



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Διπλωματική Εργασία

Παράμετροι Βελτιστοποίησης Έργων Αντλησιοταμίευσης σε Περιοχές Εξοφλημένων Επιφανειακών Ορυχείων

Ιωάννης-Ευθύμιος Πολυγένης

Επιβλέπων: Δρ. Χρήστος Ρούμπος

Αθήνα, 2026

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου.

Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού της ΜΔΕ ανήκουν στον/στη μεταπτυχιακό/ή φοιτητή/τρια και στο επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους της ΜΔΕ ανήκουν στον/στη μεταπτυχιακό/ή φοιτητή/τρια και στον/στην επιβλέποντα/ουσα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα/ουσας) ως συν-συγγραφών. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του/της μη συμμετέχοντα/ουσας στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

Ο Φοιτητής
Πολυγένης Ιωάννης

Ο Επιβλέπων
Χρήστος Ρούμπος

Περίληψη

Με την συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα, δημιουργούνται αρκετές προκλήσεις, οι οποίες αφορούν κυρίως την μεταβλητότητα της παραγωγής και την σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Για την αποτελεσματική ενσωμάτωση των ΑΠΕ, η αποθήκευση ενέργειας είναι απαραίτητη, με την αντλησιοταμίευση να αποτελεί μια από τις πιο ώριμες και αξιόπιστες τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της ανάπτυξης υβριδικών συστημάτων αντλησιοταμίευσης σε εξαντλημένα επιφανειακά ορυχεία, αλλά και η αναγνώριση των παραμέτρων που επηρεάζουν την λειτουργική και οικονομική απόδοση αυτών των συστημάτων. Αρχικά, εξετάστηκαν διεθνή παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών, με βάση σύγχρονη βιβλιογραφία η οποία αφορά την τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης και την συμβολή της στην ενεργειακή μετάβαση, την επαναχρησιμοποίηση μεταλλευτικών περιοχών και τις σύγχρονες πρακτικές βελτιστοποίησης τέτοιων έργων. Για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας τέτοιων έργων, εφαρμόστηκε μελέτη περίπτωσης εφαρμογής στο λιγνιτωρυχείο της Μεγαλόπολης. Η μεθοδολογία βασίστηκε σε τεχνοοικονομική ανάλυση, ανάλυση σεναρίων, ανάλυση ευαισθησίας και πολυκριτηριακή αξιολόγηση. Με την συμβολή των παραπάνω εργαλείων, διερευνήθηκε η επίδραση κρίσιμων τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων στη συνολική απόδοση της επένδυσης, ενώ παράλληλα αξιολογήθηκε και η περιοχή για την ανάπτυξη υβριδικού συστήματος αντλησιοταμίευσης.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν την εξεταζόμενη περιοχή ως αρκετά κατάλληλη για την εγκατάσταση συστήματος αντλησιοταμίευσης, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη των ήδη διαμορφωμένων υποδομών και τη βιομηχανική χρήση της περιοχής, παράγοντες οι οποίοι μειώνουν σε σημαντικό βαθμό αβεβαιότητες τεχνικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Από την ανάλυση προέκυψε ότι παράγοντες όπως το επενδυτικό κόστος, η παραγωγή ενέργειας, η διαφορά τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, η ευστάθεια των πρανών και το υδατικό ισοζύγιο, επιδρούν καθοριστικά στην βιωσιμότητα του έργου. Επιπλέον, τονίστηκε η σημασία του ορθού σχεδιασμού, της ψηφιοποίησης, αλλά και της αποτελεσματικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων, για τη βέλτιστη λειτουργία αυτών των συστημάτων. Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η αξιοποίηση πρώην επιφανειακών ορυχείων για την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων αποτελεί μια ρεαλιστική λύση αποθήκευσης ενέργειας στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Ακόμη, προτείνει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων για αντίστοιχα μελλοντικά έργα.

Abstract

With the ever-increasing penetration of RES in the energy system, several challenges arise, primarily related to production variability and grid stability. For the effective integration of RES, energy storage is essential, with pumped storage being one of the most mature and reliable large-scale storage technologies. The aim of this paper is to investigate the development of hybrid pumped-storage systems in depleted surface mines and to identify the parameters that affect their operational and economic performance. Initially, international examples of such applications and literature were examined, focusing on pumped storage technology and its contribution to the energy transition, the reuse of mining areas, and modern optimisation practices for such projects. To evaluate the sustainability of such projects, a case study was conducted at the Megalopolis lignite mine. The methodology was based on techno-economic analysis, scenario analysis, sensitivity analysis and multi-criteria evaluation. With the use of the above tools, the impact of critical technical, economic, and environmental parameters on the overall return on investment was investigated, while the area for the development of a hybrid pumped storage system was also evaluated.

The results highlighted the examined area as quite suitable for the installation of a pumped storage system, with the already-formed infrastructure and the area's industrial use reducing many of the technical and environmental constraints. At the same time, it was shown that factors such as investment cost, energy production, the difference between electricity purchase and sale prices, slope stability, and water balance have a decisive impact on the sustainability of the project. In addition, the importance of proper design, digitalisation, and effective management of water resources for the optimal operation of these systems was emphasised. In conclusion, this paper demonstrates that utilising former open-pit mines to develop hybrid systems is a realistic energy storage solution in the context of energy transition. It also proposes a comprehensive evaluation framework that can be used to inform the design and decision-making for similar future projects.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν, έμμεσα ή άμεσα, στην εκπόνηση της και στάθηκαν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, οφείλω στον επιβλέποντα, Δρα Χρήστο Ρούμπο, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ και να μελετήσω το συγκεκριμένο θέμα. Η καθοδήγηση του ήταν πολύτιμη, όπως οι επιστημονικές συμβουλές και η υποστήριξή του σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή Α. Φλάμο και τον Αναπλ. Καθηγητή Π. Ειρηνάκη, για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα μέλη του διδακτικού προσωπικού του τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου προσέφεραν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	12
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.1 Η μέθοδος της Αντλησιοταμίευσης	14
2.2 Υβριδικά Συστήματα Αντλησιοταμίευσης (HPHS).....	17
2.3 Επανάχρησιμοποίηση Εγκαταλελειμμένων Ορυχείων	19
2.4 Ανάλυση και παρουσίαση παραμέτρων βελτιστοποίησης υδροηλεκτρικών έργων	20
2.4.1. Λειτουργικές καινοτομίες και εξαρτήματα.....	26
2.4.2. Ο ρόλος της αντλησιοταμίευσης στο ελληνικό σύστημα	28
2.4.3. Παγκόσμια παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης ορυχείου, για αντλησιοταμίευση.....	38
2.4.4 Κοινωνικό-Τεχνικές προκλήσεις	45
3. Μεθοδολογία	49
3.1 Προσδιορισμός Παραμέτρων	50
Φάση (α): Χωροθέτηση αντλησιοταμιευτικών έργων.....	51
Φάση (β): Μελέτη και σχεδιασμός αντλησιοταμιευτικού έργου	52
Φάση (γ): Κατασκευή αντλησιοταμιευτικού έργου	52
Φάση (δ): Λειτουργία αντλησιοταμιευτικού έργου	53
3.2 Μοντέλα Ανάλυσης και Αξιολόγησης Κρίσιμων Παραμέτρων	55
Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση (Techno-Economic Assessment – TEA).....	55
Ανάλυση Σεναρίων	60
Ανάλυση Ευαισθησίας	63
Πολυκριτηριακή Ανάλυση (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA)	64
4. Μελέτη Περίπτωσης: Εφαρμογή της Μεθοδολογίας στο Ορυχείο της Μεγαλόπολης	68
5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων	75
5.1 Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση του Βασικού Συστήματος	76
5.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης Σεναρίων	82

5.2.1 Δυσμενές Σενάριο	83
5.2.2 Αισιόδοξο Σενάριο.....	86
5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας	92
5.3.1 Επίδραση του Επενδυτικού Κόστους (CAPEX)	93
5.3.2 Επίδραση της Διαφοράς Τιμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (Spread)	95
5.3.3 Επίδραση των Ωρών Λειτουργίας	98
5.3.4 Συγκριτική Αξιολόγηση.....	100
5.4 Πολυκριτηριακή Ανάλυση	103
6. Συμπεράσματα	106
6.1 Κύρια ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης	107
6.2 Συμπεράσματα από την μελέτη περίπτωσης της Μεγαλόπολης ...	109
6.3 Αξιολόγηση των παραμέτρων βελτιστοποίησης	110
6.4 Συμβολή της έρευνας.....	111
6.5 Περιορισμοί της έρευνας	112
6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	113
7. Βιβλιογραφία.....	115

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Το έργο αντλησιοταμίευσης στο πρώην χρυσωρυχείο Kidston.....	12
Εικόνα 2.1: Οι δύο τύποι αντλησιοταμίευσης.....	15
Εικόνα 2.2: Η διαδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας στον τελικό δέκτη, μέσω ενός συστήματος HPHS που χρησιμοποιεί την πλεονάζουσα ενέργεια των ΑΠΕ.....	17
Εικόνα 2.3: Βασικοί κίνδυνοι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από την ομάδα σχεδιασμού τέτοιων έργων.....	18
Εικόνα 2.4: Τυπική διάταξη συστήματος αντλησιοταμίευσης σε σύνδεση με το δίκτυο.....	20
Εικόνα 2.5: Οι χρήσεις γης για το λιγνιτωρυχείο Καρδιάς.....	31
Εικόνα 2.6: Το γεωλογικό προφίλ του ορυχείου Fushun West.....	40
Εικόνα 2.7: Ο πυρήνας της γεώτρησης στο ανοιχτό ορυχείο άνθρακα Fushun West.....	41
Εικόνα 3.1: Ιεραρχική ανάλυση απόφασης.....	64
Εικόνα 3.2: Κλίμακα Saaty.....	65
Εικόνα 4.1: Τμήμα του φωτοβολταϊκού σταθμού Μεγαλόπολης.....	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων PHS, με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν.....	21
Πίνακας 2.2: Τα λειτουργικά κόστη για τα συστήματα PHS.....	23
Πίνακας 2.3: Ο παράγοντας ασφάλειας για διαφορετικές συνθήκες κρίσιμου βάθους σε ορυχεία λιγνίτη στην Ελλάδα, όπου χρησιμοποιήθηκε για πρόβλεψη.....	29
Πίνακας 2.4: Τα κριτήρια και οι περιορισμοί για τον σχεδιασμό έργων HPHS.....	34
Πίνακας 3.1: Οι κυριότερες παράμετροι για κάθε φάση του έργου.....	53
Πίνακας 3.2: Πίνακας βαθμολόγησης και σύγκρισης των παραμέτρων.....	64
Πίνακας 3.3: Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο δείκτης RI, ανάλογα τις διαστάσεις του πίνακα.....	67
Πίνακας 4.1: Βασικές τεχνικές παράμετροι του αντλησιοταμιευτικού συστήματος, στην περιοχή του Χωρεμίου.....	71
Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για το εξεταζόμενο σύστημα..	73
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των βασικότερων μεγεθών του συστήματος αντλησιοταμίευσης, για το ορυχείο του Χωρεμίου.....	75
Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικός πίνακας των μεταβλητών που διαφοροποιούνται, για το δυσμενές σενάριο.....	84
Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα των μεταβλητών, για το αισιόδοξο σενάριο.....	87
Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις κυριότερες μεταβλητές του συστήματος αντλησιοταμίευσης, για όλα τα σενάρια ανάλυσης.....	90
Πίνακας 5.5: Πίνακας Μεταβλητών, για τις μεταβολές του CAPEX.....	93
Πίνακας 5.6: Η μεταβολή των οικονομικών δεικτών για διαφορετικές τιμές spread ηλεκτρικής ενέργειας.....	95
Πίνακας 5.7: Μεταβολή των οικονομικών δεικτών, για διαφορετικές ώρες ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος.....	97
Πίνακας 5.8: Πίνακας συγκριτικής αξιολόγησης κριτηρίων.....	102
Πίνακας 5.9: Κανονικοποιημένος πίνακας, με τα τελικά βάρη των κριτηρίων.....	103

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Οι προβλέψεις του μοντέλου NNAR, για το λιγνιτωρυχείο Καρδιάς.....	30
Σχήμα 2.2: Ανάλυση ευαισθησίας για την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), με διάφορες οικονομικές παραμέτρους.....	33
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας χωροθέτησης υβριδικού συστήματος PHS, με χρήση GIS.....	35
Σχήμα 2.4: Χάρτες που αφορούν τα κριτήρια και απεικονίζουν την βαθμολογία της καταλληλότητας για διάφορες τοποθεσίες.....	36
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας αξιολόγησης της βιωσιμότητας υβριδικού σταθμού αντλησιοταμίευσης.....	43
Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας υβριδικού συστήματος PHS.....	44
Σχήμα 2.7: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας, για την μελέτη της κοινωνικής αποδοχής των συστημάτων HPHS.....	46
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής, το οποίο αφορά την μεθοδολογία αξιολόγησης αντλησιοταμιευτικού έργου, σε επιφανειακό εξαντλημένο ορυχείο.....	66
Σχήμα 4.1: Υψομετρικός χάρτης, με την χωροθέτηση του ορυχείου της Μεγαλόπολης, στην Πελοπόννησο.....	69
Σχήμα 5.1: Κατανομή επενδυτικού κόστους (CAPEX), του εξεταζόμενου έργου αντλησιοταμίευσης.....	77
Σχήμα 5.2: Ετήσια οικονομική απόδοση του εξεταζόμενου συστήματος.....	78
Σχήμα 5.3: Εξέλιξη σωρευτικών ταμειακών ροών και χρόνος απόσβεσης.....	79
Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα της εξέλιξης των σωρευτικών ταμειακών ροών, για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια.....	89
Σχήμα 5.5: Σύγκριση των βασικότερων οικονομικών δεικτών, για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια.....	91
Σχήμα 5.6: Ανάλυση ευαισθησίας του CAPEX, ως προς τους δείκτες ΚΠΑ και IRR.....	93
Σχήμα 5.7: Ανάλυση ευαισθησίας της διαφοράς τιμών πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ως προς την ΚΠΑ και τον IRR.....	95
Σχήμα 5.8: Ανάλυση ευαισθησίας του spread τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, ως προς τον χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης.....	96

Σχήμα 5.9: Ανάλυση ευαισθησίας των ημερήσιων ωρών λειτουργίας, ως προς τον δείκτη ΚΠΑ και IRR.....	98
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα Tornado, όπου αποτυπώνονται οι διακυμάνσεις της ΚΠΑ, ως προς τις βασικές παραμέτρους ευαισθησίας.....	100
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα Spider που αφορά την μεταβολή του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR), σε συνάρτηση με τις βασικές παραμέτρους ευαισθησίας.....	101
Σχήμα 5.12: Σχετική βαρύτητα των κριτηρίων αξιολόγησης, μέσω της μεθόδου AHP.....	104

Συντομογραφίες

PHES	Υδροηλεκτρική αποθήκευση ενέργειας με άντληση (αντλησιοταμίευση)
HPHS	Υβριδικά συστήματα αντλησιοταμίευσης
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (RES)
SPREAD	Διαφορά τιμών πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
CAPEX	Κόστος Κεφαλαίου
OPEX	Λειτουργικά έξοδα
IRR	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)
AHP	Αναλυτική Μέθοδος Ιεράρχησης
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
LCOS	Σταθμισμένο Κόστος Αποθήκευσης Ενέργειας

1. Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψη τα σύγχρονα προβλήματα της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής υποβάθμισης συγκεκριμένων περιοχών, η αντιμετώπιση των αντίστοιχων συνεπειών τους καθίσταται επιτακτική. Στις κύριες αιτίες των προβλημάτων αυτών περιλαμβάνονται η καύση ορυκτών καυσίμων, η υπερβόσκηση, η αποψίλωση των δασών και άλλοι ανθρωπογενείς παράγοντες. Οι παραπάνω παράγοντες, αυξάνουν σημαντικά τα αέρια του θερμοκηπίου, επομένως η μείωση των αερίων αυτών αποτελεί κύριο στόχο της σημερινής κοινωνίας. Για να επιτευχθεί η μείωση αυτή, αναγκαιότητα αποτελεί η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, συμβάλλοντας στη μετάβαση της ενέργειας σε πιο βιώσιμους τομείς, με πιο υψηλό επίπεδο διεύθυνσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή ένωση, μέσω διεθνών συμφωνιών, έχει διαμορφώσει κάποιες σημαντικές στρατηγικές, που αφορούν την ενέργεια και το κλίμα για τα επόμενα χρόνια. Όσον αφορά τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, σημαντικό στόχο για το 2030 αποτελεί η μείωση αυτών κατά τουλάχιστον 55% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αξίζει να αναφερθεί και ο στόχος συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας, κατά τουλάχιστον 32% μέχρι το 2030. Οι βασικότερες ανανεώσιμες πηγές, που όλο και περισσότερο κερδίζουν έδαφος στην παραγωγή ενέργειας, περιλαμβάνουν την αιολική, η οποία μετατρέπει την κινητική σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω των ανεμογεννητριών, την ηλιακή, η οποία μέσω των φωτοβολταϊκών μετατρέπει την ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια και τέλος την υδροηλεκτρική, η οποία παράγει ενέργεια, μέσω της αξιοποίησης της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού. Όμως, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις στην παραγωγή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη προσωρινή υπερπαραγωγή ενέργειας, χωρίς την δυνατότητα κατανάλωσής της. Τα ζητήματα αυτά καθιστούν αναγκαία τη διαχείριση αυτής της μεταβλητότητας. Επομένως, λόγω της αυξανόμενης συμμετοχής των ΑΠΕ, τα ενεργειακά συστήματα χρειάζονται όλο και περισσότερη ευελιξία.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί σημαντική λύση, η οποία λαμβάνει υπόψη της τη μεταβλητότητα αρκετών ανανεώσιμων πηγών. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται, η αποθήκευση με την μέθοδο της αντλησιοταμίευσης, η οποία αποτελεί μια αρκετά ώριμη και ανεπτυγμένη μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, αντιπροσωπεύοντας το 96% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως (Strugała-Wilczek et al., 2025). Τα συστήματα αυτά λειτουργούν μετατρέποντας την βαρυτική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Οι μπαταρίες, θεωρούνται και αυτές αποτελεσματικές για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, αλλά παρουσιάζουν μειονεκτήματα στη χωρητικότητα και τη διάρκεια ζωής, ενώ τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να αποθηκεύουν μέχρι κάποιες γιγαβατώρες (GWh) για περιόδους από 6 έως 50 ώρες (Otto et al., 2026).

Με τη θέσπιση ξεκάθαρων στόχων απανθρακοποίησης από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τα επόμενα χρόνια, η αποκατάσταση επιφανειακών ορυχείων μπορεί να συνδυαστεί με έργα ενεργειακής μετάβασης στο πλαίσιο αλλαγών χρήσεων γης. Σημαντική δράση για αυτές τις περιοχές, αποτελεί η επανάχρηση των ορυχείων για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ανανεώσιμης ενέργειας, με τη βοήθεια συστήματος αντλησιοταμίευσης. Η δημιουργία ενός τέτοιου έργου προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, μειώνοντας τις δαπάνες σε επενδύσεις για νέες υποδομές, καθώς επαναχρησιμοποιείται τουλάχιστον

μια ήδη υπάρχουσα δεξαμενή, αλλά προσφέρει και νέες ευκαιρίες στις τοπικές κοινότητες. Για να δημιουργηθεί ένα τέτοιο σύστημα εξετάζονται η τοπογραφία, οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις και άλλοι τυχόν περιορισμοί που θα μπορούσαν να επηρεάζουν αυτό το έργο. Σημαντικά παραδείγματα τέτοιων σταθμών που βρίσκονται υπό σχεδιασμό, αποτελούν σε τοπικό επίπεδο ο σταθμός στο ορυχείο Καρδιάς και αυτός του Νότιου Πεδίου στο ορυχείο της Πτολεμαΐδας. Σε διεθνές επίπεδο, υπάρχει το ορυχείο Fushun West, στην Κίνα, το Asturian Central Coal Basin (ACCB), στην Ισπανία και στην Αυστραλία το ορυχείο χρυσού Kidston.



Εικόνα 1.1: Το έργο αντλησιοταμίευσης στο πρώην χρυσωρυχείο Kidston Πηγή: <https://www.naif.gov.au/our-projects/genex-kidston-pumped-hydro-storage-project/>

Στον ελληνικό χώρο, λόγω της μεταλιγνιτικής μετάβασης, υπάρχει αυξημένη ανάγκη για έρευνα σε αυτούς τους τομείς, ωστόσο η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη για την χρήση της αντλησιοταμίευσης σε εξοφλημένα ορυχεία και ακόμα περισσότερο για τις παραμέτρους βελτιστοποίησης των συστημάτων αυτών. Κύριο στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί, η έρευνα των δυνατοτήτων της αντλησιοταμίευσης σε τέτοιες περιοχές. Η βελτιστοποίηση τέτοιων έργων έχει μεγάλη σημασία, καθώς συμβάλλει στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων, στην οικονομική βιωσιμότητα των επενδύσεων και στην τεχνική ασφάλεια των αντίστοιχων έργων. Ακόμη, σημαντικό ζητούμενο προς έρευνα αποτελεί η αναγνώριση και εξέταση των παραμέτρων βελτιστοποίησης αυτών αλλά και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Τέλος, ένας ενδιαφέρων τομέας για τον οποίο δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες, αφορά την ιδέα της υβριδικής αντλησιοταμίευσης (HPHS), όπου συνδυάζονται οι τοπικές ανανεώσιμες πηγές, με το δίκτυο, κάνοντας το σύστημα πιο ευέλικτο. Το σύστημα αυτό λειτουργεί αποθηκεύοντας την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, προσφέροντας έτσι σταθερότητα στο δίκτυο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία βασίζεται στον συνδυασμό βιβλιογραφικής ανασκόπησης, με την αξιολόγηση πολλών μελετών και ανάλυσης των

δεδομένων που προέκυψαν από αυτές. Κύριο ζητούμενο αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς και συγκριτικών στατιστικών αποτελεσμάτων. Η εργασία δομείται ως εξής: Στη 2^η ενότητα πραγματοποιείται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και η κριτική ανάλυση συναφών εργασιών. Στην 3^η ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία της εργασίας. Ακολουθούν, η 4^η ενότητα με την περιγραφή της μελέτης περίπτωσης εφαρμογής, η οποία αφορά το ορυχείο της Μεγαλόπολης στην Πελοπόννησο, και η 5^η ενότητα στην οποία αναλύονται τα δεδομένα και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα. Τέλος, στην 6^η ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, οι περιορισμοί της έρευνας και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει ραγδαία πρόοδο με την πάροδο των χρόνων. Ωστόσο, η μεταβλητότητά τους καθιστά την αποθήκευση της ενέργειας αναγκαία, ώστε να επέλθει σταθερότητα στο σύστημα. Η δημιουργία συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, ειδικότερα πράσινης ενέργειας, επιδρά θετικά σε ζητήματα, όπως ο περιορισμός των ρύπων από την καύση άνθρακα ή πετρελαίου, η αποδοτική αξιοποίηση των ΑΠΕ, και η ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος. Συμβάλλει επίσης στη συνεχή παροχή ισχύος σε σημαντικές δομές, όπως τα νοσοκομεία, οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί, αλλά και απομακρυσμένες περιοχές. Μέσω της ανασκόπησης πληθώρας συναφών ερευνητικών εργασιών, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την κατανόηση των χαρακτηριστικών, των μεθόδων, αλλά και των περιορισμών αυτών των τεχνολογιών αποθήκευσης. Σε αυτήν την ενότητα θα αναλυθούν βιβλιογραφικά θέματα που αφορούν την αντλησιοταμίευση, την επαναχρησιμοποίηση ορυχείων, τον συνδυασμό των παραπάνω με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις παραμέτρους βελτιστοποίησης τέτοιων ενεργειακών συστημάτων.

2.1 Η μέθοδος της Αντλησιοταμίευσης

Η αποθήκευση ενέργειας με την μορφή της αντλησιοταμίευσης (PHS), αποτελεί μια τεχνολογία αποθήκευσης της μηχανικής ενέργειας, η οποία είναι μια ευρέως αναπτυγμένη μέθοδος μεγάλης κλίμακας, με πολλές εγκαταστάσεις σε όλον το κόσμο. Αποτελεί, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο βασίζεται σε τεχνολογίες υδροηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες τεχνολογίες υποστηρίζονται από πολλές πρωτοβουλίες και κατευθυντήριες γραμμές. Όπως αναφέρει και το Sustainability Working Group στο διεθνές φόρουμ για την αντλητική υδροηλεκτρική ενέργεια αποθήκευσης, το 2021, σπουδαίο ρόλο διαδραματίζει το Πρωτόκολλο Αξιολόγησης Βιωσιμότητας Υδροηλεκτρικής Ενέργειας (HSAP), το οποίο αποτελείται από εργαλεία και μεθόδους αξιολόγησης της βιωσιμότητας τέτοιων έργων.

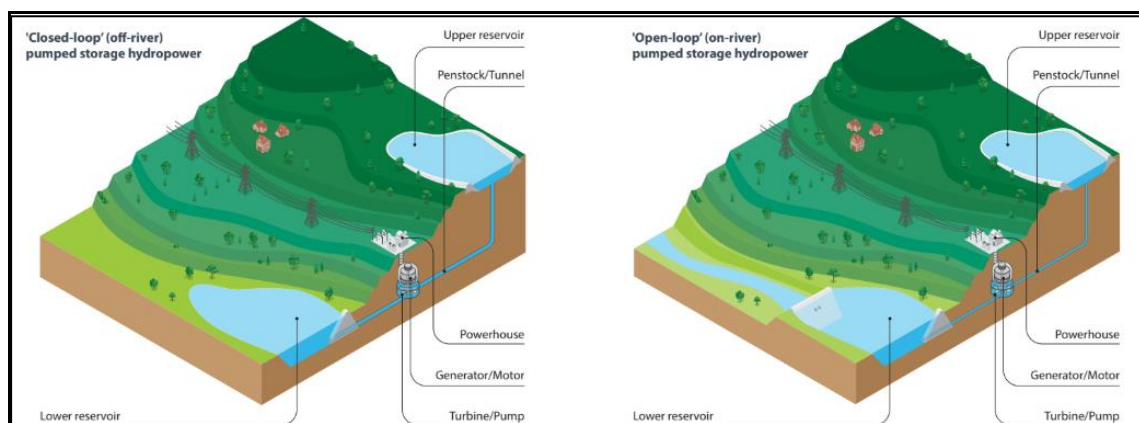
Αξιοσημείωτο είναι και το πρόγραμμα IEA hydro, το οποίο με εργαλείο την ευαισθητοποίηση, έχει ως στόχο τη βιώσιμη ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Τα Hydro Sustainability Tools (HST), αποτελούν εργαλεία, τα οποία ορίζουν βέλτιστες πρακτικές για την ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Τα εργαλεία αυτά, υποστηρίζονται από τη βιομηχανία, κυβερνήσεις, περιβαλλοντικές ΜΚΟ και χρησιμοποιούνται από ενδιαφερόμενους και κατασκευαστές, σε όλον τον κόσμο, με στόχο την κατασκευή υδροηλεκτρικών έργων, συμπεριλαμβανομένων και αυτών της αντλησιοταμίευσης. Κάποια επιπλέον εργαλεία που χρησιμοποιούνται, είναι η οικονομική ανάλυση, η πολυκριτηριακή ανάλυση και η ανάλυση του κύκλου ζωής των έργων αυτών (International Forum Pumped Storage Hydropower , 2021)

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας τέτοιων συστημάτων PHS, σε περιόδους κατά τις οποίες υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια, την αποθηκεύουν και όταν υπάρξει έλλειψη, συμπληρώνουν τις ανάγκες που υπάρχουν. Τα κύρια μέρη αυτών των συστημάτων είναι δύο δεξαμενές με σημαντική υψομετρική διαφορά, ένα σύστημα αντλιών και σωληνώσεων, ένα σύστημα υδροστροβίλων και μια ηλεκτρική μηχανή. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν αυτά, αποτελείται από δύο φάσεις, την πρώτη που αφορά την αποθήκευση ενέργειας, η οποία συμβαίνει με την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή, στην άνω και με την δεύτερη φάση, η οποία αφορά την αποκατάσταση της ενέργειας, όπου με την βοήθεια ενός στροβίλου, παράγεται ενέργεια από το νερό που επιστρέφει από την πάνω δεξαμενή, στην κάτω. Η πιο συχνή κατάσταση, είναι η ύπαρξη ξεχωριστών αντλιών και στροβιλομηχανών, αλλά υπάρχει η δυνατότητα και οι δύο παραπάνω λειτουργίες, να εκτελούνται σε μια σωλήνωση, μέθοδος η οποία αναφέρεται ως αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα, μειώνοντας έτσι τα έξοδα εγκατάστασης, αλλά επιτρέποντας και την ταυτόχρονη λειτουργία στροβίλων και αντλιών. Το σύστημα αυτό, δηλαδή η αντλία, ο υδροστροβίλος, η μηχανή, πρέπει να τοποθετούνται σε χαμηλότερο επίπεδο από την κατώτερη δεξαμενή, ώστε να αποφευχθεί εισροή αέρα και έτσι πιθανές εκσκαφές (*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συστήματα Αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα*, 2021).

Οι αντλίες, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 2.4 ανήκουν στις στροβιλομηχανές και έχουν ως λειτουργία την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια ρευστού και οι πιο συχνές είναι φυγόκεντρες. Η πτερωτή, το τμήμα εισόδου και εξόδου, αποτελούν τα κύρια τμήματα της. Κάθε μηχανικό μέρος αυτών των συστημάτων, έτσι και οι αντλίες συνοδεύονται και από απώλειες, τόσο υδραυλικές, ογκομετρικές, αλλά και μηχανικές. Οι υδροστροβίλοι, αποτελούν μηχανές που μετατρέπουν την δυναμική και κινητική ενέργεια που έχει το νερό, σε μηχανική ενέργεια με την συμβολή της σταθερής τους περιστροφικής κίνησης. Το μέρος που επιτελεί αυτή την κίνηση, λέγεται δρομέας και είναι συνδεδεμένος με την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική. Αυτή είναι η διαδικασία συμβαίνει, όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση. Υπάρχουν δύο κατηγορίες υδροστροβίλων, οι μερικής προσβολής και οι ολικής προσβολής. Διαφέρουν, κυρίως ως προς την λειτουργία, καθώς σε αυτούς της μερικής προσβολής, λειτουργεί μόνο ένα τμήμα του δρομέα. Οι τύπου Pelton, αποτελούν υδροστροβίλους μερικής προσβολής και χρησιμοποιούνται για ύψη πτώσης, από 20 μέτρα και πάνω και οι τύπου Kaplan και Francis, είναι τύποι ολικής προσβολής, για μικρά και μεσαία ύψη πτώσης. Ο τύπος Pelton, ένας από τους πιο διαδεδομένους, που χρησιμοποιείται κυρίως σε έργα με ύψη από 20 έως 300 μέτρα. Τα κύρια μέρη του είναι ένας κυκλικός δίσκος με πτερύγια, πάνω σε έναν ρότορα, όπου με την πρόσπτωση νερού, προκαλείται περιστροφή.

Για τη λειτουργία αυτών, αρκετά σημαντικά είναι και τα τμήματα τα οποία τους προσδίδουν στεγανότητα, όπως το εξωτερικό κέλυφος και οι στυπιοθλίπτες, τα μέρη που μεταφέρουν την μηχανική ενέργεια, όπως η άτρακτος, οι συμπλέκτες, τα έδρανα, αλλά και το ωστικό έδρανο, που παραλαμβάνει τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις. Αναλύοντας πιο λεπτομερώς τη λειτουργία των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, στο πρωταρχικό στάδιο, παρέχεται η πλεονάζουσα ενέργεια στις αντλίες και ανυψώνεται το νερό μέσω των σωληνώσεων, από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η αποθήκευση, με την μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν η ζήτηση της ενέργειας αυξάνεται, ποσότητα νερού μέσω των σωληνώσεων κατευθύνεται από τον άνω στον κάτω ταμιευτήρα, παράγοντας ενέργεια μέσω των υδροστροβίλων. Το σύστημα είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε οι δεξαμενές να μην μένουν χωρίς νερό και έχουν σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης, με περίπου το 80%, της ενέργειας που χρησιμοποιείται για άντληση, να μεταφέρεται στο ηλεκτρικό σύστημα. Οι κύριες απώλειες παρουσιάζονται στους υδροστροβίλους, στις αντλίες, στις γεννήτριες και στους αγωγούς. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι συχνά τα συστήματα αυτά αξιοποιούν και τις φυσικές εισροές που συμβαίνουν στον άνω ταμιευτήρα, για παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας.

Οι εγκαταστάσεις αυτές ταξινομούνται σε δύο κύριους τύπους, όταν το νερό κυκλοφορεί στις δεξαμενές χωρίς σημαντική φυσική εισροή, ονομάζεται τύπος του "κλειστού βρόχου", ενώ όταν κάποια από τις δύο δεξαμενές, είναι συνδεδεμένη με κάποια φυσική πηγή νερού, κυριαρχεί ο τύπος του "ανοιχτού βρόχου". Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση των παραπάνω στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Οι δύο τύποι αντλησιοταμίευσης. Πηγή: International Hydropower Association, <https://www.hydropower.org/>

Στον δεύτερο τύπο, η εγκατάσταση είναι πολύ παρόμοια με έναν υδροηλεκτρικό σταθμό με δεξαμενή, απλά διαφέρουν ως προς την αντλητική τους λειτουργία. Επομένως, κάποιοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να μετατραπούν σε εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές και γεωγραφικές τους συνθήκες. Η χωρητικότητα αποθήκευσης των συστημάτων αυτών, είναι ανάλογη με την υψομετρική διαφορά του πάνω και του κάτω ταμιευτήρα, αλλά και του όγκου του αποθηκευμένου νερού και η ονομαστική τους ισχύς φτάνει συνήθως κάποιες χιλιάδες MW. Λόγω των μικρών απωλειών που υπάρχουν, τα συστήματα αυτά έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες για μήνες. Σημαντικά, πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής έως 60 έτη και τα ηλεκτρικά τους συστήματα και εξαρτήματα, έχουν πολύ γρήγορο χρόνο απόκρισης. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε περιόδους αιχμής, το κόστος παραγωγής είναι αρκετά μικρότερο, διαμορφώνοντας έτσι το ρεύμα που

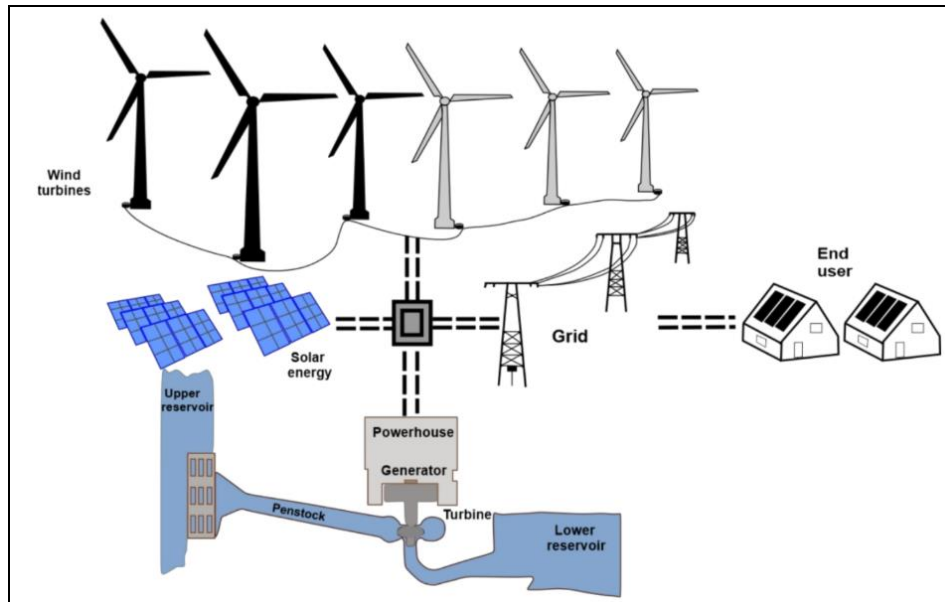
καταναλώνει ο τελικός δείκτης πιο φθηνό. Εξίσου σημαντικά είναι όμως και κάποια μειονεκτήματα αυτών, τα οποία αφορούν το πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης, τον μεγάλο χρόνο παράδοσης, την δυσκολία εύρεσης κατάλληλων τοποθεσιών και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα να μετριαστούν αυτά με την αναβάθμιση και εγκατάσταση νέων καινοτόμων τεχνολογιών (Gallo et al., 2016). Όσον αφορά τον κατασκευαστικό τομέα, οι σταθμοί αυτοί μπορούν να κατασκευαστούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος, χρησιμοποιεί τη μεγάλη υδραυλική διαφορά μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής, με σχετικά μικρή ποσότητα νερού για την κάλυψη των αναγκών, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί μικρότερη υδραυλική διαφορά, αλλά περισσότερη ποσότητα αντλούμενου νερού, άρα και αντλιών κλπ. Αυτό συμβαίνει λόγω της επίδρασης που ασκεί το μανομετρικό ύψος στην απόδοση των αντλιών και των στροβίλων. Η επιλογή σε αυτά τα δύο είναι κυρίως οικονομική, καθώς με την δημιουργία μικρού έργου, αλλά με σημαντική διαφορά ύψους, καλύπτονται οι ανάγκες με το πλεονέκτημα της ελαχιστοποίησης του κόστους (Louloudis et al., 2022).

Ωστόσο, οι μπαταρίες αποτελούν και αυτές μια σημαντική μέθοδο αποθήκευσης, που εξελίσσεται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, αλλά δεν προτιμάται για διάφορους λόγους. Αρχικά, αποτελούνται από επικίνδυνα και πολύτιμα μέταλλα, στα οποία δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση, γεγονός το οποίο αυξάνει αρκετά το κόστος παραγωγής τους. Αξίζει να σημειωθεί, ο περιορισμένος χρόνος ζωής τους, αλλά και ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων μορφών, που είναι ο ελάχιστος χρόνος εγκατάστασης τους. Με μια συγκριτική αξιολόγηση αυτών των δύο μεθόδων, συμπεραίνεται, ότι για ένα μέσο χρόνο ζωής των 100 χρόνων, το κόστος των μπαταριών είναι αρκετά μεγαλύτερο από ενός αντλησιοταμιευτικού έργου. Όσον αφορά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, οι μπαταρίες έχουν σχεδόν το διπλάσιο, σε τόνους CO₂, το οποίο οφείλεται στις πρώτες ύλες τους και λόγω αυτών πολύ υψηλό κόστος ανακύκλωσης (Δρυμωνίτου, 2021). Η αντλησιοταμίευση, αποτελεί την μέθοδο με τα περισσότερα πλεονεκτήματα, ωστόσο και οι άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως η αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES) και οι μπαταρίες εξελίσσονται συνεχώς.

2.2 Υβριδικά Συστήματα Αντλησιοταμίευσης (HPHS)

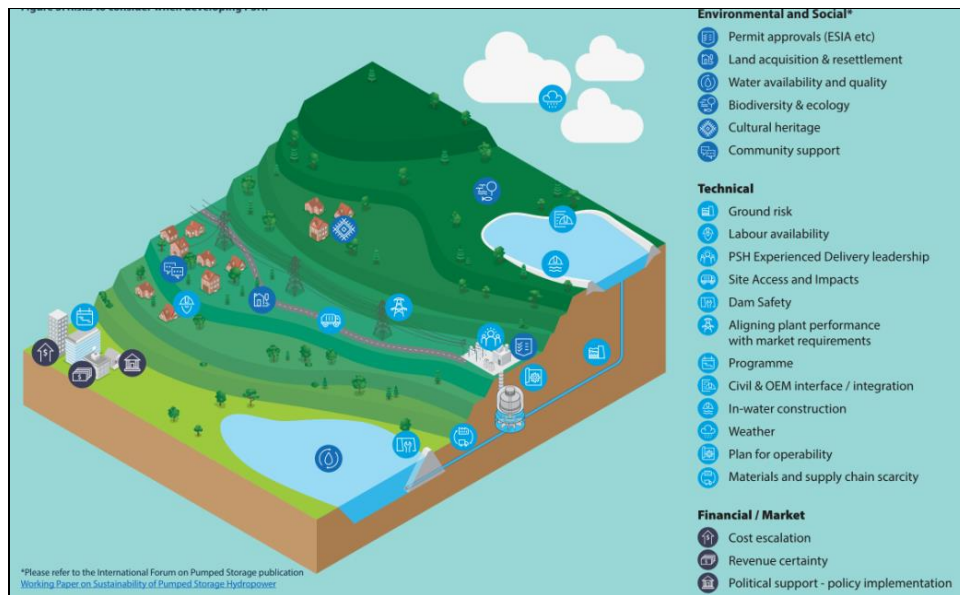
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), τα τελευταία χρόνια εισέρχονται όλο και περισσότερο στη παραγωγή ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες, λόγω της αναγκαίας μείωσης του άνθρακα. Κυρίως, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αποτελούν αξιόπιστες και αποδοτικές λύσεις, όμως συχνά παρουσιάζουν υπερπαραγωγή ενέργειας, χωρίς τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της και η παραγωγή τους δεν είναι συνεχώς διαθέσιμη. Η HPHS συνδυάζει τις τοπικές ΑΠΕ με το δίκτυο, κάνοντας το σύστημα αποθήκευσης πιο αποτελεσματικό. Με στόχο να αποφευχθεί η περικοπή της λειτουργίας των ΑΠΕ, το σύστημα της αντλησιοταμίευσης αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας και επιφέρει σταθερότητα στο δίκτυο, διαχειριζόμενο τις αλλαγές στην ζήτηση (Otto et al., 2026). Η παραδοσιακή διαδικασία της αντλησιοταμίευσης παραμένει ίδια, η κύρια αλλαγή σε αυτά τα συστήματα είναι ότι το

νερό που αντλείται από την κάτω στην άνω δεξαμενή, αντλείται με αξιοποίηση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που έχει παραχθεί από συστήματα ΑΠΕ (κυρίως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) που είναι διασυνδεδεμένα στο σύστημα. Ακολουθεί απεικόνιση των παραπάνω υβριδικών συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Η διαδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας στον τελικό δέκτη, μέσω ενός συστήματος HPHS που χρησιμοποιεί την πλεονάζουσα ενέργεια των ΑΠΕ. Πηγή: Krassakis et al. (2023)

Σημαντικό παράγοντα για την επιτυχία αυτών των συστημάτων αποτελεί η κατασκευή τους σε κατάλληλες τοποθεσίες, εξετάζοντας πιθανούς περιορισμούς που μπορεί να υπάρχουν στην μορφολογία του τόπου, στην κοινωνική αποδοχή και σε άλλους τομείς που είναι σημαντικοί για την απόδοσή τους. Τα συστήματα αυτά, αποτελούν μεγάλα έργα ανάπτυξης υποδομών και έτσι χρειάζονται σύνθετο σχεδιασμό, ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενοι κίνδυνοι. Χωρίς τα κατάλληλα μέτρα, τέτοια έργα κινδυνεύουν να υπερβούν το κόστος επένδυσης και τον χρόνο κατασκευής, αποτρέποντας έτσι τους υπευθύνους χάραξης πολιτικών και τυχόν επενδυτές από σχετικές αποφάσεις υλοποίησης. Στην ακόλουθη απεικόνιση παρουσιάζονται κάποιοι από τους πιο βασικούς κινδύνους, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την υλοποίηση τέτοιων έργων.



Εικόνα 2.3: Βασικοί κίνδυνοι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από την ομάδα σχεδιασμού τέτοιων έργων. *Πηγή: International Hydropower Association, <https://www.hydropower.org/>*

Οι κίνδυνοι αφορούν τρεις βασικές κατηγορίες, τον οικονομικό, τον τεχνικό και τον κοινωνικό τομέα. Όσον αφορά τον οικονομικό τομέα, σημαντικός είναι ο σχεδιασμός των ρυθμιστικών αρχών της αγοράς ενέργειας κατάλληλων μηχανισμών για την προμήθεια της αποθηκευμένης ενέργειας. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η αποθήκευση μεγάλης διάρκειας, ώστε να αυξάνονται τα έσοδα τα οποία συμβάλλουν στην οικονομική ολοκλήρωση τέτοιων έργων. Επίσης η άρση ρυθμιστικών φραγμών και η απλοποίηση της αδειοδότησης συμβάλλουν περαιτέρω στο κατάλληλο επενδυτικό κλίμα. Στον κοινωνικό-περιβαλλοντικό τομέα επίσης, ο κατάλληλος σχεδιασμός, με έμφαση στην κοινωνική και στην περιβαλλοντική διάσταση των έργων, συμβάλλει στην καλύτερη ενσωμάτωση των έργων στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Στο πλαίσιο αυτό ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς, στην εξασφάλιση της κοινωνικής αποδοχής, αλλά και στο υδατικό ισοζύγιο. Οι τεχνικές εργασίες που περιλαμβάνονται σε τέτοια συστήματα αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνουν υπόγεια έργα, φράγματα, δεξαμενές και σημαντικό ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό. Συνεπώς θα πρέπει να εξετάζονται όλοι οι σχετικοί κίνδυνοι (γεωτεχνικοί, περιβαλλοντικοί, κλπ.) σε μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα (International Hydropower Association).

