0	171,440
<i>Sc₄</i>	2,571.6	396.9	1,323.0	257,160
<i>Sc₅</i>	3,143.7	463.1	1,543.5	314,370
<i>Sc₆</i>	4,041.9	595.4	1,984.5	404,190
<i>Sc₇</i>	8,083.8	1,190.7	3,969.0	808,380

Πιν. 8-7 Κόστη εγκατάστασης δεξαμενών ανά σενάριο

Σενάριο	(1)	(2) = (1) * 0.18	(3) = (1)+(2)	(4) = (3) * 0.09	(5) = (3) +(4)	(6) = (5) *1.24
	Μερικό Κόστος επένδυσης (€)	Γενικά έξοδα και όφελος Εργολάβου (€)	Μερικό Κόστος επένδυσης συμπεριλαμβανομένου γενικών εξόδων και όφελος εργολάβου (€)	Απρόβλεπτες Εργασίες (€)	Μερικό Κόστος επένδυσης συμπεριλαμβανομένου γενικών εξόδων, όφελος εργολάβου και απρόβλεπτων εργασιών (€)	Κόστος επένδυσης με ΦΠΑ (€)
<i>Sc_A</i>	66,444.6	11,960	78,405	7,056	85,461	105,972
<i>Sc_B</i>	74,214.1	13,359	87,573	7,882	95,454	118,363
<i>Sc_C</i>	81,983.6	14,757	96,741	8,707	105,447	130,755
<i>Sc₁</i>	89,753	16,156	105,909	9,532	115,440	143,146
<i>Sc_D</i>	156,197.6	28,116	184,313	16,588	200,901	249,118
<i>Sc₂</i>	179,506	32,311	211,817	19,064	230,881	286,292
<i>Sc₃</i>	359,012	64,622	423,634	38,127	461,761	572,584
<i>Sc₄</i>	538,518	96,933	635,452	57,191	692,642	858,876
<i>Sc₅</i>	655,465	117,984	773,448	69,610	843,059	1,045,393
<i>Sc₆</i>	842,740	151,693	994,433	89,499	1,083,932	1,344,076
<i>Sc₇</i>	1,685,480	303,386	1,988,867	178,998	2,167,865	2,688,152

8.3 ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την παράγραφο θα εξετασθεί η οικονομική βιωσιμότητα κάθε επένδυσης που προτείνεται μέσω των 11 εξεταζόμενων σεναρίων.

Για κάθε ένα διεξάχθηκε οικονομοτεχνική ανάλυση με χρονικό ορίζοντα την 20ετία. Ο χρόνος κατασκευής των δεξαμενών αποθήκευσης θεωρήθηκε αμελητέος μέσα στο έτος, με αποτέλεσμα η αφετηρία της οικονομικής ανάλυσης του έργου να ορίζεται από το πρώτο έτος. Το **προεξοφλητικό επιτόκιο** λήφθηκε ίσο με **6%**, και σκοπός τους είναι να λάβει υπόψη του τον υπολογισμό της σημερινής αξίας ενός χρηματικού ποσού που θα δαπανηθεί ή εισπραχθεί στο μέλλον. Το κέρδος της παραχθείσας ενέργειας εξετάστηκε για δύο Περιπτώσεις (I) και (II), ώστε να ερευνηθεί η ευαισθησία που παρουσιάζει η εγκατάσταση δεξαμενής αποθήκευσης σε ένα μΥΗΕ, ως προς την τιμή πώλησης της ενέργειας. Συγκεκριμένα, στην **Περίπτωση (I)** η τιμή πώλησης λήφθηκε ίση με την τρέχουσα τιμή **0.097 €/kWh** ενώ στην **Περίπτωση (II)** η τιμή πώλησης λήφθηκε κατά 20% προσαυξημένη, ήτοι **0.116 €/kWh**. Τέλος, εκτός του κόστους επένδυσης, στα ετήσια έξοδα της οικονομοτεχνικής ανάλυσης της επένδυσης λήφθηκε υπόψη ετήσια συντήρηση των δεξαμενών και λοιπές τεχνικές επισκέψεις κόστους 2400 €.