2.3 Επαναχρησιμοποίηση Εξοφλημένων Ορυχείων

Η επίτευξη ενός βιώσιμου κλεισίματος των ορυχείων, αποτελεί σημαντικό στόχο των τελευταίων ετών, με τη σταδιακή κατάργηση του άνθρακα. Σύμφωνα με τους Martínez-López et al. (2021), ορισμένες περιοχές συχνά παρουσιάζουν μειονεκτήματα που σχετίζονται με υποβάθμιση των οικοσυστημάτων.

Η αξιοποίηση εξαντλημένων ορυχείων αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ, αλλά και για άλλους τομείς επαναχρησιμοποίησης της γης. Τέτοια παραδείγματα, αποτελούν οι βιότοποι άγριας ζωής, ο οικουρισμός, τα πάρκα

αναψυχής, η διαμόρφωση λιμνών σε αυτά τα ορυχεία, με στόχο την ανάπτυξη της αποθήκευσης νερού για αποφυγή πλημμυρών, για αναψυχή, ψάρεμα και άλλες δραστηριότητες. Σημαντικό παράγοντα για αυτές τις χρήσεις γης αποτελεί η ποιότητα του νερού. Αξιολόγηση πρακτική αποτελεί η διαμόρφωση των πρανών με ήπια κλίση.

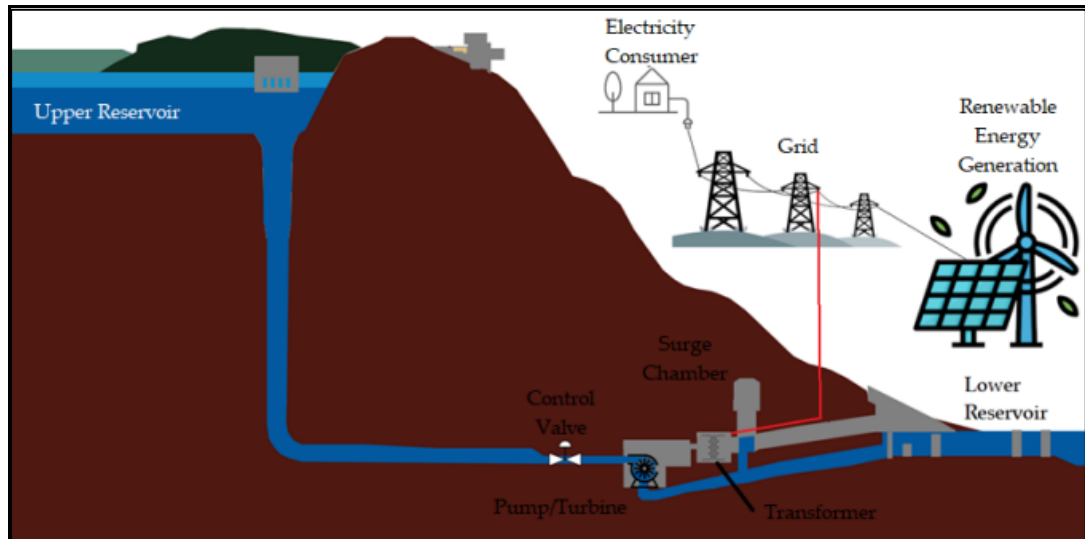
Όσον αφορά την υδρόβια βιοποικιλότητα της λίμνης, θα συνέβαλε αρκετά η πλήρωση του πυθμένα με αλκαλικές ουσίες, όπως το ασβέστιο, αλλά και η παραποτάμια βλάστηση. Όπως αναφέρεται από τον Louloudis et al. (2022), ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το Woodlawn, ένα καινοτόμο παράδειγμα κυκλικής οικονομίας, όπου εκτός από ένα υβριδικό έργο ηλεκτρικής ενέργειας, πλέον έχει μετατραπεί σε περιοχή βιο-αντιδραστήρα. Από τα αστικά απόβλητα που απορρίπτονται παράγεται βιοαέριο, τροφοδοτώντας το ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά, προωθούνται γεωργικές δραστηριότητες και τέλος, λειτουργεί βιολογική εγκατάσταση επεξεργασίας που παράγει κομπόστ, μέσω της εξαγωγής οργανικού υλικού από τα απόβλητα. Επιπλέον, μια χρήση γης αποτελεί η δημιουργία μονοπατιών και χώρων με ιστορικά αντικείμενα, προωθώντας την τοπική κληρονομιά. Τα παραπάνω θα μπορούσαν να ενισχύσουν την αναψυχή στην περιοχή, αλλά και την ανάπτυξη του τουρισμού.

Η χρήση γης για ένα εξαντλημένο επιφανειακό ορυχείο, η οποία θα αναλυθεί εκτενώς στην παρούσα εργασία, αφορά την δημιουργία ενός σταθμού αντλησιοταμίευσης που θα συνεργάζεται με εγκαταστάσεις παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Ένα τέτοιο καινοτόμο έργο υβριδικής αντλησιοταμίευσης (HPS), όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αποτελεί το Kidston Clean Energy Hub Project, στην Αυστραλία.

2.4 Ανάλυση και παρουσίαση παραμέτρων βελτιστοποίησης υδροηλεκτρικών έργων

Στην παρούσα ανασκόπηση, εξετάζονται έρευνες που αφορούν τα συστήματα αντλησιοταμίευσης σε εξαντλημένα επιφανειακά ορυχεία, με έμφαση στην αξιολόγηση και παρουσίαση των χαρακτηριστικών και των μεθόδων που βελτιστοποιούν τέτοια έργα. Οι μελέτες αυτές, επιλέχθηκαν, μέσω της αναζήτησης σε βάσεις επιστημονικών δημοσιεύσεων, χρησιμοποιώντας ως κύριους όρους, την αντλησιοταμίευση, τις ΑΠΕ, τα εξαντλημένα επιφανειακά ορυχεία και τις παραμέτρους βελτιστοποίησης.

Στην εργασία των Papadakis et al. (2023) εξετάζονται αναλυτικά τα υδροηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης. Τα συστήματα αυτά είναι ζωτικής σημασίας, καθώς εξισορροπούν την προσφορά και τη ζήτηση, μέσω της απλής μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε δυναμική και το αντίστροφο, προσδίδοντας σταθερότητα στο δίκτυο.



Εικόνα 2.4: Τυπική διάταξη συστήματος αντλιοσταμείωσης σε σύνδεση με το δίκτυο.
Πηγή:
 Papadakis et al. (2023)

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ποσοτική ανάλυση η οποία αφορά τα μεγάλα συστήματα με ισχύ παραγωγής πάνω από 1000 MW. Η ισχύς των συστημάτων PHS, μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 4000 MW, παρέχοντας ευελιξία, η διάρκεια εκφόρτισης ξεκινάει από 1 και φτάνει έως 24+ ώρες, συμβάλλοντας στην αποθήκευση πολλών ωρών έως και ημερών και η απόδοση των συστημάτων είναι γύρω στο 70 με 85%. Αυτά επιτυγχάνουν άμεση προσαρμογή στις κυμαινόμενες ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς ο χρόνος απόκρισης τους είναι ελάχιστος. Σύμφωνα με δεδομένα των ΗΠΑ, το κόστος εγκατάστασης τέτοιων σταθμών, ξεκινάει από τα 1000 και φτάνει έως τα 4000 δολάρια ανά kW. Η διάρκεια ζωής αυτών είναι γύρω στα 40 με 60+ χρόνια, προσθέτοντας μακροπρόθεσμη αξιοπιστία.

Πίνακας 2.1: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων PHS, με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Αποθήκευση Ενέργειας	• Ισχύς: 10-4000 MW • Ικανότητα Αποθήκευσης Ενέργειας: MWh έως 100 GWh
Σταθερότητα Δικτύου	• Ελάχιστος Χρόνος Αντίδρασης • Αποδοτικότητα Κύκλου: 70-85%
Ισορροπία Φορτίου	• Διάρκεια Ζωής: 40-60 Χρόνια
Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	• Αμελητέα αυτοεκφόρτιση

Από τις βασικότερες βοηθητικές υπηρεσίες που προσφέρουν, είναι η ρύθμιση της συχνότητας, διατηρώντας την ισορροπία προσφοράς και ζήτησης. Τα συστήματα ανταποκρίνονται γρήγορα στις συχνότητες του δικτύου, μεταβαίνοντας σε πλήρη ισχύ μέσα σε 20 δευτερόλεπτα έως και λίγα λεπτά. Η υποστήριξη τάσης αποτελεί υπηρεσία η οποία επιτρέπει στα συστήματα να προσαρμόσουν γρήγορα την άεργο ισχύ εξόδου τους, διατηρώντας τα επίπεδα τάσης μέσα σε ορισμένα όρια. Οι ανανεώσιμες πηγές προκαλούν συχνά διακυμάνσεις στις τάσεις λόγω της μεταβλητής φύσης τους, οπότε η υπηρεσία της υποστήριξης τάσης είναι σημαντική για την διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο. Αξιοσημείωτη είναι η μετατόπιση φορτίου, από τις περιόδους υψηλής ζήτησης στις περιόδους χαμηλής, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων παραγωγής. Τα συστήματα PHS διαφοροποιούνται ανάλογα με το μέγεθος αποθήκευσής τους, την ταχύτητα αντλίας και τις πηγές ενέργειας. Όσον αφορά το μέγεθος αποθήκευσης, τους μικρότερους σταθμούς, αποτελούν αυτοί της ωριαίας αντλησιοταμίευσης, με δεξαμενές μεγέθους 1.000.000-1.000.000.000 m³, οι οποίοι χρησιμοποιούνται περισσότερο για εφεδρική ισχύ σε περιπτώσεις ανάγκης. Οι καθημερινές διακυμάνσεις της ζήτησης απαιτούν κατάλληλη διαχείριση από τα ημερήσια συστήματα (DPHS), τα οποία αποτελούν την πιο κοινή εφαρμογή στη σημερινή εποχή. Η εβδομαδιαία αντλησιοταμίευση (WPHS) χρησιμοποιείται κυρίως για την ενσωμάτωση ενέργειας από διαλείπουσες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή. Από τις πιο ευέλικτες περιπτώσεις, αποτελεί η εποχιακή αντλησιοταμίευση (SPHS), η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή αιχμής, παροχή νερού και βοηθητικές υπηρεσίες. Τέλος, η πολυετής αντλησιοταμίευση (PAPHS), είναι από τους πιο σπάνιους τύπους, αλλά αποτελεί σημαντική περίπτωση για κάποια κράτη, καθώς προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια. Οι ταμιευτήρες αυτών των μονάδων, μπορούν να φτάσουν την τάξη των 100 x10⁹. Τα συστήματα ανοικτού και κλειστού βρόχου, διαχωρίζονται από την ύπαρξη ή μη σύνδεσης με φυσικές υδάτινες ροές. Αυτά του ανοικτού βρόχου είναι μόνιμα συνδεδεμένα με κάποια φυσική ροή, όπως ποτάμια, είτε με την πάνω, είτε με τη κάτω δεξαμενή. Κύριο πλεονέκτημά τους αποτελεί η αξιοποίηση των υδάτινων πόρων και υποδομών, μειώνοντας την επέμβαση στο περιβάλλον, αλλά έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού και παρουσιάζουν ευαισθησία στην ξηρασία. Τα συστήματα PHS όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιούν διάφορους τύπους αντλιών και στροβίλων, με διαμόρφωση σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας. Τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες διαμορφώνουν την επιλογή ανάμεσα σε στροβίλους σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας. Πιο συχνά χρησιμοποιούνται στρόβιλοι σταθερής ταχύτητας, καθώς επιτρέπουν την ενσωμάτωση των διαλειπουσών ανανεώσιμων πηγών, στο δίκτυο και οι μεταβλητής ταχύτητας έχουν αρκετά μεγαλύτερο κόστος.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν αρκετές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που απαιτούν κατάλληλες δράσεις. Σημαντικές είναι οι αλλαγές στη χρήση γης, με την κατασκευή νέων υποδομών, οδηγώντας σε μεταβολές των οικοτόπων και της βιοποικιλότητας. Αναφορικά με την ποιότητα του νερού, θα πρέπει να διερευνάται η μεταβολή της θερμοκρασίας και η ενδεχόμενη μείωση της ποσότητας του οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών. Η διαδικασία της αποσύνθεσης, της οργανικής ύλης εντός των ταμιευτήρων μπορεί να απελευθερώνει αέρια του θερμοκηπίου, με επιπτώσεις οι οποίες εξαρτώνται από το βάθος, τη θερμοκρασία και άλλους παράγοντες. Για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών αυτών, σημαντικές στρατηγικές αποτελούν η μείωση της επιφάνειας του ταμιευτήρα και η προώθηση των αερόβιων συνθηκών.

Για την προώθηση αυτής της μεθόδου αποθήκευσης, πολλά κράτη θέσπισαν ένα ιδιαίτερο πολιτικό και κανονιστικό περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, καθορίστηκαν και

δέσμες μέτρων για την καθαρή ενέργεια, συμπεριλαμβάνοντας και τον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας, με την άρση διάφορων κανονιστικών εμποδίων και θέσπιση σαφούς νομικού πλαισίου. Επιπλέον, χρηματοδοτήθηκαν διάφορα έργα έρευνας και καινοτομίας για τα συστήματα PHS, με στόχο την βελτίωση της απόδοσης και της ευελιξίας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το υπουργείο ενέργειας, έχει αναγνωρίσει την αποθήκευση ενέργειας, ως κύριο χαρακτηριστικό για την σταθερότητα του δικτύου, μέσω του προγράμματος DOE OE/ESSP. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Ρυθμιστικής Ενέργειας (FERC) έχει συμβάλλει αρκετά στην ενσωμάτωση της αποθήκευσης στην αγορά ενέργειας, με την έκδοση αρκετών εντολών. Ακόμη, η διαδικασία αδειοδότησης, πλέον αποτελεί ταχεία διαδικασία, με διάρκεια λιγότερη από 2 έτη για έργα PHS.

Τα τελευταία χρόνια η Ασία αναπτύσσεται ραγδαία στον τομέα των ΑΠΕ, κυρίως λόγω των υποστηρικτικών πολιτικών πολλών χωρών, όπως η Ινδία, η Κίνα και η Ιαπωνία. Η Ιαπωνία λόγω του ορεινού της εδάφους και του άπλετου υδατικού αποθέματός της, έχει δώσει αρκετή έμφαση στις τεχνολογίες αντλησιοταμίευσης. Η Κίνα, διαθέτει την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ σταθμών αντλησιοταμίευσης σε όλο το κόσμο, με 30 GW έργων μέχρι το 2020. Για την προώθηση της ανάπτυξης των συστημάτων αυτών, η Εθνική Επιτροπή Ανάπτυξης και Μεταρρυθμίσεων (NDRC) βελτίωσε αρκετά τη διαμόρφωση των τιμολογίων αντλησιοταμίευσης. Για την ευρύτερη ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών, τα κράτη προβαίνουν σε δημιουργία κινήτρων υποστήριξης, όπως επιδοτήσεις για την αντιμετώπιση του υψηλού αρχικού κόστους των έργων. Σημαντική είναι η διεθνής συνεργασία, με διασυνοριακά έργα PHS και με κοινή χρήση πόρων.

Για την οικονομική ανάλυση τέτοιων συστημάτων εξετάζονται διάφορα κόστη, όπως κόστη εγκατάστασης αντλιών, στροβίλων, γεννητριών και άλλου εξοπλισμού. Συχνά το κόστος παρουσιάζει αύξηση, τόσο λόγω υψηλών εξόδων αδειοδότησης, όσο και καθυστερήσεων της κατασκευής. Αξίζει να σημειωθεί η διαφορά κόστους ανάμεσα σε εγκαταστάσεις PHS και συμβατικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με ίδια χωρητικότητα, οι PHS εμφανίζουν περίπου διπλάσιο κόστος, το οποίο αντισταθμίζεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω των πλεονεκτημάτων τους. Για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα αυτών των έργων, σημαντικά είναι και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης (O&M), που αφορούν την επισκευή και την διαχείριση των εγκαταστάσεων, με τακτικές επιθεωρήσεις, συντήρηση εξοπλισμού και επισκευές. Το κόστος φόρτισης, αφορά τη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την άντληση του νερού και δεν υπολογίζεται στο κόστος λειτουργίας. Στον ακόλουθο Πίνακα 2.2 ακολουθεί η εκτίμηση του κόστους λειτουργίας για δύο συστήματα 100 MW και 1000MW.

Πίνακας 2.2: Τα λειτουργικά κόστη για τα συστήματα PHS.

ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ	ΣΥΣΤΗΜΑ 100 MW	ΣΥΣΤΗΜΑ 1000 MW
Διάρκεια (ώρες)	10	10
Εργασιακά Κόστη (USD/kW- χρόνο)	15,7	3,1
Κόστη Ανταλλακτικών (USD/kW- χρόνο)	5,6	5,6
Κόστη Ανακαινίσεων (USD/kW- χρόνο)	9	9
Συνολικά Πάγια Κόστη	30,4	17,8
Ποσοστό Κόστους Κεφαλαίου (%)	2	1,4

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, βάσει Papadakis et al. (2023)

Τα δύο αυτά σενάρια αφορούν διάρκεια παραγωγής 10 ωρών. Για το σύστημα των 100 MW, το κόστος εργασίας υπολογίζεται στα 15,7 δολάρια ανά kW για ένα έτος, το κόστος συντήρησης των εξαρτημάτων γύρω στα 5,6 δολάρια ανά kW, και της ανακατασκευής γύρω στα 9 δολάρια ανά kW, το συνολικό κόστος 30,4 δολάρια ανά kW για ένα χρόνο, ίσο με το 2% του Capex. Σημαντική διαφορά παρουσιάζει το σύστημα των 1000MW, όπου το κόστος εργασίας υπολογίζεται γύρω στα 3,1 δολάρια ανά kW για το έτος, τα κόστη των εξαρτημάτων και ανακατασκευής παραμένουν ίδια και το συνολικό κόστος λειτουργίας, υπολογίζεται γύρω στα 17,8 δολάρια ανά kW, ίσο με το 1,4% του Capex. Σημαντικό οικονομικό δείκτη αποτελεί το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE), το οποίο αντιπροσωπεύει το μέσο κόστος για κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, συνυπολογίζοντας το κόστος λειτουργίας, καυσίμων και κεφαλαίου. Αντίστοιχο δείκτη που αφορά την αποθήκευση, αποτελεί το σταθμισμένο κόστος αποθήκευσης (LCOS). Το LCOE, για μεγάλες εγκαταστάσεις κυμαίνεται από 20 δολάρια ανά MWh έως 190 δολάρια. Το Capex, το Opex και τα έσοδα των σταθμών αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της επένδυσης (ROI) και τις περιόδους αποπληρωμής. Ωστόσο, η μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό λειτουργικό κόστος, ενισχύουν την απόδοση της επένδυσης και μειώνουν την περίοδο αποπληρωμής.

Σημαντικές καινοτόμες τεχνολογίες, αποτελούν τα υπόγεια συστήματα αντλησιοταμίευσης (UPHS), σε λατομεία ή ορυχεία και οι σταθμοί θαλασσινού νερού (SPHS), με κάτω δεξαμενή τη θάλασσα, όπου παραμένουν τα αρχικά χαρακτηριστικά των συμβατικών συστημάτων, αλλά διαφοροποιούνται ανάλογα τον τύπο της κάτω δεξαμενής. Οι παραπάνω αποτελούν ελπιδοφόρους τομείς, καθώς παρατηρείται παγκόσμια μείωση της αποθήκευσης του νερού σε λίμνες. Αυτά τα συστήματα, παρακάμπτουν τους περιορισμούς διαθεσιμότητας χώρων και γλυκού νερού. Από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που μπορεί να αντιμετωπίζουν τα συστήματα PHS, είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητα τοποθεσιών για την δημιουργία τέτοιων έργων. Κρίσιμη είναι η ισορροπία ανάμεσα στην δημιουργία τέτοιων εγκαταστάσεων, προωθώντας και

τις ΑΠΕ, με την διατήρηση των οικοσυστημάτων, έτσι απαιτούνται ολοκληρωμένες περιβαλλοντικές μελέτες για την ανάπτυξη τους. Η ορθότερη προσέγγιση περιλαμβάνει καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις, με βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές και στρατηγικό σχεδιασμό. Καθοριστικό ρόλο για αυτή την ισορροπία διαδραματίζουν τα κανονιστικά πλαίσια που διαμορφώνονται από τους ρυθμιστικούς φορείς, με την επιβολή κατευθυντήριων γραμμών, που συμβάλουν στην βιώσιμη ανάπτυξη αυτών των συστημάτων. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα αυστηρά κριτήρια επιλογής τοποθεσιών, η επιλογή ήδη διαμορφωμένων χώρων για την εγκατάσταση, αλλά και οι εκτιμήσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιτακτική είναι η ανάγκη για συνεργασία μεταξύ των παρόχων ενέργειας, των κυβερνητικών φορέων, περιβαλλοντικών οργανώσεων και τοπικών κοινοτήτων, για την επιτυχία. Συχνά, οι εγκαταστάσεις PHS, μπορούν να λειτουργούν και για αποθήκευση νερού. Για την αντιμετώπιση κοινωνικών προκλήσεων, όπως η απαλλοτρίωση γης και η μετακίνηση κοινοτήτων, ουσιαστική δράση αποτελεί η επικοινωνία ανάμεσα στον κατασκευαστή και τις πληγείσες κοινότητες, εξασφαλίζοντας ότι οι ανάγκες των πολιτών λαμβάνονται υπόψη. Επιπλέον, άλλοι τομείς που συμβάλλουν στην μείωση των επιπτώσεων αυτών, είναι η αποζημίωση, η επανεγκατάσταση, αλλά και η ενίσχυση της εκπαίδευσης, με στόχο την ευαισθητοποίηση ως προς τα οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ενδιαφέρουσα συμβολή αποτελεί αυτή των Deane et al. (2010), στην οποία αναλύονται με τεχνοοικονομικά δεδομένα, ένας νέος και ένας ήδη υπάρχων σταθμός αντλησιοταμίευσης. Ακόμη, συγκρίνονται τα συστήματα PHS και οι μονάδες OCGT (μονάδες αεριοστρόβιλων ανοιχτού τύπου). Αυτές οι μονάδες αιχμής αεριοστρόβιλων παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά και ευελιξία με τα συστήματα PHS, αλλά παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης.

Σε πολλές χώρες, όπως οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία, οι σταθμοί αντλησιοταμίευσης, χρησιμοποιούνται ως σταθμοί ταχείας απόκρισης, για την υποστήριξη πυρηνικών σταθμών, αλλά τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται για την υποστήριξη της μεταβλητής αιολικής ενέργειας. Αντίθετα, πολλές ευρωπαϊκές χώρες, αναπτύσσουν τεχνολογίες PHS, με στόχο την βελτίωση των υδροηλεκτρικών σταθμών. Όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα, οι τεχνολογίες PHS, καταλαμβάνουν αρκετά μικρό ποσοστό του συνόλου της εγκατεστημένης ισχύς, για διάφορες χώρες. Το υψηλότερο ποσοστό εγκαταστάσεων παρουσιάζει το Λουξεμβούργο με 67%, ενώ η μέση ισχύς για τις περισσότερες χώρες που παρουσιάζονται, είναι γύρω στο 6%. Για χώρες όπως η Ιαπωνία, η Λετονία και άλλες, η εγκατεστημένη ισχύ των PHS, είναι υψηλή, λόγω μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος πυρηνικής ενέργειας. Ωστόσο για χώρες όπως η Κροατία και η Αυστρία, αρκεί η πλούσια υδρογραφική τοπογραφία.

Κάποιες από τις παραπάνω χώρες, χρησιμοποιούν διάφορες καινοτομίες στις μονάδες αντλησιοταμίευσης. Μια τέτοια τεχνολογία αποτελεί η χρήση αντλιών/στροβίλων μεταβλητής ταχύτητας, όπου επιτρέπεται η προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας ή του στροβίλου, ρυθμίζοντας την ποσότητα της ενέργειας που θα απορροφάται κατά την άντληση. Αποτελεί σημαντική λειτουργία, καθώς διευκολύνει την αποθήκευση ενέργειας, όταν τα επίπεδα ισχύος του δικτύου είναι χαμηλά. Ωστόσο, τα εξαρτήματα για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας, ενδείκνυται να αυξήσουν το κόστος εγκατάστασης, σε σχέση με μια συμβατική μονάδα. Για τα έργα PHS, το κόστος κεφαλαίου διαμορφώνεται από την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και από την εγκατεστημένη ισχύ (MW), με τα κόστη να φτάνουν έως τα 3000 δολάρια/kW. Τα

τελευταία χρόνια, παρατηρούνται όλο και μεγαλύτερα κόστη, λόγω αυξημένου κόστους αδειοδότησης, υψηλότερο κόστος για κατασκευή αξιόπιστων εγκαταστάσεων και μείωση καθυστερήσεων. Στην ελεύθερη αγορά ενέργειας, τα έργα αυτά δύνανται να αμείβονται μέσω πληρωμών βοηθητικών υπηρεσιών και πληρωμών δυναμικότητας, με την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας να αποτελεί την κύρια πηγή εσόδων. Σε περιόδους υπερβολικής υδροηλεκτρικής εισροής, οι μονάδες λειτουργούν ως συμβατικές υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής, αυξάνοντας την οικονομική ανταγωνιστικότητά τους.

2.4.1. Λειτουργικές καινοτομίες και εξαρτήματα

Αξιοσημείωτη έρευνα αποτελεί εκείνη των Kougias et al. (2019), στην οποία παρουσιάζονται λειτουργικές καινοτομίες στην υδροηλεκτρική ενέργεια και τα εξαρτήματα, με την τρέχουσα τεχνολογική ετοιμότητα τους (TRL). Πιο συγκεκριμένα, οι αναλυόμενες τεχνολογίες αφορούν, τους υδροστρόβιλους, τις αστάθειες των στροβίλων Francis, την ψηφιοποίηση, τις γεννήτριες με ρότορες ελέγχου, καινοτομίες στην αντλησιοταμίευση και φιλικές προς τα ψάρια τεχνολογίες. Για τον μετριασμό της αστάθειας ροής που προκαλείται από τις ΑΠΕ, οι υδροστρόβιλοι, απαιτείται να λειτουργούν με μεγάλη ευελιξία. Αστάθεια στους στροβίλους, μπορεί να εμφανίζεται με τις διακυμάνσεις πίεσης και την μείωση της απόδοσης τους, συχνά προκαλούνται ζημιές στα εξαρτήματα και ασταθής ισχύ. Για την αποφυγή αυτών, είναι σημαντική η συμβολή των πειραμάτων σε μοντέλα στροβίλων, που αξιολογούν την απόδοση τους. Επιπλέον, για τον περιορισμό των παραπάνω επιπτώσεων, έχουν αναπτυχθεί δύο κύρια είδη τεχνικών ελέγχου, αυτές του παθητικού και αυτές του ενεργού. Ο παθητικός έλεγχος δεν απαιτεί βοηθητική ισχύ, ενώ του ενεργού απαιτούν ενέργεια. Κάποιες τεχνολογίες του παθητικού ελέγχου, με τα επίπεδα της τεχνολογικής ετοιμότητας τους (TRL), προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι τεχνολογίες αυτές αφορούν, τα πτερύγια του σταθεροποιητή, τις αυλακώσεις J, τις επεκτάσεις του κώνου δρομέα, που αφορούν την ελεύθερη περιστροφή, τον στάτορα και το ρυθμιζόμενο διάφραγμα.

Παρόλο που οι τεχνικές αυτές προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην τουρμπίνα, δεν υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης αυτών των εξαρτημάτων, όταν πια δεν είναι απαραίτητα. Όσον αφορά τις τεχνικές ενεργού ελέγχου ροής, εκείνες κυρίως ασχολούνται με την έγχυση νερού ή αέρα, σε διάφορα σημεία της τουρμπίνας.

Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι τεχνικές είναι η εισαγωγή αέρα, η έγχυση νερού στο τοίχωμα του κώνου, η αξονική έγχυση νερού με υψηλή ή χαμηλή ταχύτητα, η έγχυση νερού με την μέθοδο της ανατροφοδότησης της ροής και επιπλέον ενέργεια (FFM+), η αντίστροφη διαμόρφωση του πίδακα νερού, η διφασική έγχυση αέρα και νερού και η έγχυση νερού στο πίσω μέρος των πυλών wicket.

Η ψηφιοποίηση των λειτουργιών αυτών των συστημάτων, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό, που θα συνέβαλε στην ενίσχυση της ευελιξίας τους, αλλά και στη

διαχείριση της διαλείπουσας διείσδυσης των ΑΠΕ σε αυτά. Η συλλογή και η επεξεργασία πραγματικών δεδομένων, που αφορούν τις συνθήκες λειτουργίας των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών, συνιστά κύριο στόχο, ώστε οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, να είναι αξιόπιστοι και να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις του ηλεκτρικού συστήματος. Η ψηφιοποίηση εκτός από την βελτίωση της απόδοσης, θα αυξήσει και την παραγόμενη ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η ετήσια παραγωγή θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 42 TWh, ίσες με 5 δισεκατομμύρια δολάρια λειτουργικής εξοικονόμησης, αλλά και μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου (Kougias, 2019). Σημαντική θα είναι η μείωση του χρόνου απόκρισης των στροβίλων άντλησης και των μονάδων παραγωγής. Με την συνεργασία της φυσικής μηχανικής και της επιστήμης των δεδομένων, δίνετε η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου, το οποίο θα αποτυπώνει την δυναμική των υδροηλεκτρικών σταθμών, καλύπτοντας τα υδραυλικά μηχανήματα, το ηλεκτρικό δίκτυο, ελέγχοντας, αλλά και μοντελοποιώντας την αντοχή των εξαρτημάτων. Κύρια εργαλεία, αποτελούν η ανάλυση δεδομένων, η προηγμένη μοντελοποίηση, η πρόβλεψη διάρκειας ζωής και άλλες μέθοδοι για πρόγνωση και συντήρηση.

Οι συχνές αλλαγές στη λειτουργία των εξαρτημάτων αυτών των συστημάτων, με απότομες διακοπές και εκκινήσεις, προκαλούν διάφορες φθορές, δημιουργώντας την ανάγκη εργασιών συντήρησης. Σημαντική θέση για αυτή την διαδικασία κατέχουν οι αισθητήρες για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων. Οι κύριοι αισθητήρες, που συναντώνται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς, είναι αυτοί των κραδασμών, της θερμοκρασίας, της τάσης και του ρεύματος. Αύξηση στα οφέλη του συστήματος, θα προκαλούσε η δυνατότητα των εξαρτημάτων όχι μόνο, να ανιχνεύουν και να αναφέρουν, αλλά και να αντισταθμίζουν τις μεταβολές αυτές, προσφέροντας σε αυτά την δυνατότητα αυτοθεραπείας. Σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς, η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των μονάδων τους, προσφέρει τη δυνατότητα προσαρμογής στα υδρολογικά πρότυπα των ποταμών, αυξάνοντας την απόδοση και την διάρκεια ζωής του συστήματος. Αυτή η μετατροπή συμβαίνει μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, με δύο τρόπους. Ο ένας αφορά τη σύγχρονη μηχανή η οποία είναι τροφοδοτούμενη από μετατροπέα και ο άλλος τη μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδοσίας.

Τέτοιες μονάδες αντλησιοταμίευσης, με μεταβλητή ταχύτητα, παρέχουν τα πλεονεκτήματα του ελέγχου της ισχύος της αντλίας, της εκκίνησης της και παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής του τρόπου λειτουργίας σε μικρό χρονικό διάστημα. Το πρώτο παράδειγμα τέτοιας μονάδας, μεταβλητής ταχύτητας, ξεκίνησε την λειτουργία του γύρω στο 1989, στην Κίνα και ήταν μέρος του έργου PSPP Panjiakou, η κύρια αιτία για την δημιουργία αυτής της εγκατάστασης, ήταν κυρίως οι διακυμάνσεις της στάθμης του νερού, στον άνω ταμιευτήρα (Kougias et al., 2019).

Η κατασκευή νέων και μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικών έργων, αντιμετωπίζει πολλές περιβαλλοντικές προκλήσεις, κάνοντας έτσι δύσκολη την αδειοδότησή τους. Αντίθετα, τα έργα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικής ενέργειας, αντιμετωπίζονται πιο θετικά, ως λύση καθαρής ενέργειας. Μεγάλη είναι η συμβολή τους στην ηλεκτροδότηση της υπαίθρου, υποστηρίζοντας οικονομικά και απομακρυσμένες περιοχές. Οι καινοτομίες σε αυτά τα συστήματα αφορούν, το σχεδιασμό βαρυτικών υδραυλικών μηχανών, την δυνατότητα των αντλιών να λειτουργούν ως στροβίλοι και την αξιοποίηση υπαρχουσών δομών. Σε συστήματα τα οποία, εκμεταλλεύονται ήδη υπάρχοντες υδάτινες ροές με τα οικοσυστήματα τους, σημαντικό στόχο αποτελεί η διατήρηση των ειδών τους.

2.4.2. Ο ρόλος της αντλησιοταμίευσης στο ελληνικό σύστημα

Οι Caralis et al. (2012) παρουσίασαν τον ρόλο των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας. Στόχο τους αποτέλεσε η εκτίμηση της παραγωγής από ΑΠΕ και η ικανότητα απορρόφησης της από το ελληνικό σύστημα, όπου και προσομοιώθηκε. Για την κατανομή τους οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις μονάδες βασικού φορτίου και στις μονάδες αιχμής φορτίου. Οι μονάδες βασικού φορτίου, παράγουν ενέργεια με την χρήση βαρέου τύπου λιγνίτη και οι μονάδες αιχμής φορτίου, χρησιμοποιούν αεριοστρόβιλους και ντίζελ, οι οποίες έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται γρήγορα στην ζήτηση. Σε περιόδους που αναμένεται υψηλή μεταβλητότητα της ζήτησης, αλλά και της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, για την ασφάλεια του συστήματος, χρησιμοποιούνται πιο ευέλικτες μονάδες αιχμής, όπως αυτές της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα, το πιο συχνό φαινόμενο είναι οι σταθμοί αυτοί, να λειτουργούν κατά τις ώρες αιχμής, του καλοκαιριού. Οι ετήσιες χρονοσειρές, συμβάλουν αρκετά στην διαμόρφωση της ζήτησης φορτίου, της παραγωγής αιολικής και φωτοβολταϊκής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της χρονοσειράς της παραγωγής αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται χρονοσειρές της ταχύτητας του ανέμου, μέσω του μοντέλου πρόγνωσης καιρού της χώρας. Οι ερευνητές, ασχολήθηκαν με την ικανότητα του ελληνικού συστήματος, να απορροφά αιολική ενέργεια, με το ενεργειακό μείγμα και τις περικοπές της αιολικής ενέργειας, σε ετήσια βάση.

Για την αποθήκευση της πλεονάζουσας αιολικής ενέργειας αναλύεται η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης και πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η προσθήκη αντλησιοταμιευτικών έργων στο ελληνικό σύστημα, με χωρητικότητα γύρω στα 1000 MW, για τρεις περιπτώσεις που θα ενσωματώνουν αιολική και φωτοβολταϊκή ενέργεια. Η πρώτη περίπτωση αφορά σύστημα, με αιολική ισχύ 3000MW και φωτοβολταϊκή 500MW, η δεύτερη αφορά σύστημα με αναλογίες ισχύων 5000MW και 1000MW και η τρίτη περίπτωση σύστημα με αναλογία 8000MW και 2000MW. Το πλεόνασμα της αιολικής ενέργειας, αποθηκεύεται σε δύο αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς, που έχουν αρκετές αντλίες. Πραγματοποιείται αξιολόγηση, για δύο ακραίες περιπτώσεις σύνθεσης, την Α και Β, με την μέγιστη και ελάχιστη ευελιξία του αντλησιοταμιευτικού σταθμού. Η περίπτωση Α, αφορά τρεις σταθμούς παραγωγής ενέργειας, με μονάδες άντλησης, που αποτελούνται από 5 αντλίες των 50 MW, από 3 των 100 MW και 3 των 150 MW. Στην περίπτωση Β, υπάρχει ένας σταθμός παραγωγής, με αντλίες, που αποτελείται από 3 αντλίες με ισχύ 333,3 MW. Οι δύο περιπτώσεις αυτές αξιολογούνται τόσο για αντλίες σταθερής ταχύτητας, όσο και για την περίπτωση, όπου η μια από τις αντλίες κάθε σταθμού, έχει μεταβλητή ταχύτητα.

Για την επιλογή μιας αντλίας, η λειτουργία της μεταβλητής ταχύτητας προσφέρει ευελιξία και αποτελεσματικότητα, καθώς χρησιμοποιείται μεγαλύτερο μέρος της πλεονάζουσας ενέργειας για άντληση και αξιοποιείται καλύτερα το αντλιοστάσιο. Συμπερασματικά, για τα τρία σενάρια ενσωμάτωσης αιολικής και φωτοβολταϊκής ενέργειας, παρατηρείται ότι για το πρώτο σενάριο, παρόλο που το ποσοστό του πλεονάσματος που χρησιμοποιείται είναι υψηλό, ο βαθμός αξιοποίησης των αντλιών, είναι πολύ χαμηλός για όλες τις περιπτώσεις. Για το δεύτερο σενάριο, χρησιμοποιείται πλεόνασμα περίπου 60-80% αιολικής ενέργειας και ο βαθμός αξιοποίησης είναι

χαμηλός γύρω στο 5-6%. Το τρίτο αποτελεί, το βέλτιστο σενάριο, όπου αφορά μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση ανανεώσιμης ενέργειας, αλλά το πλεόνασμα που χρησιμοποιείται μειώνεται γύρω στο 50-60%. Αντίθετα, ο βαθμός αξιοποίησης παρουσιάζει αύξηση γύρω στο 15-17%. Ακόμα και στην βέλτιστη περίπτωση, ο βαθμός αξιοποίησης παραμένει σχετικά χαμηλός, υποδηλώνοντας, ότι χρειάζονται ειδικές συνθήκες. Προκειμένου να βελτιωθεί αυτός ο βαθμός του σταθμού, σημαντική θα μπορούσε να είναι η συνεισφορά συμπληρωματικής ενέργειας, από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η νομοθεσία της χώρας δεν έχει σταθερά τιμολόγια για την παραγωγή, από υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Μόνο σε περιπτώσεις μη διασυνδεδεμένων νησιών, η ρυθμιστική αρχή ενέργειας, έχει το δικαίωμα να υποβάλει κάποιες συστάσεις στο υπουργείο. Το πλήθος των νησιών, αδυνατεί να έχουν σταθερά τιμολόγια, καθώς, διαφέρουν στα καύσιμα, στο ετήσιο προφίλ ζήτησης και σε επιμέρους χαρακτηριστικά της παραγωγής. Σημαντική επιδίωξη των ερευνητών, αποτελεί η εξίσωση του κόστους παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, με το τιμολόγιο που χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την οριακή βιωσιμότητα. Για την προώθηση της αντλησιοταμίευσης, το απαιτούμενο τιμολόγιο πρέπει να έχει τουλάχιστον αυτή την τιμή. Για αυτή την ανάλυση εξετάζονται τα δύο σενάρια με αιολική ισχύ 5000MW και 8000MW. Κατά τις ώρες πλεονάσματος ισχύος, ο διαχειριστής του σταθμού αντλησιοταμίευσης, αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, με σχετικά χαμηλή τιμή, η οποία αποτελεί το οριακό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για την ηπειρωτική χώρα. Τις περιόδους με υψηλούς ανέμους και χαμηλή ζήτηση, το οριακό κόστος της αιολικής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται ανάλογα, με την χρέωση της πλεονάζουσας αυτής ενέργειας, να κυμαίνεται από 0 έως 60 ευρώ ανά MWh. Για την οικονομική ανάλυση, οι ερευνητές έλαβαν ως υποθέσεις ότι για τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, το συνολικό κόστος επένδυσης είναι 2.000 ευρώ ανά kW, η διάρκεια ζωής γύρω στα 25 έτη, το επιτόκιο αναγωγής 6% και η απόδοση του σταθμού γύρω στο 75%. Με τη χρήση αποκλειστικά πλεονάσματος αιολικής ενέργειας για άντληση, οι υδροστρόβιλοι για να λειτουργήσουν και να παράγουν ενέργεια, έχουν κόστος από 400 έως 500 ευρώ ανά MWh, για το σενάριο των 5.000 MW και από 150 με 200 ευρώ ανά MWh, για το σενάριο των 8.000 MW. Η κατάλληλη τοπογραφία, αλλά και η αξιολόγηση ενός ήδη υπάρχοντος χώρου, ως κάτω ταμιευτήρα, αποτελούν παράγοντες μείωσης του κόστους εγκατάστασης, έχοντας ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των παραπάνω ευρώ τιμών. Για μια επένδυση με κόστος 1.000 ευρώ ανά kW, για το σενάριο των 5000MW, οι τιμές κυμαίνονται από 200 έως 300 ευρώ ανά MWh και για το σενάριο των 8000MW, από 75 έως και 155 ευρώ ανά MWh.

Η δεύτερη περίπτωση, της αιολικής ισχύος των 8000MW, προτιμάται, καθώς τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, έχουν την δυνατότητα αξιοποίησης του πλεονάσματος της ενέργειας. Για το ελληνικό σύστημα, σημαντικό παράγοντα που θα βοηθήσει στην μετάβαση από την αιολική ισχύ των 5000MW στα 8000MW, αποτελεί η χρήση συμπληρωματικής συμβατικής ενέργειας για άντληση. Επομένως, για την μείωση της αβεβαιότητας τέτοιων έργων, ο καθορισμός των τιμολογίων είναι απαραίτητος.

Η μελέτη, των Louloudis et al. (2022), παρουσιάζει την επαναχρησιμοποίηση ενός ορυχείου άνθρακα, με εξέταση της ανάπτυξης της δημιουργούμενης λίμνης. Το ορυχείο που χρησιμοποιήθηκε ως μελέτη περίπτωσης αποτελεί το ορυχείο Καρδιάς. Στην μεθοδολογία της έρευνας, αναλύθηκε η μορφολογία της λεκάνης, το υδρογεωλογικό περιβάλλον, οι εισροές και οι απώλειες νερού, οι στρατηγικές ενεργειακής μετάβασης και οικονομική αξία του έργου. Λίγο πιο λεπτομερώς, όσον αφορά την περιοχή μελέτης, το κοίτασμα Καρδιάς βρίσκεται στην Πτολεμαΐδα και είχε περίπου 273 εκ. τόνους αποθέματος λιγνίτη. Η περιοχή αποτελείται κυρίως από τεταρτογενή ιζήματα,

πιο συγκεκριμένα παρεμβολές άμμων, αργίλων, αμμωδών μαργών και συσσωμάτων, τα οποία περιβάλλουν τους σχηματισμούς λιγνίτη. Έχουν αναγνωρισθεί, δύο υδροφορείς, ο ανώτερος υδροφορέας είναι ο Σαργικιόλ και ο κατώτερος είναι ο Κόμανος. Οι περισσότερες υδάτινες ροές, προέρχονται από τα γύρω βουνά, με πιο συχνή κατεύθυνση των ποταμό Σουλού. Τα τεταρτογενή ιζήματα, μέσω απορρόφησης της βροχής, επιτρέπουν την ανανέωση του υδροφορέα. Σύμφωνα με μετεωρολογικά δεδομένα, η περιοχή χαρακτηρίζεται από αρκετή υγρασία. Στο ανοιχτό Φρέαρ του ορυχείου της Καρδιάς, έχει αναπτυχθεί λίμνη, με κύριες πηγές εισροής νερού, να είναι τα υπόγεια ύδατα από την επιφάνεια διήθησης και την επιφανειακή απορροή. Στην επιφάνεια της λίμνης, παρατηρούνται αρκετές απώλειες νερού, κυρίως λόγω της εξάτμισης, μειώνοντας έτσι την επαναφόρτιση της λίμνης. Σημαντικό ερευνητικό ερώτημα της μελέτης αποτελεί, αν η λίμνη έχει την δυνατότητα να πληρωθεί εγκαίρως ή χρειάζεται εκβολή ποταμού. Λόγω αυτού αξιολογήθηκε η στάθμη του νερού, μέσω προβλέψεων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας. Η στρατηγική που έχει θεσπιστεί για την ενεργειακή μετάβαση του ορυχείου, βασίζεται σε τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας που θα εγκατασταθούν στην περιοχή. Για την κάλυψη την μεταβλητής ενέργειας που παράγεται, απαιτείται μονάδα αποθήκευσης. Την καλύτερη λύση αποτελεί μια εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης (PHS), καθώς ευνοείται από την μορφολογία του ορυχείου, το βάθος του και του όγκου της λίμνης.

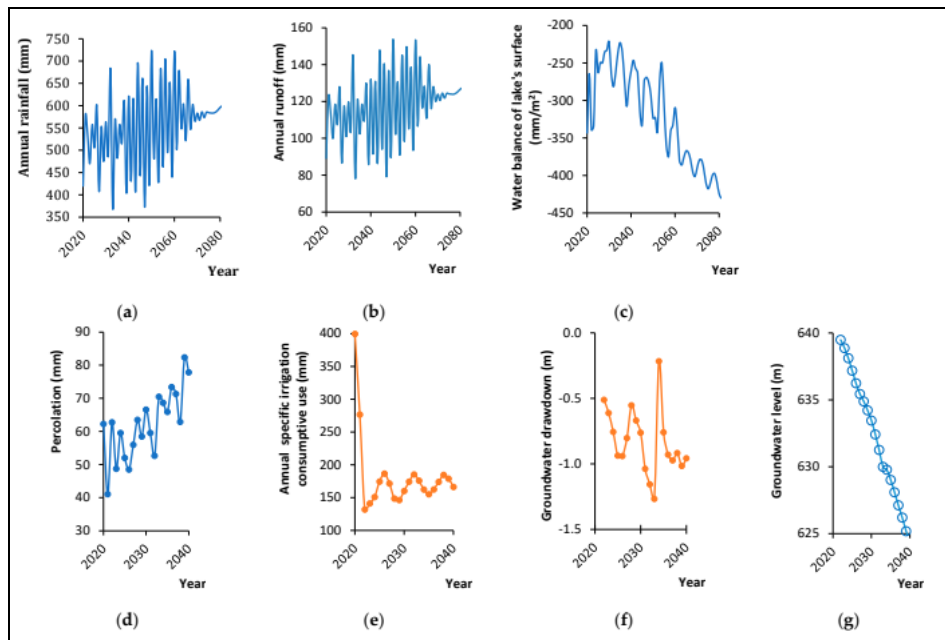
Σύμφωνα με τον Louloudis et al., σημαντικό περιορισμό αποτελεί η νομοθετική διάταξη 3468 του ΦΕΚ 129/A/ 27 Ιουνίου 2006, η οποία αναφέρει ότι στη διάρκεια του έτους, η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνεται από το δίκτυο, δεν πρέπει να ξεπερνά το 30% της ποσότητας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης. Επομένως, ο φωτοβολταϊκός σταθμός μπορεί να διαθέσει μόνο το 30% για αποθήκευση στο σύστημα. Η αξιολόγηση των διαφορετικών επιπέδων της στάθμης της λίμνης, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την οικονομική αποδοτικότητα του έργου. Αυτός ο προσδιορισμός μπορεί να συμβεί με την συμβολή δεικτών απόδοσης, για κάθε στάθμη. Ένας σημαντικός τέτοιος δείκτης, είναι η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ), η οποία συγκρίνει την παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών εισροών, με την αρχική επένδυση. Πιο συγκεκριμένα στην μελέτη αυτή, η ΚΠΑ υποδεικνύει εάν, το παραγόμενο εισόδημα της επένδυσης, θα είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο, από το συνολικό κόστος ζωής του έργου. Σημαντικό, γεωτεχνικό παράγοντα, για τον σχεδιασμό του συστήματος, αποτελεί το κρίσιμο βάθος του νερού, στον ταμιευτήρα. Σταθερότητα στο σύστημα, μπορεί να υπάρξει, με βάθος περίπου 15-35%, της τελικής κατάστασης ισορροπίας. Ωστόσο, ο συντελεστής ασφάλειας, αυξάνεται σε υψηλότερα επίπεδα λιμνών, λόγω της πίεσης του νερού, που ασκείται στην κλίση. Παρακάτω, στον Πίνακα 2.3, παρουσιάζονται προβλέψεις, που αφορούν την σταθερότητα της λίμνης, για διαφορετικά σενάρια βάθους νερού, στο ορυχείο.

Πίνακας 2.3: Ο παράγοντας ασφάλειας για διαφορετικές συνθήκες κρίσιμου βάθους σε ορυχεία λιγνίτη στην Ελλάδα

Βάθος Νερού Ταμιευτήρα	Safety Factor (FS)
0	1.0
0.1	<1.0
0.2	1.0
0.4	1.075
0.6	1.25
0.8	1.6

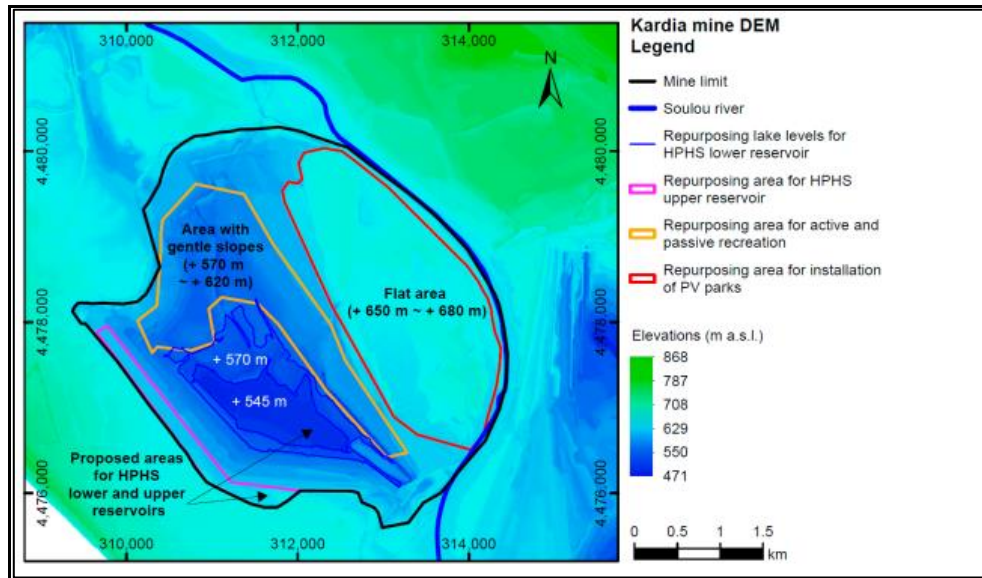
Πηγή: Louloudis et al. (2022)

Η παραπάνω μελέτη δημιούργησε προγνωστικά μοντέλα, για παραμέτρους όπως οι μελλοντικές βροχοπτώσεις, η επιφανειακή απορροή, η εξάτμιση, ο ρυθμός διήθησης και άλλα. Με την χρήση του μοντέλου NNAR, για τα επόμενα 10 χρόνια, υπολογίστηκε η αναμενόμενη εξασθένηση του υδροφορέα Sarigiol, γύρω στα 10 m, λόγω απαιτήσεων άρδευσης. Αυτή η μείωση των υπόγειων υδάτων, θα προκαλέσει μείωση 20% στις εισροές της λίμνης. Ακόμη, όσον αφορά την επιφανειακή ισορροπία της λίμνης, παρατηρήθηκε αυξημένη τάση απωλειών νερού, λόγω αύξησης της εξάτμισης, αλλά και της επιφάνειας του νερού. Τα παραπάνω, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Οι προβλέψεις του μοντέλου NNAR, για το λιγνιτωρυχείο Καρδιάς.
Πηγή: Louloudis et al. (2022)

Επιπλέον, εξετάστηκαν και κάποια ακόμη πιθανά σενάρια χρήσης γης, τα οποία συμφωνούν με την τελική κάλυψη του κενού του ορυχείου με νερό. Με γνώμονα κάποια τοπογραφικά χαρακτηριστικά, η περιοχή κοντά στο υψόμετρο +650m, χαρακτηρίζεται ως επίπεδη, καθιστώντας την ιδανική για την δημιουργία φωτοβολταϊκού πάρκου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.5. Η κλίση της περιοχής είναι περίπου 3,5% και έχει έκταση 5 τετραγωνικά χιλιόμετρα.



Εικόνα 2.5: Οι χρήσεις γης για το λιγνιτωρυχείο Καρδιάς. Πηγή: Louloudis et al. (2022)

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, για τα υψόμετρα +570m με +620m, ο χώρος αυτός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αναψυχή, με παραδείγματα την κολύμβηση, τις καταδύσεις, εγκαταστάσεις ψυχαγωγίας, ποδηλατικές διαδρομές και άλλα.

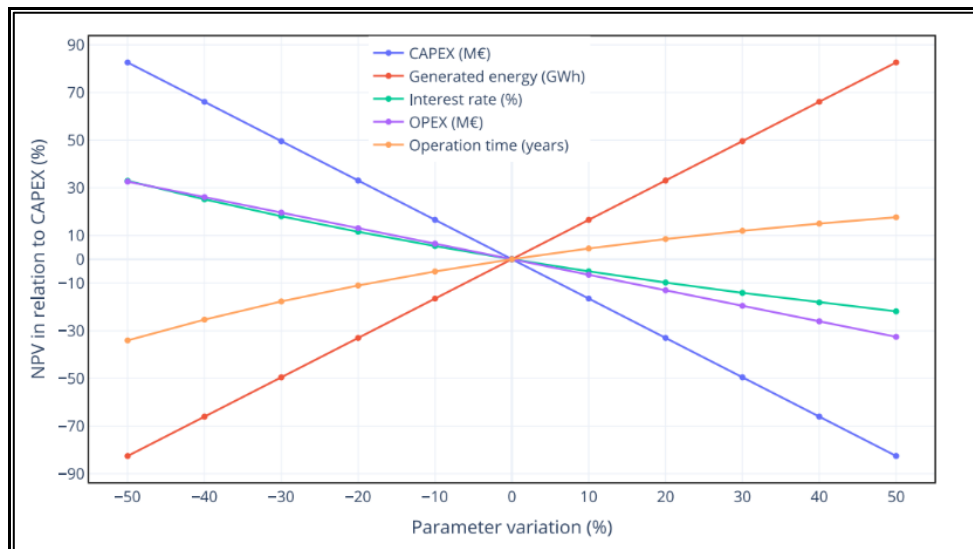
Οι Otto et al. (2026), ασχολήθηκαν με την οικονομική σκοπιμότητα σταθμού αντλησιοταμίευσης, σε ορυχείο ανοιχτού φρέατος, στην Ευρώπη. Αυτή η οικονομική αξιολόγηση, αφορά όπως και η προηγούμενη μελέτη, ένα υβριδικό σύστημα αντλησιοταμίευσης (HPHS), στο λιγνιτωρυχείο Καρδιάς, ώστε να αναπτυχθούν οι κατάλληλες στρατηγικές για τον προγραμματισμό συστημάτων HPHS, να μετριαστούν οι ανισορροπίες προσφοράς και ζήτησης και να σταθεροποιηθεί το δίκτυο, αναλύονται δεδομένα πρόβλεψης με το συνδυασμό των τιμών της αγοράς. Αυτά τα δεδομένα, παρέχουν πληροφορίες για την αναμενόμενη προσφορά ενέργειας, από ΑΠΕ, έως και 72 ώρες νωρίτερα. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται ως συστήματα ενεργειακού 'αρμπιτράζ', εκμεταλλευόμενα την δυναμική της αγοράς και τα πρότυπα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, για σωστή ανάπτυξη. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας, αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους, που οι τιμές είναι χαμηλές και την χρησιμοποιεί ή πουλάει, σε περιόδους αιχμής. Για τον γενικό σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων εξετάζονται τρεις χρονικές καταστάσεις λειτουργίας. Η πρώτη αφορά την κατάσταση αδράνειας, δηλαδή την παραμονή εκτός σύνδεσης, η δεύτερη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εκφόρτιση) και η τρίτη αφορά την φόρτιση, με αποθήκευση ενέργειας.

Για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, με χρήση της εκροής νερού, από τον άνω ταμιευτήρα, είναι αναγκαία δύο κριτήρια. Αρχικά, ο άνω ταμιευτήρας, να έχει αποθηκεύσει δυναμική ενέργεια, πάνω από το ελάχιστο επίπεδο αποθήκευσης και επιπλέον, η τιμή του δικτύου για την επόμενη ημέρα, να είναι υψηλότερη από την μέση τιμή, μέσα στο τρέχον 12ωρο. Οι τιμές του δικτύου, αποτελούν τη βάση, για τον υπολογισμό της αποθηκευμένης και παραγόμενης ενέργειας και των εσόδων και εξόδων, που παράγονται με την λειτουργία του HPHS. Σε αυτή την μελέτη, διερευνήθηκαν δύο σενάρια, ώστε να βρεθούν οι επιπτώσεις τους στην αποθήκευση και την παραγωγή ενέργειας. Το πρώτο σενάριο αφορά την τιμή του δικτύου και το δεύτερο την τιμή του δικτύου και το υπολειμματικό φορτίο. Το πρώτο σενάριο, αφορά

την πραγματική τιμή δικτύου, όπου οι τιμές συγκρίνονται με την μέση τιμή. Μέσω αυτής της ανάλυσης καθορίζεται αν η ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται, όταν η τιμή του δικτύου είναι κάτω από τον μέσο όρο, ή να παράγεται, όταν η τιμή του δικτύου είναι μεγαλύτερη του μέσου όρου, συγκρίνοντας την μέση ωριαία τιμή ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στις 12 ώρες, με την πραγματική τιμή δικτύου. Στο δεύτερο σενάριο, απαιτείται το υπολειμματικό φορτίο να είναι μικρότερο της μέσης τιμής, ώστε να ξεκινήσει αποθήκευση ενέργειας. Ως υπολειμματικό φορτίο, εννοείται η ζήτηση ενέργειας, η οποία δεν καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές και παρέχεται από συμβατικούς σταθμούς, είτε εισάγεται. Το σενάριο εξασφαλίζει, ότι υπάρχει σημαντική ποσότητα πλεονάζουσας ενέργειας από ΑΠΕ και έτσι βελτιστοποιείται η ικανότητα άντλησης στον HPHS.

Για την δημιουργία υβριδικού συστήματος HPHS, στην Ελλάδα, το κόστος εγκατάστασης αναμένεται περίπου στα 1.100 ευρώ/kW. Με τον παρόν σταθμό να έχει κόστος 143 εκατομμύρια ευρώ. Οι λειτουργικές δαπάνες, κυμαίνονται στο 3%-5% του αρχικού κόστους εγκατάστασης, ετησίως. Αυτές οι δαπάνες αφορούν κυρίως την λειτουργία, αλλά και την συντήρηση των δεξαμενών, του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, των σωλήνων και άλλων οργάνων. Οι λειτουργικές δαπάνες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την μελέτη, αφορούσαν περίπου το 4% του αρχικού κόστους, άρα γύρω στα 5,72 εκατομμύρια το χρόνο.

Για την οικονομική αξιολόγηση του ορυχείου της Καρδιάς εξετάστηκαν δείκτες, όπως η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ), ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (IRR) και το σταθμισμένο κόστος αποθήκευσης (LCOS). Με την καθαρά παρούσα αξία και τον εσωτερικό συντελεστή, να είναι θετικοί και μεγαλύτεροι του επιτοκίου, αναμένεται κερδοφορία. Ένας IRR, πάνω από 10%, αποτελεί θετικό πρόσημο για την επένδυση, ενώ κάτω από 5%, η επένδυση επανεξετάζεται. Σημαντικό δείκτη αποτελεί και η περίοδος αποπληρωμής, η οποία αναφέρεται στα έτη, όπου η επένδυση θα εξοφλήσει τα αρχικά έξοδα. Με την ανάλυση των παραπάνω, τα ενδιαφερόμενα μέρη, έχουν την δυνατότητα λήψης τεκμηριωμένων επενδυτικών αποφάσεων. Στην παρακάτω ανάλυση ευαισθησίας, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, παρατηρείται, πως η παραγόμενη ενέργεια και το κόστος εγκατάστασης (Capex), αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες διαμόρφωσης της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ). Για παράδειγμα, μια αύξηση 10% στην παραγωγή, αυξάνει την ΚΠΑ κατά 17%, και μια μείωση περίπου 10% στο Capex, αυξάνει εξίσου την ΚΠΑ κατά 10% (Otto et al., 2026).



Σχήμα 2.2: Ανάλυση ευαισθησίας για την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), με διάφορες οικονομικές παραμέτρους. Πηγή: Otto et al. (2026)

Η μοντελοποίηση για το πρώτο σενάριο, εμφάνισε σταθερή αύξηση της παραγωγής για τα έτη που είχαν τεθεί. Τα κέρδη λόγω πωλήσεων της ηλεκτρικής ενέργειας του HPHS, παρουσιάζουν σημαντική αύξηση, η οποία οφείλεται κυρίως, στην αυξημένη παραγωγή από ΑΠΕ. Όσον αφορά, το δεύτερο σενάριο, παρουσιάζει παρόμοια τάση στο κέρδος, αλλά με μικρότερη παραγωγή, λόγω της στρατηγικής του λειτουργίας. Ωστόσο, στο δεύτερο σενάριο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διασπορά της τιμής, 7,45% μεγαλύτερη από το πρώτο σενάριο, αποτελώντας μια πιο οικονομικά αποδοτική στρατηγική, με λιγότερες ώρες λειτουργίας, μειώνοντας έτσι και τα λειτουργικά έξοδα. Επιπλέον, προάγει την ευελιξία του δικτύου, μέσω της ευθυγράμμισης με την διαθεσιμότητα των ΑΠΕ. Αυτή η στρατηγική έχει ενισχυμένη οικονομική επιλεκτικότητα και αποτελεί σημαντική μέθοδο για την βελτιστοποίηση συστημάτων HPHS για δυναμικές συνθήκες ενεργειακού συστήματος.

Ακόμη μια αξιοσημείωτη μελέτη που εστιάζει στο λιγνιτωρυχείο της Καρδιάς, αποτελεί αυτή, των Krassakis et al. (2023), η οποία χρησιμοποιεί το σύστημα GIS, για να αξιολογήσει ένα υβριδικό σύστημα αντλησιοταμίευσης, στην περιοχή αυτή. Ο τόπος αυτός, επιλέχθηκε ως κατάλληλος για την ανάπτυξη ενός HPHS, με ανάλυση συγκεκριμένων κριτηρίων και μοντέλων. Τα κριτήρια επιλογής τοποθεσίας, χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους, αυτά που ασχολούνται με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και αυτά που αφορούν την εγγύτητα της νέας δεξαμενής, με διάφορα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Σημαντικό στοιχείο για τον πρώτο τύπο αποτέλεσε, ότι η υπάρχουσα μορφολογία και ο υπάρχον κατώτερος ταμιευτήρας, είναι κατάλληλοι για την κατασκευή του άνω ταμιευτήρα. Σημαντικό χαρακτηριστικό, αποτελεί και η κλίση, καθώς όσο πιο επίπεδο το έδαφος, τόσο πιο κατάλληλο και τόσο λιγότερες οι παρεμβάσεις. Όσον αφορά το δεύτερο τύπο, τα κριτήρια ασχολούνται με τις ελάχιστες αποστάσεις του έργου, από στοιχεία της περιοχής. Για παράδειγμα, η ελάχιστη απόσταση από περιοχές προστασίας της φύσης, επιλέχθηκαν τα 500 μέτρα. Για την ελάχιστη απόσταση από κατοικημένες περιοχές προτείνονται επίσης τα 500 μέτρα. Για να είναι βιώσιμος ένας τέτοιος σταθμός, ως μέγιστη απόσταση από το υπάρχον δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζονται τα 20 χιλιόμετρα και ως ελάχιστη από το δίκτυο μεταφορών τα 200 μέτρα. Επιπλέον, αρκετή προσοχή χρειάζεται η απόσταση

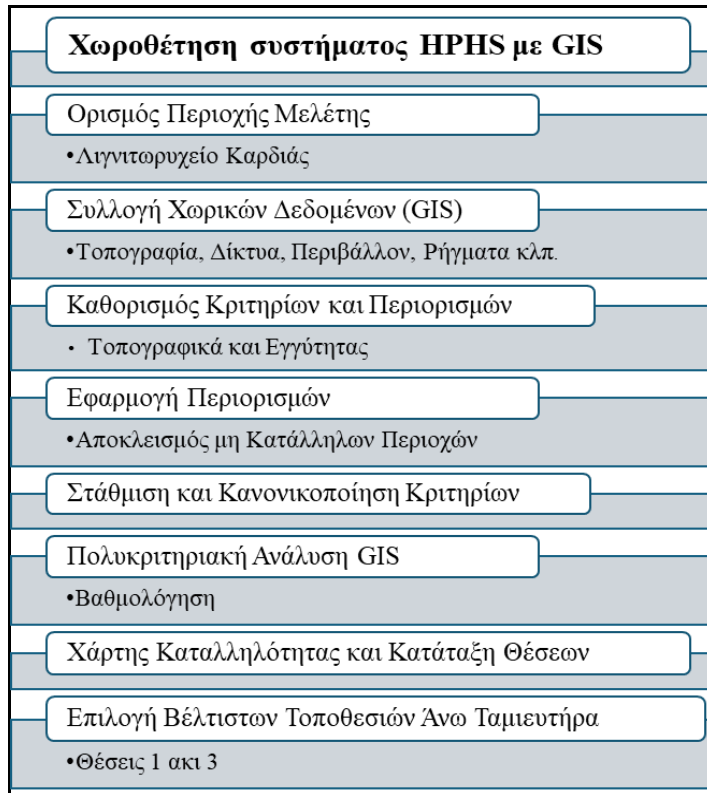
από γεωλογικά ρήγματα και περιοχές με κατολισθήσεις. Στην συνέχεια, ακολουθεί ο Πίνακας 2.4, στον οποίο συνοψίζονται οι παράγοντες, που δημιούργησαν τα κριτήρια και τους περιορισμούς για τον σχεδιασμό ενός τέτοιου έργου, μαζί με το αντίκτυπο τους σε αυτό. Στον οποίο βλέπουμε ότι η ύπαρξη κατώτερου ταμιευτήρα και η τοπογραφία της περιοχής, έχουν θετικό αντίκτυπο και καλύπτουν τα κριτήρια, μαζί με την απόσταση από το οδικό δίκτυο και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, η απόσταση από τα συστήματα Natura 2000 και Corine 2018 αποτελεί περιορισμό για την ανάπτυξη του έργου.

Πίνακας 2.4: Τα κριτήρια και οι περιορισμοί για τον σχεδιασμό έργων HPHS.

Παράγοντες	Χαρακτηριστικό Κριτηρίου
Η τοποθεσία του ήδη υπάρχοντα κάτω ταμιευτήρα	Απόσταση μεταξύ των ταμιευτήρων
Τοπογραφία	Μέση απαιτούμενη υψομετρική διαφορά μεταξύ των ταμιευτήρων και αποδεκτή κλίση εδάφους
Natura 2000	Ελάχιστη απόσταση από φυσικούς βιότοπους
Οδικό Δίκτυο	Απόσταση από το υπάρχον οδικό δίκτυο
Ηλεκτρικό Δίκτυο	Απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο

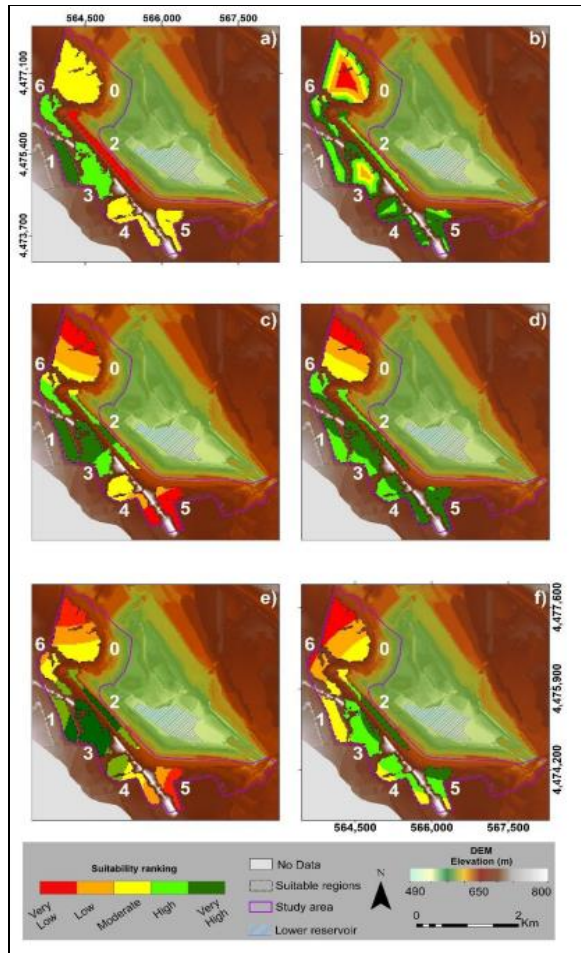
Πηγή: Krassakis et al. (2023)

Ακόμη ένας κρίσιμος παράγοντας, για το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων, αποτελεί η απόσταση της υπάρχουσας κάτω δεξαμενής, με την νέα άνω δεξαμενή. Αυτός, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, καθώς επηρεάζει το λειτουργικό κόστος του σταθμού, λόγω των απωλειών από την τριβή στους αγωγούς. Ως μέγιστη απόσταση θεωρήθηκαν τα 5 χιλιόμετρα και για την ανάλυση κατατάχθηκαν ως καταλληλότερες οι μικρότερες αποστάσεις. Ακολουθεί η μεθοδολογία της χωροθέτησης του συστήματος HPHS, μέσω GIS, για το λιγνιτωρυχείο της Καρδιάς.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας χωροθέτησης υβριδικού συστήματος PHS, με χρήση GIS. Πηγή: Ιδία επεξεργασία, βάσει Krassakis et al. (2023)

Στη παρούσα μελέτη, συνοψίζονται τα βασικά στάδια που αναδεικνύει η βιβλιογραφία, για την αξιολόγηση των εγκαταλελειμμένων ορυχείων. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή βασίζεται κυρίως σε θεωρητικές και υπολογιστικές προσεγγίσεις και δεν ενσωματώνει δεδομένα από έρευνες πεδίου, γεγονός που περιορίζει την εμπειρική τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί σχήμα, στο οποίο παρουσιάζονται τα έξι πιο σημαντικά κριτήρια, που επιλέχθηκαν να απεικονιστούν στους χάρτες, με σκοπό να βρεθεί η καταλληλότερη, από τις προτεινόμενες τοποθεσίες για την δημιουργία του άνω ταμιευτήρα..



Σχήμα 2.4: Χάρτες που αφορούν τα κριτήρια και απεικονίζουν την βαθμολογία της καταλληλότητας για διάφορες τοποθεσίες. Πηγή: Krassakis et al. (2023)

Ο πρώτος χάρτης α), αφορά την μέση διαφορά υψομέτρου, ο β), την απόσταση από το οδικό δίκτυο, ο γ), την απόσταση από ρήγματα, ο δ) την απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ο ε), την απόσταση από το δίκτυο αποχέτευσης και ο στ), την απόσταση από την κάτω δεξαμενή. Η κατάταξη τους από το πιο σημαντικό στο μη, ακολουθεί ως εξής. Το πιο σημαντικό παράγοντα, αποτελεί η μέση διαφορά υψομέτρου, έπειτα η απόσταση των δεξαμενών, συνεχίζει η απόσταση από τα ρήγματα, και τέλος ακολουθούν οι άλλοι τρεις με μικρές διαφορές. Μετά από μια πολυκριτηριακή ανάλυση, οι καταλληλότερες τοποθεσίες για την ανάπτυξη της άνω δεξαμενής, βρίσκονται κοντά στο κέντρο της περιοχής και αφορούν τις τοποθεσίες με ένδειξη 1 και 3, ενώ η χειρότερη τοποθεσία είναι βόρεια και αφορά την ένδειξη 0.

Οι Krassakis et al. (2022), με τη βοήθεια των συστημάτων GIS, ανέπτυξαν τρισδιάστατο γεωλογικό μοντέλου, με στόχο την υλοποίηση καινοτόμων μεθόδων εξόρυξης, αλλά και μετατροπής άνθρακα, σε επιφανειακό ορυχείο. Η μετατροπή αυτή, αφορά την υπόγεια αεριοποίηση άνθρακα (UCG), η οποία αποτελεί τεχνολογία, που μετατρέπει τον άνθρακα σε αέριο. Αποτελεί πολύ πιο φιλοπεριβαλλοντική τεχνολογία από τις συμβατικές τεχνικές εξόρυξης και για την περίοδο της ενεργειακής μετάβασης και της κλιματικής αλλαγής, αποτελεί ευκαιρία αυτή η τεχνολογία. Η διαδικασία της UCG, χρησιμοποιείται στα εναπομείναντα ορυχεία, ώστε να αεριοποιήσει τον άνθρακα που δεν έχει εξορυχθεί. Έπειτα, παράγει συνθετικό αέριο (syngas), το οποίο μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως χημική πρώτη ύλη. Αξίζει να αναφερθεί, ο συνδυασμός της UCG με τις τεχνολογίες Gas to Liquids, όπου αυτά τα υψηλής ποιότητας συνθετικά υγρά καύσιμα, προσφέρουν αρκετά περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Η μελέτη των Krassakis et al., στοχεύει στην ενσωμάτωση δεδομένων που αφορούν γεωτρήσεις, τη χαρτογράφηση και το πάχος της λιγνιτικής φλέβας, στο ορυχείο της Καρδιάς. Απώτερο στόχο, αποτέλεσε ο εντοπισμός κατάλληλων ορυχείων, για την εφαρμογή τεχνολογιών εξόρυξης και ταυτόχρονης μετατροπής άνθρακα.

2.4.3. Παγκόσμια παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης ορυχείου για αντλησιοταμίευση

Μελέτη η οποία εξετάζει ένα Ευρωπαϊκό παράδειγμα, αλλά μελετά και το ελληνικό παράδειγμα του λιγνιτωρυχείου της Καρδιάς, αποτελεί αυτή των Strugała-Wilczek et al. (2025), οι οποίοι μελέτησαν τις υδρογεωχημικές επιδράσεις των σταθμών αντλησιοταμίευσης, σε περιοχές επιφανειακών ορυχείων στην Ελλάδα και την Πολωνία. Από το ορυχείο Belchatow στην Πολωνία και από αυτό της Καρδιάς στην Ελλάδα, ελήφθησαν δείγματα στερεών ιζημάτων, για περαιτέρω ανάλυση.

Οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των παραπάνω δειγμάτων, είναι η καύση σε υψηλή θερμοκρασία με ανίχνευση IR, η τεχνική (WDXRF) με χρήση ακτίνων X, η τεχνική (ICP-OES) και η τεχνική (CV-AAS). Τα υγρά δείγματα αναλύθηκαν, με τις παραδοσιακές τεχνικές, αλλά και με σύγχρονες, όπως η ιοντική χρωματογραφία (IC), η ανάλυση ροής και άλλες. Για όλα τα δείγματα προσδιορίστηκε η συνολική υγρασία. Τα περισσότερα δείγματα του ορυχείου Καρδιάς, αποτελούνται από παρόμοια σύνθεση, με κυρίαρχο συστατικό να είναι ο ασβεστίτης με ποσοστά από 30% έως 80%. Αντίθετα, μόνο το δείγμα Mix 5K, είχε ως κυρίαρχο συστατικό τον χαλαζία σε ποσοστό 45%. Η ποσότητα των άμορφων ουσιών στα δείγματα κυμαίνεται περίπου στο 12%. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η μη ανίχνευση πυρίτη. Όσον αφορά το ορυχείο Belchatow, το κύριο συστατικό αποτελεί ο χαλαζίας με ποσοστό από 51% έως 87% και οι άμορφη ύλη κυμαίνεται στο 5% με 10%. Στο ορυχείο αυτό ανακαλύφθηκε και πυρίτης στο περίπου 5%, όπου χρειάζεται συγκεκριμένη αντιμετώπιση, καθώς έχει υψηλή αντιδραστικότητα και ευαισθησία στην οξείδωση και ενέχει κινδύνους, όπως το να αλλάξει την χημεία του νερού και να υποβαθμίσει την ποιότητα του. Η διαδικασία αυτή μπορεί να συμβεί, όταν το νερό του ορυχείου, έρχεται σε επαφή με οξυγόνο, κατά την αποθήκευση του στις εξωτερικές δεξαμενές του συστήματος, η χημική του σύσταση αλλάζει ώστε να έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον και προκαλεί διακυμάνσεις στο pH. Όσον αφορά την χημική σύνθεση αυτών των δειγμάτων, κύρια συστατικά αποτέλεσαν, ο οργανικός άνθρακας, το θείο, το νικέλιο και άλλα.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά των ιζημάτων των ορυχείων με την επαφή τους με το νερό, αλλά και να αναλυθούν οι διεργασίες που θα συμβούν στον κάτω ταμιευτήρα ενός σταθμού PHS κατά την λειτουργία του, έγιναν δοκιμές έκπλυσης με υλικό από τα στερεά ιζήματα. Για αυτή τη διαδικασία συλλέχθηκαν τοπικά όμβρια ύδατα και εξετάστηκαν και τα υπόγεια. Για τις δοκιμές έκπλυσης με νερό βροχής, παρατηρήθηκε παρόμοιο pH γύρω στο 8 και κάποιες ουσίες όπως θειικά

άλατα, νιτρικά και κάλιο. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί, ότι για κάποια δείγματα του ορυχείου της Πολωνίας, μειώθηκε αρκετά το pH και πιθανών συνέβη όξινη αποστράγγιση (AMD). Ιδιαίτερη προσοχή, πρέπει να δοθεί στις ενώσεις BTEX, όπου ανιχνεύθηκε μόνο βενζόλιο, το οποίο είναι αρκετά τοξικό για την υγεία και το περιβάλλον. Με την λειτουργία της μονάδας PHS, οι υδροχημικοί κύκλοι μπορεί να αλλάξουν αρκετά χαρακτηριστικά όπως το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, το πυρίτη, τα σουλφίδια και άλλα στοιχεία, επηρεάζοντας αρνητικά την ανθεκτικότητα της εγκατάστασης, με την διάβρωση των αντλιών, των στροβίλων, αλλά και μεταβάλλοντας την χημική ισορροπία του υδροφορέα. Η διαβρωτική επιθετικότητα του νερού δρα στο χάλυβα, στο σκυρόδεμα και σε άλλα υλικά και μπορεί να προσδιοριστεί με την ανάλυση των θεικών ιόντων, του pH, του επιθετικού CO₂ και άλλων. Η μείωση της περιεκτικότητας του CO₂, απελευθερώνει ίζημα, το οποίο σχηματίζει ένα στρώμα προστασίας από την διάβρωση, ενώ η αύξηση της περιεκτικότητας, διαλύει το ίζημα και προκαλεί διάβρωση. Για την τοποθεσία της Καρδιάς, το νερό της βροχής θεωρείται αρκετά ελαφρύ και μη επιθετικό για το σκυρόδεμα, αλλά μέτρια διαβρωτικό για τον χάλυβα. Τα συστατικά που λαμβάνονται από το ορυχείο, επηρεάζουν ελαφρώς το σκυρόδεμα. Για το ορυχείο του Belchatow, το νερό της βροχής μπορεί να προκαλέσει ελαφριές ζημιές στην χαλύβδινη υποδομή, οπότε χρειάζεται ειδική προστασία.

Ακόμη, συμπληρωματική μελέτη αποτελεί αυτή των Schnepfer et al. (2025), στην οποία επίσης εξετάζονται, οι υδρογεωχημικές επιδράσεις των συστημάτων αντλησιοταμίευσης σε χώρους επιφανειακών ορυχείων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην περιοχή της Καρδιάς και στο Belchatow στην Πολωνία. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης, χρειάζεται να προσαρμόζονται στις εξειδικευμένες συνθήκες τοποθεσίας, μορφολογίας και περιβάλλοντος σε κάθε μέρος. Με την πλημμύρα των ορυχείων αυτών, επηρεάζεται τόσο το τοπικό, όσο και το περιφερειακό υδροχημικό σύστημα, καθώς κινητοποιούνται ρύποι, από τις χωματερές των ορυχείων, με την ροή του νερού. Αρκετά ορυκτά αποτελούν ασταθείς ενώσεις, σε οξειδωτικές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να επέλθουν με την εκσκαφή και εναπόθεσή τους. Σε αυτόν τον χώρο, επιτελούνται διάφορες χημικές αντιδράσεις, που μπορούν να προκαλέσουν ρύπους, τους οποίους μεταφέρει το νερό στον ταμιευτήρα του συστήματος, αλλά και στον τοπικό υδροφορέα. Σε πρώην ορυχεία, έχουν παρατηρηθεί ταμιευτήρες πλούσιοι σε θειικά άλατα και με πολύ χαμηλό pH. Αυτά τα χαρακτηριστικά, χρησιμεύουν και ως δείκτες, όταν εξετάζεται η ποιότητα του νερού σε ορυχεία, με τη λειτουργία συστήματος PHS. Η έρευνα αυτή, αναπτύσσει ένα πλαίσιο μοντελοποίησης της πορείας των αντιδράσεων, ώστε να προσομοιωθούν διάφορα σενάρια συστημάτων αντλησιοταμίευσης και υδροχημικών κύκλων. Σημαντικό συμπέρασμα αποτελεί ο έλεγχος της συγκέντρωσης του οξειδωμένου πυρίτη, η ρυθμιστική ικανότητα του ασβεστίτη και οι μηχανισμοί αραίωσης, για την ποιότητα του νερού στις δεξαμενές. Η αυξημένη οξύτητα και οι υψηλές συγκεντρώσεις αυτών των μετάλλων και των οξέων, μπορούν να επηρεάσουν από το τοπικό περιβάλλον, μέχρι και την υποδομή του PHS μέσω διάβρωσης.

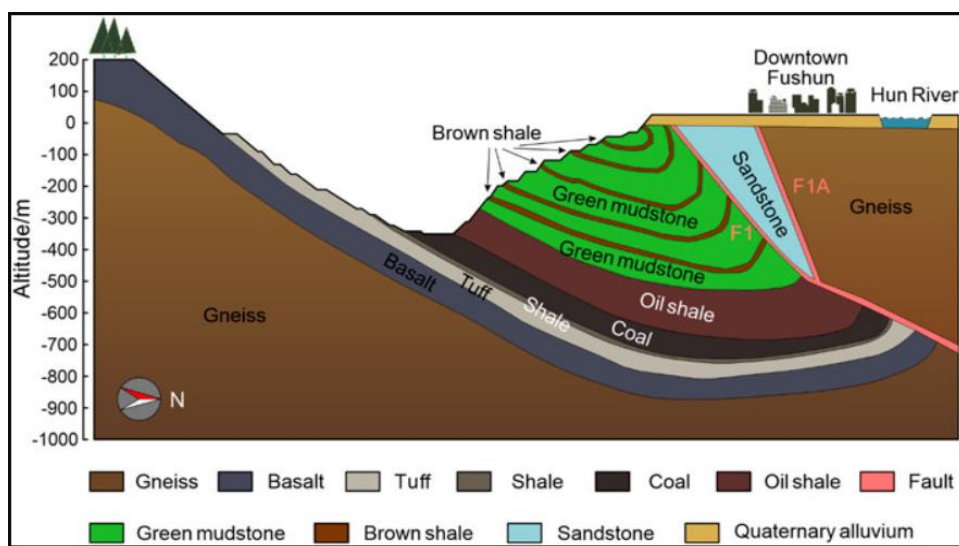
Βασικό στοιχείο των προσομοιώσεων αποτέλεσε η πλημμύρα του κάτω ταμιευτήρα με νερό βροχής, υπόγεια ύδατα και επιφανειακή απορροή, με διάφορες αναλογίες. Ο μόνος τρόπος φυσικής αραίωσης του νερού του ταμιευτήρα για το σύστημα PHS είναι με το νερό της βροχής. Η σύσταση των ιζημάτων αποτελείται από 30% άργιλο και 70% από άμμο και χαλίκι. Όλα τα στοιχεία και για τις δύο περιοχές μελέτης ελήφθησαν από δεδομένα πεδίου και εργαστηρίου, με δειγματοληψίες, δοκιμές έκπλυσης και ποσοτικές και ποιοτικές αναλύσεις. Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης, χρησιμοποιήθηκε το

πρόγραμμα Python, ώστε να αναλυθούν τα δεδομένα και ένα ακόμη εργαλείο γεωχημικής προσομοίωσης, το PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 2013). Σε αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνονται τρεις διαδρομές, η διαδραστική παραμετροποίηση, η προσομοίωση πλημμύρας και η κυκλική προσομοίωση του συστήματος PHS. Το πρώτο στάδιο αφορά τη δημιουργία πολλών συνδυασμών παραμέτρων εισόδου, που αφορούν υδροχημικά δεδομένα. Με στόχο, να μοντελοποιηθεί το σύστημα PHS και η πλημμύρα, χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις υδρογεωχημικών αντιδραστήρων. Επιπλέον, προσομοιώθηκαν αντιδράσεις μεταξύ ορυκτών και νερού, αερίων και νερού και άλλα. Βέλτιστο σημείο, το οποίο σήμαινε το τέλος των προσομοιώσεων, αποτελούσε το σημείο στο οποίο το pH και οι συγκεντρώσεις σιδήρου και θεικών έφταναν σε σταθερή κατάσταση ή επιτεύχθηκε το χρονικό διάστημα των 20 χρόνων λειτουργίας. Για το ορυχείο της Καρδιάς, τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις για τη λειτουργία του PHS, φανερώνουν σταθεροποίηση για το pH και τις συγκεντρώσεις θεικών ιόντων, μετά τα 4 χρόνια και όλα τα κριτήρια πληρούνται μετά από 11,5 χρόνια. Το αρχικό pH, στον κάτω ταμιευτήρα, είναι γύρω στο 8, σύμφωνα με τις αναλογίες ανάμιξης κατά την πλημμύρα. Έπειτα, το pH μειώνεται γύρω στο 7,5, με την πάροδο των πρώτων κύκλων άντλησης, ανάλογα με την σύνθεση του νερού της απορροής. Οι συγκεντρώσεις των θεικών αλάτων, αρχικά κυμαίνονται μεταξύ 200-700 mg/L και έπειτα σταθεροποιούνται γύρω στα 300 mg/L. Η μείωση της συγκέντρωσης, συμβαίνει λόγω της αραιώσης του νερού της δεξαμενής, με υπόγεια ύδατα. Όσον αφορά το ορυχείο Belchatów, το pH και οι συγκεντρώσεις των θεικών αλάτων, σταθεροποιούνται μετά από τα 20 χρόνια λειτουργίας του σταθμού PHS, αν και δεν επιτυγχάνεται το βέλτιστο της χημικής σταθερότητας. Οι περιοχές μελέτης της έρευνας, έχουν σημαντικές διαφορές, που αφορούν, τον όγκο νερού τους, την τοπική υδρογεωλογία και τους τρόπους λειτουργίας των PHS.