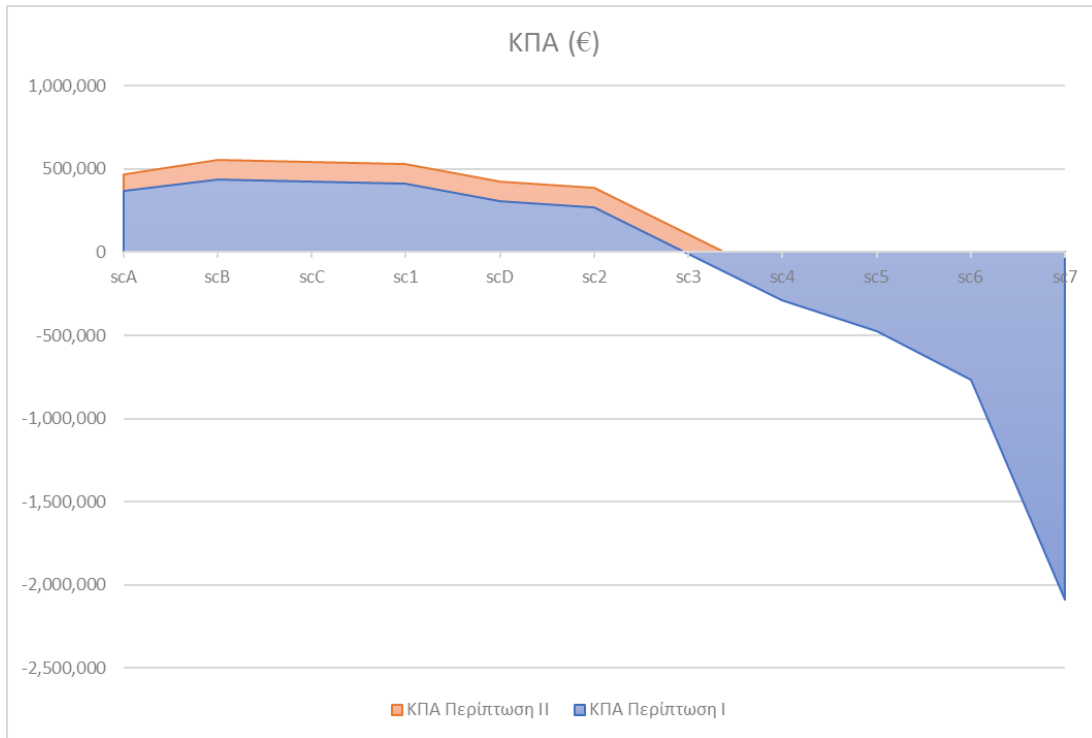
Παρακάτω στους πίνακες **Πιν. 8-8** και **Πιν. 8-9** παρουσιάζεται η μεταβολή εσόδων σε ευρώ της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση, για τις Περιπτώσεις (I) και (II). Επιπρόσθετα, υπολογίζονται οι τιμές της Καθαρής Παρούσας Αξίας, του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης και του λόγου οφέλους- κόστους B/C. Προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη πρέπει η ΚΠΑ να είναι θετική και ο ΕΠΑ μεγαλύτερος του επιτοκίου προεξόφλησης. Από τα παρακάτω αποτελέσματα τόσο για την περίπτωση (I), όσο και για την (II) βέλτιστο είναι το σενάριο **Sc_B** με την προσθήκη 1 δεξαμενής ύψους 2 m, ωφέλιμου όγκου $V_{tank,max,i} = 617m^3$, πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας ίσης με 523,452 kWh και επιπλέον όφελος 50,775 € (περίπτωση I) και 60,930 € (περίπτωση II). Η ΚΠΑ του βέλτιστου σεναρίου ισούται με 436,493 € και 552,969 €, ο ΕΒΑ σε 40.83% και 49.43%, ενώ ο λόγος B/C σε 3.99 και 4.79, ανά περίπτωση I και II αντίστοιχα.