Για το λιγνιτωρυχείο της Καρδιάς, κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την υδροχημεία του συστήματος, αποτελούν η εισροή των επιφανειακών απορροών κατά τις πλημμύρες και το νερό που υπάρχει στην δεξαμενή και είχε επαφή με την χωματερή του ορυχείου. Τα υπόγεια ύδατα εμποδίζονται από τα αδιαπέραστα ιζήματα, αλλά και διευθετούνται, οπότε δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το σύστημα. Σε ένα ανοιχτό ορυχείο το βάθος διείσδυσης του νερού στα ιζήματα κατά την διάρκεια ενός κύκλου, είναι κάποια εκατοστά. Η διάβρωση των ιζημάτων αποτελεί σημαντική διαδικασία για το ορυχείο, καθώς συχνά, ποσότητες λεπτών ιζημάτων εκπλύνονται και εισέρχονται στην δεξαμενή και παραμένουν στο σύστημα PHS, όπως φάνηκε από τις δοκιμές έκπλυσης για την περιοχή της Καρδιάς. Εάν οδηγηθεί προς τον λάκκο λάσπη σιδήρου, τότε δημιουργείται συσσώρευση σιδήρου στην βάση της δεξαμενής. Η αξιολόγηση των αλλαγών στη στάθμη και στη ροή της λίμνης, συμβάλλει στην πρόβλεψη της σύνθεσης του νερού και της διάβρωσης. Αποτρεπτική λύση για την είσοδο ρύπων στο σύστημα αποτελεί η σφράγιση της δεξαμενής με γεωμεμβράνη ή τσιμέντο, αλλά και η συγκράτηση της επιφανειακής απορροής, μέσω κατασκευής κάποιων καναλιών αποστράγγισης. Ακόμη, η απόρριψη νερού σε παρακείμενο ποταμό αποτελεί σημαντική διαδικασία, καθώς σε περιόδους υψηλών βροχοπτώσεων, συμβάλλει στη διατήρηση σταθερού όγκου νερού στο PHS, αλλά αραιώνει και το νερό της δεξαμενής, μειώνοντας και άλλο τις συγκεντρώσεις θεικών. Αυξημένες συγκεντρώσεις τέτοιων ιόντων, αποτελούν κίνδυνο για την ανθεκτικότητα εξαρτημάτων, όπως οι αγωγοί και οι στρόβιλοι, καθώς περιέχουν σίδηρο. Όσον αφορά τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς στο σύστημα PHS στο ορυχείο της Καρδιάς, η επίδραση της υδροχημείας σε αυτούς θα είναι ελάχιστη.

Το ορυχείο Belchatow, αποτελεί μια πιο περίπλοκη περίπτωση, λόγω του μεγέθους του και της γεωλογίας του υπεδάφους του. Στην δεξαμενή κυριαρχεί μεγάλη εισροή υπόγειων υδάτων, παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά το pH. Τα θειικά ιόντα προέρχονται κυρίως από την εσωτερική χωματερή του ορυχείου και έχουν συγκέντρωση πολύ χαμηλότερη από αυτή των 1050 mg/L, που υπολόγισαν οι προσομοιώσεις ως μέγιστη συγκέντρωση θεικών για όλο των κάτω ταμιευτήρα. Για την αποφυγή υδραυλικής επαφής με λιγνίτη και με υδροφορέα, θα προστεθούν στην δεξαμενή ιζημάτα, τα οποία θα την κάνουν και πιο ρηχή. Θεικά άλατα, αλλά και προϊόντα οξείδωσης πυρίτη, θα απελευθερωθούν στην δεξαμενή κατά την αρχική πλημμύρα, μέχρι την κάλυψη των ιζημάτων, που θα μειώσει την διαθεσιμότητα τους σε οξυγόνο. Η επίδραση του PHS, στην στρωματοποίηση της λίμνης του Belchatow, δεν αξιολογήθηκε. Αν συμβεί αυτή η διαδικασία μέσα στην δεξαμενή, θα επιδράσει στις συγκεντρώσεις των θεικών και του σιδήρου στα στρώματα της, μετατρέποντας τα σε ποιο ακίνδυνα και βελτιστοποιώντας την ποιότητα του νερού για την παρουσία ψαριών και άλλων οργανισμών.

Μελετώντας παγκόσμια δεδομένα, και πιο συγκεκριμένα, την κινέζικη πραγματικότητα, οι Liu et al. (2022), εξετάζουν την τεχνική σκοπιμότητα ενός σταθμού PHS, στο ορυχείο άνθρακα Fushun West Open-Pit. Αποτελεί, το μεγαλύτερο ορυχείο της Ασίας, καθώς τα τελευταία χρόνια έχουν εξορυχθεί περίπου 190 εκατομμύρια τόνοι άνθρακα και 480 εκατομμύρια τόνοι σχιστολιθικού πετρελαίου. Η μηχανική γεωλογία του ορυχείου είναι σχετικά περίπλοκη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6. Στο ενδιαμέσο μέρος φαίνεται να υπάρχει στρώση αργιλώδους πετρώματος και σχιστόλιθου, ενώ η φλέβα του άνθρακα έχει πάχος, από 30 έως 145 μέτρα, η οποία περιβάλλεται από σχιστολιθικό πετρέλαιο και τόφο. Στην περιοχή, έχουν παρατηρηθεί πολλές κατολισθήσεις διαφορετικών μεγεθών και έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές αναλύσεις για την σταθερότητα των βραχωδών πλαγιών.

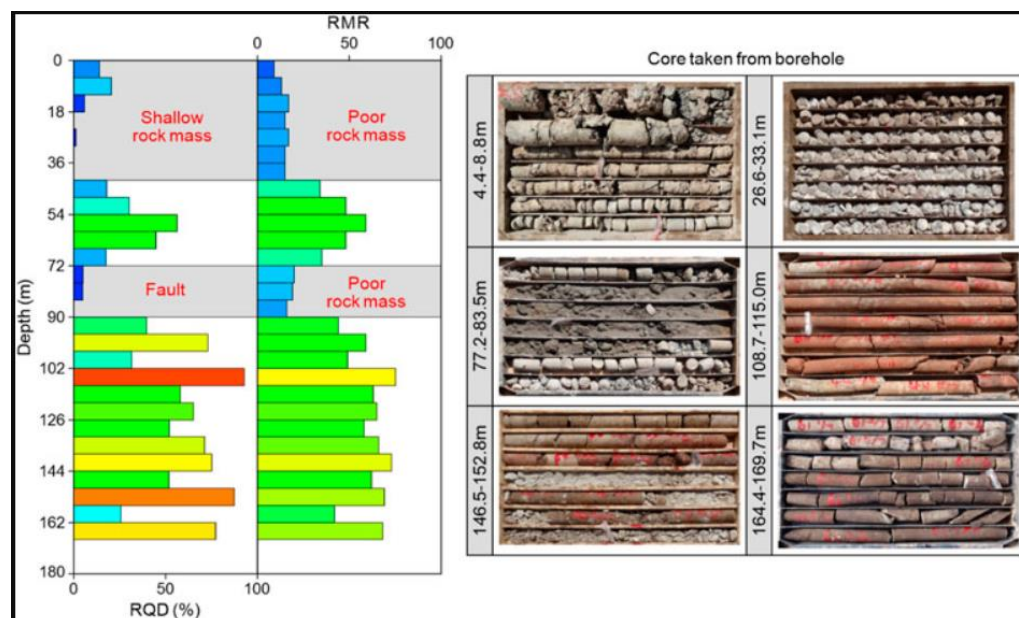


Εικόνα 2.6: Το γεωλογικό προφίλ του ορυχείου Fushun West. (2022)

Πηγή: Liu et al.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, για την παρούσα μελέτη ανοίχτηκε γεωλογική γεώτρηση, στην βόρεια πλαγιά. Στην παρακάτω Εικόνα 2.7, αναλύεται ο πυρήνας που ελήφθη από την γεώτρηση. Παρατηρείται, ότι στις ρηχές βραχώδεις μάζες υπάρχει

έντονη φθορά, ενώ οι βαθιές έχουν μια πιο ελαφριά. Υπολογίστηκαν η ποιότητα του βράχου (RQD) και η απόσταση των αρμών. Η μάζες αυτές παρατηρήθηκαν ως σχετικά υγρές, καθώς στην πλαγιά υπάρχουν πολλά σημεία εξόδου νερού. Επιπλέον για την ποιότητα χρησιμοποιήθηκε η βαθμολογία βραχώδους μάζας (RMR).



Εικόνα 2.7: Ο πυρήνας της γεώτρησης στο ανοιχτό ορυχείο άνθρακα Fushun West. Πηγή: Liu et al. (2022)

Αυτά τα ορυχεία, λόγω των γύρω βραχωδών μαζών, που λειτουργούν ως πορώδεις μέσο, δεν θεωρούνται αδιαπέραστες δεξαμενές. Το αρχικό σχέδιο για την στεγανότητα των δεξαμενών αφορά, την δημιουργία καθαρών και επίπεδων επιφανειών και την τοποθέτηση ομοιογενούς αργίλου και γεωμεμβράνης στον πυθμένα του ορυχείου. Επιπρόσθετα, δύναται να ενισχυθούν οι αρμοί στις πλαγιές με σκυρόδεμα.

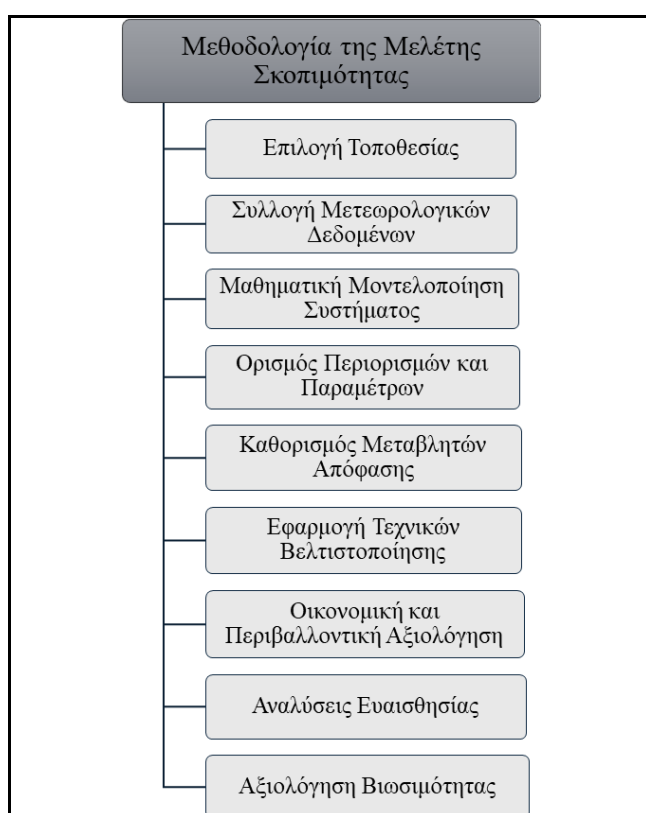
Για την κατασκευή της άνω δεξαμενής του σταθμού εξετάστηκαν 3 φάσεις. Στην πρώτη φάση, χρησιμοποιείται για άνω δεξαμενή η διαθέσιμη λίμνη Nanhuayuan, στην δεύτερη, χρησιμοποιούνται οι τρεις χώροι απόθεσης για άνω δεξαμενές και στην τρίτη φάση για άνω δεξαμενή θα επαναχρησιμοποιηθεί το ορυχείο Fushun. Οι τρεις χώροι απόθεσης περιέχουν θρυμματισμένη πέτρα, οπότε θα χρειαστούν περαιτέρω εργασίες για την στεγανότητα, αλλά παρέχουν υψηλότερο ύψος πτώσης νερού σε σύγκριση με το ορυχείο. Κύριο παράγοντα που προκαλεί αστάθεια στην κλίση του ταμιευτήρα, αποτελεί η διακύμανση της στάθμης του νερού, επομένως για την διασφάλιση των έργων του ταμιευτήρα, κλειδί αποτελεί η ακριβής ανάλυση της σταθερότητας της κλίσης. Ακόμη την σταθερότητα, επηρεάζουν η διαρροή και η σύζευξη τάσεων. Η παρακολούθηση και η έγκαιρη προειδοποίηση για κατολισθήσεις βράχων, συμβάλουν με οικονομικά αποδοτικό τρόπο στην διατήρηση της ασφάλειας της κλίσης του ταμιευτήρα. Η υψηλότερη στάθμη νερού, προσφέρει επιπλέον υδροστατική πίεση στην πλαγιά και μειώνει την ενεργό τάση, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια. Η μονάδα αντλησιοταμίευσης που σχεδιάστηκε, μετέτρεψε το εγκαταλελειμμένο ορυχείο ως κάτω δεξαμενή, την γειτονική λίμνη, τις χωματερές και ένα άλλο μέρος του ορυχείου ως άνω δεξαμενή. Η ανάλυση της γεώτρησης, φανέρωσε χαμηλή ποιότητα

της βραχύδης μάζας του ορυχείου, επομένως σημαντικούς τομείς για την μηχανική ανάλυση, αποτελούν ο σχεδιασμός της στεγανότητας και η σταθερότητα της πλαγιάς.

Στην έρευνα τους, για την χώρα της Κίνας, οι Lyu et al. (2022), αναλύουν τις πολιτικές, αλλά και τα προβλήματα της κατασκευής σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, με αντλησιοταμίευση, σε εγκαταλελειμμένα ορυχεία και διαμορφώνεται η θεωρητική βάση για την υλοποίηση του έργου. Ωστόσο, αυτή η πλούσια θεωρητική προσέγγιση, παρουσιάζει ελλείψεις σε έρευνες πεδίου και μελέτες περίπτωσης πιλοτικών εγκαταστάσεων, περιορίζοντας την αξιολόγηση της τεχνολογικής βιωσιμότητας τέτοιων έργων. Έως το 2030, εκτιμάται, ότι στην Κίνα θα έχουν εγκαταλειφθεί περίπου 15.000 ορυχεία, τα οποία θα μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη. Για την χρήση αυτών είναι σημαντική η έρευνα των γεωγραφικών συνθηκών, για την επιλογή της τοποθεσίας, η εξέταση του υδροδυναμικού και χημικού προφίλ της περιοχής, ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση και η φθορά του εξοπλισμού. Για τις δεξαμενές σημαντικές μεταβλητές αποτελούν η στεγανότητα και η σταθερότητα, όπου μέσω των μακροχρόνιων κύκλων λειτουργίας, η διάβρωση επιδρά στον ταμιευτήρα. Η συνεργασία των επενδυτών με τις κυβερνήσεις και τους αρμόδιους φορείς αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, με στόχο την δημιουργία βάσης δεδομένων, για τα ορυχεία της Κίνας και την διαθεσιμότητα πληροφοριών. Η αναζήτηση αυτή, συνδυάζεται με αριθμητικές προσομοιώσεις και με την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων για την απεικόνιση του επιλεγμένου ορυχείου. Η ανάπτυξη στον τομέα της παρακολούθησης, με καινοτόμο εξοπλισμό ειδικό για δεξαμενές νερού, συμβάλει στην καταγραφή και γρήγορη απόκριση σε ερεθίσματα και μεταβολές. Για την ορθή λειτουργία των μονάδων αυτών, σημαντικό παράγοντα αποτελεί η δημιουργία μιας μεθόδου αξιολόγησης του εξοπλισμού του συστήματος, ώστε να παρέχονται δεδομένα, για την συντήρηση και την ορθή λειτουργία των μονάδων. Η προσπάθειά της Κίνας να απαλλαγεί από τον άνθρακα και να μεταβεί σε πιο πράσινες επενδύσεις, είναι σημαντική, αλλά ακόμα χρειάζεται τεχνολογικές καινοτομίες και βιομηχανικούς σχεδιασμούς.

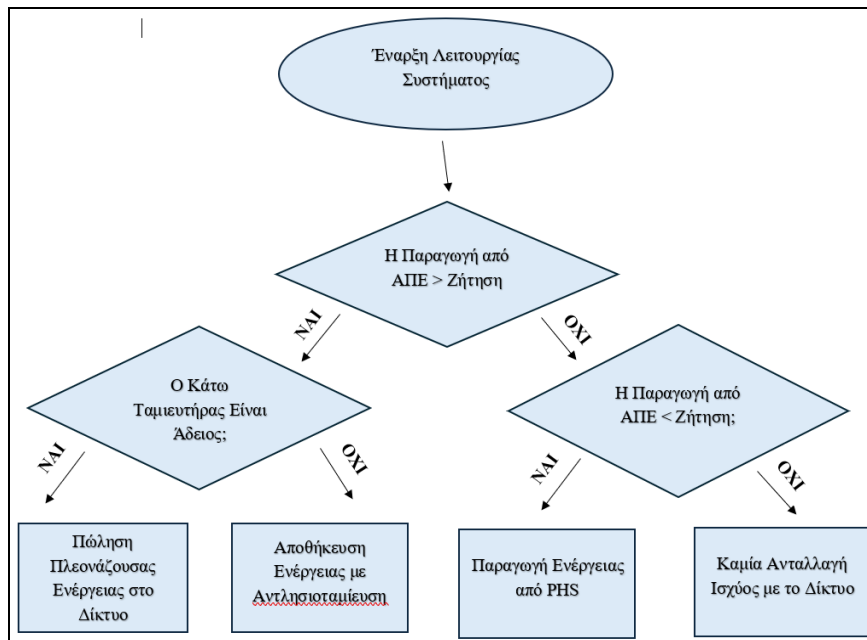
Σημαντικό είναι το παράδειγμα της Ινδίας, όπως το εξετάζουν οι Bhimaraju et al. (2023), μέσα από μια μελέτη σκοπιμότητας, για την δημιουργία υβριδικού συστήματος PHS, σε ορυχείο άνθρακα. Για το σύστημα δεν απαιτείται κατασκευή άνω ταμιευτήρα, καθώς χρησιμοποιείται ένας ποταμός, ο Godavari, αλλά και κάτω καθώς χρησιμοποιείται το εγκαταλελειμμένο ορυχείο. Ο συντελεστής LCOCER, δηλαδή το σταθμισμένο κόστος μείωσης των εκπομπών του CO₂, εξετάζεται στη μελέτη, ώστε να εκτιμηθεί η μείωση του αποτυπώματος του άνθρακα. Οι ερευνητές αρχικά, μοντελοποιούν μαθηματικά τα στοιχεία του συστήματος, συλλέγουν μετεωρολογικά δεδομένα για την τοποθεσία μελέτης, αναλύουν τους περιορισμούς και τις παραμέτρους, επιλέγουν τις τεχνικές βελτιστοποίησης και τέλος διαμορφώνουν κατάλληλα το σύστημα. Το υβριδικό σύστημα, είναι συνδεδεμένο με φωτοβολταϊκά κύτταρα, όπου η ποσότητα ενέργειας που συλλέγεται, είναι ανάλογη του διαθέσιμου ηλιακού φωτός και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, εξετάστηκαν δείκτες όπως η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ), όπου συμβάλει στην κατανόηση της τρέχουσας ταμειακής ροής και όταν είναι θετική, η επένδυση καθίσταται βιώσιμη. Το LCOE, αποτελεί βασικό δείκτη για την οικονομική σκοπιμότητα του έργου και είναι ο λόγος της τρέχουσας αξίας του έργου προς τη συνολική ενέργεια που παρέχεται. Σημαντικό κόστος, είναι αυτό της ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (CGrid), που αφορά την συνολική διαφορά κόστους μεταξύ της αγορασμένης ισχύος και της παρεχόμενης. Τα κόστη ποινής, αφορούν ποινές για την μη αξιοποίηση ισχύς. Για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών

επιπτώσεων, εξετάστηκε το σταθμισμένο κόστος μείωσης των εκπομπών CO₂ (LCOCER) και η μείωση των εκπομπών CO₂ (COER). Οι μελετητές εξέτασαν διάφορους περιορισμούς του συστήματος, όπως το κλάσμα αυτό αξιοποίησης ΑΠΕ (RESUF), που αφορά την ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται από τις ΑΠΕ. Η Πιθανότητα Απορρόφησης Ισχύος Δικτύου (PGPA), που περιορίζει την συνολική ισχύ φορτίου που αγοράζεται, η Συχνότητα Χρήσης Ταμιευτήρα (fLR), όπου αφορά το μέγεθος του κάτω ταμιευτήρα, με την υπερδιαστασιολόγηση του να αυξάνει το κόστος του σταθμού και την υποδιαστασιολόγηση να υπερφορτώνει το δίκτυο. Σημαντικούς περιορισμούς αποτελούν οι μεταβλητές απόφασης, οι οποίοι συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση του υβριδικού συστήματος και αφορούν τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πάνελ, της αντλίας μεταβλητής ταχύτητας, του στροβίλου και του όγκου της κάτω δεξαμενής. Όσον αφορά την τοποθεσία του φωτοβολταϊκού σταθμού, υπάρχει περιορισμένος χώρος ανοιχτής γης για την δημιουργία του κοντά στο ορυχείο.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας αξιολόγησης της βιωσιμότητας υβριδικού σταθμού αντλησιοταμίευσης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία, βάσει Bhimaraju et al. (2023)

Η σπουδαιότητα της παραπάνω μελέτης, όπως παρουσιάζεται και στο ακόλουθο διάγραμμα, αφορά τις καινοτομίες στην στρατηγική της διαχείρισης της ενέργειας. Σημαντικό στοιχείο του συστήματος, αφορά την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας στο δίκτυο, όταν ο κάτω ταμιευτήρας είναι άδειος, επιπλέον όταν θα υπάρχει ελλειψής παροχή ενέργειας από ΑΠΕ, το σύστημα θα παράγει ενέργεια μέχρι την μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής, μειώνοντας τις αγορές από το δίκτυο. Σε περίπτωση, που η παραγωγή από ΑΠΕ, ισούται με την ζήτηση, τότε το σύστημα αντλησιοταμίευσης δεν θα λειτουργεί και δεν θα ανταλλάσσεται ισχύς με το δίκτυο.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας υβριδικού συστήματος PHS.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία, βάσει Bhimaraju et al. (2023)

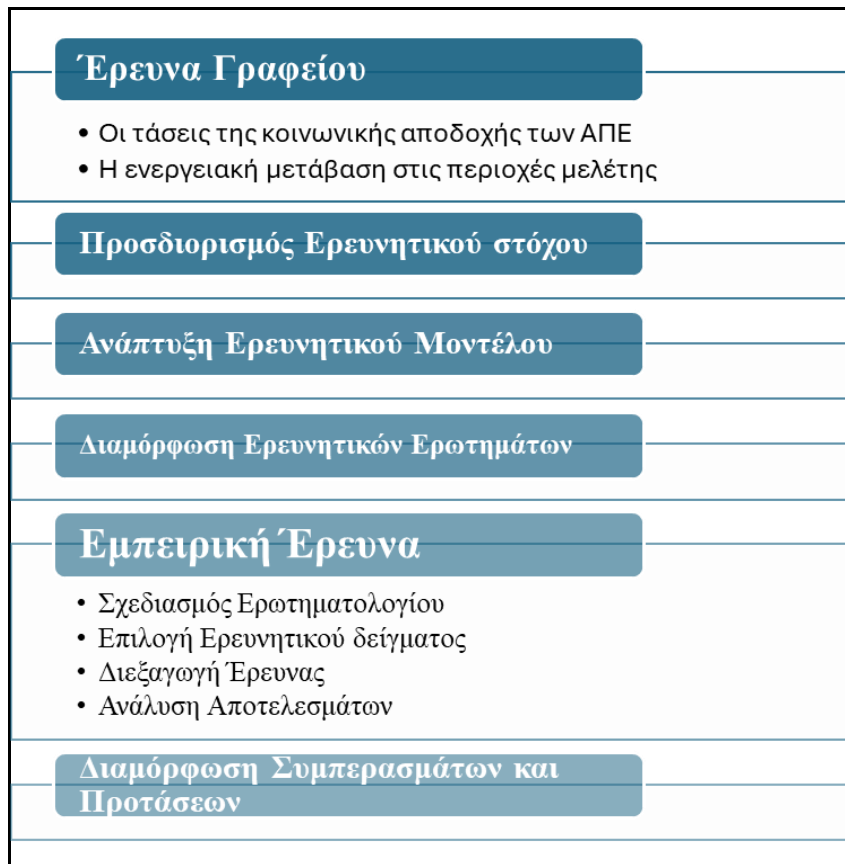
Τα αποτελέσματα της έρευνας, στήριξαν ποικίλες αναλύσεις ευαισθησίας. Αξιοσημείωτη αναφορά, είναι η επίδραση των διακοπών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, όπου οι διακοπές του 10% αυτών, μειώνει ελάχιστα την παραγωγή και αυξάνει την αγορά ενέργειας από το δίκτυο. Ακόμη, ο συννεφιασμένος καιρός, μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία, γύρω στο 30%, μειώνοντας την παραγωγή αντίστοιχα. Το κόστος των εξαρτημάτων και άλλα μακροοικονομικά στοιχεία, αποτελούν μεταβλητές, που εμφανίζουν διακυμάνσεις λόγω της αγοράς και των επιτοκίων. Μια ελαφρά αύξηση του κόστους αυτού, μπορεί να παρουσιάσει σημαντική αύξηση στο LCOE, ενώ μια αντίστοιχη μείωση του κόστους, βελτιστοποιεί το LCOE. Το παράδειγμα αυτό, που αφορά την μελέτη για την χώρα της Ινδίας, αποτελεί μια ολοκληρωμένη έρευνα, για την δημιουργία σταθμού αντλησιοταμίευσης, σε πρώην ανθρακωρυχείο, που εξετάζει την επένδυση σε ποικίλους τομείς.

2.4.4 Κοινωνικό-Τεχνικές προκλήσεις

Σημαντική είναι η συμβολή της μελέτης, των Kruczek et al. (2025), στην αντιμετώπιση των κοινωνικοτεχνικών προκλήσεων και στην αποδοχή από το κοινό, των υβριδικών σταθμών αντλησιοταμίευσης (HPHS). Για την επίτευξη του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, υπάρχει υψηλή ανάγκη για επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, αυτές οι επενδύσεις συχνά αντιμετωπίζουν τοπικές αντιδράσεις, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στις επιπτώσεις των έργων στις τοπικές κοινότητες, σε περιβαλλοντικές ανησυχίες, αλλά και σε πολιτικές στάσεις. Σημαντικές μεταβλητές για την διαμόρφωση της τοπικής άποψης, αποτελούν, η ηλικία, το εισόδημα, η μόρφωση και άλλοι ψυχολογικοί παράγοντες. Τα κύρια επίπεδα στάσης ως προς αυτά τα έργα,

αποτελούν τα εξής, η έγκριση, η υποστήριξη, η απόρριψη, η αντίσταση και άλλες δευτερεύουσες, όπως η ανοχή, η απάθεια και άλλα. Οι οικονομικές, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους στην διαμόρφωση της στάσης του κοινού, είτε διευκολύνοντας, είτε εμποδίζοντας την αποδοχή. Για τις τοπικές αντιλήψεις, οι διαταραχές στην κοινοτική ζωή, οι αλλαγές στο τοπίο και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς για την ανάπτυξη τέτοιων των έργων, καλλιεργώντας αίσθημα φόβου για την ποιότητα της ζωής τους. Η εξέλιξη ως προς τις τεχνολογίες ΑΠΕ, ενδέχεται να προκαλέσει σε πολλές χώρες και περιοχές, διάφορες κοινωνικό περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς χωρίς σωστή μετάβαση, περιοχές που εξαρτώνται από την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων, κινδυνεύουν από οικονομικές υφέσεις. Η ορθή μετάβαση, εστιάζει κυρίως στις θέσεις εργασίας, στο περιβάλλον και στην κοινωνία. Σημαντικό παράγοντα για αυτή την διαδικασία, αποτελεί η τοπική διακυβέρνηση, με ουσιαστική στήριξη, μειώνοντας τις συγκρούσεις με τις επιχειρήσεις. Καθοριστικό ρόλο για την ενεργειακή μετάβαση σε αυτές τις κοινωνίες, απαρτίζει η ορθή κατανομή των κονδυλίων και ο έλεγχος των λογαριασμών των τοπικών φορέων.

Η μελέτη, περιλαμβάνει τόσο πτυχές του βιοτικού επιπέδου, όσο και της ποιότητας ζωής, εξετάζοντας το επίπεδο πλούτου, την εκπαίδευση, τον ελεύθερο χρόνο και το αίσθημα ασφάλειας σε ότι αφορά τον ενεργειακό εφοδιασμό. Όσον αφορά την δημιουργία υβριδικών σταθμών αντλησιοταμίευσης σε ορυχεία, το ευρύ κοινό δεν έχει αρκετές γνώσεις, όσο για τις υπόλοιπες τεχνολογίες ΑΠΕ, οπότε χρειάζεται να αντιμετωπιστεί και αυτό το πρόβλημα της περιορισμένης γνώσης. Σημαντική ανησυχία που εκφράζεται από την κοινή γνώμη για ένα τέτοιο έργο, αφορά την άποψη, αν η τεχνολογία αναπτύσσεται, ώστε να προσφέρει πλεονεκτήματα στην κοινωνία, ή να ωφελήσει τα επιχειρηματικά συμφέροντα των επενδυτών. Σε τέτοιες περιπτώσεις τεχνολογιών, τα ενδιαφερόμενα μέρη απαρτίζουν κρίσιμο παράγοντα για την κοινωνική αποδοχή, ενώ την βιομηχανία και τους δημόσιους θεσμούς υποδεικνύεται έλλειψη εμπιστοσύνης. Αρκετά σημαντική διαδικασία αποτελεί, η κατανόηση του επιπέδου εμπιστοσύνης στους υπεύθυνους του έργου, αλλά και στις δυνατότητες τους, για την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Για την εξέταση της κοινωνικής αποδοχής της τεχνολογίας HPHS, χρησιμοποιήθηκε εμπειρική και έρευνα γραφείου. Η εμπειρική φάση, βασισμένη στα στοιχεία της έρευνας γραφείου, σχεδιάστηκε για να αξιολογήσει τις επιπτώσεις ενός υποθετικού έργου, στις τοπικές οικονομίες, τις αγορές εργασίας και γενικότερα στην κοινωνική ευημερία, σε δύο περιοχές εξόρυξης, στην περιοχή της Καρδιάς και στο Belchatow, στην Πολωνία. Στο ακόλουθο διάγραμμα, παρουσιάζεται η ερευνητική προσέγγιση που ακολούθησε η ερευνητική ομάδα.



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας, για την μελέτη της κοινωνικής αποδοχής των συστημάτων HPHS. Πηγή: Ιδία επεξεργασία, βάσει Kruczek et al. (2025)

Τα κύρια βήματα της εμπειρικής φάσης περιλαμβάνουν, την ποσοτική έρευνα για την αποδοχή της ενεργειακής μετάβασης από το κοινό, την επιλογή δείγματος από τοπικούς ενδιαφερόμενους που να ασχολούνται με τον μεταλλευτικό τομέα, την διεξαγωγή έρευνας και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι δύο περιοχές μελέτης από τα παλιά χρόνια, εξαρτιόντουσαν κατά πολύ από την εξόρυξη, στα θέματα οικονομίας. Η περιοχή της Μακεδονίας, στην οποία βρίσκεται το ορυχείο Καρδιάς, τα τελευταία χρόνια αντιμετωπίζει αρκετά κοινωνικοοικονομικά προβλήματα, όπως ανεργία και δημογραφική μείωση, με παρόμοια προβλήματα να αντιμετωπίζει και η περιοχή της Πολωνίας. Το ερωτηματολόγιο που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα, χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος περιέγραφε το σκοπό της μελέτης και είχε και ένα γλωσσάρι με τις βασικές έννοιες για την τεχνολογία HPHS. Στο δεύτερο μέρος αξιολογήθηκε η αποδοχή της τεχνολογίας από τους ερωτηθέντες και γενικότερες απόψεις για την ενεργειακή μετάβαση και τις κοινωνικοοικονομικές της επιπτώσεις. Στο τελευταίο μέρος συλλέχθηκαν τα δημογραφικά δεδομένα των ερωτηθέντων. Συνολικά 129 σωστά ερωτηματολόγια προχώρησαν για επεξεργασία και στατιστική ανάλυση. Τέσσερις ήταν οι κύριες μεταβλητές που εξετάστηκαν και αφορούσαν, την επίγνωση της σημασίας της ενεργειακής μετάβασης στην περιοχή, την επίδραση της μετάβασης στην ζωή του ερωτηθέντος, την γνώση για την τεχνολογία HPHS και την αποδοχή κατασκευής εγκατάστασης HPHS σε τοποθεσίες της περιοχής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, γύρω στο 85% των ερωτηθέντων δήλωσε ότι έχει γνώση σχετικά με την ενεργειακή μετάβαση και περίπου το 80% ότι αυτή θα έχει αντίκτυπο στην ζωή τους.

Όσον αφορά τον αντίκτυπο της μετάβασης, οι ερωτηθέντες είναι αρκετά αρνητικοί σε ότι αφορά την αγορά εργασίας και τις επιπτώσεις στην ποιότητα του περιβάλλοντος. Για την γνώση της τεχνολογίας HPHS οι περισσότεροι ερωτηθέντες δήλωσαν ότι έχουν γνώση της τεχνολογίας, με το 70% να δηλώνει υποστήριξη προς την δημιουργία τέτοιων εγκαταστάσεων. Συμπερασματικά, η μελέτη υπογραμμίζει την προσεκτική προσέγγιση της ενεργειακής μετάβασης, με διαφάνεια στις λήψεις αποφάσεων, χωρίς αποκλεισμούς, με την συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών σε όλα τα στάδια και επενδύσεις στην ανάπτυξη του ανθρώπινου κεφαλαίου, με προτεραιότητα την προσαρμογή του εργατικού δυναμικού και την οικονομική υποστήριξη.

Ο τομέας της αντλησιοταμίευσης, ως τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη και εμφανίζει σημαντική διεθνή ερευνητική δραστηριότητα. Ωστόσο, η ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας δείχνει ότι εξακολουθούν να υφίστανται ζητήματα τα οποία δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς. Ένα αρχικό ερευνητικό κενό αφορά τον περιορισμένο αριθμό μελετών που αφορούν αποκλειστικά εγκαταστάσεις υβριδικών συστημάτων αντλησιοταμίευσης σε επιφανειακά ορυχεία. Οι περισσότερες δημοσιεύσεις εξετάζουν είτε συμβατικά έργα, είτε μεμονωμένες περιπτώσεις επαναξιοποίησης μεταλλευτικών χώρων, χωρίς να αναλύεται σε βάθος η λειτουργία τους. Επιπλέον, οι προσεγγίσεις που εξετάζουν συνολικά την αλληλεπίδραση τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι περιορισμένες, εμποδίζοντας την εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων, σχετικά με την συνολική βιωσιμότητα τέτοιων έργων. Όσον αφορά τις παραμέτρους βελτιστοποίησης τέτοιων συστημάτων, υπάρχει ερευνητικό κενό, καθώς δεν έχει διαμορφωθεί κάποιο κοινά αποδεκτό πλαίσιο αξιολόγησης τους. Η διεθνής βιβλιογραφία παρουσιάζει μεγάλο αριθμό μεταβλητών που αφορούν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τους υδατικούς πόρους, τις ενεργειακές αγορές, χωρίς όμως να προσδιορίζεται η σχετική βαρύτητα του κάθε παράγοντα ως προς το τελικό αποτέλεσμα. Η ελληνική πραγματικότητα παραμένει σχετικά περιορισμένη σε σχέση με την διεθνή βιβλιογραφία, παρότι υπάρχει μεγάλη ανάγκη αξιοποίησης των υπάρχουσών μεταλλευτικών εκτάσεων. Επομένως, ένα ερώτημα που εγείρει προβληματισμό, αφορά το κατά πόσο οι διεθνείς πρακτικές μπορούν να προσαρμοστούν, στις ιδιαιτερότητες των πρώην λιγνιτωρυχείων της Ελλάδας. Η παρούσα μελέτη, επιδιώκει την κάλυψη μέρους των παραπάνω κενών, διερευνώντας τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη τέτοιων υβριδικών συστημάτων σε πρώην επιφανειακά ορυχεία, αλλά και εξετάζοντας τους παράγοντες που επιδρούν στην τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική τους απόδοση.

Σε αυτό το πλαίσιο διαμορφώνονται οι ακόλουθοι ερευνητικοί στόχοι:

- Εξέταση των προϋποθέσεων που απαιτούνται για την δημιουργία υβριδικού συστήματος αντλησιοταμίευσης σε ένα εξαντλημένο επιφανειακό ορυχείο.
- Προσδιορισμός των παραγόντων που επιδρούν στην λειτουργία και την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος.
- Αξιολόγηση της επίδρασης των κρίσιμων τεχνοοικονομικών μεταβλητών στην απόδοση της επένδυσης.
- Διερεύνηση της καταλληλότητας της περιοχής της Μεγαλόπολης για την ανάπτυξη συστήματος αντλησιοταμίευσης.
- Διαμόρφωση πολυκριτηριακής προσέγγισης, η οποία θα συμβάλει στην διαδικασία λήψης αποφάσεων για αντίστοιχα έργα.

3. Μεθοδολογία

Τα έργα αντλησιοταμίευσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποθήκευση ενέργειας, αποτελώντας σύνθετα ενεργειακά έργα μεγάλης κλίμακας και διευκολύνοντας την διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα. Για την υλοποίηση και τον σχεδιασμό τέτοιων έργων, λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν την εφικτότητα και τη βιωσιμότητά τους, όπως οι τεχνικές, που αφορούν τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, αλλά και οι οικονομικές, που σχετίζονται με την οικονομική απόδοση και το λειτουργικό κόστος της επένδυσης. Ακόμη σημαντικές είναι και οι περιβαλλοντικές παράμετροι, τόσο στις χρήσεις γης, όσο και στα οικοσυστήματα και οι κοινωνικοί παράγοντες, που αφορούν την κοινωνική αποδοχή και το κανονιστικό πλαίσιο. Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας, η ανάπτυξη συστηματικών και ολοκληρωμένων μεθοδολογικών προσεγγίσεων, καθίσταται αναγκαία, ώστε να αξιολογηθεί ορθά η βιωσιμότητα τέτοιων έργων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι ερευνητές έχουν ασχοληθεί κυρίως με την ανάλυση επιμέρους πτυχών αυτών των έργων, που αφορούν την τεχνική διάσταση, την οικονομική αποδοτικότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χωρίς να εξετάζεται η μεταξύ τους αλληλεπίδραση και χωρίς να υπάρχει, ένα κοινό πλαίσιο αξιολόγησης, που να συνδυάζει όλες τις πτυχές αυτές, ώστε να ληφθούν οι σωστές αποφάσεις σε όλα τα στάδια ενός τέτοιου έργου. Σε περιπτώσεις πιο σπάνιων και μη συμβατικών χωροθετήσεων, όπως σε εξοφλημένα ορυχεία, αυτές οι ελλείψεις είναι πιο εμφανείς, καθώς οι ιδιαίτερες περιβαλλοντικές και οικονομικές συνθήκες απαιτούν πιο εξειδικευμένες και πολυκριτηριακές προσεγγίσεις.

Το παρόν κεφάλαιο έχει ως στόχο την ανάπτυξη επαρκούς και ολοκληρωμένης μεθοδολογίας, στην οποία οι κρίσιμες παράμετροι για τη βιωσιμότητα των αντλησιοταμιευτικών έργων θα προσδιορίζονται και θα αξιολογούνται ορθά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω εννοιολογικής ανάλυσης και ημι-ποσοτικών εργαλείων. Για τους σκοπούς αυτούς, χρησιμοποιείται ως παράδειγμα ένα πρώην επιφανειακό ορυχείο λιγνίτη, ώστε να εξεταστεί η αξιοποίησή του για την κατασκευή ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης, στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης.

Η δομή του κεφαλαίου είναι η ακόλουθη, αρχικά αναλύεται η διαδικασία εντοπισμού των παραμέτρων, σε όλο το εύρος του κύκλου ζωής των έργων αντλησιοταμίευσης, ακολουθούν τα μοντέλα και οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση, όπως η ανάλυση ευαισθησίας, οι πολυκριτηριακές μέθοδοι αλλά και η χωρική αξιολόγηση, και η μελέτη περίπτωσης εφαρμογής σε επιφανειακό ορυχείο, στην οποία καλείται εφαρμόζεται η μεθοδολογία σε πραγματικές συνθήκες και στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η συνολική ροή της ανάλυσης.

3.1 Προσδιορισμός Παραμέτρων

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης έχουν υψηλή στρατηγική σημασία και αποτελούν σύνθετα ενεργειακά έργα. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό της παραγωγής και της αποθήκευσης, με την στήριξη των ηλεκτρικών δικτύων και την διαχείριση των υδατικών πόρων. Για την ανάπτυξη ενός τέτοιου έργου, δεν επιτελείται μια απλή ενιαία διαδικασία, αλλά μια διαχρονική εξέλιξη, μέσω ενός διακριτού κύκλου ζωής, χωρισμένου σε διάφορες φάσεις. Αρχικά, τη φάση της χωροθέτησης, έπειτα τη φάση μελέτης και σχεδιασμού, τη φάση κατασκευής και τέλος τη φάση λειτουργίας και συντήρησης. Κάθε κατηγορία από αυτές σχετίζεται με διαφορετικούς στόχους, πληροφορίες, ποσοστά αβεβαιότητας και απαιτήσεις σε θέματα λήψης αποφάσεων.

Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι που αφορούν τον σχεδιασμό, την αξιολόγηση και την υλοποίηση ενός τέτοιου σύνθετου έργου, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής του έργου. Ακόμη, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση αυτών, ανάλογα με τη φάση του έργου και τον στόχο της αξιολόγησης. Στα πρώιμα στάδια του έργου, κύριο στόχο αποτελεί ο εντοπισμός της καταλληλότητας μια περιοχής και ο αποκλεισμός άλλων, που μπορεί να εμφανίζουν σημαντικούς τεχνικούς, περιβαλλοντικούς ή και κοινωνικούς περιορισμούς. Στη συνέχεια, στα μετέπειτα στάδια, οι παράμετροι αποκτούν περισσότερη ακρίβεια και λεπτομέρεια, και αφορούν κυρίως τον τεχνοοικονομικό σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, αλλά και τη συμμόρφωση με την ισχύουσα νομοθεσία. Στο τελικό στάδιο, που αφορά τη φάση λειτουργίας, η αξιολόγηση σχετίζεται με δείκτες απόδοσης και αξιοπιστίας του έργου, αλλά και της μακροχρόνιας βιωσιμότητάς του.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων κάθε φάσης, χρησιμοποιείται ο συνδυασμός διαφόρων πηγών πληροφόρησης, ώστε να αξιολογείται ο βαθμός της επιστημονικής τεκμηρίωσης και να εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής στην πράξη. Αυτό συμβαίνει κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο και συγκεντρώνονται τα τεκμηριωμένα κριτήρια, που μπορεί να έχουν χρησιμοποιηθεί από επιστήμονες, σε παγκόσμιο επίπεδο. Ακολουθεί, η κατηγοριοποίηση των παραμέτρων, αλλά αναδεικνύονται και οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση των αντλησιοταμιευτικών έργων. Παράλληλα, οι διεθνείς βέλτιστες πρακτικές, μεταφέρουν γνώσεις και δεξιότητες, που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε ώριμες αγορές και σε άλλα επιτυχημένα παραδείγματα εφαρμογής, παρέχοντας πρακτικά βήματα για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία τέτοιων έργων. Σημαντικό καθοριστικό παράγοντα αποτελεί το θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο, θέτοντας τους νομικούς και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα την επιλογή των παραμέτρων, αλλά και τη βαρύτητά τους για κάθε στάδιο. Τέλος, τα υφιστάμενα έργα αντλησιοταμίευσης προσφέρουν σημαντικές γνώσεις, που αφορούν τις πραγματικές συνθήκες για την υλοποίηση τέτοιων έργων, τα πιο συχνά προβλήματα και τις πιο κρίσιμες παραμέτρους, που σχετίζονται με την επιτυχία των έργων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται αρκετά σημαντική η ταξινόμηση των παραμέτρων ανά φάση του κύκλου ζωής στα αντλησιοταμιευτικά έργα, επιτρέποντας την ορθή αξιολόγηση κάθε σταδίου, αποφεύγοντας ακατάλληλα κριτήρια και ενισχύοντας τη λήψη σωστών αποφάσεων, σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.

Φάση (α): Χωροθέτηση αντλησιοταμιευτικών έργων

Η χωροθέτηση αποτελεί το κυριότερο στάδιο για την αξιολόγηση της ανάπτυξης ενός έργου αντλησιοταμίευσης σε εξοφλημένα ορυχεία. Σε αυτό το στάδιο εξετάζεται η καταλληλότητα της περιοχής, σε ένα αρχικό επίπεδο, ώστε να εντοπιστούν οι θέσεις που παρουσιάζουν τεχνική, περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα και να αποκλειστούν οι εναλλακτικές που παρουσιάζουν αρκετούς περιορισμούς. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτής της φάσης εξετάστηκαν αρκετά διεθνή παραδείγματα, αλλά και εμπειρικά δεδομένα από υφιστάμενα έργα αξιοποίησης μεταλλευτικών περιοχών, για αξιοποίηση ενεργειακών υποδομών. Οι παράμετροι κατηγοριοποιούνται σε βασικές κατηγορίες κριτηρίων, ανάλογα με τη σύνθετη φύση των έργων.

Τα μορφολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αφορούν τις τεχνικές παραμέτρους. Βασικό στοιχείο αποτελεί η υψομετρική διαφορά μεταξύ του άνω και του κάτω ταμιευτήρα, η οποία έχει σημαντική επίδραση στο αναμενόμενο ενεργειακό δυναμικό του συστήματος. Υψηλής σημασίας είναι επίσης η γεωλογία και η γεωτεχνική καταλληλότητα των πρανών του ορυχείου, η στεγανότητα των δεξαμενών, αλλά και οι υδρολογικές συνθήκες, όπως το ισοζύγιο του νερού και τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Ακόμη, εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης ήδη υπαρχουσών κοιλοτήτων ως ταμιευτήρων. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φυσικού περιβάλλοντος με το έργο. Εξετάζεται η απόσταση με προστατευόμενες περιοχές όπως Natura 2000, η ύπαρξη ευαίσθητων οικοσυστημάτων και άλλες πιθανές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Στο πλαίσιο αυτής της αξιολόγησης, ερευνάται αν η αξιοποίηση ενός ήδη διαταραγμένου τοπίου, όπως ένα εξοφλημένο ορυχείο, συμβάλει στην περιβαλλοντική αποκατάσταση και σε επαναχρησιμοποίηση γης.

Η θέση του έργου σε σχέση με κρίσιμες ενεργειακές και μεταφορικές υποδομές αφορά τις χωρικές παραμέτρους. Σημαντικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν άμεσα τις τεχνικές δυνατότητες και το κόστος υλοποίησης τέτοιων έργων, αποτελούν η απόσταση από υφιστάμενα δίκτυα, η δυνατότητα σύνδεσης με υποσταθμούς υψηλής τάσης, αλλά και η προσβασιμότητα στο οδικό δίκτυο. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ύπαρξη ήδη υπαρχουσών υποδομών, εντός των ορίων του μεταλλευτικού χώρου. Η συμβατότητα του έργου με τις τοπικές δραστηριότητες και την κοινωνική αποδοχή, εξετάζεται από τις κοινωνικές παραμέτρους και τις χρήσεις γης. Λαμβάνονται υπόψη η εγγύτητα σε οικισμούς, οι υφιστάμενες και οι μελλοντικές χρήσεις γης, αλλά και η δυνατότητα του έργου να συμβάλει στη μεταλινιτική μετάβαση του τόπου, δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας και ανάπτυξης. Συνοπτικά, η φάση της χωροθέτησης εξετάζει αρχικά τη βιωσιμότητα του έργου, μέσω συστηματικής καταγραφής των παραπάνω παραμέτρων, διαμορφώνοντας και τη βάση για τα επόμενα στάδια της ανάλυσης, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Φάση (β): Μελέτη και σχεδιασμός αντλησιοταμιευτικού έργου

Ακόλουθη φάση της επιλογής της κατάλληλης θέσης, είναι αυτή της μελέτης και του σχεδιασμού, και εστιάζει στη λεπτομερή τεchnοοικονομική διερεύνηση του έργου. Στο παρόν στάδιο, αξιολογούνται οι βασικές παράμετροι που αφορούν τη διαστασιολόγηση και τη λειτουργική απόδοση του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη και τις ιδιαιτερότητες του ορυχείου. Στο τεχνικό μέρος του σχεδιασμού, κρίσιμα στοιχεία αποτελούν η εγκατεστημένη ισχύς, η ενεργειακή χωρητικότητα και η διάρκεια του κύκλου φόρτισης - εκφόρτισης. Παράλληλα, διαστασιολογούνται υδραυλικά οι αγωγοί, η απόδοση του κύκλου του συστήματος και η επιλογή του τύπου των στροβίλων.

Οι οικονομικές παράμετροι σχετίζονται με το κόστος επένδυσης και λειτουργίας του έργου. Αρχικά κοστολογούνται βασικές υποδομές, όπως τα φράγματα, οι ταμιευτήρες, τα υδραυλικά έργα, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός, αλλά και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Ακόμη εξετάζονται παράμετροι που αφορούν τα πιθανά έσοδα του έργου, όπως η συμμετοχή στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας και άλλα, με κύριο στόχο την κατανόηση των βασικών μεταβλητών που επηρεάζουν την οικονομική βιωσιμότητα.

Οι περιβαλλοντικές παράμετροι του σχεδιασμού αναλύονται σε αυτό το στάδιο αναλυτικότερα, εξετάζοντας τα μέτρα πρόληψης και μείωσης των επιπτώσεων, μέσω της διαχείρισης των υδάτων, της αποκατάστασης του τοπίου και της προστασίας της βιοποικιλότητας. Οι αδειοδοτήσεις αποτελούν σημαντική φάση της μελέτης, στην οποία αναλύονται οι απαιτήσεις τους, οι όροι σύνδεσης με το δίκτυο, αλλά και οι χωροταξικές και θεσμικές δεσμεύσεις που μπορεί να επηρεάζουν το χρονοδιάγραμμα του έργου και έχουν άμεση σχέση με τον επενδυτικό κίνδυνο. Συμπερασματικά, η φάση του σχεδιασμού έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της τεχνικής διαμόρφωσης του συστήματος, αλλά και την ανάδειξη των σημαντικότερων παραγόντων που καθορίζουν την οικονομική, αλλά και τη λειτουργική απόδοση. Οι παράμετροι αυτής της φάσης θα αξιολογηθούν παρακάτω συγκριτικά, με τη χρήση πολυκριτηριακών αναλύσεων και άλλων εργαλείων.

Φάση (γ): Κατασκευή αντλησιοταμιευτικού έργου

Κατά τη φάση της κατασκευής, υλοποιούνται οι επιμέρους τεχνικές εργασίες, που προσδιορίστηκαν στο στάδιο του σχεδιασμού και αφορά την πρακτική εφαρμογή των τεχνικών λύσεων εντός του ορυχείου. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι παράμετροι που σχετίζονται με την τεχνική εφικτότητα σε πραγματικές συνθήκες, με τη διαχείριση των κινδύνων, με τον έλεγχο του χρόνου και του κόστους και με τις επιπτώσεις που πιθανών θα προκύψουν, τόσο περιβαλλοντικές, όσο και κοινωνικές. Σε έργα που χωροθετούνται σε ορυχεία, βασικό πεδίο αξιολόγησης αποτελούν οι γεωτεχνικές παράμετροι, όπως οι γεωλογικές ασυνέχειες, τα πρηνή εκσκαφών, αλλά και η πιθανή ύπαρξη παλιών κοιλοτήτων, καθώς τέτοιες συνθήκες αυξάνουν την αβεβαιότητα κατά την εκτέλεση των έργων. Επομένως, εξετάζονται παράμετροι που αφορούν την ευστάθεια των

πρανών, την ανάγκη για ενίσχυση αυτών, τη στεγάνωση των ταμιευτήρων, αλλά και παράμετροι που αφορούν τις συνθήκες για τη θεμελίωση των υδραυλικών κατασκευών. Οι παράμετροι που αφορούν το κόστος και το χρονοδιάγραμμα κατασκευής είναι ιδιαίτερα κρίσιμες σε αυτή τη φάση. Πιθανές αναθεωρήσεις σε μελέτες, τεχνικές δυσκολίες, καθυστερήσεις στην προμήθεια υλικών και εξοπλισμού, αποτελούν σημαντικό παράγοντα κινδύνου, καθώς αυξάνεται η πιθανότητα υπέρβασης του κόστους και του χρόνου κατασκευής. Επίσης, η πολυπλοκότητα των έργων πολιτικού μηχανικού, η προσβασιμότητα της περιοχής, αλλά και οι καιρικές συνθήκες, επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια κατασκευής του έργου. Όλες οι παραπάνω παράμετροι, έχουν σημαντική επίδραση στα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία του έργου.

Κατά τη φάση της κατασκευής, οι περιβαλλοντικές παράμετροι αφορούν κυρίως παροδικές επιπτώσεις, λόγω των εργασιών. Μερικά τέτοια παραδείγματα αποτελούν η παραγωγή σκόνης και θορύβου, αλλά και η πιθανή επιβάρυνση των υδατικών σωμάτων, από την διαχείριση των αποβλήτων. Στο πλαίσιο της συνολικής αξιολόγησης της βιωσιμότητας του έργου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και αυτές οι επιπτώσεις, παρά το γεγονός ότι είναι χρονικά περιορισμένες, καθώς δεν επηρεάζουν μόνο το περιβάλλον, αλλά και την τοπική κοινωνία. Η κοινωνική αποδοχή του έργου, εξαρτάται σημαντικά από την αλληλεπίδραση του εργοταξίου με την ευρύτερη περιοχή. Ζητήματα όπως η όχληση από κατασκευαστικές δραστηριότητες, η αυξημένη κυκλοφορία βαρέων οχημάτων, αλλά και η προσωρινή δέσμευση εκτάσεων, επηρεάζουν σημαντικά την αποδοχή του έργου. Αντίθετα, η φάση της κατασκευής, προσδίδει πλεονεκτήματα στην τοπική κοινωνία, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας, αλλά και η τόνωση της οικονομίας της. Συμπερασματικά, η φάση της κατασκευής, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και ανάγκη για διαχείριση κινδύνων. Οι παράμετροι που εξετάζονται, δεν αφορούν μόνο τεχνικά χαρακτηριστικά, αλλά και τη δυνατότητα να τηρηθεί ο σχεδιασμός του έργου και να παραμείνει εντός των στόχων του. Η ενσωμάτωση αυτών στο μεθοδολογικό πλαίσιο, συμβάλλει σε μια πιο ολοκληρωμένη αποτίμηση της βιωσιμότητας ενός αντλησιοταμιευτικού έργου σε ένα εξοφλημένο ορυχείο.

Φάση (δ): Λειτουργία αντλησιοταμιευτικού έργου

Η παρούσα φάση αφορά τη μακροχρόνια απόδοση και τη συμβολή του έργου στο ενεργειακό σύστημα, αλλά και τις περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιδράσεις. Αντίθετα με τις άλλες φάσεις, στην παρούσα το ενδιαφέρον μετατοπίζεται από την κατασκευή και τον σχεδιασμό, στην αξιοπιστία, τη λειτουργική αποδοτικότητα και τη διαχρονικότητα του συστήματος. Οι λειτουργικές και τεχνικές παράμετροι, σχετίζονται με την απόδοση του έργου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Μερικά από τα βασικότερα μεγέθη αποτελούν η απόδοση του κύκλου άντλησης-παραγωγής, οι ανάγκες συντήρησης, η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και η αξιοπιστία των αντλιοστροβίλων και των ηλεκτρομηχανών. Ακόμη, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά, αποτελεί η ευελιξία του συστήματος, όπου αυτό έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται στις μεταβολές του φορτίου και να το εξισορροπεί με εφεδρεία και ρύθμιση της συχνότητας, στο δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην φάση αυτή κεντρικό ρόλο έχουν οι ενεργειακές και οικονομικές παράμετροι. Αξιολογείται η

συμβολή του έργου ως προς την διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας από την παραγωγή, όπου καλύπτονται και οι αιχμές της ζήτησης. Άλλες παράμετροι που εξετάζονται είναι τα έσοδα από αγορές της ηλεκτρικής ενέργειας, από αγορές εξισορρόπησης και επικουρικών υπηρεσιών, αλλά και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Αυτές οι παράμετροι είναι καθοριστικές για τη μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα του έργου, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις μεταβολές του ενεργειακού μίγματος και των ρυθμιστικών πλαισίων.

Οι μόνιμες επιδράσεις του έργου στο τοπικό οικοσύστημα αφορούν κυρίως τις περιβαλλοντικές παραμέτρους λειτουργίας. Τα κυριότερα ζητήματα που εξετάζονται είναι οι μεταβολές της ποιότητας και της στάθμης του νερού, η αλληλεπίδραση με τα υπόγεια ύδατα, αλλά και η μακροχρόνια ευστάθεια των πρανών και των ταμιευτήρων. Σε ότι αφορά την επαναχρησιμοποίηση πρώην ορυχείου, το έργο συνδυάζει δράσεις περιβαλλοντικής αποκατάστασης και επαναχρησιμοποίησης του ορύγματος. Σε βάθος χρόνου, εξετάζονται κοινωνικές και αναπτυξιακές παράμετροι, που αφορούν τη σχέση του έργου με την τοπική κοινωνία. Σημαντικά στοιχεία αξιολόγησης αποτελούν η δημιουργία μόνιμων θέσεων εργασίας, η ενίσχυση των τοπικών υποδομών, αλλά και η συμβολή στη δίκαιη μετάβαση των μεταλλευτικών περιοχών. Παράλληλα, χαρακτηριστικά όπως η διαφάνεια, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η συνεχής επικοινωνία με τους τοπικούς φορείς, είναι αυτά που διαμορφώνουν σημαντικά την κοινωνική αποδοχή του έργου κατά τη φάση λειτουργίας. Στη παρούσα φάση, αποτυπώνεται η πραγματική απόδοση αυτών των έργων, τόσο σε τεχνικό, οικονομικό, αλλά και κοινωνικοπεριβαλλοντικό επίπεδο.

Στον ακόλουθο Πίνακα 3.1, παρουσιάζονται οι κυριότερες παράμετροι, για όλες τις φάσεις του έργου

Πίνακας 3.1: Οι κυριότερες παράμετροι για κάθε φάση του έργου.

ΦΑΣΗ ΕΡΓΟΥ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ
Χωροθέτηση	Υψομετρική Διαφορά, Γεωτεχνική ευστάθεια των Πρανών, Ισοζύγιο και ποιότητα του Νερού, Στεγανότητα των Δεξαμενών, Απόσταση από Υφιστάμενα Δίκτυα
Μελέτη και Σχεδιασμός	Εγκατεστημένη Ισχύς, Ενεργειακή Χωρητικότητα, Διάρκεια του Κύκλου Φόρτισης -Εκφόρτισης, Οικονομικοί δείκτες
Κατασκευή	Ευστάθεια των Πρανών, Προσβασιμότητα Περιοχής, Κοινωνική Αποδοχή
Λειτουργία	Αξιοπιστία Εξοπλισμού, Ευελιξία Συστήματος, Απόδοση του Κύκλου, Έσοδα, Κόστος Λειτουργίας, Μεταβολές στην Ποιότητα του Νερού

3.2 Μοντέλα Ανάλυσης και Αξιολόγησης Κρίσιμων Παραμέτρων

Στην προηγούμενη ενότητα, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι, που αποτελούν τα βασικά δεδομένα για το παρόν μεθοδολογικό πλαίσιο, οι οποίες αξιολογούνται και ιεραρχούνται. Η βέλτιστη διαμόρφωση ενός αντλησιοταμιευτικού συστήματος σε ένα εξαντλημένο ορυχείο και η αξιολόγηση της σκοπιμότητάς του, αποτελεί σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων και χρειάζεται η διερεύνηση πολλών τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών, αλλά και κοινωνικών παραμέτρων. Οι διαφορές αυτών των παραμέτρων εμφανίζονται κυρίως στη φύση, τη μονάδα μέτρησης, τον βαθμό αβεβαιότητας και την βαρύτητά τους, επομένως καθίσταται αναγκαία η εφαρμογή συνδυαστικών μεθοδολογικών εργαλείων. Στην παρούσα εργασία, το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύσσεται, περιλαμβάνει πολυκριτηριακή ανάλυση, ώστε να σταθμιστούν και να ιεραρχηθούν οι παράμετροι, τεχνοοικονομική αξιολόγηση, για να αξιολογηθούν με ποσοτική ανάλυση βασικά τεχνικά και οικονομικά μεγέθη, ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να εντοπιστούν οι παράμετροι που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα και ανάλυση σεναρίων, στην οποία εξετάζονται εναλλακτικές συνθήκες λειτουργίας, όπως διαφοροποιήσεις σε τεχνικά χαρακτηριστικά, είτε σε οικονομικές παραμέτρους και αξιολογείται το σύστημα σε συνθήκες αβεβαιότητας, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση αξιόλογων συμπερασμάτων. Με αυτές τις μεθόδους, συγκροτείται ένα συνεκτικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων, το οποίο αναδεικνύει και τις κρίσιμες παραμέτρους, που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα του έργου.

Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση (Techno-Economic Assessment – TEA)

Για τη δημιουργία της πολυκριτηριακής ανάλυσης παρακάτω, χρειάζονται αξιόπιστα ποσοτικά δεδομένα, που να σχετίζονται με τις βασικές τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους. Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση αποτελεί το εργαλείο, το οποίο συμβάλλει στον προσδιορισμό των μεγεθών αυτών και συνδέει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου, με την οικονομική του διάσταση. Στη μελέτη προσδιορίζονται η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος, η χωρητικότητα αποθήκευσης της ενέργειας και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου του συστήματος. Τα παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων, το διαθέσιμο υψόμετρο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η ικανότητα του συστήματος να παρέχει ευελιξία στο δίκτυο, αλλά και η ετήσια ενεργειακή συμπεριφορά του, εκτιμάται μέσω αυτών των παραμέτρων. Τα τεχνικά μεγέθη δεν αξιολογούνται μόνο ως σταθερά χαρακτηριστικά εγκατάστασης, αλλά εξετάζονται και σε σύγκριση με τον λειτουργικό ρόλο της αντλησιοταμίευσης στο ηλεκτρικό σύστημα. Ακόμη, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου, συνδέονται με τη στρατηγική του αξία, όσον αφορά την ενεργειακή μετάβαση, μέσω της παροχής υπηρεσιών εξισορρόπησης φορτίου, την απορρόφηση της πλεονάζουσας παραγωγής από ΑΠΕ, αλλά και της συμβολής του στην σταθερότητα συχνότητας και τάσης.

Από τα βασικότερα οικονομικά μεγέθη που εκτιμώνται, είναι το αρχικό κόστος επένδυσης (Capex), στο οποίο περιλαμβάνονται τα έργα πολιτικού μηχανικού, ο

ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός και οι υποδομές σύνδεσης, αλλά και το ετήσιο λειτουργικό κόστος (Opex), το οποίο αφορά τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη διαχείριση του συστήματος. Αυτά τα μεγέθη λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό δεικτών οικονομικής επίδοσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην πολυκριτηριακή ανάλυση. Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση δεν αφορά μόνο την εκτίμηση της κερδοφορίας, αλλά διερευνά την τεχνική και την οικονομική εφικτότητα διαφόρων καινοτομιών του συστήματος, συμβάλλοντας στην ορθή αποτίμηση κρίσιμων τεχνικοοικονομικών παραμέτρων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά, ένα από τα κυριότερα είναι ο όγκος των ταμιευτήρων (V). Στις πιο συχνές περιπτώσεις, ο συνολικός όγκος των ταμιευτήρων δεν είναι ίδιος για τον άνω και κάτω ταμιευτήρα, αλλά για την ορθή λειτουργία του συστήματος ο ωφέλιμος όγκος, πρέπει να είναι αντίστοιχος και στην άνω και στην κάτω δεξαμενή. Αναλύοντας τα υψομετρικά δεδομένα της εξεταζόμενης περιοχής, υπολογίζονται τα υψόμετρα της κάθε δεξαμενής. Για να υπολογιστεί η υψομετρική τους διαφορά χρησιμοποιείται ο τύπος

$$H_g = H_u - H_l$$

Ωστόσο, για να υπολογιστεί ορθά το πραγματικό διαθέσιμο ύψος για την παραγωγή ενέργειας, χρησιμοποιείται ο τύπος

$$H = H_g - h_f$$

ο οποίος συμπεριλαμβάνει στην εξίσωση και τις υδραυλικές απώλειες (h_f), οι οποίες αφορούν κυρίως τριβές στους αγωγούς. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, οι απώλειες αυτές κυμαίνονται σε ένα ποσοστό από 3% μέχρι 10%.

Για τον υπολογισμό της θεωρητικής υδραυλικής ενέργειας (E) που θα αποθηκευτεί, χρησιμοποιείται ο τύπος

$$E = \rho g H V$$

όπου:

- ρ : πυκνότητα του νερού, η οποία υπολογίζεται στα 1000 kg/m^3
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας η οποία είναι $9,81 \text{ m/s}^2$
- H : το καθαρό υδραυλικό ύψος (m)
- V : ωφέλιμος όγκος νερού (m^3).

Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται με μονάδα μέτρησης τα Joule. Για την μετατροπή της μονάδας μέτρησης σε MWh, χρησιμοποιείται ο τύπος

$$1\text{MWh} = 3,6 \times 10^9 \text{ J}$$

Ωστόσο, για να υπολογιστεί η πραγματική ενέργεια, χρειάζεται να συμπεριληφθεί και η απόδοση του κύκλου, η οποία αφορά την αντλία, τον στρόβιλο, τη γεννήτρια, αλλά και τις υδραυλικές απώλειες. Τυπικές τιμές της απόδοσης για τέτοια σύγχρονα υβριδικά συστήματα αντλησιοταμίευσης, κυμαίνονται αρκετά υψηλά, με ποσοστά 80-90%.

Κρίσιμο στάδιο για τον σχεδιασμό του έργου, διαδραματίζει η επιλογή ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, η οποία αφορά άμεσα την απόδοση, την ευελιξία και άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος. Οι πιο συχνές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται διεθνώς, περιλαμβάνουν τις αναστρέψιμες υδροτουρμπίνες τύπου Francis, Pelton και Kaplan, οι οποίες διαφοροποιούνται κυρίως ανάλογα με το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος. Τέτοια συστήματα αντλησιοταμίευσης λειτουργούν με κυκλική εναλλαγή μεταξύ άντλησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν υπάρχει χαμηλή ζήτηση και αυξημένη παραγωγή από τις ανανεώσιμες πηγές του συστήματος, αντλείται νερό από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω, ενώ όταν υπάρχει αύξηση της ζήτησης, παράγεται ενέργεια μέσω των υδροστρόβιλων. Οι κύκλοι λειτουργίας διαμορφώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού συστήματος, σε ημερήσιους κύκλους λειτουργίας, εβδομαδιαίους και εποχιακή αποθήκευση. Ακόμη, σημαντική παράμετρο αποτελεί και η διάρκεια εκφόρτισης του έργου, η οποία εκφράζει τον χρόνο, για τον οποίον το σύστημα μπορεί να παρέχει συνεχώς το πλήρες φορτίο της ηλεκτρικής ισχύος. Η διάρκεια αυτή κυμαίνεται από 4 έως και 12 ώρες. Με βάση τα παραπάνω εύρη τιμών και τις θεωρητικές παραδοχές που προκύπτουν από την διεθνή βιβλιογραφία, ακολουθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας στο εξεταζόμενο εξαντλημένο επιφανειακό ορυχείο.

Η εγκατεστημένη ισχύς (P) για τα συστήματα PHES, προκύπτει από τον τύπο

$$P = E/t$$

όπου:

- E: η ωφέλιμη ενέργεια σε MWh
- t: η διάρκεια εκφόρτισης (h)

Σημαντικό στοιχείο για το σύστημα, αποτελεί η παροχή (Q), η οποία είναι αρκετά σημαντική για τον πλήρη υδραυλικό σχεδιασμό του συστήματος. Ο υπολογισμός της παροχής, συμβάλει στη διαστασιολόγηση των αγωγών του συστήματος και της διατομής που θα χρειαστεί, ώστε να επιτυγχάνονται οι ενεργειακοί στόχοι του έργου. Για τον υπολογισμό της παροχής, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος

$$P = \eta \rho g H Q$$

Με την τεχνική διαστασιολόγηση του συστήματος, παρέχεται η δυνατότητα της οικονομικής αξιολόγησής του, καθώς τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά, έχουν άμεση επίδραση τόσο στο αρχικό κόστος επένδυσης, όσο και στα λειτουργικά έξοδα που θα έχει ένα τέτοιο έργο. Κύριοι στόχοι της οικονομικής ανάλυσης, αποτελούν η εκτίμηση της βιωσιμότητας της επένδυσης, αλλά και η αξιολόγηση της λειτουργικής του αποδοτικότητας. Ένας από τους σημαντικότερους οικονομικούς δείκτες για μια επένδυση, είναι το CAPEX, το οποίο αφορά το κόστος επένδυσης και στην προκειμένη περίπτωση περιλαμβάνει το σύνολο των δαπανών που αφορούν την κατασκευή του έργου αντλησιοταμίευσης. Στα αντλησιοταμιευτικά έργα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, το υδραυλικό ύψος, η εγκατεστημένη ισχύς, αλλά και η μορφολογία του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά το κόστος επένδυσης. Οι κύριοι τομείς που επηρεάζουν το κόστος επένδυσης για τέτοια συστήματα αφορούν:

- Τα έργα εκσκαφών και διαμόρφωσης του ορυχείου
- Τη κατασκευή των ταμιευτήρων
- Τα υδραυλικά έργα
- Τους αγωγούς και τις σήραγγες
- Τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό
- Τους υποσταθμούς και τα έργα σύνδεσης με το δίκτυο
- Όλες τις βοηθητικές υποδομές

Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, τα κόστη που αφορούν τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό εκφράζονται σε €/kW.

Ακολουθως, το λειτουργικό κόστος Orex, αφορά τις λειτουργικές δαπάνες του συστήματος, αλλά και αυτές τις συντήρησης. Οι βασικές συνιστώσες του περιλαμβάνουν:

- Τη συντήρηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- Τα λειτουργικά έξοδα των εγκαταστάσεων
- Το ενεργειακό κόστος της άντλησης
- Τις δαπάνες παρακολούθησης και διαχείρισης του συστήματος

Το ετήσιο Orex, συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό του συνολικού Capex ή ως €/kW της εγκατεστημένης ισχύος.

Σημαντικό οικονομικό δείκτη για τη βιωσιμότητα της επένδυσης, αποτελούν τα έσοδα του έργου, τα οποία προέρχονται κυρίως από μηχανισμούς συμμετοχής στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και την παροχή υπηρεσιών ευελιξίας προς το δίκτυο. Μια από τις βασικότερες πηγές εσόδων, αποτελεί το λεγόμενο “Ενεργειακό Αρμπιτραζ”, μια διαδικασία κατά την οποία το σύστημα καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια για την άντληση νερού σε περιόδους που οι τιμές είναι χαμηλές και αντίστοιχα παράγει ενέργεια σε περιόδους που υπάρχουν υψηλές τιμές. Άλλες υπηρεσίες οι οποίες μπορούν να αποφέρουν έσοδα αφορούν τη ρύθμιση της συχνότητας, την εφεδρεία ισχύος, την εξισορρόπηση του φορτίου, αλλά και την υποστήριξη της σταθερότητας της τάσης.

Για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των επενδύσεων, εξετάζεται ο δείκτης της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV), ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τη

χρονική αξία του χρήματος, προεξοφλώντας τις μελλοντικές χρηματοροές στην παρούσα χρονική στιγμή.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

όπου:

- CF_t : Καθαρή χρηματοροή κατά το έτος t
- r : Προεξοφλητικό επιτόκιο,
- n : Διάρκεια ζωής του έργου (έτη)

Για να θεωρηθεί οικονομικά βιώσιμο το έργο, η τιμή της NPV χρειάζεται να είναι θετική.

Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), χρησιμοποιείται ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση μιας επένδυσης, αλλά επιτρέπει και τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών επενδυτικών επιλογών. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει το προεξοφλητικό επιτόκιο, για το οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία του έργου μηδενίζεται, άρα υπολογίζεται από την συνθήκη

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t}$$

Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο πιο ελκυστική θεωρείται η επένδυση.

Ο χρόνος αποπληρωμής (Payback Period), εκφράζει το χρονικό διάστημα που απαιτείται, ώστε τα καθαρά έσοδα να καλύψουν το αρχικό κόστος επένδυσης. Υπολογίζεται από τον τύπο

$$PP = \frac{CAPEX}{CF}$$

Η ύπαρξη μικρού χρόνου αποπληρωμής, υποδηλώνει ότι το αρχικό επενδυτικό κόστος θα ανακτηθεί ταχύτερα και ότι ο επενδυτικός κίνδυνος είναι μικρότερος.

Τέλος, για την οικονομική αξιολόγηση έργου που αφορά τεχνολογία αποθήκευσης, πολύ σημαντικός είναι ο δείκτης Σταθμισμένου Κόστους Αποθήκευσης Ενέργειας (LCOS), ο οποίος εκφράζει το μέσο κόστος αποθήκευσης και επαναπαραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο δείκτης υπολογίζεται από την σχέση

$$LCOS = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

όπου:

- C_t : συνολικό κόστος κατά το έτος t ,
- E_t : παραγόμενη ή αποδιδόμενη ενέργεια κατά το έτος t ,
- r : προεξοφλητικό επιτόκιο
- n : διάρκεια ζωής του έργου.

Ο δείκτης LCOS, συνήθως εκφράζεται σε €/MWh και συμβάλλει στην σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης υπό κοινή οικονομική βάση. Οικονομικά αποδοτικότερο σύστημα θεωρείται αυτό με την χαμηλότερη τιμή LCOS.

Ανάλυση Σεναρίων

Κατά την ανάπτυξη τέτοιων ενεργειακών έργων, υπάρχει πληθώρα αβεβαιοτήτων, όπως η εξέλιξη της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, το ρυθμιστικό πλαίσιο, αλλά και η διεξόδωση των ΑΠΕ. Στην ανάλυση σεναρίων, εξετάζονται οι μεταβολές του έργου υπό διαφορετικές μελλοντικές συνθήκες, ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά και η βιωσιμότητα του, σε τέτοιες συνθήκες αβεβαιότητας. Σε αυτό το στάδιο ανάλυσης διαμορφώνονται εναλλακτικά σενάρια, τα οποία αφορούν διαφορετικές παραδοχές, σχετικά με τις τιμές ενέργειας, το κόστος τεχνολογιών, τη

ζήτηση για αποθήκευση, την διείσδυση των ΑΠΕ, αλλά και το θεσμικό περιβάλλον. Για κάθε εναλλακτικό σενάριο, επαναλαμβάνεται η διαδικασία αξιολόγησης, ωθώντας στη σύγκριση της απόδοσης του έργου για τα διάφορα πλαίσια λειτουργίας. Αυτό το είδος ανάλυσης, επιτρέπει την εξέταση της στρατηγικής θέσης του έργου, της πορείας της ενεργειακής μετάβασης, όπως σενάρια που έχουν υψηλή διείσδυση ΑΠΕ ή και άλλα που έχουν αυξημένες ανάγκες αποθήκευσης. Η ανάλυση σεναρίων, δεν περιορίζει την αξιολόγηση σε βραχυπρόθεσμες οικονομικές παραμέτρους, αλλά επεκτείνει και τη μακροχρόνια συμβολή του έργου, στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Η επιλογή των σεναρίων που θα αναλυθούν είναι στενά συνδεδεμένη, με τις ενεργειακές πολιτικές, αλλά και τους στόχους που έχουν τεθεί για την Ελλάδα. Αξιοσημείωτες είναι οι αναφορές στο ΕΣΕΚ (Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα) για τους στόχους απολιγνιτοποίησης, την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, αλλά και την ανάγκη ευελιξίας του συστήματος. Η συμβολή της τεχνοοικονομικής ανάλυσης, είναι αρκετά σημαντική στη διαμόρφωση των σεναρίων ανάλυσης, καθώς μέσω εκείνης παρουσιάζονται οι πιο κρίσιμες παράμετροι για την επιτυχία τέτοιων έργων, οι οποίες θα εξεταστούν, για κάθε πιθανό σενάριο. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που θα εξεταστούν στην ανάλυση σεναρίων, αφορούν την απόδοση του συστήματος, το κόστος κεφαλαίου (Capex), τη διαφορά των τιμών πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και τη διείσδυση των ΑΠΕ, η οποία αποτελεί στρατηγική παράμετρο, καθώς επηρεάζει τη μεταβλητότητα της αγοράς, αυξάνει τις ώρες χαμηλών τιμών και την ανάγκη αποθήκευσης. Σύμφωνα με το ΕΣΕΚ, κύριο στόχο για τον ενεργειακό μετασχηματισμό του τομέα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί η διαμόρφωση της συμμετοχής των μονάδων παραγωγής από ΑΠΕ, ώστε να φτάνει το 76,8% μέχρι το έτος 2030. Η ανάλυση αφορά τρία σενάρια:

- Το Βασικό Σενάριο, το οποίο αποτελείται από τις τιμές του συστήματος που εξετάζεται και αφορά την πιο ρεαλιστική απεικόνιση.

Παράμετρος	Τιμή
Capex	1.500 €/kW
Απόδοση	85%
Διαφορά Τιμών	60 €/MWh
Διείσδυση ΑΠΕ	76,8%

Η διαφορά των τιμών αφορά την διαφορά της τιμής αγοράς ενέργειας με αυτή της τιμής πώλησης και αντιπροσωπεύει τα μικτά έσοδα. Το βασικό ποσοστό για τη διείσδυση των ΑΠΕ αντλήθηκε από το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), το οποίο θεωρείται σχετικά υψηλό ποσοστό.

- Το Δυσμενές Σενάριο, το οποίο αναφέρεται σε πιο αργή ενεργειακή μετάβαση:

Παράμετρος	Τιμή
Capex	1.700 €/kW
Απόδοση	80%
Διαφορά Τιμών	45 €/MWh
Διείσδυση ΑΠΕ	65%

- Το Αισιόδοξο Σενάριο, το οποίο αναφέρεται σε υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ:

Παράμετρος	Τιμή
Capex	1.350 €/kW
Απόδοση	88%
Διαφορά Τιμών	85 €/MWh
Διείσδυση ΑΠΕ	85%

Με στόχο να αξιολογηθεί το εξεταζόμενο έργο, εφαρμόζεται η μεταβολή των παραπάνω τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων για κάθε σενάριο. Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν, καθώς επηρεάζουν τόσο τη λειτουργία του υβριδικού συστήματος αντλησιοταμίευσης, όσο και την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Η μεταβολή τους αυτή πραγματοποιείται για κάθε σενάριο, ώστε να προσομοιωθούν διαφορετικές μελλοντικές συνθήκες της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και διαφορετικά επίπεδα ανάγκης για υπηρεσίες αποθήκευσης. Αφού εφαρμοστούν οι παραδοχές του κάθε σεναρίου, επαναυπολογίζονται τα βασικά οικονομικά μεγέθη του έργου. Ο πρωτεύων υπολογισμός αφορά τα μικτά έσοδα, μέσω της διαφοράς τιμών αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη και την ωφέλιμη ενέργεια του συστήματος. Ακολουθεί, ο υπολογισμός των καθαρών ετήσιων εσόδων, αφαιρώντας από τα μικτά έσοδα τα λειτουργικά έξοδα (Opex), τα οποία είναι ανάλογα και των μεταβολών του κάθε σεναρίου. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης (Payback Period), ο οποίος προκύπτει από τη διαίρεση του Capex με τα καθαρά ετήσια έσοδα του έργου. Τέλος, αφού υπολογιστούν αυτοί οι οικονομικοί δείκτες, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου, ώστε να

αξιολογηθεί η επίδραση των διαφορετικών τεχνικών και οικονομικών συνθηκών στη βιωσιμότητα του έργου. Μέσω της σύγκρισης αυτής, αναγνωρίζονται οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν περισσότερο την οικονομική επίδοση του συστήματος, αλλά αξιολογείται και η προσαρμοστικότητα του έργου σε διαφορετικές πορείες ενεργειακής μετάβασης. Συμπερασματικά, μέσω της διαδικασίας αυτής, διερευνάται η ανθεκτικότητα του έργου ως προς μελλοντικές συνθήκες αβεβαιότητας, αλλά εκτιμάται και η συμβολή του στην ευελιξία και αποθήκευση ενέργειας στο ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα.

Ανάλυση Ευαισθησίας

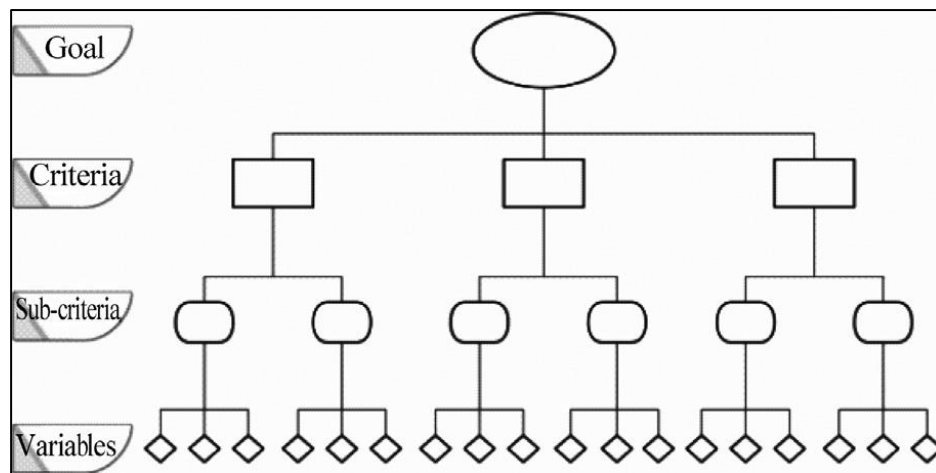
Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, διαμορφώνονται και επηρεάζονται από παραμέτρους, οι οποίες χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, κυρίως λόγω περιορισμένων δεδομένων, αλλά και λόγω μελλοντικών μεταβολών σε τεχνολογίες και στην αγορά ενέργειας. Για να διερευνηθεί ο βαθμός επίδρασης των μεταβολών βασικών παραμέτρων στη συνολική αξιολόγηση του έργου, εφαρμόζεται η ανάλυση ευαισθησίας. Στη μεθοδολογία, το κόστος επένδυσης, ο βαθμός απόδοσης και οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούν κάποιες από τις επιλεγμένες παραμέτρους, οι οποίες μεταβάλλονται συστηματικά. Για κάθε μεταβολή, ο συνολικός δείκτης αξιολόγησης επαναυπολογίζεται, με στόχο να αποτυπωθεί, η επίδραση της κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται ο εντοπισμός των παραμέτρων που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη βιωσιμότητα του έργου. Εκτός από αυτή την μεμονωμένη μεταβολή παραμέτρων, αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά μεγέθη ενδέχεται να μεταβάλλονται συσχετισμένα, όπως το κόστος της επένδυσης, ο χρόνος κατασκευής και τα έσοδα από αγορές εξισορρόπησης. Η εξέταση και η αναγνώριση τέτοιων αλληλεξαρτήσεων, ενισχύει τη διαμόρφωση αντικειμενικής εικόνας για την ανάλυση και συμβάλλει στην ολοκληρωμένη κατανόηση των παραγόντων που έχουν επίδραση στη συνολική αξιολόγηση.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται η μέθοδος της μονοπαραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας, κατά την οποία κάθε μεταβλητή εξετάζεται ανεξάρτητα, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν στις σταθερές τιμές του βασικού σεναρίου. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές παράμετροι που εξετάζονται αφορούν, το κόστος κεφαλαίου (Capex), την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επηρεάζει άμεσα τα ετήσια έσοδα του έργου, αλλά και τις ώρες λειτουργίας του συστήματος, κατά την διάρκεια της ημέρας, οι οποίες καθορίζουν την παραγόμενη ενέργεια και τον βαθμό αξιοποίησης της εγκατάστασης. Οι μεταβολές που θα πραγματοποιηθούν σε κάθε παράμετρο, είναι εντός εύλογων ορίων, βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων, αλλά και συνθηκών της ελληνικής αγοράς. Αφού, πραγματοποιηθούν αυτές οι αλλαγές, επαναυπολογίζονται τα ετήσια καθαρά έσοδα, ο χρόνος αποπληρωμής και άλλοι βασικοί οικονομικοί δείκτες, ώστε να αναγνωριστούν οι παράμετροι με την μεγαλύτερη επίδραση στη βιωσιμότητα της επένδυσης, αλλά και να εξεταστεί η ανθεκτικότητα του έργου απέναντι σε συνθήκες αβεβαιότητας.

Πολυκριτηριακή Ανάλυση (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA)

Για την ανάπτυξη τέτοιων αντλησιοταμιευτικών έργων σε πρώην ορυχεία, δεν αξιολογείται μόνο ένα κριτήριο, όπως η ενεργειακή απόδοση. Αυτά τα έργα, απαιτούν την ταυτόχρονη συνεκτίμηση διαφορετικών στόχων, όπως η τεχνική αποδοτικότητα, η οικονομική βιωσιμότητα, η περιβαλλοντική προστασία, αλλά και η κοινωνική αποδοχή, στόχοι που συχνά μπορεί να είναι αντικρουόμενοι. Λόγω αυτού, εφαρμόζεται πολυκριτηριακή ανάλυση, όπου συγκρίνονται ετερογενείς παράμετροι, στο πλαίσιο μιας ενιαίας διαδικασίας αξιολόγησης. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η προσέγγιση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP), προσφέροντας διαφάνεια στην διαδικασία της στάθμισης, δυνατότητα ενσωμάτωσης ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, αλλά και ευελιξία στην ιεράρχηση των κριτηρίων. Η διαδικασία αυτή διασπά το πρόβλημα σε επίπεδα ιεράρχησης, και ο γενικός στόχος της συνολικής αξιολόγησης της βιωσιμότητας του έργου τοποθετείται στην κορυφή. Ακολουθούν οι βασικές κατηγορίες κριτηρίων (τεχνικά, οικονομικά κλπ.), και συνεχίζουν οι επιμέρους παράμετροι, που προσδιορίστηκαν παραπάνω. Για την αποτύπωση της σημασίας τους ως προς τον τελικό στόχο, τα κριτήρια σταθμίζονται, μέσω συγκριτικών αξιολογήσεων ανά ζεύγη. Αυτές οι συγκρίσεις κανονικοποιούνται και προκύπτουν τα αριθμητικά βάρη, που εκφράζουν την συμβολή του κάθε κριτηρίου στη συνολική αξιολόγηση. Κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται για κάθε παράμετρο και, σύμφωνα με τα βάρη, υπολογίζεται ένας τελικός δείκτης επίδοσης. Για τον εντοπισμό και την διόρθωση πιθανών λογικών αντιφάσεων στις αξιολογήσεις, κατά τη διαδικασία της στάθμισης, εφαρμόζεται έλεγχος συνέπειας των συγκριτικών κρίσεων, διασφαλίζοντας έτσι την μεθοδολογική συνέπεια της διαδικασίας. Με αυτή τη διαδικασία, περιορίζεται σημαντικά ο βαθμός της υποκειμενικότητας και ενισχύεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Η πολυκριτηριακή ανάλυση κυρίως αναδεικνύει τις παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο την τελική αξιολόγηση. Με αυτόν τον τρόπο, εντοπίζονται οι κρίσιμοι παράγοντες σχεδιασμού, οι οποίοι απαιτούν προσοχή κατά τις φάσεις της τεχνικής και της οικονομικής διερεύνησης. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που θα αναλυθούν περαιτέρω είναι η ευστάθεια των πρανών, το ισοζύγιο του νερού, η υψομετρική διαφορά και η χωρητικότητα των δεξαμενών.

Κατά την AHP, αρχικά αναλύεται ο στόχος που έχει τεθεί και ιεραρχούνται οι αποφάσεις, ώστε να εξαχθούν ορθά αποτελέσματα κατά την ανάλυση. Όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη εικόνα, η ανάλυση πραγματοποιείται με την μορφή δέντρου, όπου στην κορυφή του, οριοθετείται ο στόχος. Στην παρούσα ανάλυση, ο απώτερος στόχος είναι η ορθή μελέτη και κατασκευή ενός βιώσιμου έργου αντλησιοταμίευσης. Έπειτα, ακολουθούν τα κριτήρια, τα οποία αναλύονται ακόμα περισσότερο, ώστε στο τέλος να υπάρχουν οι εναλλακτικές επιλογές.



Εικόνα 3.1: Ιεραρχική ανάλυση απόφασης.

Πηγή: Paraskevis et al (2019)

Στη συνέχεια, συγκρίνονται κατά ζεύγη οι παράμετροι, ως προς την προτίμηση της μιας έναντι της άλλης, σε ότι αφορά τον απώτερο σκοπό, που είναι η κατασκευή βιώσιμου έργου. Για την καταγραφή των συγκρίσεων αυτών, απαιτείται η δημιουργία κατάλληλων πινάκων, στους οποίους συλλέγονται οι προτιμήσεις του ατόμου ή της ομάδας απόφασης. Ακολουθεί ο πίνακας που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα ανάλυση.

Πίνακας 3.2: Πίνακας βαθμολόγησης και σύγκρισης των παραμέτρων.

	Ευστάθεια Πρανών	Ισοζύγιο Νερού	Υψομετρική Διαφορά	Χωρητικότητα Δεξαμενών
Ευστάθεια Πρανών				
Ισοζύγιο Νερού				
Υψομετρική Διαφορά				
Χωρητικότητα Δεξαμενών				

Για την αποτύπωση των παραπάνω συγκρίσεων, χρησιμοποιείται η κλίμακα Saaty, η οποία χρησιμοποιεί πέντε κύρια επίπεδα προτίμησης, την ισοδύναμη, τη μέτρια, την ισχυρή, την πολύ ισχυρή και την απόλυτη. Η οποία αντιστοιχεί και στην αριθμητική κλίμακα με τους αριθμούς 1,3,5,7,9 και τους 2,4,6,8 να εκφράζουν τις ενδιάμεσες προτιμήσεις.