Πιν. 8-8 Οικονομικοί δείκτες ανά σενάριο, περίπτωση ευαισθησίας I

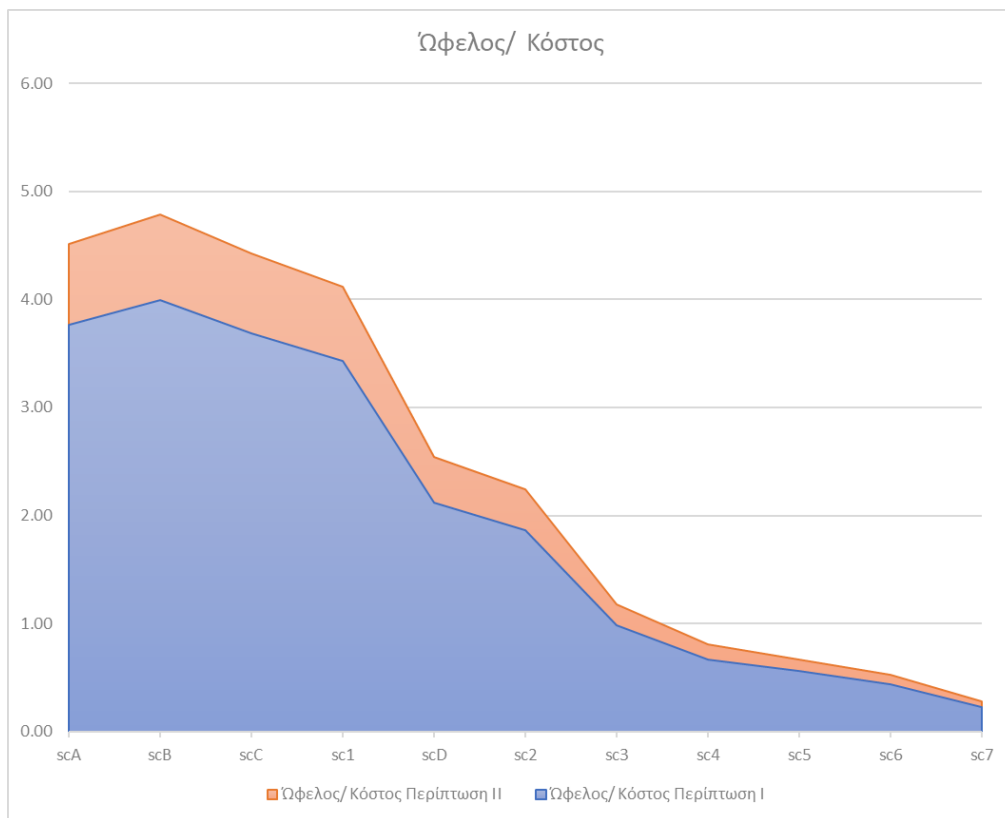
Σενάριο	Πλεόνασμα Παραγόμενης ενέργειας (kWh)	Μεταβολή εσόδων λόγω πλεονάσματος ενέργειας (€)	ΚΠΑ(€)	ΕΒΑ (%)	B/C
<i>Sc_A</i>	451,498	43,795	368,830	39.01%	3.76
<i>Sc_B</i>	523,452	50,775	436,493	40.83%	3.99
<i>Sc_C</i>	524,228	50,850	424,964	36.99%	3.68
<i>Sc₁</i>	525,778	51,000	414,298	33.85%	3.43
<i>Sc_D</i>	526,271	51,048	308,874	18.92%	2.12
<i>Sc₂</i>	526,271	51,048	271,700	16.14%	1.87
<i>Sc₃</i>	530,172	51,427	-10,252	5.78%	0.98
<i>Sc₄</i>	534,714	51,867	-291,491	1.39%	0.67
<i>Sc₅</i>	538,472	52,232	-473,826	-0.5%	0.56
<i>Sc₆</i>	543,250	52,695	-767,194	-2.6%	0.44
<i>Sc₇</i>	563,596	54,669	-2,088,633	-7.7%	0.23

Πιν. 8-9 Οικονομικοί δείκτες ανά σενάριο, περίπτωση ευαισθησίας II

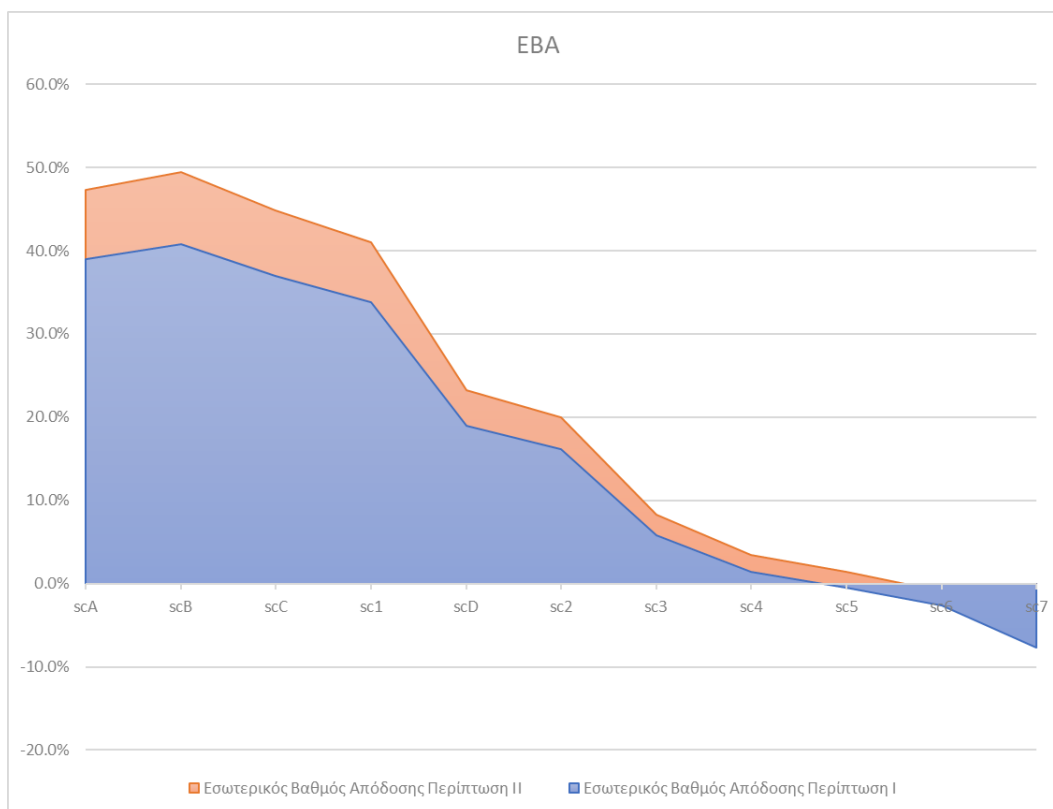
Σενάριο	Μεταβολή εσόδων λόγω πλεονάσματος ενέργειας (€)	ΚΠΑ (€)	ΕΒΑ(%)	B/C
<i>Sc_A</i>	52,554	469,295	47.31%	4.52
<i>Sc_B</i>	60,930	552,969	49.43%	4.79
<i>Sc_C</i>	61,020	541,614	44.80%	4.42
<i>Sc₁</i>	61,201	531,292	41.03%	4.11
<i>Sc_D</i>	61,258	425,978	23.27%	2.54
<i>Sc₂</i>	61,258	388,803	20.02%	2.24
<i>Sc₃</i>	61,712	107,720	8.23%	1.18
<i>Sc₄</i>	62,241	-172,508	3.39%	0.81
<i>Sc₅</i>	62,678	-354,007	1.40%	0.67
<i>Sc₆</i>	63,234	-646,312	-0.93%	0.53
<i>Sc₇</i>	65,603	-1,963,224	-6.31%	0.28



Εικ. 8-1 Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) για κάθε σενάριο, για περιπτώσεις ευαισθησίας I και II



Εικ. 8-2 Διάγραμμα λόγου οφέλους-κόστους (B/C) για κάθε σενάριο, για περιπτώσεις ευαισθησίας I και II



Εικ. 8-3 Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (EBA) για κάθε σενάριο, για περιπτώσεις ευαισθησίας I και II

Γενικότερα, το εύρος των βιώσιμων επενδύσεων που προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι:

- Για την περίπτωση (I): για ωφέλιμο όγκο δεξαμενής, από 308 m³ (**Sc_A**) έως 3084 m³ (**Sc₂**), αντίστοιχου εύρους κόστους επένδυσης 105,972 € έως 286,292 €
- Για την περίπτωση (II) για ωφέλιμο όγκο δεξαμενής από 308 m³ (**Sc_A**) έως 6169 m³ (**Sc₃**), αντίστοιχου εύρους κόστους επένδυσης 105,972 € έως 572,584 €

Από την εφαρμογή της ευαισθησίας, προκύπτει ότι με την αύξηση της τιμής πώλησης της ενέργειας, εκτός από την επιπλέον αύξηση και βελτίωση των οικονομικών δεικτών ΚΠΑ, EBA και B/C, παρατηρείται η ανάδειξη μιας επιπλέον επένδυσης ως βιώσιμη, (σενάριο **Sc₃**), καθώς προκύπτει θετική ΚΠΑ και ΕΠΑ>6%, σε σχέση με την περίπτωση I που κρίνεται μη βιώσιμη.

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα στις εικόνες **Εικ. 8-1**, **Εικ. 8-2** και **Εικ. 8-3**, η αύξηση της τιμής πώλησης κατά 20 % οδηγεί σε αύξηση του ετήσιου κέρδους κατά 10,155 € ή 16,67%, όσον αφορά το βέλτιστο σενάριο.