Κλίμακα Saaty	
Τιμή	Ερμηνεία
1	Ίση Σημασία
3	Μέτρια Υπεροχή
5	Ισχυρή Υπεροχή
7	Πολύ Ισχυρή Υπεροχή
9	Απόλυτη Υπεροχή
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές

Εικόνα 3.2: Κλίμακα Saaty.

Ακολουθώντας, υπολογίζονται τα βάρη για κάθε παράμετρο, φανερώνοντας την προτεραιότητά τους. Η εκτίμηση των βαρών αυτών προκύπτει από τη σχέση

$$\hat{A}\hat{w} = \lambda_{max} \hat{w} \quad \text{ή} \quad \lambda_{max} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{w_i}{w_j}$$

όπου:

- το $\hat{A}$ αντιπροσωπεύει τον πίνακα των συγκρίσεων,
- το λ_{max} αφορά την μέγιστη ιδιοτιμή αυτού του πίνακα, δηλαδή το πλήθος των συγκρινόμενων παραμέτρων,
- το $\hat{w}$ αφορά το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα, το οποίο προσεγγίζει το διάνυσμα των πραγματικών σχετικών βαρών w .

Από τον Πίνακα A , για τον υπολογισμό του διανύσματος w , αθροίζονται τα στοιχεία του Πίνακα, κατά γραμμή

$$S_i = \sum_j a_{ij} \quad \text{για κάθε } i$$

και έπειτα λαμβάνεται ο λόγος του αθροίσματος S_i προς το άθροισμα όλων των στοιχείων

$$w_i = \frac{S_i}{\sum_i \sum_j a_{ij}}$$

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιείται ο δείκτης συνέπειας (CI) και ο λόγος συνέπειας (CR).

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n-1)$$

και

$$CR = (CI/RI) * 100$$

Πίνακας 3.3: Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο δείκτης RI, ανάλογα τις διαστάσεις του πίνακα.

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0	0	0,5	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,58

Ο δείκτης CR, θεωρείται αποδεκτός, όταν η τιμή του είναι $\leq 0,10$.

Τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ενσωματώνονται σε μια ενιαία διαδικασία αξιολόγησης. Τα ποσοτικά δεδομένα που απαιτούνται για την περιγραφή των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών του συστήματος παρέχονται από την τεχνοοικονομική αξιολόγηση. Από αυτά τα δεδομένα, τροφοδοτείται η πολυκριτηριακή ανάλυση, η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης εκτίμησης της βιωσιμότητας του έργου. Ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας, με την οποία εξετάζεται πόσο σταθερά είναι τα αποτελέσματα σε μεταβολές των βασικών παραμέτρων, αλλά και η ανάλυση σεναρίων διευρύνει το πλαίσιο αξιολόγησης, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές μελλοντικές συνθήκες. Συμπερασματικά, η συμπληρωματική εφαρμογή αυτών των μοντέλων, αναδεικνύει κρίσιμες παραμέτρους, οι οποίες επιδρούν καθοριστικά στον σχεδιασμό ενός αντλησιοταμιευτικού έργου σε ένα πρώην ορυχείο και συμβάλει στην ορθότερη λήψη αποφάσεων.

Το ακόλουθο διάγραμμα ροής, συνοψίζει τη συνολική μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής, το οποίο αφορά την μεθοδολογία αξιολόγησης αντλησιοταμιευτικού έργου, σε επιφανειακό εξαντλημένο ορυχείο.

4. Μελέτη Περίπτωσης: Εφαρμογή της Μεθοδολογίας στο Ορυχείο της Μεγαλόπολης

Η απολιγνιτοποίηση, αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για όλη την επικράτεια, αλλά κυρίως για τις λιγνιτικές περιοχές. Για τον λόγο αυτόν, η μελέτη περίπτωσης, αφορά τα πρώην επιφανειακά λιγνιτωρυχεία, στον δήμο της Μεγαλόπολης, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για περαιτέρω δραστηριότητες μετά την παύση των εξορυκτικών δραστηριοτήτων τους και την αποκατάστασή τους. Στο πλαίσιο της ορθής μετάβασης, κύριο στάδιο αποτελεί η αποκατάσταση των πρώην μεταλλευτικών χώρων, με την υλοποίηση ενεργειακών εφαρμογών. Επομένως, εάν πληρούνται και οι κατάλληλες τεχνικές προϋποθέσεις, η παρούσα περιοχή, μπορεί να εξεταστεί ως προς την δυνατότητα ανάπτυξης ενός έργου αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με τη μορφή της αντλησιοταμίευσης.

Η πόλη της Μεγαλόπολης, βρίσκεται στο κέντρο ενός εύφορου οροπεδίου, με απόσταση 35 χλμ. από την Τρίπολη και 200 χλμ. από την Αθήνα, διατρέχεται και από τον νέο αυτοκινητόδρομο Κορίνθου- Καλαμάτας και η λιγνιτοφόρος λεκάνη της βρίσκεται στο κέντρο της Πελοποννήσου. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η προστασία γεωργικών εκτάσεων από δέντρα και θάμνους, επιτρέποντας έτσι τον εμποτισμό του εδάφους με τα όμβρια ύδατα. Αυτό το στοιχείο, συνιστά βασικό πλεονέκτημα για την κατασκευή αντλησιοταμιευτικού έργου, καθώς το νερό που απορροφάται από το έδαφος, έχει την δυνατότητα να καταλήγει στις δεξαμενές του ορυχείου, μέσω των υδροφορέων.

Η συστηματική εκμετάλλευση του λιγνίτη στα ορυχεία Μεγαλόπολης ξεκίνησε γύρω στο έτος 1970, από το ορυχείο Θωκνίας, το οποίο έχει εξοφληθεί από το 1994. Εκτός από αυτό υπάρχουν άλλα τρία ορυχεία, των Κυπαρισσίων, της Μαραθούσας και του Χωρεμίου. Το τελευταίο ορυχείο λειτουργούσε έως το 2024.

Αξίζει να σημειωθούν κάποια σημαντικά κριτήρια που είχαν τεθεί, για τον ορθό σχεδιασμό περάτωσης των ορυχείων και την παύση των εξορυκτικών δραστηριοτήτων, τα οποία αφορούν την γεωτεχνική, αλλά και την γεωχημική σταθερότητα.

Οι τελικές χρήσεις γης, που αφορούν την λιγνιτική περιοχή της Μεγαλόπολης και συμφωνούν με το Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης (ΣΔΑΜ), αφορούν έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τεχνητές φυτείες δάσους, ανάπτυξη γεωργικών εκτάσεων και κτηνοτροφίας. όπου εκτός από την παραγωγή ενέργειας, προσελκύονται και νέες πράσινες επενδύσεις. Θα δημιουργηθούν επίσης εγκαταστάσεις αποθήκευσης με μπαταρίες (BESS), βιομηχανικές ζώνες, ζώνες αναψυχής και λιμναία οικοσυστήματα.

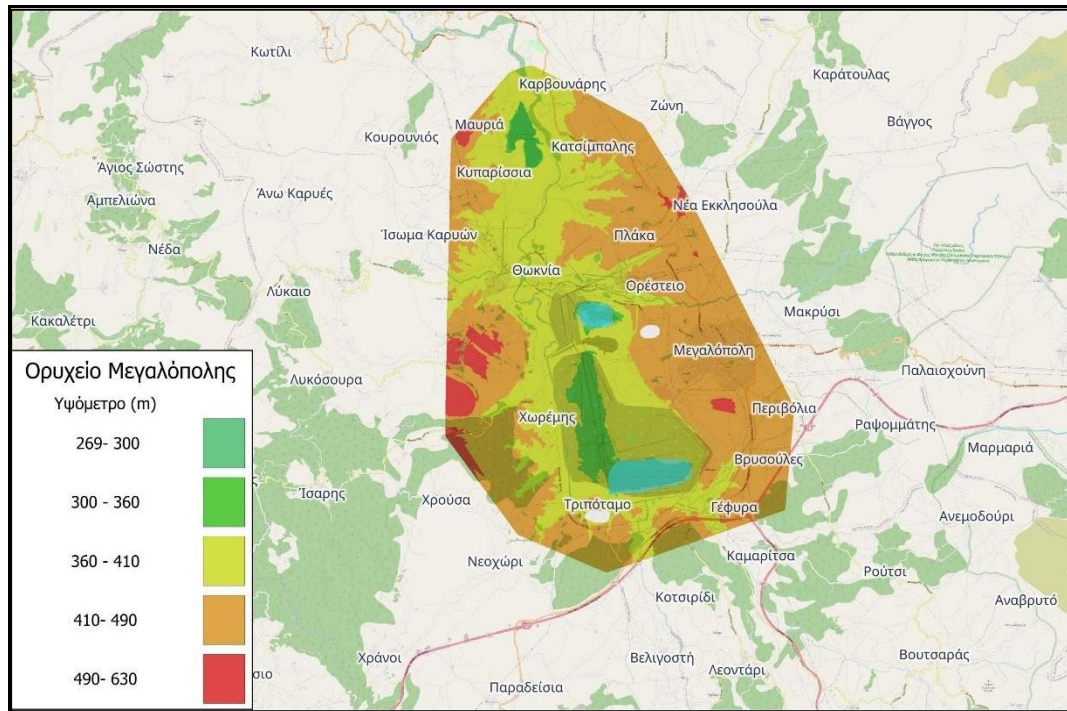


Εικόνα 4.1: Τμήμα του φωτοβολταϊκού σταθμού Μεγαλόπολης.

Πηγή: ΔΕΗ

Όπως φαίνεται και στον ακόλουθο χάρτη, όπου παρουσιάζονται τα υψόμετρα της περιοχής του ορυχείου της Μεγαλόπολης, κατάλληλες υψομετρικές διαφορές για την κατασκευή αντλησιοταμιευτικών έργων, υπάρχουν στην περιοχή της Μαραθούσας και σε αυτή του Χωρεμίου, καθώς σε αυτές τις περιοχές υπάρχουν και τα πιο χαμηλά σε υψόμετρο μέρη, τα οποία φαίνονται με πράσινο χρώμα και έχουν υψόμετρο, από 269 έως 300 μέτρα. Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθεί η δημιουργία έργου στο Ορυχείο Χωρεμίου καθώς υπάρχει και η απαιτούμενη υψομετρική διαφορά.

Στον χάρτη, με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η περιοχή του κάτω ταμιευτήρα, ενώ με άσπρο χρώμα είναι ο άνω ταμιευτήρας, που χρειάζεται να κατασκευαστεί για τη δημιουργία έργου αντλησιοταμίευσης.



Σχήμα 4.1: Υψομετρικός χάρτης, με την χωροθέτηση του ορυχείου της Μεγαλόπολης, στην Πελοπόννησο. Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Στα πλαίσια των εξορυκτικών εργασιών, είχαν δημιουργηθεί ειδικά διαμορφωμένοι χώροι, τα αντλιοστάσια, όπου οδηγούνταν τα επιφανειακά νερά, κυρίως της βροχής. Από εκεί απομακρύνονταν με άντληση, ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα στις εργασίες αποκατάστασης. Με την παύση των αντλήσεων αυτών, αναπτύχθηκαν οι αντίστοιχες λίμνες.

Αναλύοντας τα υψομετρικά δεδομένα για την περιοχή του Χωρεμίου, υπολογίστηκε ότι η κάτω δεξαμενή θα βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 320 m, ενώ η άνω θα βρίσκεται στα 440 m. Επομένως, η υψομετρική διαφορά υπολογίζεται στα 120m.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι υδραυλικές απώλειες, κυμαίνονται από 3% μέχρι 10%. Για το σύστημα που εξετάζεται οι υδραυλικές απώλειες θέτονται στο 5%. Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες αυτές, το καθαρό υδραυλικό ύψος εκτιμάται στα 114 m.

Παρότι ο άνω και ο κάτω ταμιευτήρας, δεν έχουν τον ίδιο συνολικό όγκο, για την ορθή λειτουργία του συστήματος, ο ωφέλιμος όγκος και των δύο δεξαμενών διαμορφώνεται περίπου στα $5 \times 10^6 \text{ m}^3$, ώστε να επιτυγχάνεται η μεταφορά της απαιτούμενης ποσότητας νερού ανάμεσα στους δύο ταμιευτήρες.

Η ενέργεια (E) υπολογίζεται

$$E = 55.917 \times 10^8 \text{ J}$$

Για τη μετατροπή της μονάδας μέτρησης σε MWh, χρησιμοποιείται ο τύπος

$$1\text{MWh} = 3,6 \times 10^9 \text{ J}$$

Άρα $E = 1.553 \text{ MWh}$ ή $1,55 \text{ GWh}$

Ωστόσο, για να υπολογιστεί η πραγματική ενέργεια, χρειάζεται να συμπεριληφθεί και η απόδοση του κύκλου, η οποία αφορά την αντλία, τον στρόβιλο, την γεννήτρια, αλλά και τις υδραυλικές απώλειες. Τυπικές τιμές της απόδοσης για τέτοια σύγχρονα υβριδικά συστήματα αντλησιοταμίευσης, κυμαίνονται αρκετά υψηλά με ποσοστά 80-90%. Η απόδοση για το σύστημα που εξετάζεται, τέθηκε στο 85%.

Επομένως η ωφέλιμη ενέργεια υπολογίζεται

$$E_u = 1.320 \text{ MWh} \quad \text{ή} \quad 1,32 \text{ GWh}$$

Μετά από λεπτομερή ανάλυση της βιβλιογραφίας, ο τύπος εξοπλισμού που επιλέχθηκε για το εξεταζόμενο έργο είναι η αντιστρεφόμενη υδροτουρμπίνα τύπου Francis, η οποία αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για έργα αντλησιοταμίευσης. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που ώθησαν στην επιλογή της αποτελούν η υψηλή απόδοση που προσφέρει τόσο σε άντληση, όσο και σε παραγωγή, το πλούσιο λειτουργικό εύρος της με υψόμετρα από 50 m έως και 600 m, αλλά και ύπαρξη λιγότερων μηχανικών μερών, καθώς η ίδια μηχανή λειτουργεί ως αντλία, αλλά και ως στρόβιλος, κάτι το οποίο συμβάλλει και στην μείωση του κόστους εγκατάστασης. Το σύστημα, θα λειτουργεί σε έναν ημερήσιο κύκλο, κατά τον οποίο θα αντλείται νερό όταν υπάρχει πλεονάζουσα ηλιακή παραγωγή και αντίστοιχα θα παράγει ενέργεια στις ώρες αιχμής ή τη νύχτα. Πιο συγκεκριμένα, ανά ημέρα θα λαμβάνει χώρα μια πλήρης φόρτιση - εκφόρτιση. Για το σύστημα έχουν οριστεί οι 8 ώρες ως διάρκεια εκφόρτισης (t), τιμή αρκετά τυπική για έργα τέτοιας κλίμακας, η οποία συμβαδίζει με τις ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου και της παραγωγής των φωτοβολταϊκών.

Η εγκατεστημένη ισχύς (P) διαμορφώνεται αντίστοιχα από τον ακόλουθο τύπο

$$P = E/t$$

όπου:

- E: η ωφέλιμη ενέργεια σε MWh
- t: η διάρκεια εκφόρτισης (h)

Επομένως, η εγκατεστημένη ισχύς, υπολογίζεται στα 165 MW, η οποία θα χωρίζεται σε δύο μονάδες αναστρεφόμενων υδροστρόβιλων, των 82,5 MW, ώστε να υπάρχει ευελιξία.

Ακόμη ένα στοιχείο για το σύστημα αποτελεί η παροχή (Q), η οποία είναι αρκετά σημαντική για τον πλήρη υδραυλικό σχεδιασμό του συστήματος. Για τον υπολογισμό της παροχής, χρησιμοποιείται η εγκατεστημένη ισχύς, το καθαρό υδραυλικό ύψος και η απόδοση του συστήματος, μέσω του ακόλουθου τύπου

$$P = \eta \rho g H Q$$

οπότε $Q = 173 \text{ m}^3/\text{s}$.

Πίνακας 4.1: Βασικές τεχνικές παράμετροι του αντλησιοταμιευτικού συστήματος, στην περιοχή του Χωρεμίου.

Ωφέλιμος Όγκος Ταμιευτήρων	$5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Καθαρή Υψομετρική διαφορά	114 m
Ωφέλιμη Ενέργεια	1,32 GWh
Εγκατεστημένη Ισχύς	165 MW
Παροχή	173 m ³ /s

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στο πρώην αυτό ορυχείο απαιτεί την ιεράρχηση ορισμένων παραμέτρων ως προς την βαρύτητα τους. Λόγω της πρώην εξορυκτικής δραστηριότητας, η στεγανότητα, αλλά και οι γεωτεχνικές συνθήκες, παρουσιάζουν αυξημένη σημασία. Ωστόσο, το υφιστάμενο οδικό δίκτυο και οι ηλεκτρικές υποδομές, μειώνουν το κόστος κατασκευής του ενεργειακού έργου. Αυτή η μελέτη περίπτωσης δεν αφορά μόνο την τεχνική διερεύνηση της συγκεκριμένης θέσης του ορυχείου, αλλά εφαρμόζεται η αναπτυγμένη μεθοδολογία, μέσω της εφαρμογής της σε πραγματικές συνθήκες.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το έργο αντλησιοταμίευσης αφορά την μεγάλη διάρκεια ζωής του, η οποία μπορεί να πλησιάζει τα 70 χρόνια. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, η αντλησιοταμίευση προτιμάται σε σχέση με άλλες μορφές αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες.

Όσον αφορά το κόστος κεφαλαίου (Capex), που χρειάζεται να επενδυθεί σε ένα τέτοιο έργο, στην παρούσα περίπτωση, είναι αρκετά μειωμένο σε σχέση με παραδείγματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, καθώς η αποκατάσταση του ήδη υπάρχοντος χώρου του ορυχείου, μειώνει σημαντικά τις εκσκαφές και τα έργα διαμόρφωσης των ταμιευτήρων. Αυτό αποτελεί μια από τις πιο οικονομικά ευνοϊκές μορφές αντλησιοταμιευτικού έργου, καθώς υπάρχει ήδη διαμορφωμένος ο κάτω ταμιευτήρας, περιορίζονται τα έργα στεγάνωσης, αλλά και χρησιμοποιούνται τα ήδη υπάρχοντα οδικά και ηλεκτρικά δίκτυα. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, το κόστος αυτό για αντλησιοταμιευτικά έργα κυμαίνεται από τα 1.000 €/kW έως τα 4.000 €/kW 1.700 €/kW, ενώ για τέτοια συστήματα σε εξαντλημένα ορυχεία, το κόστος αυτό μειώνεται αρκετά, με εύρος 800-2.500€/kW. Το κόστος κεφαλαίου, για το αντλησιοταμιευτικό έργο στην περιοχή του Χωρεμίου, λαμβάνεται 1.500 €/kW, με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα. Επομένως, το Capex υπολογίζεται από την σχέση

$$\text{Capex} = 165.000 \text{ kW} \times 1.500 \text{ €/kW}$$

$$\text{άρα Capex} = 247.500.000 \text{ €}$$

Ο επιμερισμός του κόστους κεφαλαίου, σε συμφωνία και με την βιβλιογραφία για τα ελληνικά δεδομένα, έχει ως ακολούθως για τα κύρια μέρη του:

- Τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, με ποσοστό γύρω στο 48% του Capex, δηλαδή 118.800.000 €
- Τα έργα του πολιτικού μηχανικού, με ποσοστό 23% του Capex, άρα και κόστος 56.925.000 €, το οποίο παρουσιάζει σχετική μείωση σε σχέση με τις τυπικές τιμές, καθώς ένα μεγάλο μέρος των εργασιών αυτών, αφορά τις εκσκαφές, την διαμόρφωση των ταμιευτήρων, την σταθεροποίηση των πρανών και άλλες δραστηριότητες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί ήδη λόγω της ύπαρξης του ορυχείου.
- Τα υδραυλικά έργα, με ποσοστό 19% και κόστος 47.025.000 €
- Τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό σύστημα, η οποία καταλαμβάνει αρκετά μικρό ποσοστό του Capex, λόγω των ήδη υπάρχουσών εγκαταστάσεων υποσταθμών, αλλά και γραμμών μεταφοράς. Το ποσοστό αυτό είναι στο 3% και το χρηματικό κόστος 7.425.000 €.
- Τις μελέτες και αδειοδοτήσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν ποσοστό περίπου 7% του κόστους κεφαλαίου, δηλαδή 17.325.000 €

Στη συνέχεια, το λειτουργικό κόστος του συστήματος (Opex), περιλαμβάνει, τη συντήρηση των στροβίλων και αντλιών, τους μισθούς του εργατικού και μη προσωπικού, αλλά και τα έξοδα λειτουργίας και παρακολούθησης του σταθμού. Το κόστος αυτό καταλαμβάνει περίπου το 2,5% του Capex, δηλαδή

$$\text{Opex} = 0,025 \times 247.500.000 \text{ €} = 6.187.500 \text{ €/έτος}$$

Σύμφωνα με αντίστοιχες μελέτες ενεργειακών έργων αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, ώστε να αξιολογηθεί οικονομικά το έργο, χρησιμοποιείται προεξοφλητικό επιτόκιο της τάξεως του 6-8%, για την παρούσα έρευνα το επιτόκιο καθορίζεται στο 7%. Αυτό αντανakλά το κόστος κεφαλαίου, τον επενδυτικό κίνδυνο και τις συνθήκες που αφορούν την χρηματοδότηση τέτοιων υποδομών.

Η αξιολόγηση των εσόδων τέτοιων συστημάτων, αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, καθώς εκείνα, επηρεάζονται τόσο από την μεταβλητότητα της αγοράς, το εύρος των τιμών, αλλά και την διείσδυση των ΑΠΕ.

Για ένα αντλησιοταμιευτικό σύστημα το οποίο λειτουργεί στην ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, τα έσοδα του προέρχονται κυρίως από υπηρεσίες όπως

- Το Ενεργειακό Αρμπιτράζ: Το σύστημα αποθηκεύει ενέργεια μέσω της άντλησης, όταν υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής από ΑΠΕ και οι τιμές είναι χαμηλές. Ενώ αντίστοιχα παράγει ενέργεια τις ώρες που οι τιμές είναι υψηλές.
- Υπηρεσίες Ευελιξίας και Εξισορρόπησης: Συμβάλλουν στην σταθεροποίηση του συστήματος, μέσω της γρήγορης ανταπόκρισης του σταθμού, αυξάνοντας ή μειώνοντας ισχύ άμεσα.

Σύμφωνα με τα δεδομένα των τελευταίων χρόνων, για την αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες μεγάλης ηλιακής παραγωγής, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για αγορά, κυμαίνεται από 30-60 €/MWh, αλλά κάποιες φορές εμφανίζονται και μηδενικές τιμές. Ενώ, κατά τις ώρες αιχμής, ειδικά τα βράδια, η τιμή κυμαίνεται από 120-200 €/MWh. Ακολουθεί ο πίνακας τιμών για το παρόν σύστημα.

Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για το εξεταζόμενο σύστημα.

Τιμή Άντλησης	65 €/MWh
Τιμή Πώλησης	125 €/MWh
Έσοδα	60 €/MWh

Επομένως, για κάθε 1 MWh που αποδίδει το σύστημα, τα έσοδα του είναι 60 €. Το σύστημα έχει παραγόμενη ενέργεια 1.320 MWh ανά ημέρα, άρα τα ημερήσια έσοδα θα ανέρχονται στα 79.200 €. Θεωρώντας ότι το σύστημα θα κάνει περίπου 330 κύκλους, κατά τη διάρκεια ενός έτους, τότε τα μικτά έσοδα του συστήματος υπολογίζονται

$$330 \text{ κύκλοι} \times 79.200 \text{ €/ανά κύκλο} = 26.136.000 \text{ €/έτος}$$

Για τον υπολογισμό των καθαρών εσόδων του συστήματος, λαμβάνονται υπόψη στην τα λειτουργικά κόστη. Άρα

$$\text{Καθαρά έσοδα} = \text{Μικτά Έσοδα} - \text{Ορεχ}$$

$$\text{Καθαρά έσοδα} = 26.136.000 \text{ €/έτος} - 6.187.500 \text{ €/έτος}$$

Άρα τα καθαρά έσοδα του συστήματος, υπολογίζονται στα 19.948.500 €/έτος.

Σύμφωνα με αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία, τα έργα αντλησιοταμίευσης μεγάλης κλίμακας, έχουν διάρκεια ζωής από 40 έως 80 έτη. Λαμβάνοντας υπόψη την μακροχρόνια λειτουργία των υδραυλικών αλλά και λοιπών υποδομών, η διάρκεια ζωής του εξεταζόμενου έργου ορίζεται στα 60 έτη.

5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα, από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, για την αξιοποίηση του εξαντλημένου επιφανειακού ορυχείου της περιοχής του Χωρεμίου, με στόχο τη δημιουργία συστήματος αντλησιοταμίευσης. Με βάση τα τεchnοοικονομικά χαρακτηριστικά, τα οποία προσδιορίστηκαν στη μελέτη περίπτωσης, πραγματοποιείται η αξιολόγηση του συστήματος, ώστε να αποτιμηθεί η ενεργειακή και οικονομική του απόδοση, αλλά και η συνολική βιωσιμότητα της επένδυσης.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του βασικού σεναρίου λειτουργίας του συστήματος, όπου αναλύονται βασικά μεγέθη, όπως η εγκατεστημένη ισχύς, η ενεργειακή χωρητικότητα, το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, τα έσοδα, ο χρόνος αποπληρωμής, αλλά και άλλοι οικονομικοί δείκτες. Με την αξιολόγηση των παραπάνω δεικτών, εξετάζεται η οικονομική σκοπιμότητα του έργου, αλλά και η δυνατότητα ανταγωνιστικής λειτουργίας του, στο σύγχρονο ενεργειακό περιβάλλον. Ακόμη, παρατηρείται η συμβολή της αξιοποίησης πρώην ορυχείου, στη μείωση του κόστους κεφαλαίου της επένδυσης, με την επαναχρησιμοποίηση των ήδη διαμορφωμένων εκτάσεων.

Στη συνέχεια, εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας, για τα οποία διαφοροποιούνται κάποιες βασικές τεχνικές και οικονομικές παράμετροι, όπως η διείσδυση των ΑΠΕ, η διαφορά της τιμής αγοράς με αυτή της πώλησης, το κόστος κεφαλαίου, αλλά και η απόδοση του συστήματος. Με τη χρήση της ανάλυσης σεναρίων, αξιολογείται το έργο υπό διαφορετικές συνθήκες ενεργειακής μετάβασης και εξετάζεται η ανθεκτικότητα της επένδυσης, για μελλοντικές αβεβαιότητες.

Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας, η οποία συμβάλλει στον εντοπισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν περισσότερο την επενδυτική απόδοση του έργου. Εξετάζονται οι

μεταβολές κρίσιμων παραμέτρων, όπως το επενδυτικό κόστος, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και οι ώρες λειτουργίας του συστήματος, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης αυτών, στους βασικούς οικονομικούς δείκτες.

Τέλος, παρουσιάζεται η πολυκριτηριακή ανάλυση του έργου, με την ιεράρχηση των τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα, αξιολογούνται συνδυαστικά, επιτρέποντας την εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων, τα οποία αφορούν την ανάπτυξη αντλησιοταμιευτικού έργου σε εξαντλημένο ορυχείο, αλλά και την συμβολή του στη μεταλινιτική ανάπτυξη.

5.1 Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση του Βασικού Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης του βασικού σεναρίου λειτουργίας του εξεταζόμενου συστήματος. Με βάση τα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία που αναπτύχθηκαν στη μελέτη περίπτωσης, αξιολογούνται οι κυριότεροι οικονομικοί και ενεργειακοί δείκτες, ώστε να αποτιμηθεί η αποδοτικότητα του έργου.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των βασικότερων μεγεθών του συστήματος αντλησιοταμίευσης, για το ορυχείο του Χωρεμίου.

Παράμετρος	Τιμή
Υψομετρική Διαφορά	114m
Ωφέλιμος Όγκος	$5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Εγκατεστημένη Ισχύς	165 MW
Ενεργειακή Χωρητικότητα	1,32 GWh
Παροχή	$173 \text{ m}^3/\text{s}$
Διάρκεια Εκφόρτισης	8 ώρες
Απόδοση Κύκλου	85%

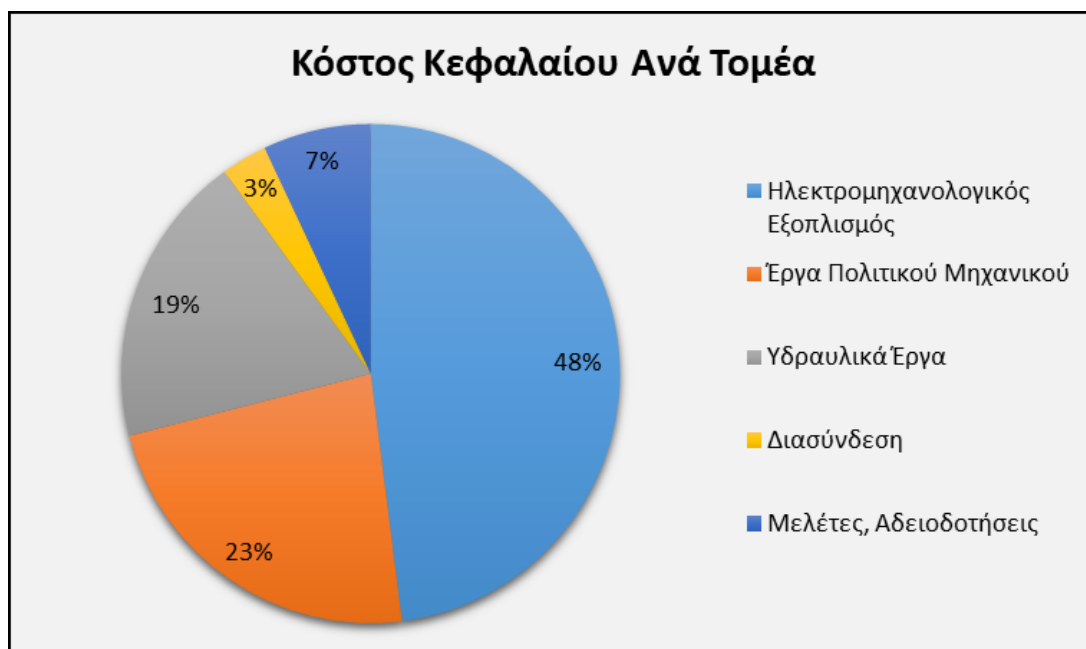
CAPEX	247.500.000 €
OPEX	6.187.500 €/έτος
Ετήσια Έσοδα	26.136.000 €
Καθαρά Έσοδα	19.948.500 €/έτος
Χρόνια λειτουργίας	60 έτη

Το εξεταζόμενο σύστημα παρουσιάζει σημαντική ενεργειακή ικανότητα αποθήκευσης και υψηλή εγκατεστημένη ισχύ, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην εξισορρόπηση του ηλεκτρικού συστήματος, αλλά και την ενίσχυση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Τα 114 μέτρα της υψομετρικής διαφοράς των δύο ταμιευτήρων, αποτελούν επαρκές υψόμετρο, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη υδραυλικού δυναμικού, επιτυγχάνοντας υψηλή ενεργειακή χωρητικότητα, χωρίς να χρειάζεται μεγάλος όγκος νερού. Με βάση την εγκατεστημένη ισχύ, η διάρκεια εκφόρτισης του συστήματος, που υπολογίζεται περίπου στις 8 ώρες συνεχόμενης λειτουργίας με πλήρες φορτίο, αποτελεί ιδιαίτερα κατάλληλο χαρακτηριστικό για το σύστημα, που λειτουργεί σε ημερήσιο κύκλο αποθήκευσης ενέργειας. Ένας τέτοιος πλήρης κύκλος φόρτισης- εκφόρτισης, 8 ωρών, υποστηρίζεται σημαντικά από τον ωφέλιμο όγκο των ταμιευτήρων, ο οποίος διαμορφώθηκε στα $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ και επιτρέπει την αποθήκευση σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Η χωρητικότητα αυτή των ταμιευτήρων, κατατάσσει το εξεταζόμενο σύστημα, στα έργα αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας. Η απόδοση του συστήματος η οποία εκτιμήθηκε στο 85%, βρίσκεται στο πλαίσιο των υψηλών τιμών, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία για τέτοια σύγχρονα έργα. Αυτή η τιμή της απόδοσης, υποδηλώνει λιγοστές ενεργειακές απώλειες κατά την άντληση και παραγωγή, ενισχύοντας την επίδοση του έργου. Ακόμη, σημαντική είναι και η συμβολή της στην οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος, καθώς αυξάνει την καθαρή ενέργεια η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί και να επιστραφεί στο δίκτυο.

Αρκετά σημαντική, είναι η δυνατότητα του συστήματος, να εναλλάσσει γρήγορα τις λειτουργίες του από την άντληση στην παραγωγή. Σε συνδυασμό και με τη μεγάλη αποθηκευτική του ικανότητα, το έργο συμβάλλει στη ρύθμιση του φορτίου, στη σταθεροποίηση της συχνότητας και στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών προς το ηλεκτρικό σύστημα, αποκτώντας επιπλέον έσοδα. Όσον αφορά την παροχή του συστήματος η οποία υπολογίστηκε στα $173 \text{ m}^3/\text{s}$, η τιμή της θεωρείται σχετικά υψηλή για ένα τέτοιο έργο μεσαίου υδραυλικού ύψους των 114 μέτρων. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο μεταβλητές υπάρχει άμεση συσχέτιση, καθώς το μέτριο υδραυλικό φορτίο που προκύπτει, απαιτεί μεγαλύτερη μεταφορά νερού, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή εγκατεστημένη ισχύ των 165 MW. Αυτή η τιμή της παροχής αποτελεί σημαντικό

στοιχείο για τον σχεδιασμό του συστήματος, καθώς απαιτούνται μεγάλης διατομής αγωγοί, πιο περίπλοκα υδραυλικά έργα και ισχυρός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου, υποδεικνύεται, ότι η αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος ορυχείου, δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη ενός αποδοτικού και τεχνικά βιώσιμου συστήματος αντλησιοταμίευσης, συμβάλλοντας στην ενεργειακή μετάβαση και στην ενίσχυση της αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας.

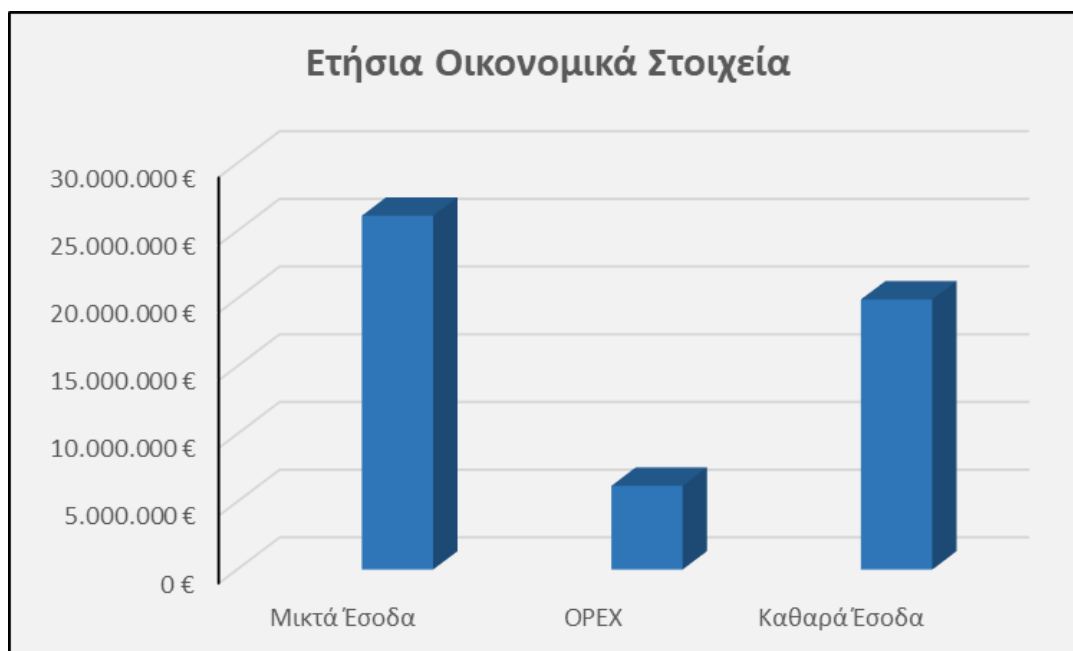
Όσον αφορά, την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, το κόστος κεφαλαίου διαμορφώθηκε στα 247.500.000 €, κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 1.500 €/kW εγκατεστημένης ισχύος. Το κόστος αυτό θεωρείται σχετικά ανταγωνιστικό για έργο αντλησιοταμίευσης μεσαίας υψομετρικής διαφοράς, καθώς αρκετά από τα έξοδα του είναι μειωμένα λόγω της ήδη ύπαρξης διαμορφωμένου χώρου, του ορυχείου. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους κεφαλαίου, καταλαμβάνεται από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, και έπειτα από τα έργα του πολιτικού μηχανικού, καθώς υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις για αγωγούς, υδροτουρμπίνες και άλλα υδραυλικά έργα. Η αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος εξαντλημένου επιφανειακού ορυχείου, συμβάλλει αρκετά στη μείωση του κόστους της επένδυσης, καθώς μέρος των εκσκαφών και χωματουργικών παρεμβάσεων έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στην περιοχή, προσφέροντας στο εξεταζόμενο έργο σημαντικά πλεονεκτήματα, έναντι των συμβατικών έργων αντλησιοταμίευσης, τα οποία κατατάσσονται στην greenfield ανάπτυξη.



Σχήμα 5.1: Κατανομή επενδυτικού κόστους (CAPEX), του εξεταζόμενου έργου αντλησιοταμίευσης.

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος (OPEX), υπολογίστηκε σε 6.187.500 €/έτος, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο 2,5% του CAPEX, ένα σχετικά χαμηλό ποσοστό, το οποίο διαμορφώνεται λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των υποδομών και τις λιγοστές ανάγκες αντικατάστασης εξοπλισμού. Η μεγάλη διάρκεια ζωής του έργου, η οποία διαμορφώνεται στα 60 έτη, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του λειτουργικού κόστους σε μακροχρόνιο ορίζοντα, ενισχύοντας έτσι και την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

Τα ετήσια έσοδα του εξεταζόμενου συστήματος διαμορφώθηκαν στα 26.136.000 €, τα οποία αποτελούν τον βασικό οικονομικό πυλώνα της επένδυσης. Την κύρια διαδικασία για την παραγωγή εσόδων αποτελεί το “Ενεργειακό Arbitrage”, σύμφωνα με το οποίο το σύστημα αποθηκεύει ενέργεια σε περιόδους που το κόστος της είναι χαμηλό και πουλάει ξανά στο δίκτυο, όταν οι τιμές είναι αυξημένες, κατά τις ώρες αιχμής. Το σύστημα θα λειτουργεί με περίπου 330 ετήσιους κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης, παράγοντας έτσι περίπου 435,6 GWh το χρόνο. Σημαντικό χαρακτηριστικό για τη διαμόρφωση αυτής της παραγωγής αποτελεί η απορρόφηση της πλεονάζουσας ενέργειας των ΑΠΕ της περιοχής, κατά τις ώρες που η παραγωγή τους είναι αυξημένη. Εκτός του “Ενεργειακού Arbitrage”, το έργο παρέχει και επικουρικές υπηρεσίες εξισορρόπησης και ευελιξίας στο ηλεκτρικό σύστημα, προσφέροντας επιπλέον έσοδα. Ωστόσο, αυτές οι υπηρεσίες δεν αποτιμήθηκαν στην παρούσα εργασία, ώστε να εκτιμηθεί ασφαλέστερα η οικονομική αποδοτικότητα του έργου. Με την αφαίρεση των λειτουργικών εξόδων, τα καθαρά ετήσια έσοδα υπολογίστηκαν στα 19.948.500 €/έτος, διαμορφώνοντας θετικές προοπτικές για τη μακροχρόνια λειτουργία του έργου.

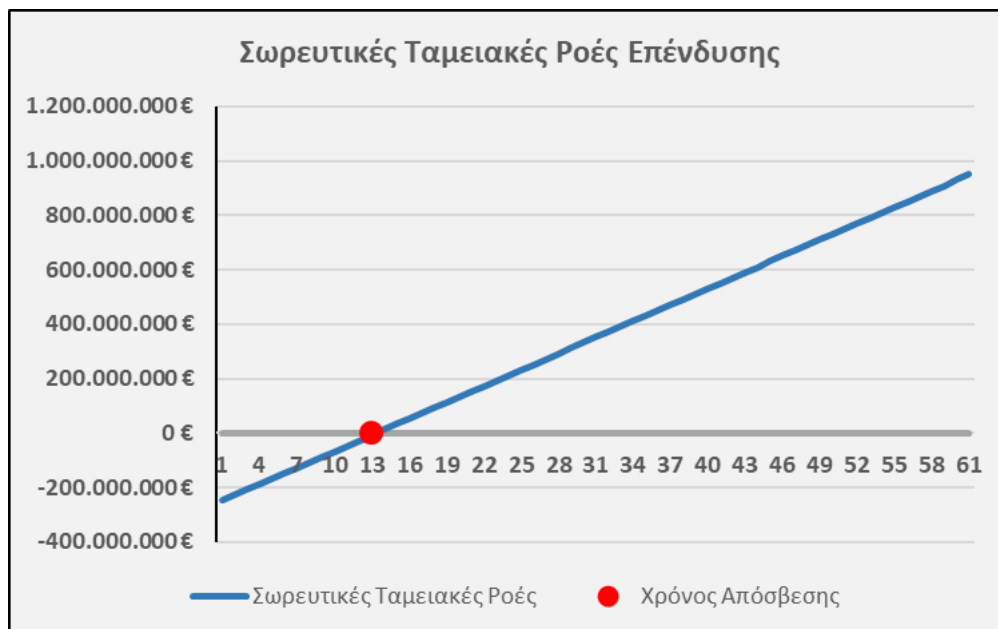


Σχήμα 5.2: Ετήσια οικονομική απόδοση του εξεταζόμενου συστήματος.

Έναν από τους βασικότερους δείκτες οικονομικής αξιολόγησης τέτοιων ενεργειακών επενδύσεων, αποτελεί ο χρόνος αποπληρωμής, ο οποίος αντιστοιχεί στον χρόνο που θα απαιτηθεί ώστε να ανακτηθεί το αρχικό κόστος κεφαλαίου μέσω των καθαρών εσόδων του. Ο χρόνος αποπληρωμής της αρχικής επένδυσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Payback Period} = \frac{247.500.000 \text{ €}}{19.948.500 \text{ €/έτος}}$$

Ο χρόνος αυτός εκτιμήθηκε γύρω στα 12,4 έτη, μια ρεαλιστική τιμή για έργα μεγάλης κλίμακας, με υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος και μεγάλη διάρκεια ζωής.



Σχήμα 5.3: Εξέλιξη σωρευτικών ταμειακών ροών και χρόνος απόσβεσης.