Τα παραπάνω συμπεράσματα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην υφιστάμενη εγκατάσταση του μΥΗΕ, επενδύοντας ένα αρχικό κεφάλαιο της τάξης των **118,363 €** για μια δεξαμενή ωφέλιμου όγκου **617 m³**, μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση τόσο του ποσοστού αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού και της λειτουργίας του στροβίλου όσο και των κερδών της με την εγκατάσταση δεξαμενής αποθήκευσης, η οποία θα λειτουργεί υπό τον προτεινόμενο ρυθμιστικό κανόνα λειτουργίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, ορίζονται νέοι στόχοι και μεταγενέστερες θεματικές ενότητες προς διερεύνηση και λύση. Σκοπός είναι να εξετασθούν άλλες υφιστάμενες εγκαταστάσεις διαφορετικών τύπων στροβίλων υπό μεταβαλλόμενα και μη τιμολόγια, με στόχο την εξαγωγή καθολικών συμπερασμάτων γύρω από ένα μεγαλύτερο εύρος περιπτώσεων τύπων εγκατάστασης μΥΗΕ.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΤΕΡΑ ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Με αφορμή τη διερεύνηση του έργου προσθήκης δεξαμενής αποθήκευσης σε υφιστάμενο μΥΗΕ ροής, προέκυψαν στην πορεία επιμέρους θεματικές ενότητες που μπορούν να αναπτυχθούν και να εμπλουτίσουν την έρευνα γύρω από την αποθήκευση σε έργα ΑΠΕ. Σκοπός, τόσο των επόμενων βημάτων που γεννήθηκαν και παρατίθενται παρακάτω, όσο και της παρούσας εργασίας είναι να αναλυθεί και μελετηθεί η δυνατότητα, των έργων που παράγουν ενέργεια και συνεισφέρουν στο ενεργειακό μείγμα αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, να εξασφαλίζουν τη ζήτηση που απαιτείται με όσο το δυνατό μειωμένη την παράμετρο της αβεβαιότητας, που η ίδια η φύση τους επιβάλλει. Η αποθήκευση, μαζί με κατάλληλα μοντέλα πρόγνωσης αποτελούν δυο από τις σημαντικότερες απαντήσεις στο παραπάνω πρόβλημα. Εξετάζοντας την απόδοση δε υφιστάμενων εγκαταστάσεων ΑΠΕ με την παράλληλη προσθήκη αποθηκευτικών μέσων (π.χ. δεξαμενή αποθήκευσης), η βιωσιμότητά τους αυξάνεται στον χρονικό ορίζοντα.

Ορισμένα από τα μεταγενέστερα βήματα προς ανάλυση που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

- Εφαρμογή του ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας μΥΗΕ με δεξαμενή αποθήκευσης, σε εγκατάσταση που λειτουργεί με μείγμα στροβίλων με ταυτόχρονη εφαρμογή βέλτιστου κανόνα λειτουργίας του μείγματος³⁰
- Εφαρμογή του ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας μΥΗΕ με δεξαμενή αποθήκευσης, με τύπο στροβίλου αντιδράσεως, π.χ. Francis. Η διαφορά του στροβίλου αντιδράσεως κείται στη μορφή της καμπύλης του βαθμού απόδοσης, καθώς εμφανίζει χαμηλό βαθμό απόδοσης σε μικρές τιμές παροχής, σε αντίθεση με τον Pelton. Η προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης, μπορεί να εξασφαλίσει μεγαλύτερες παροχές προς του στροβίλους, μέσω της ρύθμισης της, εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, αυξάνοντας σημαντικά το κέρδος του μΥΗΕ,
- Ανάπτυξη ρυθμιστικού κανόνα λειτουργίας εφαρμόζοντας δυναμικό προγραμματισμό εμπρόσθιας τροφοδότησης,
- Εφαρμογή κυμαινόμενου τιμολογίου ενέργειας μεταξύ των περιόδων υψηλής και χαμηλής ζήτησης.

Καθένα από τα παραπάνω μπορεί να συμβάλλει στην τεχνογνωσία γύρω από τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα με τη συνοδεία αποθηκευτικής δεξαμενής, καθώς και να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ευελιξία και πεδίο εφαρμογής σεναρίων.

³⁰Πηγή: V.-E Sarantopoulou, K.-K. Drakaki, G.- J. Tsekouras, A. Salis G.-K. Sakki, A. Efstratiadis, D. Papantonis, V. Riziotis, G. Caralis, K. Soulis, *Optimal Operation of a Run-of-River Small Hydropower Plant with Two Hydro-Turbines*, 2022