Ο δείκτης LCOS (Levelized Cost of Storage) χρησιμοποιείται ώστε να αποτιμηθεί το μέσο κόστος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου αποθήκευσης και χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών. Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιήθηκε το προεξοφλημένο κόστος επένδυσης και λειτουργίας, αλλά και η προεξοφλημένη συνολική παραγόμενη ενέργεια. Για τον υπολογισμό της ετήσιας ενέργειας που αποδίδει το σύστημα, εξετάστηκαν οι κύκλοι λειτουργίας του, οι οποίοι διαμορφώθηκαν περίπου στους 330 το χρόνο, άρα:

$$E_{\text{ετήσια}} = 1,32 \text{ GWh} \times 330 \text{ κύκλοι}$$

$$E_{\text{ετήσια}} = 435,6 \text{ GWh/έτος} \quad \text{ή} \quad 435.600 \text{ MWh/έτος}$$

Ακολουθεί ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη:

$$LCOS = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Ο δείκτης αυτός, όταν υπάρχει σταθερό ετήσιο κόστος και παραγωγή, απλοποιείται σε:

$$LCOS = \frac{[CAPEX \times CRF] + OPEX}{E_{ετ.}}$$

όπου $CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$. Με προεξοφλητικό επιτόκιο $r = 0,07$ και διάρκεια ζωής $n = 60$ χρόνια, υπολογίζεται $CRF = 0,072$.

$$\text{Άρα το } LCOS = \frac{[247.500.000 \times 0,072] + 6.187.500}{435.600} = 55.11 \text{ €/MWh}$$

Η παραπάνω τιμή του δείκτη είναι ανταγωνιστική για έργα μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης, υποδηλώνοντας ότι το σύστημα μπορεί να παρέχει την αποθηκευμένη του ενέργεια στο δίκτυο, με σχετικά χαμηλό μοναδιαίο κόστος, προσφέροντας υψηλή χρηματοοικονομική επίδοση σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των χρηματοοικονομικών οφελών της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη τη διαχρονική αξία του χρήματος, μέσω της προεξόφλησης των μελλοντικών ταμιακών ροών. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad \text{ή} \quad NPV = CF \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} - CAPEX$$

$$\text{Αρα, } KΠΑ = 19.948.500 \frac{1-(1+0,07)^{-60}}{0,07} - 247.500.000$$

Η ΚΠΑ υπολογίζεται στα 32.560.605 €, υποδηλώνοντας με τη θετική τιμή της ότι οι προεξοφλημένες μελλοντικές χρηματοροές υποστηρίζουν την καταρχήν βιωσιμότητα του έργου, με βάση τις παραδοχές του σεναρίου.

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), αποτελεί σημαντικό δείκτη της αποδοτικότητας της επένδυσης, καθώς εκφράζει το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο η ΚΠΑ μηδενίζεται:

$$0 = CF \frac{1-(1+IRR)^{-n}}{IRR} - CAPEX$$

Ο δείκτης IRR εκτιμήθηκε περίπου στο 8%, τιμή η οποία καθορίζει το έργο ως επενδυτικά αποδεκτό.

Συμπερασματικά, το βασικό σενάριο προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα ως προς την τεχνική, αλλά και την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, παρουσιάζοντας ικανοποιητική ενεργειακή ικανότητα αποθήκευσης και ανταγωνιστικούς οικονομικούς δείκτες. Σημαντικό στοιχείο αποτέλεσε η αξιοποίηση του χώρου πρώην ορυχείου, μειώνοντας το κόστος κατασκευής, αλλά συμβάλλοντας στην αξιοποίηση της περιοχής σε έργα ενεργειακής μετάβασης.

5.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης Σεναρίων

Η ανάλυση σεναρίων, εφαρμόστηκε, ώστε να διερευνηθεί η οικονομική συμπεριφορά του εξεταζόμενου συστήματος αντλησιοταμίευσης, υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Εξετάστηκαν τρία σενάρια, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τις κρίσιμες παραμέτρους, όπως το επενδυτικό κόστος, την απόδοση του συστήματος, την διαφορά τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και προς το επίπεδο διείσδυσης ΑΠΕ. Κύριο στόχο της ανάλυσης αυτής αποτελεί η αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων αυτών στην οικονομική ανταγωνιστικότητα του έργου, καθώς και η διερεύνηση του βαθμού ανθεκτικότητας της επένδυσης ως προς τις μελλοντικές συνθήκες αβεβαιότητας. Επισημαίνεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος, διατηρήθηκε σταθερή για όλα τα σενάρια, καθώς αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο και όχι λειτουργική. Οι μεταβολές τις οποίες εμφανίζει η απόδοση επηρεάζουν την

ενεργειακή χωρητικότητα και την οικονομική επίδοση του έργου, χωρίς να μεταβάλλουν βασικά σχεδιαστικά στοιχεία, όπως ο εξοπλισμός κλπ.

5.2.1 Δυσμενές Σενάριο

Στο δυσμενές σενάριο εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος, για λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες αγοράς και απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, το επενδυτικό κόστος εγκατάστασης είναι αυξημένο, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος είναι χαμηλότερη, η διαφορά των τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερη και η διείσδυση των ΑΠΕ είναι περιορισμένη για το ενεργειακό μείγμα. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται παρακάτω:

Παράμετρος	Τιμή
Capex	1.700 €/kW
Απόδοση	80%
Διαφορά Τιμών	45 €/MWh
Διείσδυση ΑΠΕ	65%

Η θεωρητική υδραυλική ενέργεια που αποθηκεύεται σύμφωνα με τη μελέτη περίπτωσης, διαμορφώνεται στις 1.553 MWh. Υπολογίζοντας και την απόδοση του συστήματος, η οποία είναι 80%, η ωφέλιμη ενέργεια του συστήματος είναι 1.242,4 MWh. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υπολογίζεται για τους 330 ημερήσιους κύκλους, άρα $E_{\text{ετ.}} = 409.992 \text{ MWh}$ ή 410 GWh.

Για τον υπολογισμό των μικτών εσόδων, χρησιμοποιείται η διαφορά των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τιμή αυτής της διαφοράς για το δυσμενές σενάριο είναι 45 €/MWh, άρα για τις 1.242,4 MWh ημερήσιας παραγωγής τα έσοδα είναι 55.908 €/ημέρα. Λαμβάνοντας υπόψη και τους 330 ημερήσιους κύκλους, που θα έχει το σύστημα σε ένα έτος, τα ετήσια μικτά έσοδα διαμορφώνονται στα 18.449.700 €.

Το Capex της επένδυσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Capex} = \text{Ισχύς} \times 1.700 \text{ €/kW}$$

Άρα το κόστος κεφαλαίου για το δυσμενές σενάριο διαμορφώνεται στα 280.500.000 €.

Αντίστοιχα και το λειτουργικό κόστος (Orex), το οποίο αναλογεί στο 2,5% του Capex, διαμορφώνεται στα 7.012.500 €/έτος.

Για τον υπολογισμό των καθαρών εσόδων αφαιρούνται τα λειτουργικά κόστη από τα μικτά έσοδα. Επομένως τα καθαρά έσοδα είναι 11.437.140 €/έτος.

Ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης διαμορφώνεται από τον τύπο:

$$Payback\ Period = \frac{280.500.000\ \text{€}}{11.437.140\ \text{€/έτος}}$$

Άρα η απόσβεση της επένδυσης θα πραγματοποιηθεί περίπου στα 24,5 χρόνια λειτουργίας του έργου.

Για τον υπολογισμό του δείκτη LCOS, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος απλοποιημένος τύπος:

$$LCOS = \frac{[CAPEX \times CRF] + OPEX}{E\epsilon\tau.}$$

Και διαμορφώνεται στα 66,4 €/MWh.

Για τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ), χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$NPV = CF \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} - CAPEX$$

Άρα ΚΠΑ = - 120.005.952 €

Τέλος, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), υπολογίζεται μηδενίζοντας τον τύπο της ΚΠΑ.

$$0 = CF \frac{1 - (1 + IRR)^{-n}}{IRR} - CAPEX$$

Ο δείκτης υπολογίζεται στο 4%.

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικός πίνακας των μεταβλητών που διαφοροποιούνται, για το δυσμενές σενάριο.

Μεταβλητή	Τιμή
Ωφέλιμη Ενέργεια	1.242,4 MWh
Ετήσια Παραγωγή	410 GWh
CAPEX	280.500.000 €
OPEX	7.012.500 €/έτος
Καθαρά Έσοδα	11.437.140 €
Χρόνος Αποπληρωμής	24 έτη
LCOS	66,4 €/MWh
NPV	-120.005.952 €
IRR	4%

Τα αποτελέσματα του δυσμενούς σεναρίου τονίζουν τη σημασία των συνθηκών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος για την οικονομική επιτυχία του έργου. Η ταυτόχρονη αύξηση του κόστους κεφαλαίου, η μείωση της απόδοσης και της διαφοράς μεταξύ των τιμών πώλησης και αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, επηρεάζουν αρκετά τους οικονομικούς δείκτες της επένδυσης. Αρχικά, η μείωση της απόδοσης στο 80% οδηγεί σε μειωμένη ωφέλιμη ενεργειακή χωρητικότητα. Παρότι η εγκατεστημένη ισχύς παραμένει σταθερή, η συνολική αξιοποιήσιμη ενέργεια περιορίζεται, προσφέροντας μειωμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Η ετήσια παραγωγή μειώνεται στις 410 GWh, επηρεάζοντας άμεσα τα έσοδα της επένδυσης.

Ακόμη, η διαφορά της τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή της αγοράς, η οποία μειώνεται στα 45 €/MWh, περιορίζει αρκετά τα κέρδη που προσδίδονται στο σύστημα. Η μεταβλητότητα αυτή της αγοράς συνδέεται άμεσα με τη μικρότερη διείσδυση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό μείγμα, όπου λιγοστεύουν τα διαστήματα των υψηλών τιμών κατά τις ώρες αιχμής, αλλά και αυτά των πολύ χαμηλών τιμών. Λόγω αυτού, παρουσιάζεται δυσκολία στην αξιοποίηση των διακυμάνσεων της αγοράς, μειώνοντας σημαντικά τα έσοδα του έργου.

Η αύξηση του κόστους κεφαλαίου στα 280 εκατομμύρια επιβαρύνει σημαντικά τις αρχικές κεφαλαιουχικές απαιτήσεις, επηρεάζοντας παράλληλα και το λειτουργικό

κόστος. Παρότι το λειτουργικό κόστος (Opex) παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα, η αύξησή του επιβαρύνει περαιτέρω τις καθαρές χρηματοροές της επένδυσης.

Ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων επιδρά έντονα στον χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης, αυξάνοντάς τον στα 24 έτη. Παρότι η περίοδος αυτή παραμένει μικρότερη από τη διάρκεια ζωής του έργου, μειώνεται η κερδοφορία, σε σχέση με το βασικό σενάριο, καθώς αυξάνεται το χρονικό διάστημα για την ανάκτηση του αρχικού κεφαλαίου.

Αντίστοιχα, αυξάνεται και το μοναδιαίο κόστος αποθήκευσης ενέργειας, καθώς ο δείκτης LCOS κυμαίνεται στα 66,4 €/MWh. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην ταυτόχρονη αύξηση του επενδυτικού κόστους, αλλά και στη μείωση της ωφέλιμης ενέργειας. Η τιμή παραμένει ανταγωνιστική για τέτοιες τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας, αλλά το σενάριο εμφανίζει μειωμένη οικονομική αποδοτικότητα.

Σημαντική είναι η μεταβολή της Καθαρής Παρούσας Αξίας, η οποία κυμαίνεται στα -120.000.000 €. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι οι προεξοφλημένες μελλοντικές ταμειακές ροές, δεν επαρκούν ώστε να καλυφθεί το συνολικό κόστος της επένδυσης, περιορίζοντας σημαντικά την οικονομική πρόοδο του έργου. Παρόμοια διαμορφώνεται και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), με τιμή περίπου 4%. Χαμηλότερη τιμή σε σχέση με το προεξοφλητικό επιτόκιο με ποσοστό 7%, υποδηλώνοντας, ότι η επένδυση δυσκολεύεται να δημιουργήσει ικανοποιητική απόδοση κεφαλαίου, υπό τις εξεταζόμενες δυσμενείς συνθήκες αγοράς και λειτουργίας, αυξάνοντας τον επενδυτικό κίνδυνο.

Συμπερασματικά, το δυσμενές σενάριο φανερώνει ότι η οικονομική σκοπιμότητα του έργου, μεταβάλλεται έντονα από την εξέλιξη της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, την διείσδυση των ΑΠΕ και την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Το σύστημα διατηρεί την τεχνική του λειτουργικότητα, ωστόσο υποβαθμίζονται σημαντικά τα οικονομικά του οφέλη, τονίζοντας την ανάγκη για ύπαρξη ευνοϊκότερων συνθηκών ενεργειακής μετάβασης, ώστε να αναπτυχθούν ορθά τέτοιες επενδύσεις.

5.2.2 Αισιόδοξο Σενάριο

Στο παρόν σενάριο, εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος, υπό ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες σε ότι αφορά την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και την ενεργειακή μετάβαση. Ιδιαίτερα αυξημένη θεωρείται η διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, υψηλότερη η απόδοση του συστήματος, μεγαλύτερη η διαφορά στις τιμές πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και μειωμένο κόστος κεφαλαίου. Οι παραπάνω συνθήκες αναμένεται να ενισχύσουν σημαντικά την δράση της αποθήκευσης ενέργειας και να αυξήσουν και την οικονομική αξία της αντλησιοταμίευσης.

Οι τιμές των παραμέτρων αυτών, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Παράμετρος	Τιμή
Capex	1.350 €/kW
Απόδοση	88%
Διαφορά Τιμών	75 €/MWh
Διείσδυση ΑΠΕ	85%

Για τον υπολογισμό της ωφέλιμης ενέργειας του συστήματος, εξετάζεται η θεωρητική υδραυλική ενέργεια του έργου, σύμφωνα με την μελέτη περίπτωσης, σε συνάρτηση με την απόδοση του συστήματος, η οποία διαμορφώνεται στο 88%. Επομένως, η ωφέλιμη ενέργεια κυμαίνεται στις 1.366,6 MWh. Υπολογίζοντας τους 330 ημερήσιους κύκλους, που θα συμβαίνουν στο σύστημα, στην διάρκεια ενός χρόνου, η ετήσια ενέργεια υπολογίζεται στις 450.991 MWh ή 451 GWh.

Η διαφορά των τιμών αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ορίζεται στα 75 €/MWh, για αυτό το σενάριο, αντιπροσωπεύει το οικονομικό όφελος ανά αποδιδόμενη MWh λόγω της στρατηγικής του ενεργειακού Arbitrage. Άρα για τις 1.366,6 MWh ημερήσιας παραγωγής, τα έσοδα θα είναι 102.498 €/ανά ημέρα. Για τον υπολογισμό των ετήσιων μικτών εσόδων, συνυπολογίζονται και οι 330 κύκλοι του έργου, επομένως τα μικτά έξοδα διαμορφώνονται στα 33.824.340 €.

Για τον υπολογισμό του κόστους κεφαλαίου της επένδυσης, χρησιμοποιείται η ισχύς, η οποία παραμένει σταθερή για όλα τα σενάρια, καθώς αποτελεί τεχνικό χαρακτηριστικό. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο ακόλουθος:

$$\text{Capex} = \text{Ισχύς} \times 1.350 \text{ €/kW}$$

Επομένως το κόστος κεφαλαίου για το αισιόδοξο σενάριο κυμαίνεται στα 222.750.000 €. Αντίστοιχα, και το λειτουργικό κόστος (Opex), το οποίο αναλογεί στο 2,5% του Capex, διαμορφώνεται στα 5.568.750 €/έτος.

Για τον υπολογισμό των καθαρών εσόδων της επένδυσης, αφαιρείται το Opex από τα μικτά έσοδα, διαμορφώνοντας τα ετήσια καθαρά έσοδα του έργου, στα 28.255.590 €.

Ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης διαμορφώνεται από τον τύπο:

$$\text{Payback Period} = \frac{222.750.000 \text{ €}}{28.255.590 \text{ €/έτος}}$$

Άρα η επένδυση θα αποπληρωθεί γύρω στα 8 χρόνια λειτουργίας του έργου.

Για τον υπολογισμό του δείκτη Εξισωμένου Κόστους Αποθήκευσης Ενέργειας (LCOS), χρησιμοποιείται ο απλοποιημένος τύπος:

$$LCOS = \frac{[CAPEX \times CRF] + OPEX}{E_{ετ.}}$$

Και διαμορφώνεται στα 48 €/MWh.

Η Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV), υπολογίζεται από τον τύπο:

$$NPV = CF \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} - CAPEX$$

Άρα ΚΠΑ= 174.060.436 €

Τέλος, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), υπολογίζεται μηδενίζοντας τον τύπο της ΚΠΑ.

$$0 = CF \frac{1-(1+IRR)^{-n}}{IRR} - CAPEX$$

Ο δείκτης υπολογίζεται στο 13%.

Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα των μεταβλητών, για το αισιόδοξο σενάριο.

Μεταβλητή	Τιμή
Ωφέλιμη Ενέργεια	1.367 MWh
Ετήσια Παραγωγή	451 GWh

CAPEX	222.750.000 €
OPEX	5.568.750 €/έτος
Καθαρά Έσοδα	28.255.590 €
Χρόνος Αποπληρωμής	8 έτη
LCOS	48 €/MWh
NPV	174.060.436 €
IRR	13%

Με βάση αυτά τα δεδομένα, αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ και ευνοϊκότερης λειτουργίας της αγοράς ενέργειας, το αισιόδοξο σενάριο φαίνεται να προσφέρει ιδιαίτερα θετικές προοπτικές, ως προς την ανάπτυξη του εξεταζόμενου συστήματος αντλησιοταμίευσης. Ο συνδυασμός της αυξημένης απόδοσης ενέργειας, του μειωμένου κόστους κεφαλαίου και της μεγαλύτερης διαφοράς ανάμεσα στην τιμή πώλησης και αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση των οικονομικών δεικτών της επένδυσης.

Η απόδοση του συστήματος, με ποσοστό 88%, μειώνει τις απώλειες και αξιοποιεί μεγαλύτερο μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας, κατά την διαδικασία της άντλησης και επαναπαραγωγής. Επομένως, αυξάνεται η ωφέλιμη ενεργειακή χωρητικότητα του έργου, παρέχοντας μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Η ετήσια παραγωγή του συστήματος η οποία κυμαίνεται στις 451 GWh, ισχυροποιεί σημαντικά την ικανότητα του, να υποστηρίζει την εξισορρόπηση της μεταβλητής παραγωγής των ΑΠΕ.

Παράλληλα, η διαφορά των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας η οποία διαμορφώνεται στα 75 €/MWh, αυξάνει την κερδοφορία της στρατηγικής του ενεργειακού Arbitrage, για το σύστημα. Η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, εμφανίζει συχνότερα περιόδους όπου οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλές, λόγω της αυξημένης παραγωγής, αλλά και περιόδους αιχμής, όπου οι τιμές αυξάνονται. Το σύστημα της αντλησιοταμίευσης, εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά αυτές τις διακυμάνσεις, πολλαπλασιάζοντας τα ετήσια έσοδα του έργου.

Το μειωμένο Capex, με τιμή 222.750.000 €, ενισχύει σημαντικά την παραγωγικότητα της επένδυσης, περιορίζοντας τις αρχικές κεφαλαιουχικές απαιτήσεις, αλλά μειώνοντας αισθητά και το λειτουργικό κόστος. Αυτή η παράμετρος θεωρείται αρκετά σημαντική για τέτοια αντλησιοταμιευτικά έργα μεγάλης διάρκειας ζωής, διότι βελτιώνει αισθητά την μακροχρόνια οικονομική απόδοση.

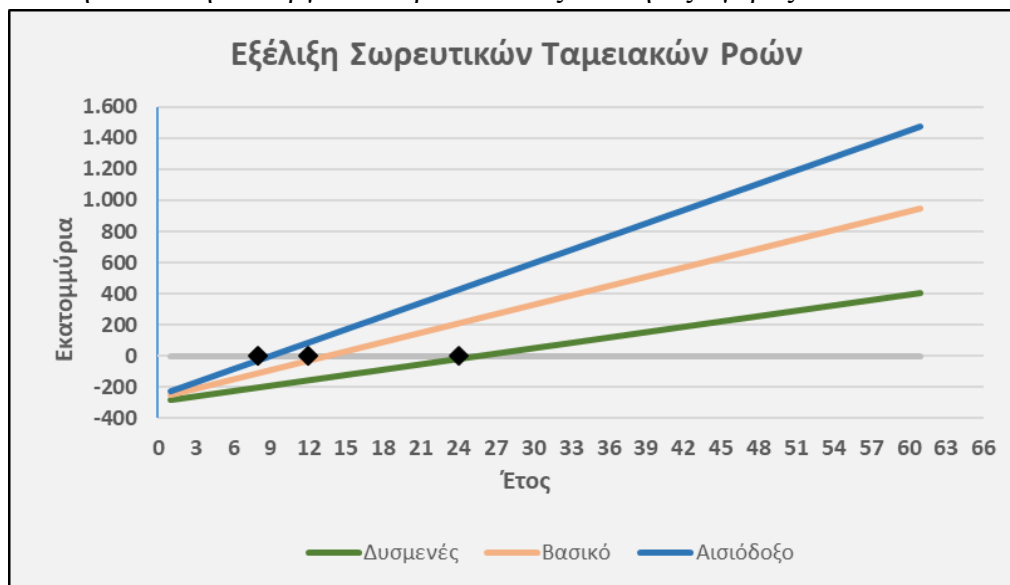
Οι συνθήκες αυτές, αντικατοπτρίζονται στους οικονομικούς δείκτες της επένδυσης. Η αποπληρωμή της επένδυσης, επιτυγχάνεται αρκετά γρήγορα, περίπου στα 8 έτη, όπου το αρχικό επενδυτικό κόστος ανακάταται ταχύτατα και μειώνεται ο χρηματοοικονομικός κίνδυνος. Ακόμη, ο δείκτης LCOS, μειώνεται αρκετά σε σχέση με τα άλλα σενάρια, στα 48 €/MWh, ένα ανταγωνιστικό κόστος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας,

χαρακτηρίζοντας το έργο ως αρκετά ανταγωνιστικό σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης.

Ένας από τους σημαντικότερους δείκτες, είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία, η οποία έχει θετικό πρόσημο και υπερβαίνει τα 174.000.000 €, υποδηλώνοντας ότι οι μελλοντικές προεξοφλημένες ταμειακές ροές υπερκαλύπτουν αρκετά το αρχικό κόστος κεφαλαίου, τονώνοντας την χρηματοοικονομική βιωσιμότητα του έργου. Εξίσου και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR), διαμορφώνεται στο 13%, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από το προεξοφλητικό επιτόκιο, αυξάνοντας την απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου και εξασφαλίζοντας περισσότερη ανθεκτικότητα σε πιθανές μελλοντικές μεταβολές.

Συνεπώς, το αισιόδοξο σενάριο παρουσιάζει ισχυρές προοπτικές ανάπτυξης για έργο αντλησιοταμίευσης, υπό περιβάλλον υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ. Στις συνθήκες αυτού του σεναρίου, το εξεταζόμενο έργο, εμφανίζει υψηλή οικονομική επιτυχία και ανταγωνιστικότητα, αλλά ακόμη συμβάλει ιδιαίτερα και στην αύξηση της σταθεροποίησης του ηλεκτρικού συστήματος και της υποστήριξης της ενεργειακής μετάβασης.

Στο ακόλουθο διάγραμμα, παρουσιάζεται η εξέλιξη των ταμειακών ροών, για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια, η οποία αποτυπώνει την χρονική διαφοροποίηση της οικονομικής απόδοσης τους. Τα μαύρα σχήματα, πάνω στις ευθείες των σεναρίων αντιπροσωπεύουν το έτος, όπου η επένδυση θα έχει αποσβέσει το αρχικό κόστος επένδυσης. Παρατηρείται, ότι το αισιόδοξο σενάριο αποδίδει στην επένδυση, αρκετά πιο γρήγορα το αρχικό κεφάλαιο, οδηγώντας σε σημαντικά υψηλότερες συσσωρευμένες αποδόσεις, ενώ το δυσμενές, παρουσιάζει βραδύτερη οικονομική εξέλιξη. Το βασικό σενάριο, εμφανίζει ενδιάμεση συμπεριφορά, επιβεβαιώνοντας την θετική απόδοση του έργου υπό ρεαλιστικές συνθήκες αγοράς.



Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα της εξέλιξης των σωρευτικών ταμειακών ροών, για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια.

Όσον αφορά το βασικό σενάριο, το οποίο αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα 5.1, χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση ως σημείο αναφοράς, με στόχο να

αξιολογηθούν οι εναλλακτικές συνθήκες λειτουργίας. Οι τεχνικές και οικονομικές παράμετροι του βασικού σεναρίου αντιπροσωπεύουν μια ρεαλιστική εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος, όπου οι συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι τυπικές, η διείσδυση των ΑΠΕ είναι καλή προς μέτρια και η ενεργειακή απόδοση είναι σχετικά υψηλή. Η σύγκριση αυτού του σεναρίου, με το δυσμενές και το αισιόδοξο, επιτρέπει την εκτίμηση της ευαισθησίας της επένδυσης, αλλά και της ανθεκτικότητας του έργου, για διάφορες συνθήκες αγοράς και ενεργειακής μετάβασης.

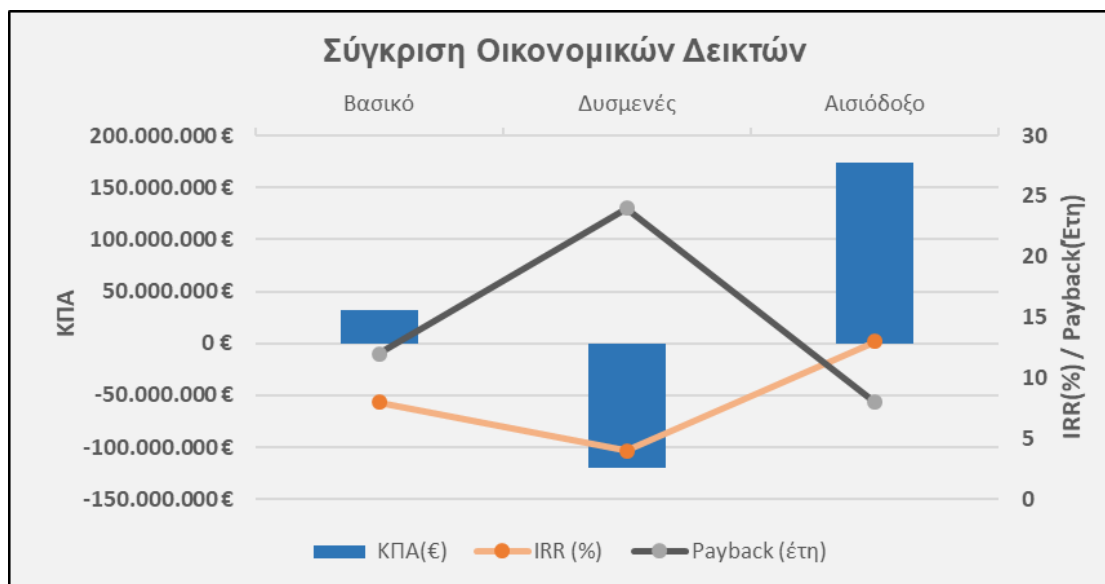
Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις κυριότερες μεταβλητές του συστήματος αντλησιοταμίευσης, για όλα τα σενάρια ανάλυσης.

Μεταβλητή	Δυσμενές	Βασικό	Αισιόδοξο
Απόδοση	80%	85%	88%
Διαφορά τιμών Αγοράς-Πώλησης	45 €/MWh	60 €/MWh	75 €/MWh
Διείσδυση ΑΠΕ	65%	75%	85%
CAPEX	280.500.000 €	247.500.000 €	222.750.000 €
Καθαρά Έσοδα	11.437.140 €	19.948.500 €	28.255.590 €
Payback Period	24,5 έτη	12,4 έτη	8 έτη
LCOS	66,4 €/MWh	55,1 €/MWh	48 €/MWh
NPV	- 120.005.952 €	32.560.605 €	174.060.436 €
IRR	4%	8%	13%

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν αμετάβλητα, ωστόσο οι μεταβολές των οικονομικών και λειτουργικών παραμέτρων διαφοροποιούν σημαντικά τους βασικούς δείκτες αξιολόγησης. Για το δυσμενές σενάριο, η οικονομική του απόδοση είναι περιορισμένη, με αρκετά αυξημένο χρόνο αποπληρωμής, αρνητική ΚΠΑ και εσωτερικό βαθμό απόδοσης χαμηλότερο από το προεξοφλητικό επιτόκιο. Αυτά τα δεδομένα, φανερώνουν ότι το έργο δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες αγοράς, και επίσης υποδηλώνουν επενδυτικό κίνδυνο.

Από την άλλη, στο αισιόδοξο σενάριο οι οικονομικοί δείκτες παρουσιάζουν μεγέθυνση, με αυξημένα τα καθαρά έσοδα, χαμηλότερο κόστος αποθήκευσης LCOS, αλλά και ταχύτερο χρόνο απόσβεσης του αρχικού κεφαλαίου. Η υψηλή Καθαρή Παρούσα Αξία, αλλά και ο αυξημένος δείκτης IRR, φανερώνουν ισχυρή επενδυτική ελκυστικότητα, σε τέτοιες συνθήκες.

Ακολουθεί διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η σύγκριση των κυριότερων οικονομικών δεικτών (ΚΠΑ, IRR, Payback), για τα εξεταζόμενα σενάρια, εμφανίζοντας τις διαφοροποιήσεις των οικονομικών δεδομένων του έργου για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και αγοράς.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση των βασικότερων οικονομικών δεικτών, για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια.

5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο αξιολόγησης ενεργειακών επενδύσεων, εκτιμώντας την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην αποδοτικότητα του έργου. Αντίθετα με την ανάλυση σεναρίων, στην οποία μεταβάλλονται ταυτόχρονα πολλές μεταβλητές, στην ανάλυση ευαισθησίας, εξετάζεται ξεχωριστά η κάθε παράμετρος, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες συνθήκες. Με αυτό το τρόπο, εντοπίζονται οι παράγοντες που ασκούν μεγαλύτερη επίδραση στους βασικούς οικονομικούς δείκτες του εξεταζόμενου έργου.

Στο παρόν έργο, χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος ανάλυσης, ώστε να αξιολογηθεί ο βαθμός ανθεκτικότητας της επένδυσης, ως προς πιθανές μελλοντικές μεταβολές τεχνικών και οικονομικών δεδομένων. Είναι ευρέως γνωστό, ότι μεγάλα έργα αντλησιοταμίευσης χαρακτηρίζονται από υψηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου, υψηλή διάρκεια λειτουργίας και εμφανίζουν ισχυρή εξάρτηση, με τις συνθήκες αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η διερεύνηση της ευαισθησίας τους, σε κρίσιμες

μεταβολές παραμέτρων, θεωρείται απαραίτητη, ώστε να αποτιμάται ασφαλέστερα η επένδυση. Αρχικά, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που εξετάζονται, είναι το κόστος κεφαλαίου (CAPEX), διότι επηρεάζει τόσο τις αρχικές χρηματοδοτικές απαιτήσεις, αλλά και το συνολικό κόστος της επένδυσης. Ακόμη, αναλύεται η μεταβολή της διαφοράς μεταξύ των τιμών αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, παράμετρος η οποία συνδέεται άμεσα με την στρατηγική του ενεργειακού “Arbitrage”, επηρεάζοντας καθοριστικά τα ετήσια έσοδα του συστήματος. Τέλος, διερευνάται η επίδραση των ωρών λειτουργίας του έργου, οι οποίες καθορίζουν την συνολική ετήσια παραγωγή και αξιοποίηση της αποθήκευσης ενέργειας.

Για κάθε παράμετρο από αυτές, αξιολογείται ξεχωριστά η επίδραση της στου βασικούς οικονομικούς δείκτες της επένδυσης, όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), και ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης. Αυτή η αξιολόγηση, παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για τον βαθμό οικονομικής ευαισθησίας του έργου, αλλά και για τις συνθήκες, υπό τις οποίες η επένδυση θεωρείται βιώσιμη και ανταγωνιστική. Η μέθοδος αυτή, συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση των κρίσιμων παραγόντων, που διαμορφώνουν την ανάπτυξη τέτοιων έργων αντλησιοταμίευσης σε εξαντλημένα ορυχεία, παρέχοντας παράλληλα, προοπτικές ως προς την ένταξη τέτοιων συστημάτων, στο σύγχρονο ενεργειακό περιβάλλον υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ.

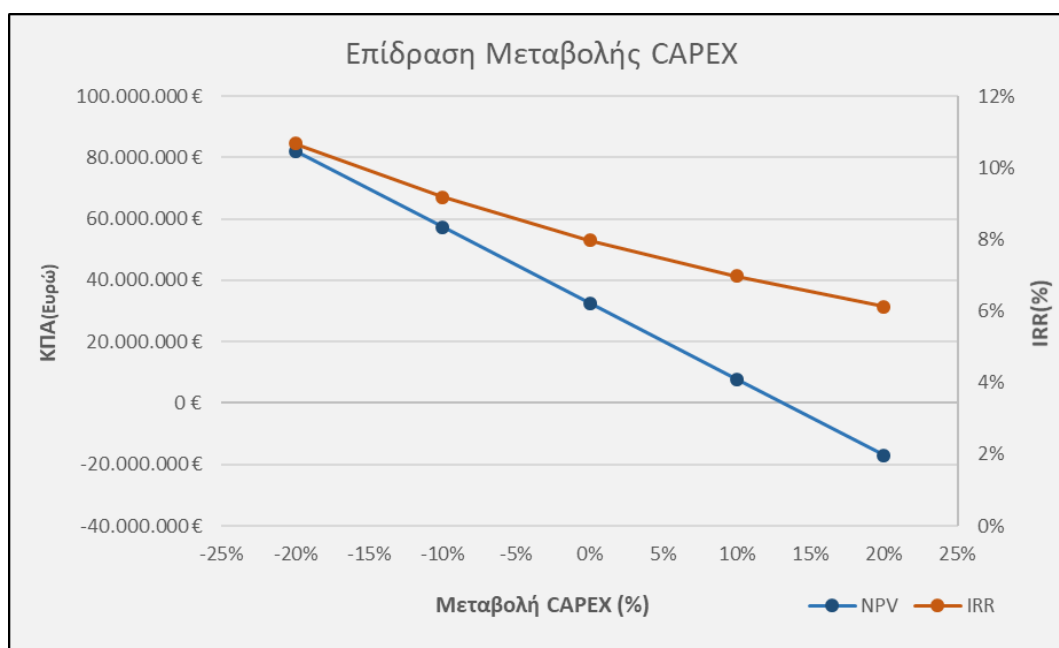
5.3.1 Επίδραση του Επενδυτικού Κόστους (CAPEX)

Με στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση του επενδυτικού κόστους, στα οικονομικά αποτελέσματα του έργου, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας την τιμή του CAPEX, σε ένα εύρος $\pm 20\%$, σε σχέση με το βασικό σενάριο. Κατά την ανάλυση αυτή, οι μόνες μεταβλητές που μεταβάλλονται μαζί με το CAPEX, είναι το λειτουργικό κόστος (OPEX), το οποίο διαμορφώνεται ως ποσοστό του και λόγω αυτού τροποποιούνται και τα καθαρά έσοδα του έργου. Οι υπόλοιπες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι διατηρούνται σταθερές, με στόχο να απομονωθεί η επίδραση του κόστους κεφαλαίου, στους βασικούς οικονομικούς δείκτες της επένδυσης. Για την δημιουργία του γραφήματος της ανάλυσης ευαισθησίας, δημιουργήθηκε ο ακόλουθος πίνακας δεδομένων, με τις μεταβολές αυτών.

Πίνακας 5.5: Πίνακας Μεταβλητών, για τις μεταβολές του CAPEX.

Μεταβολή CAPEX	CAPEX (€)	OPEX	Payback	NPV	IRR	Καθαρά Έσοδα
-20%	198.000.000 €	4.950.000 €	9	82.060.605 €	11%	21.186.000 €
-10%	222.750.000 €	5.568.750 €	11	57.310.605 €	9%	20.567.250 €
0%	247.500.000 €	6.187.500 €	12	32.560.605 €	8%	19.948.500 €
10%	272.250.000 €	6.806.250 €	14	7.810.605 €	7%	19.329.750 €
20%	297.000.000 €	7.425.000 €	16	-16.939.395 €	6%	18.711.000 €

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, στο ακόλουθο διάγραμμα, παρουσιάζεται η μεταβολή του CAPEX, σε συνάρτηση με τους βασικούς οικονομικούς δείκτες του έργου, όπως την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR).



Σχήμα 5.6: Ανάλυση ευαισθησίας του CAPEX, ως προς τους δείκτες ΚΠΑ και IRR.

Αυτό που παρατηρείται στο γράφημα, είναι ότι η μεταβολή του επενδυτικού κόστους, επηρεάζει ιδιαίτερα την αποτελεσματικότητα της επένδυσης, καθώς τόσο η Καθαρή Παρούσα Αξία, όσο και ο IRR, εμφανίζουν σαφή πτώση, με την αύξηση του αρχικού κόστους επένδυσης. Αναμενόμενη συμπεριφορά, καθώς το CAPEX αποτελεί το

σημαντικότερο τμήμα των συνολικών δαπανών έργου αντλησιοταμίευσης και επηρεάζει άμεσα την δυνατότητα ανάκτησης του αρχικού κεφαλαίου.

Με την μείωση του κόστους κατά 20%, η ΚΠΑ εμφανίζει αύξηση, η οποία διαμορφώνεται γύρω στα 80 εκατομμύρια ευρώ, ενώ ο δείκτης IRR, λίγο πάνω από 10%. Η αύξηση των δεικτών αυτών υποδηλώνει, ότι η μείωση των αρχικών κεφαλαιουχικών απαιτήσεων, αυξάνει σημαντικά την οικονομική απόδοση της επένδυσης, επίδραση σημαντική για τέτοια έργα μεγάλης διάρκειας ζωής, όπου ακόμα και μικρές διαφοροποιήσεις στο αρχικό κόστος, επηρεάζουν τις μελλοντικές ταμειακές ροές.

Αντίθετα, με την αύξηση του CAPEX, παρατηρείται συνεχής υποβάθμιση των οικονομικών δεικτών. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του κόστους κατά 10%, η ΚΠΑ μειώνεται αισθητά, σε οριακά θετικές τιμές, ενώ ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης, πλησιάζει το 7%, κοντά στο επίπεδο του προεξοφλητικού επιτοκίου. Με την μείωση αυτή, το έργο χάνει την επενδυτική του ελκυστικότητα, λόγω του περιορισμού της δημιουργίας επαρκών αποδόσεων, σε σχέση με το απαιτούμενο κεφάλαιο.

Αξίζει να σημειωθεί η περίπτωση όπου το κόστος αυξάνεται κατά 20% και η Καθαρή Παρούσα Αξία, λαμβάνει αρνητικές τιμές, υποδηλώνοντας ότι οι προεξοφλημένες μελλοντικές χρηματοροές, δεν επαρκούν ώστε να καλυφθεί το συνολικό επενδυτικό κόστος. Παράλληλα, ο δείκτης IRR, διαμορφώνεται περίπου στο 6%, χαμηλότερα από το προεξοφλητικό επιτόκιο, θέτοντας την επένδυση, ως μη ελκυστική προς τους επενδυτές. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, παρουσιάζουν την υψηλή ευαισθησία του έργου, ως προς πιθανές υπερβάσεις του κόστους κατά την φάση κατασκευής και ανάπτυξης.

Συμπερασματικά, η ανάλυση φανερώνει ότι το κόστος κεφαλαίου, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επιδρούν στην οικονομική επίδοση του εξεταζόμενου έργου. Η αξιοποίηση του επιφανειακού ορυχείου, μειώνει σημαντικά την ανάγκη για νέες χωματουργικές και τεχνικές παρεμβάσεις, συγκρατώντας το CAPEX και ενισχύοντας τα οικονομικά κέρδη της επένδυσης.

5.3.2 Επίδραση της Διαφοράς Τιμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (Spread)

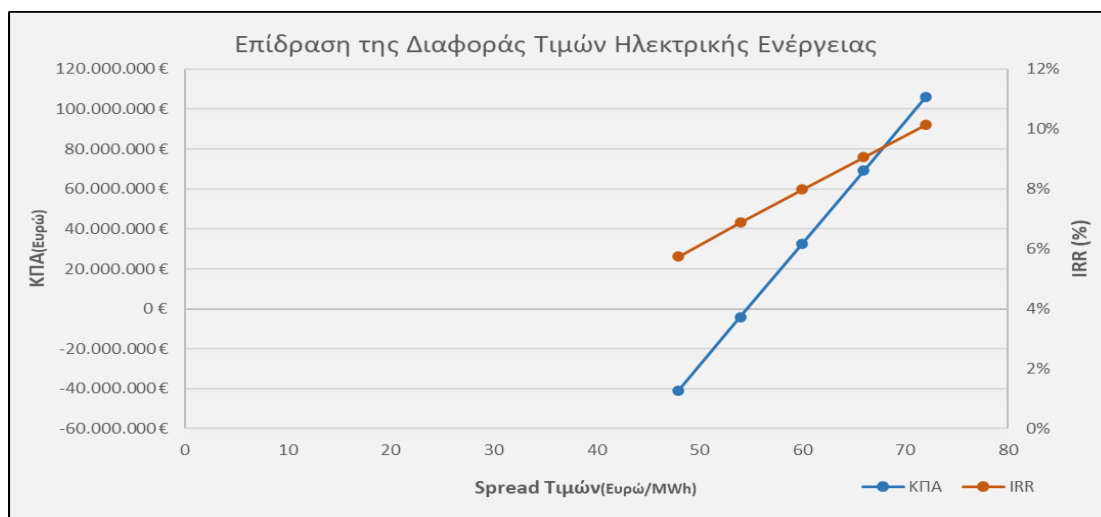
Για την αξιολόγηση της επίδρασης των συνθηκών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, στην οικονομική επίδοση του έργου, πραγματοποιείται ανάλυση του spread των τιμών αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η παράμετρος αυτή, αποτελεί σημαντικό μηχανισμό δημιουργίας εσόδων για το σύστημα και καθορίζει και την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής του ενεργειακού Arbitrage. Η τιμή του spread μεταβάλλεται για ένα εύρος $\pm 20\%$ σε σχέση με το βασικό σενάριο, και οι τεχνικές και οικονομικές παράμετροι, όπως η ισχύς, η απόδοση, οι ώρες λειτουργίας, το κόστος κεφαλαίου, το λειτουργικό κόστος και το προεξοφλητικό επιτόκιο, παραμένουν

σταθερές, με στόχο την εξέταση της επίδρασης της μεταβολής του spread στους οικονομικούς δείκτες της επένδυσης.

Πίνακας 5.6: Η μεταβολή των οικονομικών δεικτών για διαφορετικές τιμές spread ηλεκτρικής ενέργειας.

Μεταβολή Spread	Spread (€/ MWh)	Ετήσια Έσοδα	ΚΠΑ	IRR	Χρόνος Αποπληρωμής	Καθαρά Έσοδα
-20%	48	20.908.800 €	-40.825.003	6%	17	14.721.300 €
-10%	54	23.522.400 €	-4.132.199	7%	14	17.334.900 €
0%	60	26.136.000 €	32.560.605	8%	12	19.948.500 €
10%	66	28.749.600 €	69.253.409	9%	11	22.562.100 €
20%	72	31.363.200 €	105.946.213	10%	10	25.175.700 €

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα των μεταβλητών, στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του spread, στους βασικούς οικονομικούς δείκτες του έργου, την ΚΠΑ και τον IRR.



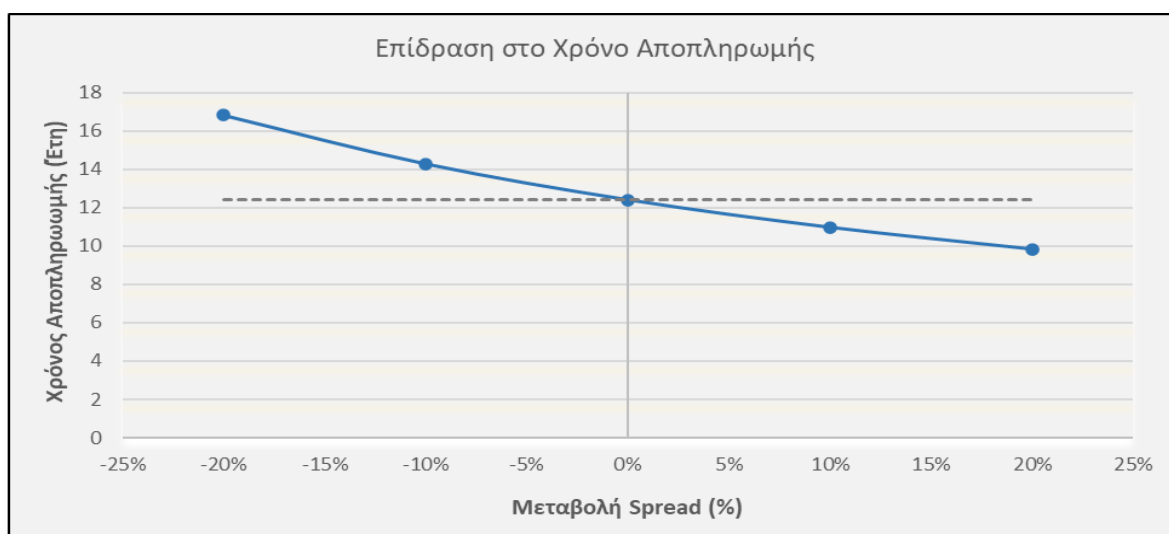
Σχήμα 5.7: Ανάλυση ευαισθησίας της διαφοράς τιμών πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ως προς την ΚΠΑ και τον IRR.