10 ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ MATLAB

```
%inflows is the excel file with daily discharge data

inflows=readtable('ARGYRIDATA.xlsx','sheet','ALLDATA','Range','B367:B1827',...
    'ReadVariableNames',false);

inflows_array=table2array(inflows);

%dates of case study refers to data during the period 1/1/2018-31/12/2021

dates=readtable('ARGYRIDATA.xlsx','sheet','ALLDATA','Range','A367:A1827',...
    'ReadVariableNames',false);

dates.Properties.VariableNames{1} = 'DATES';

dates_array=table2array(dates);
m=month(dates_array);
edges=unique(m);
counts=histc(m(:),edges);
appears_of_months=[edges,counts];%matrix of how many times each month
%exists in data

% Group by month
months = month(dates_array);
unqMonths = unique(months);
months_t=array2table(months);

% Group by year
years = year(dates_array);
unqYears = unique(years);
years_t=array2table(years);

data=[years_t,months_t,inflows];

data_t = table2array(data);

%naming the columns of data

data.Properties.VariableNames{1} = 'years';
data.Properties.VariableNames{2} = 'months';
data.Properties.VariableNames{3} = 'inflows';
data.Properties.VariableUnits{3} = 'lt/sec';

Monthly_Ave=zeros(length(unqMonths),length(unqYears));

for i= 1:length(unqYears);
    for j = 1:length(unqMonths);
        %find the rows of year and month where year=year(i) and month=(month(j)
        idx=find((data_t(:,1)==unqYears(i)) & (data_t(:,2)==unqMonths(j)));

        meandata1=mean(data_t(idx,3)); %calculate the mean of the rows
        %of data_t for each unqMonths(j) and each unqYears(i)

        Monthly_Ave(j,i)=(meandata1);
        %store them to a matrix
    end
end
```

```

Monthly_Ave(isnan(Monthly_Ave))=0; %replace NaN with zeros
Monthly_Ave_cub=Monthly_Ave/1000;% convert from lt/sec to m3/sec

% calculation of the ecoflow

Average_jun_jul_august=mean(mean(Monthly_Ave_cub([6 7 8],:),2));
%average of flow for months june, july and august

Average_sept=mean(mean(Monthly_Ave_cub(9,:),2));
%average of flow for month september

ecoflow_1=0.3*Average_jun_jul_august;

ecoflow_2=0.5*Average_sept;

minimum_ecoflow=0.03;

ecoflows_data=[ecoflow_1,ecoflow_2,minimum_ecoflow];

ecoflow=max(ecoflows_data);

if ecoflow==ecoflow_1
    disp ('The ecological flow is equal to the 30% of average flow of months June, July and August')
elseif ecoflow==ecoflow_2
    disp ('The ecological flow is equal to the 50% of average flow of month September')
else
    disp ('The ecological flow is equal to the minimum accepted value regarding the heartiness of the
ecosystem ')
end

Qtotal=data_t(:,3)/1000; % total inflow in m3/sec

%calculate the inflow without ecological discharge

Q=zeros(length(data_t),1);

for i=1:length(data_t);
    if ecoflow >= Qtotal(i);
        Q(i)=0;
    else
        Q(i)=Qtotal(i)-ecoflow;
    end
end

%Duration Curve
DC_1=0:5:100; %percentages
DC_1=DC_1';

%percentile vaues
Perctl=zeros(length(DC_1),1);

for i=1:length(DC_1);

    Perctl(i)=prctile(Q,100-DC_1(i));
end

DC=[DC_1,Perctl];

%Duration Curve 2-D graph

X1=DC_1;
Y1=Perctl;
plot(X1,Y1);
xlabel('Probability of exceedance %','fontsize',12,'fontname','times new roman');
ylabel('Inflow (m3/sec)','fontsize',12,'fontname','times new roman');
title ('Duration Curve');

t1=datetime(2017,10,1);
t2=datetime(2021,9,30);
t=t1:t2;

```

```

t=t';

%hydrological year 2-D graph

X2=t;
Y2=Q;
plot(X2,Y2);
xlabel('Years','fontsize',12,'fontname','times new roman');
ylabel('Inflow (m3/sec)','fontsize',12,'fontname','times new roman');
title('Timeseries of hydrological year');

%qdaily is the excel file with daily discharge data

qdaily=readtable('Dailytohourlydata.xlsx','sheet','CALC','Range','B1:D1463');

nrows=height(qdaily);

%calculation for intercept and slope of linear regression between the
%discharge of couple days in order to get hourly data from daily
ecoflow_river=ecoflow;

m_y=max(0,table2array(qdaily(:,3))-ecoflow_river); %daily discharge-ecoflow
...from ECOFLOWARGYRI code

m_x=table2array(qdaily(:,2)); %hours sum for each day

slope_data=zeros(nrows-1,1);

intercept_data=zeros(nrows-1,1);

for i=1:nrows-1;
    for j=i+1;
        x=[m_x(i,1) m_x(j,1)];
        y=[m_y(i,1) m_y(j,1)];

        %scatter(x,y,'b','*');

        P = polyfit(x,y,1);
        slope_data(i)= P(1);
        intercept_data(i) = P(2);

        % P(1) is the slope and P(2) is the intercept
    end
end

linear_val=[slope_data,intercept_data];

%Discharge values from daily to hourly

hrlval=24*(nrows-1);

disch_hrl=zeros(hrlval,1); %pinakas me tis oriees times paroxis
disch_hrl_0=zeros(24,1);

hours_step=(1:hrlval)'; %vima pinaka me oriees times

p=1;
k=1;

for i=0:24:hrlval-1;
    for j=1:24;
        disch_hrl_0(j)=hours_step(p)*linear_val(k,1)+linear_val(k,2);
        p=p+1;
    end
    disch_hrl(i+1:i+24,1)=disch_hrl_0;
    k=k+1;
end

```

```

end

%dates for each hour
dates_table=readtable('dates.xlsx','sheet','sheet1','Range','A1:E35065');

steps=table2array(dates_table(:,5));

name_days=table2array(dates_table(:,2));

col_days=num2cell(zeros(35064,1));

k=1;

for i=1:length(steps);
    if steps(i,1)==24
        k=k+1;
        col_days(i,1)=name_days(k,1);
    else
        col_days(i,1)=name_days(k,1);
    end
end

%dates
disch_hrl_cell=num2cell(disch_hrl);

data_model=[col_days,disch_hrl_cell];

%volume hourly

vol_h=3600*disch_hrl;

%volume daily

vol_d=m_y*24*3600;

%average daily volume

vol_avr_d=mean(vol_d); %with subtracted eco volume

%maximum ogkos dexamenis

c=0.03; %!!!variable for optimization!!!

V_tank_max=c*vol_avr_d;

a=20;% dimension of square tank (m)

A_tank=a*a;

H_tank=V_tank_max/A_tank;

%turbine characteristics

%Pelton

qmin=0.27;

qmax=2.4;

qopt=1.5;

%-----operation rule-----

%parametroi ogkou-----
V0=V_tank_max*0.5; %initial volume (paradoxi)
spill=zeros(length(disch_hrl),1);

Vk=V0;
Vq=zeros(length(disch_hrl),1);%ofelimos ogkos dexamenis

```



```

proxVq=zeros(length(disch_hrl),1);

%parametroi xronou-----

tmin_op=30*60; %sec, 30 minutes minimum operation of turbine
tmin_no_op=10*60; %sec, 10 minutes minimum power-off
dt=60*60;%sec, 60 minutes recharging period of tank

%parametroi energieias-----

qturb=zeros(length(disch_hrl),1);
Energy=zeros(length(disch_hrl),1);
efficiency=zeros(length(disch_hrl),1);
Hnet=301.9; %meters, VARIABLE DEPENDED FROM Vtank_max

%!Προϋπόθεση, dt>= tmin_op+tmin_no_op!

for i=1:length(disch_hrl);

    if disch_hrl(i)>qmin;

        if disch_hrl(i)<qmax;

            qturb(i)=disch_hrl(i);

            Vq(i)=Vk;

            spill(i)=0;

        else

            qturb(i)=qmax;

            Vq(i)=min(Vk+(disch_hrl(i)-qturb(i))*dt,V_tank_max);

            spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));

        end

    elseif disch_hrl(i)<qmin;

        proxVq(i)= Vk+disch_hrl(i)*dt;

        dtopt= proxVq(i)/qopt;

        if dtopt>=tmin_op && (dt-dtopt)>tmin_no_op;

            qturb(i)=qopt;

            Vq(i)=min(Vk+disch_hrl(i)*dt-qturb(i)*dtopt,V_tank_max);

            spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));

        elseif dtopt<tmin_op; %turbine cannot operate with qopt

            if (proxVq(i)/tmin_op)>qmin;

                qturb(i)=proxVq(i)/tmin_op;

                Vq(i)=min(Vk+disch_hrl(i)*dt-qturb(i)*tmin_op,V_tank_max);

                spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));

            else

                qturb(i)=0;

                Vq(i)=min(Vk+(disch_hrl(i))*dt,V_tank_max);

                spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));

            end

        elseif (dt-dtopt)<tmin_no_op; %tote proteino megaliteri paroxi

```

```

%leitoyrgias gia xrono=dt-tmin_no_op
if (proxVq(i)/(dt-tmin_no_op))>=qmax;
    qturb(i)=qmax;
    Vq(i)=min(Vk+disch_hrl(i)*dt-qturb(i)*(dt-tmin_no_op),V_tank_max);
    spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));
elseif (proxVq(i)/(dt-tmin_no_op))>qmin;
    qturb(i)=proxVq(i)/(dt-tmin_no_op);
    Vq(i)=min(Vk+disch_hrl(i)*dt-qturb(i)*(dt-tmin_no_op),V_tank_max);
    spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));
else
    qturb(i)=0;
    Vq(i)=min(Vk+(disch_hrl(i))*dt,V_tank_max);
    spill(i)=max(0,(disch_hrl(i)*dt- Vq(i)-qturb(i)*dt));
end
end
end
efficiency(i)=-0.0053*((qturb(i))^2)+0.0159*qturb(i)+0.8581;
Energy(i)= efficiency(i)*Hnet*qturb(i)*9.81; %kWh
Vk=Vq(i);
end

```

11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <https://www.eea.europa.eu/ims/share-of-energy-consumption-from>
2. https://competition-policy.ec.europa.eu/sectors/energy-environment/european-green-deal_en
3. https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180208STO97442/cutting-eu-greenhouse-gas-emissions-national-targets-for-2030?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=greenhouse%20emissions&at_topic=Greenhouse&at_location=GR&gclid=Cj0KCQjwkqSIBhDaARIsAFJANkgf2Q63Wdsi3rhjzkVqRTdS8I0bG09MYOzPYyFpkyp7cNEERMTI7z0aAv0wEALw_wcB
4. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
5. <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy> ή: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy> ή: deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_el
6. Multidimensional Role of Agrovoltaics in Era of EU Green Deal: Current Status and Analysis of Water–Energy–Food–Land Dependencies Aikaterini Roxani, Athanasios Zisos, Georgia-Konstantina Sakki and Andreas Efstratiadis
7. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/inf_23_525
8. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20230426-2>
9. K.-K. Drakaki, Optimizing the management of small hydroelectric plants: from the synergetic operation of the turbine system to day-ahead energy forecasting, Diploma thesis, 88 pages, Department of Water Resources and Environmental Engineering – National Technical University of Athens, Νοέμβριος 2021.
10. V.-E Sarantopoulou, K.-K. Drakaki, G.-J. Tsekouras, A. Salis G.-K. Sakki, A. Efstratiadis, D. Papantonis, V. Riziotis, G. Caralis, K. Soulis, Optimal Operation of a Run-of-River Small Hydropower Plant with Two Hydro-Turbines, 2022
11. Σημειώσεις «Αποθήκευση ενέργειας 1 -Εισαγωγή», Γεώργιος Τσεκούρας
12. Σημειώσεις «Αποθήκευση ενέργειας 2 -Αντλησιοταμίευση», Γεώργιος Τσεκούρας
13. http://envirotechnical.blogspot.com/2014/03/blog-post_29.html
14. https://www.researchgate.net/figure/The-schematic-diagram-of-the-hybrid-renewable-energy-system_fig3_328068861
15. <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines>
16. <https://www.spaceflightpower.com/is-solar-panel-draining-battery-at-night/>
17. <https://www.clpgroup.com/en/about/our-business/assets-and-services/australia/gannawarra-battery-storage-system.html>

18. <https://ppcr.gr/el/hydroelectric/stratos-ii-agrinio>
19. <https://galaxyscience.weebly.com/run-off-river-hydropower-facilities.html>
20. <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/file-hydrokinetic-2021.pdf>
21. Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα, Αθήνα 2016, Εκδόσεις Τσότρας
22. Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις, σωληνώσεις, αντλιοστάσιο, υδραυλικό πλήγμα, Αθήνα 2015, Εκδόσεις Τσότρας
23. Chiyembekezo S. Kaunda, Cuthbert Z. Kimambo, Torbjørn K Nielsen Q Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa, DOI: 10.5402/2012/132606
24. “Renewable Energy & Hydroelectric Work 8th semester, School of Civil Engineering”
25. Efstratiadis, I. Tsoukalas, G.-K. Sakki, N. Mamassis & D. Koutsoyiannis, Department of Water Resources & Environmental Engineering, NTUA, Academic year 2020-21
26. Sakki, G.-K., Tsoukalas, I., and Efstratiadis, A.: A reverse engineering approach across small hydropower plants: a hidden treasure of hydrological data?, Hydrol. Sci. J., <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2000992>, 2021a.
27. Sakki, G.-K., Tsoukalas, I., P. Kossieris, and Efstratiadis, A.: A dilemma of small hydropower plants: Design with uncertainty or uncertainty within design?, EGU General Assembly 2021, online, EGU21-2398, European Geosciences Union, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2398>, 2021b