Παρατηρείται, ότι με την αύξηση της διαφοράς των τιμών, επηρεάζεται θετικά η οικονομική απόδοση της επένδυσης, καθώς τόσο η ΚΠΑ, όσο και ο IRR αυξάνονται

σημαντικά. Αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς μεγαλύτερη διαφορά τιμών αγοράς και πώλησης, οδηγεί σε υψηλότερο οικονομικό όφελος, λόγω της καθημερινής λειτουργίας άντλησης και παραγωγής, αυξάνοντας τα καθαρά έσοδα του έργου. Στην περίπτωση της κατά 20% αύξησης, όπου η διαφορά είναι στα 72 €/MWh, η ΚΠΑ αυξάνεται με τιμή γύρω στα 100 εκατομμύρια ευρώ, ενώ ο IRR ξεπερνά το 10%, προσφέροντας υψηλότερη οικονομική ανταγωνιστικότητα στην επένδυση. Αυτή η μεταβολή, αποτυπώνει την σημασία των συνθηκών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την επένδυση, αλλά και την σπουδαιότητα της αξιοποίησης των ωρών χαμηλών και υψηλών τιμών.

Αντίθετα, η μείωση του spread κατά 20%, εμφανίζει αρνητικές τιμές στην ΚΠΑ, ενώ ο IRR περιορίζεται σε χαμηλότερα επίπεδα από το βασικό σενάριο. Οι τιμές αυτές, υποδηλώνουν ότι σε συνθήκες μειωμένης μεταβλητότητας της αγοράς, περιορίζεται σημαντικά η αξιοποίηση των διακυμάνσεων τιμών, μειώνοντας την οικονομική απόδοση της αποθήκευσης ενέργειας.

Εκτός από την επίδραση στους δείκτες της Καθαρής Παρούσας Αξίας και του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης, σημαντικές μεταβολές παρουσιάζει και ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 5.8: Ανάλυση ευαισθησίας του spread τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, ως προς τον χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης.

Η μεταβολή του spread των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, επιδράς σημαντικά στον χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης, καθώς καθορίζει την δημιουργία εσόδων μέσω της λειτουργίας του συστήματος. Όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα, η αύξηση της διαφοράς των τιμών μειώνει σταδιακά τον χρόνο αποπληρωμής, βελτιώνοντας την οικονομική απόδοση του έργου. Αντίθετα, σε συνθήκες όπου μειώνεται αυτή η διαφορά, η επένδυση εμφανίζει μεγαλύτερες περιόδους ανάκτησης του αρχικού κεφαλαίου, μειώνοντας τα οφέλη της επένδυσης.

Πιο συγκεκριμένα, για μείωση της διαφοράς των τιμών κατά 20%, ο χρόνος αυξάνεται σημαντικά γύρω στα 17 έτη, λόγω της μείωσης των ετήσιων καθαρών εσόδων. Αντίθετα, με την αύξηση του spread κατά 20%, ο χρόνος απόσβεσης διαμορφώνεται γύρω στα 10 έτη, φανερώνοντας την ενίσχυση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου υπό ευνοϊκότερες συνθήκες αγοράς. Ακόμη, στο γράφημα παρουσιάζεται με οριζόντια γραμμή αναφοράς και ο χρόνος αποπληρωμής του βασικού σεναρίου, γύρω στα 12 έτη λειτουργίας. Το σημείο αυτό αναφοράς, λειτουργεί και ως σημείο σύγκρισης, συμβάλλοντας στην άμεση αξιολόγηση της επίδρασης του spread, στην οικονομική απόδοση της επένδυσης. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί, ότι για αρνητικές μεταβολές της διαφοράς τιμών, ο χρόνος αποπληρωμής υπερβαίνει αρκετά την τιμή αναφοράς, ενώ για θετικές μεταβολές, μειώνεται κάτω από αυτή.

Συνεπώς, αυτή η ανάλυση ευαισθησίας, επισημαίνει την κρισιμότητα του spread τιμών, για την επιτυχία των έργων αντλησιοταμίευσης, καθώς διαμορφώνει άμεσα τόσο τα ετήσια έσοδα, όσο και την ταχύτητα ανάκτησης του επενδυμένου κεφαλαίου. Η σχέση αυτή, τονίζει την σημασία της εξέλιξης της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και της αυξημένης διείσδυσης μεταβλητών ΑΠΕ, η οποία ενισχύει τις διακυμάνσεις τιμών, και με τον τρόπο αυτό την κερδοφορία του συστήματος.

5.3.3 Επίδραση των Ωρών Λειτουργίας

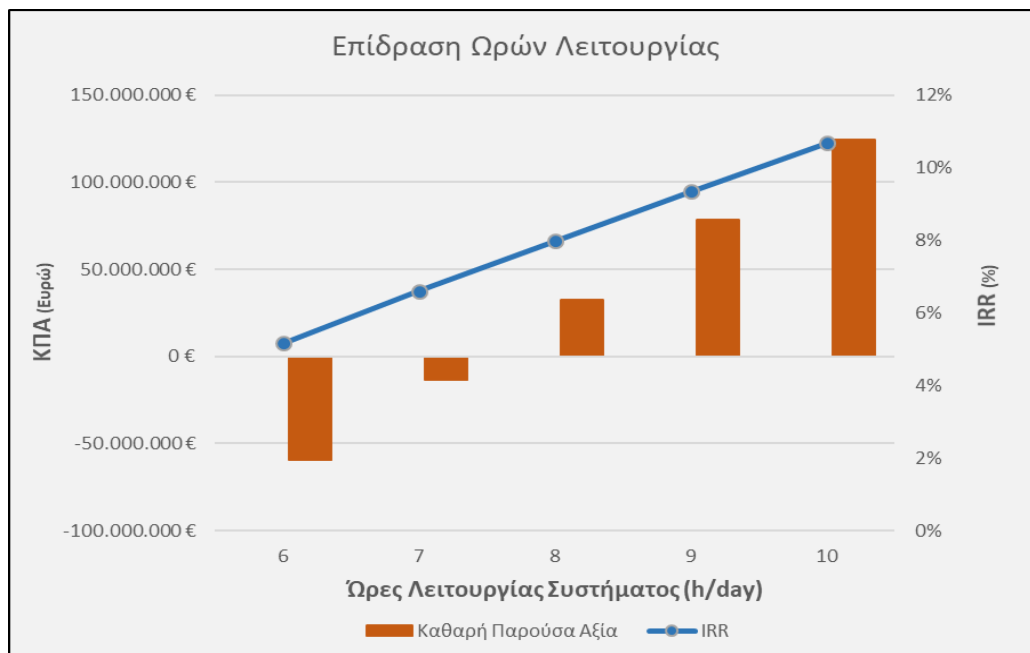
Για να αξιολογηθεί η επίδραση που ασκεί ο βαθμός αξιοποίησης του συστήματος στην οικονομική του απόδοση, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις ημερήσιες ώρες λειτουργίας του έργου, με εύρος από 6 έως 10 ώρες ανά ημέρα, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθεροί με τις τιμές του βασικού σεναρίου.

Πίνακας 5.7: Μεταβολή των οικονομικών δεικτών, για διαφορετικές ώρες ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος.

Ωρες λειτουργίας	ΚΠΑ	IRR	Χρόνος Αποπληρωμής (Ετη)	Παραγόμενη Ενέργεια (MWh/day)	Μικτά Ημερήσια Έσοδα	Μικτά Ετήσια Έσοδα	Καθαρά Ετήσια Έσοδα
6	-59.171.404 €	5%	18	990	59.400 €	19.602.000 €	13.414.500 €
7	-13.305.400 €	7%	15	1155	69.300 €	22.869.000 €	16.681.500 €
8	32.560.605 €	8%	12	1320	79.200 €	26.136.000 €	19.948.500 €

9	78.426.610 €	9%	11	1485	89.100 €	29.403.000 €	23.215.500 €
10	124.292.615 €	11%	9	1650	99.000 €	32.670.000 €	26.482.500 €

Τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα, φανερώνουν, ότι με την αύξηση των ωρών λειτουργίας, βελτιώνονται και οι βασικοί οικονομικοί δείκτες, καθώς η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας που προκαλείται με την αύξηση των ωρών, συμβάλλει στην διαμόρφωση μεγαλύτερων καθαρών ταμειακών ροών κατά την διάρκεια του έργου. Στο ακόλουθο γράφημα, εξετάζεται η επίδραση των ημερήσιων ωρών λειτουργίας, στους δείκτες της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) και του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR).



Σχήμα 5.9: Ανάλυση ευαισθησίας των ημερήσιων ωρών λειτουργίας, ως προς τον δείκτη ΚΠΑ και IRR.

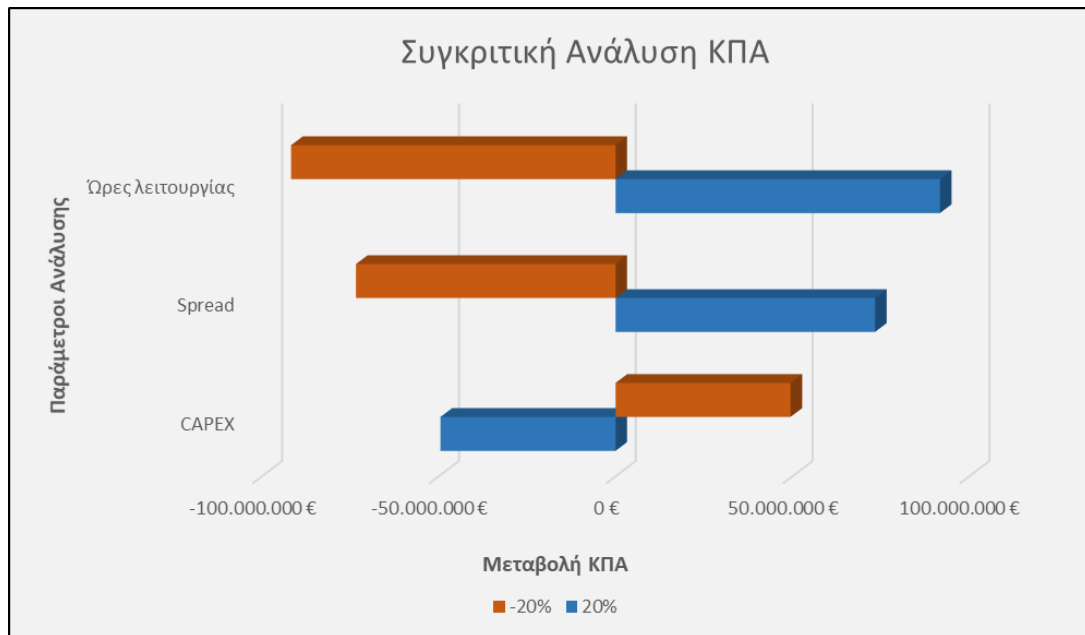
Στο διάγραμμα παρατηρείται, ότι η οικονομική κερδοφορία του έργου, επηρεάζεται άμεσα από τις ώρες λειτουργίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, για ημερήσια λειτουργία 6 ωρών, η ΚΠΑ διαμορφώνει έντονα αρνητικές τιμές γύρω στα -59.000.000 ευρώ, ενώ ο IRR, μειώνεται κοντά στο 5%, χαμηλότερα από το προεξοφλητικό επιτόκιο της επένδυσης. Γεγονός, που υποδηλώνει ότι οι συνθήκες χαμηλής αξιοποίησης της εγκατάστασης, και οι χρηματοροές που παράγονται δεν επαρκούν, ώστε να θεωρείται οικονομικά αποδοτική η λειτουργία του έργου.

Αντίθετα, με την αύξηση των ωρών λειτουργίας, οι δείκτες βελτιώνονται. Για το βασικό σενάριο των 8 ωρών, η ΚΠΑ ανέρχεται στα 32.600.000 ευρώ και ο IRR προσεγγίζει το 8%, πάνω από το προεξοφλητικό επιτόκιο. Για λειτουργία 10 ωρών, η Καθαρή Παρούσα Αξία υπερβαίνει τα 120.000.000 ευρώ και ο IRR αυξάνεται στο 11%.

Συνεπώς, ο ρόλος του utilization factor, δηλαδή οι ώρες χρήσης του συστήματος, είναι καθοριστικές για την χρηματοοικονομική συμπεριφορά τέτοιων έργων αντλησιοταμίευσης, καθώς με την συχνότερη λειτουργία, εκμεταλλεύεται μεγαλύτερο μέρος των διακυμάνσεων των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και αυξάνονται τα έσοδα λόγω του ενεργειακού Arbitrage. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι για την διατήρηση μεγάλου αριθμού κύκλων λειτουργίας, απαιτούνται ευνοϊκές συνθήκες αγοράς και αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ, οι οποίες δυναμώνουν την μεταβλητότητα των τιμών και ωθούν στην αποθήκευση ενέργειας.

5.3.4 Συγκριτική Αξιολόγηση

Έπειτα από την επιμέρους διερεύνηση της επίδρασης του CAPEX, της διαφοράς των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας (spread), αλλά και των ωρών ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος, αξιολογείται συγκριτικά η επίδραση αυτών των παραμέτρων στους οικονομικούς δείκτες του έργου. Μέσω της ανάλυσης αυτής θα αναδειχθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τα οικονομικά κέρδη του έργου και θα εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα του απέναντι σε μελλοντικές συνθήκες αβεβαιότητας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα διάγραμμα Tornado, στο οποίο παρουσιάζεται η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), αλλά και ένα διάγραμμα Spider, όπου αποτυπώνεται η μεταβολή του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR).



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα Tornado, όπου αποτυπώνονται οι διακυμάνσεις της ΚΠΑ, ως προς τις βασικές παραμέτρους ευαισθησίας.

Από το παραπάνω γράφημα προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στην ΚΠΑ, την ασκούν οι ώρες λειτουργίας του συστήματος, διότι η μεταβολή των ωρών αυτών, κατά $\pm 20\%$, εμφανίζει την μεγαλύτερη απόκλιση από την τιμή του βασικού σεναρίου. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση των ωρών, προκαλεί σημαντική πτώση της Καθαρής Παρούσας Αξίας με αρνητικές τιμές, ενώ η αντίστοιχη αύξηση βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Αυτή η σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι οι ώρες λειτουργίας, συνδέονται άμεσα με την παραγόμενη ενέργεια του συστήματος, διαμορφώνοντας έτσι και τα συνολικά έσοδα της εγκατάστασης. Ουσιαστικά αυτή η παράμετρος, αφορά τον βαθμό αξιοποίησης της μονάδας αποθήκευσης και τονίζει την σημασία της ευελιξίας των έργων αντλησιοταμίευσης.

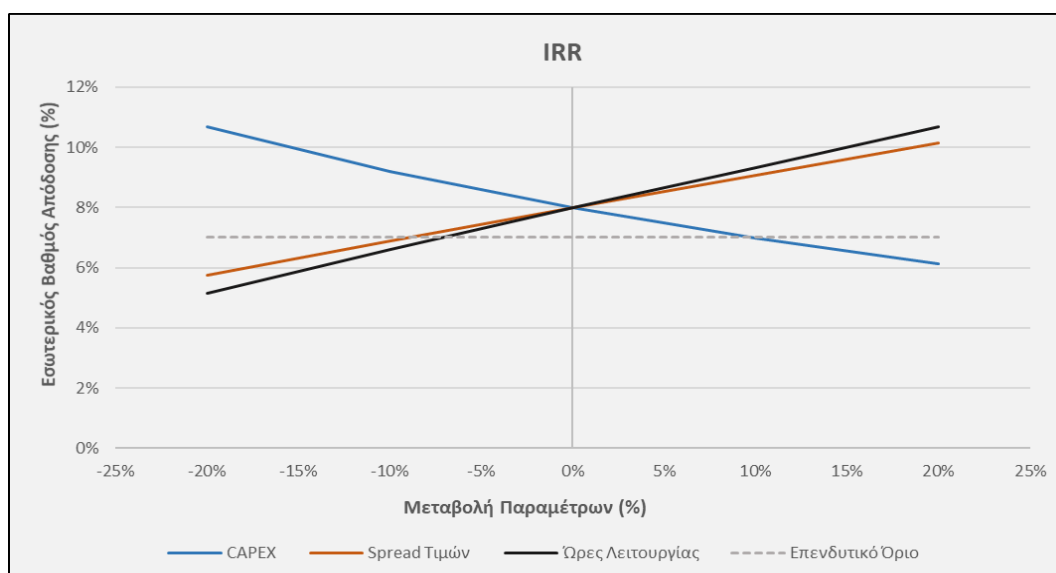
Εξίσου έντονη επίδραση εμφανίζεται και λόγω του spread των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, παράμετρο η οποία διαμορφώνει σημαντικά τα έσοδα της επένδυσης, καθώς αυτά προκύπτουν από την διαφορά των τιμών μεταξύ των περιόδων φόρτισης και εκφόρτισης. Με την αύξηση του spread, βελτιώνεται σημαντικά η ΚΠΑ, ενώ η μείωση του περιορίζει αισθητά το κέρδος της επένδυσης. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν την εξάρτηση της επένδυσης από τις συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και από την διατήρηση επαρκούς spread τιμών κατά τις ώρες χαμηλής, αλλά και υψηλής ζήτησης.

Το κόστος κεφαλαίου (CAPEX), παρουσιάζει την μικρότερη επίδραση σε σχέση με τις προηγούμενες παραμέτρους, αλλά αποτελεί και αυτό σημαντικό παράγοντα για την οικονομική αξιολόγηση. Οι μεταβολές του CAPEX, επηρεάζουν αρκετά την ΚΠΑ, ωστόσο η απόκλιση που προκαλείται παραμένει μικρότερη από εκείνη που προκαλείται από μεταβολές στα λειτουργικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της μονάδας.

Συμπερασματικά, η κατάταξη των παραμέτρων ως προς την επίδραση τους στην ΚΠΑ διαμορφώνεται ακολούθως:

Ωρες λειτουργίας > Spread τιμών > CAPEX

,υποδεικνύοντας ότι η οικονομική απόδοση του εξεταζόμενου έργου, επηρεάζεται περισσότερο από την λειτουργική αξιοποίηση του αλλά και από τις συνθήκες της αγοράς, παρά από το αρχικό επενδυτικό κόστος.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα Spider που αφορά την μεταβολή του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR), σε συνάρτηση με τις βασικές παραμέτρους ευαισθησίας.

Στο παραπάνω διάγραμμα Spider, παρουσιάζεται η μεταβολή του IRR, για ποσοστιαίες μεταβολές των εξεταζόμενων παραμέτρων, αλλά και το επίπεδο του προεξοφλητικού επιτοκίου στο 7%, το οποίο λειτουργεί ως ελάχιστο αποδεκτό όριο για την επένδυση. Παρατηρείται ότι οι ώρες λειτουργίας και το spread τιμών εμφανίζουν θετική κλίση, υποδηλώνοντας ότι η αύξηση αυτών, ενισχύει και τον IRR του έργου. Αντίθετα, το κόστος κεφαλαίου (CAPEX), εμφανίζει αρνητική κλίση, διότι με την αύξηση του μειώνεται η οικονομική πρόοδος της επένδυσης. Οι ευθείες και των τριών παραμέτρων, τέμνονται από την γραμμή του επενδυτικού ορίου (7%). Με την μείωση των ωρών λειτουργίας, αλλά και του spread κατά 20%, ο δείκτης IRR υποχωρεί κάτω από το επενδυτικό όριο, μειώνοντας το ενδιαφέρον της επένδυσης, ενώ η αύξηση του CAPEX, προκαλεί επίσης τα ίδια αποτελέσματα.

Αυτό το γράφημα, όπως και το προηγούμενο της ανάλυσης Tornado, τονίζει την ευαισθησία της επένδυσης ως προς την λειτουργία και τα έσοδα του έργου. Συνεπώς, κρίσιμοι παράγοντες για την μακροχρόνια απόδοση της επένδυσης, αποτελούν η διασφάλιση επαρκούς αριθμού ωρών λειτουργίας, αλλά και η ύπαρξη επαρκούς διαφοράς τιμών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

5.4 Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Με στόχο να αξιολογηθεί η σχετική επίδραση των βασικών τεχνικών και γεωμορφολογικών παραμέτρων, στο εξεταζόμενο έργο αντλησιοταμίευσης, εφαρμόζεται η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP). Κατά την διαδικασία αυτή, τα κριτήρια συγκρίθηκαν ανά ζεύγη και σύμφωνα με την κλίμακα προτίμησης Saaty, με στόχο να αποτυπωθεί η βαρύτητα της κάθε παραμέτρου. Τα κριτήρια που εξετάστηκαν αποτελούν, την ευστάθεια των πρανών, το ισοζύγιο νερού, την υψομετρική διαφορά και την χωρητικότητα των δεξαμενών, καθώς πρόκειται για παράγοντες που επιδρούν άμεσα στην υλοποίηση, αλλά και την λειτουργική αποτελεσματικότητα των έργων αντλησιοταμίευσης, σε εξαντλημένα ορυχεία.

Για την δημιουργία του πίνακα, όπου συγκρίνονται τα κριτήρια ανά ζεύγη χρησιμοποιήθηκε η κλίμακα Saaty, η οποία παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας.

Πίνακας 5.8: Πίνακας συγκριτικής αξιολόγησης κριτηρίων.

	Ευστάθεια Πρανών	Ισοζύγιο Νερού	Υψομετρική Διαφορά	Χωρητικότητα Δεξαμενών
Ευστάθεια Πρανών	1	2	4	6
Ισοζύγιο Νερού	1/2	1	2	4
Υψομετρική Διαφορά	1/4	1/2	1	2
Χωρητικότητα Δεξαμενών	1/6	1/4	1/2	1
Άθροισμα	1,92	3,75	7,50	13

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η κανονικοποίηση του πίνακα και ο υπολογισμός των τελικών βαρών για κάθε παράμετρο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.9: Κανονικοποιημένος πίνακας, με τα τελικά βάρη των κριτηρίων.

	Ευστάθεια Πρανών	Ισοζύγιο Νερού	Υψομετρική Διαφορά	Χωρητικότητα Δεξαμενών	Βάρη
Ευστάθεια Πρανών	0,52	0,53	0,53	0,46	0,51
Ισοζύγιο Νερού	0,26	0,27	0,27	0,31	0,28
Υψομετρική Διαφορά	0,13	0,13	0,13	0,15	0,14
Χωρητικότητα Δεξαμενών	0,09	0,07	0,07	0,08	0,07

Για την εξέταση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων από τις προηγούμενες συγκρίσεις, πραγματοποιείται έλεγχος συνέπειας, χρησιμοποιώντας τον δείκτη (CR). Ο δείκτης αυτός ελέγχει, εάν οι συγκρίσεις ακολουθούν μια λογική δομή και δεν παρουσιάζουν αντιφάσεις. Για να θεωρείται αποδεκτή τιμή, χρειάζεται $CR < 0,10$.

Αρχικά, υπολογίζεται η τιμή λ , για κάθε κριτήριο, η οποία προκύπτει από τον λόγο του σταθμισμένου αθροίσματος κάθε παραμέτρου, προς το αντίστοιχο βάρος της. Ακόμη, υπολογίζεται και η μέγιστη τιμή λ_{max} , ως ο μέσος όρος των επιμέρους τιμών λ .

Οι τιμές που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ευστάθεια Πρανών	4,10
Ισοζύγιο Νερού	4,17
Υψομετρική Διαφορά	4,17
Χωρητικότητα Δεξαμενών	4,17
λ_{max}	4,15

Με βάση την τιμή του λ_{max} , υπολογίζεται και ο δείκτης συνέπειας (CI), από τον ακόλουθο τύπο:

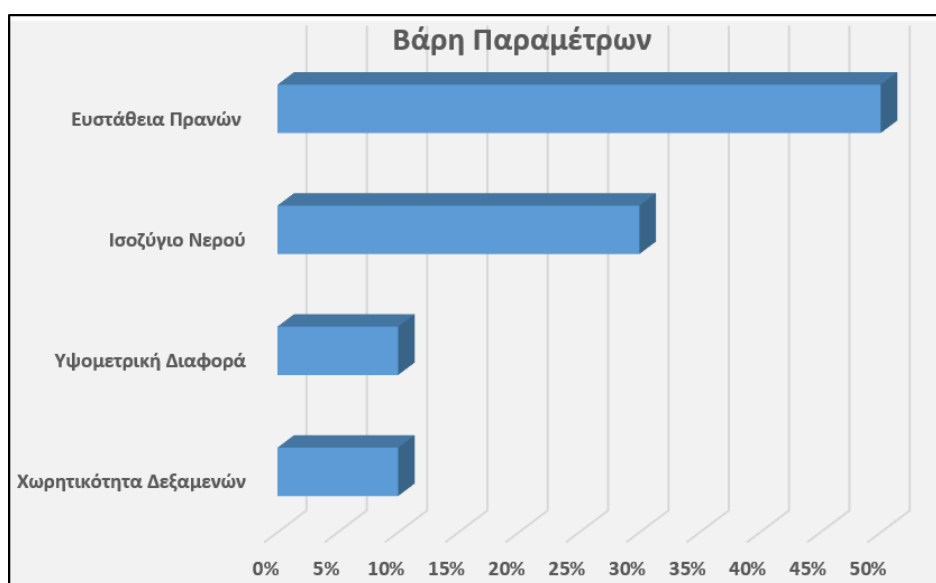
$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

οπότε $CI = 0,05$

Τέλος, για τον υπολογισμό του λόγου συνέπειας (CR), χρησιμοποιείται ο λόγος του CI προς τον τυχαίο δείκτη της μεθόδου Saaty, ο οποίος ισούται με 0,90.

Ο CR υπολογίζεται στο 0,06, τιμή χαμηλότερη από το ανώτερο όριο του 0,10. Επομένως, οι συγκριτική αξιολόγηση θεωρείται συνεπής και τα βάρη αξιόπιστα, για την ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά την επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων.

Τα βάρη που προκύπτουν από την πολυκριτηριακή ανάλυση, παρουσιάζουν σαφή διαφοροποίηση ως προς την σημασία των παραμέτρων.



Σχήμα 5.12: Σχετική βαρύτητα των κριτηρίων αξιολόγησης, μέσω της μεθόδου AHP.

Το σημαντικότερο κριτήριο, αποτελεί η ευστάθεια των πρανών, συγκεντρώνοντας το υψηλότερο ποσοστό βαρύτητας, στο 50%. Αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς η γεωτεχνική σταθερότητα, αποτελεί κύρια προϋπόθεση για την δημιουργία τέτοιων έργων αντλησιοταμίευσης σε εξαντλημένα ορυχεία. Η παρουσία ασταθών πρανών, αυξάνει σημαντικά το κόστος εργασιών αποκατάστασης, αλλά περιορίζει και την διαμόρφωση των ταμιευτήρων. Η μη ορθή εξέταση των πρανών, ενέχει το κίνδυνο της αστοχίας του έργου. Ακολουθεί, η παράμετρος που αφορά το ισοζύγιο του νερού, όπου το βάρος της υπολογίζεται περίπου στο 30%, τονίζοντας τη σημασία της επάρκειας των υδατικών πόρων, ώστε να επιτυγχάνεται η ορθή λειτουργία του συστήματος. Η δυνατότητα εξασφάλισης επαρκούς ποσότητας νερού, έχει άμεση επίδραση στη λειτουργική αξιοποίηση του έργου, κυρίως για περιοχές που υπάρχουν υδρολογικοί περιορισμοί και αυξημένες απώλειες λόγω εξάτμισης ή διήθησης. Σημαντικό πλεονέκτημα της περιοχής μελέτης, αποτελεί η ύπαρξη δύο γειτονικών ποταμών, οι οποίοι θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν το σύστημα, σε περιόδους έλλειψης νερού.

Στην συνέχεια, η υψομετρική διαφορά, εμφανίζει χαμηλή βαρύτητα γύρω στο 10%, παρ' ότι αποτελεί βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό για τέτοια έργα. Το ποσοστό αυτό, οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη μεγάλου εύρους υψομέτρων, όπου τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, έχουν την δυνατότητα επιτυχούς λειτουργίας. Στο υπό εξέταση έργο, η γεωμορφολογία της περιοχής προσφέρει ικανοποιητική υψομετρική διαφορά, με αποτέλεσμα η παράμετρος αυτή να μην λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας. Αντίστοιχα, η χωρητικότητα των δεξαμενών διαμορφώνει το βάρος της επίσης στο 10%, υποδηλώνοντας ότι αποτελεί δευτερεύουσα παράμετρο για την τεχνική αξιολόγηση του έργου. Η χωρητικότητα, συνδέεται άμεσα με την αποθηκευτική ικανότητα των ταμιευτήρων, ωστόσο με την πραγματοποίηση περαιτέρω εκσκαφών, δύναται να αυξηθεί ο όγκος τους. Στην παρούσα περίπτωση, η ύπαρξη μεγάλου χώρου εξόρυξης, μειώνει σημαντικά τους περιορισμούς που αφορούν την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στους ταμιευτήρες. Η ανάλυση αυτή, παρουσιάζει ότι τα γεωτεχνικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, παρουσιάζουν αυξημένη σημασία έναντι των καθαρών μορφολογικών παραμέτρων, κατά την διαδικασία αξιολόγησης της καταλληλότητας της εξεταζόμενης περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, η κατάταξη αυτή, υποδηλώνει ότι για την επιτυχή αξιοποίηση εξαντλημένων επιφανειακών λιγνιτωρυχείων, για την δημιουργία αντλησιοταμιευτικών έργων, πρωτίστως εξετάζεται η ασφάλεια της γεωτεχνικής δομής και η εξασφάλιση του αναγκαίου υδατικού ισοζυγίου.

Συμπερασματικά, η τεχνοοικονομική ανάλυση του βασικού σεναρίου, η ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων ως προς τις συνθήκες λειτουργίας και η ανάλυση ευαισθησίας των κρίσιμων παραμέτρων, υποδεικνύουν, ότι η τεχνοοικονομική επίδοση του έργου, διαμορφώνεται κυρίως από τις ώρες λειτουργίας και την διαφορά τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικού ρεύματος. Ακόμη, η πολυκριτηριακή ανάλυση με την μέθοδο AHP, ανέδειξε την σημασία των γεωτεχνικών συνθηκών του χώρου εγκατάστασης του έργου, αλλά και του υδατικού ισοζυγίου. Πιο συγκεκριμένα, ως κρίσιμες παράμετροι καθορίστηκαν η ευστάθεια των πρανών και το ισοζύγιο του νερού, ώστε το σύστημα να είναι λειτουργικά αξιόπιστο. Τα παραπάνω ευρήματα, αποτελούν την βάση ώστε να αποτιμηθεί συνολικά το έργο και να διατυπωθούν τα συμπεράσματα του ακόλουθου κεφαλαίου.

6. Συμπεράσματα

Με την ταχεία διείσδυση των ΑΠΕ στο σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο, δημιουργούνται αυξημένες απαιτήσεις αποθήκευσης και διαχείρισης, αυτής της παραγόμενης ενέργειας. Η συνεχής μεταβολή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την δημιουργία αξιόπιστων και μεγάλης κλίμακας συστημάτων αποθήκευσης. Παράλληλα, η παύση της εξόρυξης λιγνίτη, έχει δημιουργήσει αρκετές μεταλλευτικές εκτάσεις, οι οποίες θα συνέβαλαν στην περιβαλλοντική αποκατάσταση,

αλλά και στην οικονομική άνοδο των γύρω περιοχών, με την δημιουργία, νέων βιώσιμων χρήσεων. Το σύνθετο ερευνητικό ζήτημα, το οποίο αναδεικνύεται, αφορά την δυνατότητα συνδυασμού της μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης, με την αξιοποίηση των εξαντλημένων επιφανειακών ορυχείων. Η πιο γνωστή διεθνώς, μέθοδος αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, είναι τα συστήματα αντλησιοταμίευσης. Ωστόσο, οι τεχνικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις που αφορούν την βιωσιμότητα τέτοιων συστημάτων σε πρώην μεταλλευτικές περιοχές, χρειάζονται λεπτομερή μελέτη. Ακόμη, από την βιβλιογραφία, καταδεικνύεται ότι η επιτυχία τέτοιων έργων, εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων, οι οποίες χρειάζονται συστηματικό έλεγχο, αλλά και βελτιστοποίηση, ώστε αυτά τα συστήματα να θεωρούνται αποδοτικά.

Στόχο της παρούσας εργασίας, αποτελεί η εξέταση της δυνατότητας αξιοποίησης πρώην ορυχείων για την δημιουργία συστημάτων αντλησιοταμίευσης, σε συνεργασία με εγκαταστάσεις ΑΠΕ. Παράλληλα, κύριο στόχο αποτελεί η ανάδειξη των παραγόντων που επηρεάζουν την τεχνική και οικονομική απόδοση αυτών των συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η καταλληλότητα μεταλλευτικής περιοχής της Μεγαλόπολης, ως ενδεικτική περιοχή εφαρμογής, συνεισφέροντας στην ενεργειακή μετάβαση της περιοχής. Ωστε να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, εφαρμόστηκε πολυεπίπεδη μεθοδολογική προσέγγιση, με το αρχικό στάδιο να αφορά την εκτενή βιβλιογραφική έρευνα, των χαρακτηριστικών των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, της εφαρμογής αυτών σε εξαντλημένα ορυχεία, αλλά και των πρακτικών που επηρεάζουν την βελτιστοποίηση τέτοιων έργων. Έπειτα, αναπτύχθηκε ένα πλαίσιο αξιολόγησης των πιο κρίσιμων τεχνοοικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, το οποίο εφαρμόστηκε στην μελέτη περίπτωσης, για την περιοχή της Μεγαλόπολης. Αυτή η διαδικασία περιέχει τεχνικούς υπολογισμούς, εκτίμηση ενεργειακών μεγεθών, εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας, με την χρήση βασικών δεικτών, αλλά και ανάλυση ευαισθησίας και πολυκριτηριακή ανάλυση, ώστε να αξιολογηθεί συνολικά η εξεταζόμενη επένδυση, αλλά και οι παράμετροι που χρήζουν προσοχή. Η μελέτη αυτή επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων, για την αξιοποίηση μεταλλευτικών περιοχών ως υποδομών αποθήκευσης ενέργειας, τονίζοντας τη συμβολή τους, στην στήριξη των ΑΠΕ και στην σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, αλλά και στην εξέλιξη της απολιγνιτοποίησης.

6.1 Κύρια ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση, ανέδειξε την σημασία της αντλησιοταμίευσης ως τεχνολογία αποθήκευσης, στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Η αύξηση της διείσδυσης της ηλιακής, αλλά και της αιολικής ενέργειας στο σύστημα, δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, αυξάνοντας την ανάγκη για τεχνολογίες αποθήκευσης, ώστε να εξισορροπείται η προσφορά και η ζήτηση. Επομένως, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης αποτελούν κυρίαρχη μορφή αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, καθώς μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Από την βιβλιογραφία, φανερώθηκε ότι αυτά τα συστήματα, παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης, υψηλή αξιοπιστία σε ότι αφορά την λειτουργία τους και μεγάλη διάρκεια ζωής, σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, όπως οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τα συστήματα

αντλησιοταμίευσης, θεωρούνται κατάλληλα για σταθερή λειτουργία, αλλά και γρήγορη ανταπόκριση σε μεταβολές του ηλεκτρικού φορτίου. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων, αποτελεί και η σταθερότητα που προσδίδουν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι έρευνες επισήμαναν, ότι η αντλησιοταμίευση, έχει την δυνατότητα να λειτουργεί ως μηχανισμός εξισορρόπησης της περιοδικής παραγωγής των ΑΠΕ, μειώνοντας τις περικοπές ενέργειας και προσδίδοντας αξιοπιστία στον ενεργειακό εφοδιασμό. Το χαρακτηριστικό της ταχείας απόκρισης, που εμφανίζουν αυτά τα συστήματα, επιτρέπει την ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης του δικτύου, κρίσιμο στοιχείο για συστήματα με αυξημένη συμμετοχή μεταβλητών μορφών ενέργειας.

Η αξιοποίηση των πρώην μεταλλευτικών περιοχών για την ανάπτυξη έργων αντλησιοταμίευσης, συνιστά μια αρκετά υποσχόμενη πρακτική, η οποία συνδυάζει τόσο ενεργειακά, όσο και περιβαλλοντικά οφέλη. Η μετατροπή των περιοχών αυτών, που έχουν υποστεί σημαντική οικολογική υποβάθμιση λόγω των εξορυκτικών τους δραστηριοτήτων, λειτουργεί ως μέσο περιβαλλοντικής αποκατάστασης, με τον επαναπροσδιορισμό της χρήσης γης. Η χρησιμοποίηση, των ήδη διαμορφωμένων κοιλοτήτων, τεχνικών έργων και υποδομών, μειώνει αρκετά το κόστος κατασκευής, περιορίζοντας παράλληλα και την ανάγκη για νέες παρεμβάσεις στο τοπίο. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η επανάχρηση τέτοιων χώρων ενισχύει την κοινωνική αποδοχή, διότι μετατρέπει τις εγκαταλελειμμένες περιοχές, σε παραγωγικές ενεργειακές υποδομές. Επομένως, λόγω των παραπάνω μειώνονται αρκετά οι απαιτήσεις της χωροθέτησης, αλλά και τα εμπόδια που αφορούν την περιορισμένη διαθεσιμότητα κατάλληλων εκτάσεων και κοινωνικές αντιδράσεις, καθώς η χρήση των ήδη διαταραγμένων περιοχών αποτελεί πιο βιώσιμη εναλλακτική. Ωστόσο, η ανάλυση της βιβλιογραφίας, επεσήμανε την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση πιθανών περιορισμών, όπως η γεωτεχνική σταθερότητα, η ποσότητα και ποιότητα των υδάτων, αλλά και οι γεωχημικές συνθήκες των περιοχών αυτών.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση, τόνισε ότι η αποδοτικότητα των έργων αντλησιοταμίευσης, επηρεάζεται από πληθώρα λειτουργικών και τεχνικών παραμέτρων. Στα κυριότερα χαρακτηριστικά συγκαταλέγεται και η υψομετρική διαφορά του άνω και του κάτω ταμιευτήρα, η οποία καθορίζει άμεσα την δυνατότητα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Η αύξηση του υδραυλικού ύψους βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, μειώνοντας τις απαιτήσεις χωρητικότητας. Ωστόσο, η χωρητικότητα των ταμιευτήρων αναδείχθηκε και εκείνη ως εξίσου καθοριστική, διαμορφώνοντας την διάρκεια λειτουργίας, αλλά και την συνολική ευελιξία των εγκαταστάσεων αυτών. Ο ορθός σχεδιασμός δεξαμενών, μεγάλων διαστάσεων, ωθεί στην αποθήκευση μεγαλύτερων ποσοτήτων πλεονάζουσας ενέργειας και συμβάλλει στην καλύτερη κάλυψη των αναγκών του δικτύου, κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης. Ιδιαίτερη σημασία, αποδόθηκε στις υδρογεωλογικές συνθήκες των περιοχών αυτών, με παράγοντες όπως οι απώλειες νερού λόγω αποστράγγισης, η ποιότητα των γεωλογικών σχηματισμών, αλλά και η σταθερότητα των πρανών, να κρίνονται καθοριστικοί για την ασφαλή λειτουργία τέτοιων έργων αντλησιοταμίευσης. Τέλος, η βιβλιογραφία υπογράμμισε την σημασία της ψηφιοποίησης και του σχεδιασμού της λειτουργίας, ως κύριες παράμετροι για την συνολική απόδοση των συστημάτων. Τεχνολογίες όπως έξυπνα συστήματα παρακολούθησης, αυτοματισμοί και άλλα εργαλεία ελέγχου, βελτιώνουν σημαντικά την λειτουργία αυτών των συστημάτων, περιορίζοντας ενδεχόμενους κινδύνους. Αντίστοιχα, ο σωστός

σχεδιασμός των τεχνικών χαρακτηριστικών και του εξοπλισμού, στηρίζει την αποδοτικότητα και την μακροχρόνια βιωσιμότητα τέτοιων επενδύσεων.

6.2 Συμπεράσματα από την μελέτη περίπτωσης της Μεγαλόπολης

Η αξιολόγηση της περιοχής μελέτης της Μεγαλόπολης και πιο συγκεκριμένα του ορυχείου Χωρεμίου, κατέδειξε, ότι η συγκεκριμένη περιοχή, διαθέτει αρκετά στοιχεία τα οποία απαιτούνται για την δημιουργία ενός ρεαλιστικού συστήματος αντλησιοταμίευσης. Το εξαντλημένο λιγνιτωρυχείο αποτέλεσε σημαντικό πλεονέκτημα, λόγω του ήδη διαμορφωμένου χώρου, καθώς μειώνει αρκετά τις ανάγκες για εκτεταμένες χωματουργικές επεμβάσεις και νέες τεχνικές υποδομές. Ακόμη, η βιομηχανική χρήση της περιοχής, προσφέρει ευνοϊκότερες συνθήκες χωροθέτησης, διότι το φυσικό περιβάλλον της περιοχής είναι ήδη διαταραγμένο. Η μορφολογία της περιοχής κρίθηκε κατάλληλη για αντλησιοταμιευτικό σύστημα, με την διαθέσιμη υψομετρική διαφορά των 114 μέτρων να συμβάλει στην αξιοποίηση σημαντικού ωφέλιμου όγκου νερού, διαμορφώνοντας ένα τεχνικά εφαρμόσιμο έργο. Ωστόσο, από την ανάλυση προέκυψε ότι οι γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος σε βάθος χρόνου. Οι υφιστάμενες υποδομές στην ευρύτερη περιοχή, όπως η οδική πρόσβαση και η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, περιορίζουν πρακτικές δυσκολίες, αλλά μειώνουν και το απαιτούμενο κόστος για την ανάπτυξη του έργου.

Το εξεταζόμενο σύστημα, από ενεργειακής πλευράς, εμφάνισε ικανοποιητικές επιδόσεις, ενισχύοντας την δυνατότητα αξιοποίησης του ως μονάδα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Χαρακτηριστικά όπως η εγκατεστημένη ισχύς των 165 MW και η ενεργειακή χωρητικότητα των 1,3 GWh, φανερώνουν, ότι το σύστημα είναι ικανό να συνεισφέρει στην εξισορρόπηση του ηλεκτρικού δικτύου και ιδιαίτερα σε περιόδους, όπου η μεταβλητότητα της παραγωγής των ΑΠΕ είναι υψηλή. Επιπλέον, οι οκτώ ώρες ως διάρκεια εκφόρτισης, προσφέρουν ικανοποιητική ευελιξία, καλύπτοντας τις ανάγκες που δημιουργούνται κατά τις ώρες αιχμής. Η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή των 435 GWh, σε συνδυασμό με την απόδοση κύκλου στο 85%, συμβάλει στην διαπίστωση ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να αξιοποιεί αποτελεσματικά την αποθηκευμένη ενέργεια, με λιγιστές απώλειες άντλησης και επαναπαραγωγής. Σημαντικό χαρακτηριστικό, για ένα ενεργειακό σύστημα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, όπου είναι αναγκαία η απορρόφηση και επαναδιάθεση ενέργειας σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Επομένως, η μελέτη περίπτωσης φανέρωσε ότι το εξεταζόμενο έργο εκτός από την αποθήκευση ενέργειας, δύναται να συμβάλει και στην σταθεροποίηση του συστήματος και στην ταχεία απόκριση του. Αξιοσημείωτα στοιχεία, τα οποία υποστηρίζουν την ενεργειακή μετάβαση, ιδίως περιοχών που διαφοροποιούνται από τις συμβατικές μορφές παραγωγής, σε πιο ενεργειακά καθαρές.

Όσον αφορά την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος, καταδεικνύεται ότι παρά το υψηλό αρχικό κόστος της επένδυσης, το έργο εμφανίζει οικονομική αποδοτικότητα, υπό τις συνθήκες του βασικού σεναρίου λειτουργίας. Το συνολικό κόστος κεφαλαίου υπολογίζεται περίπου στα 247,5 εκατομμύρια ευρώ, με το λειτουργικό κόστος να

βρίσκεται στα 6,2 εκατομμύρια ευρώ. Ενώ η επένδυση απαιτεί υψηλό κεφάλαιο, το Capex του συστήματος παραμένει ανταγωνιστικό για έργα τέτοιου μεγέθους, λόγω των περιορισμένων κατασκευαστικών απαιτήσεων, που προσφέρει η μεταλλευτική περιοχή. Σχετικά με τους κυριότερους οικονομικούς δείκτες που εξετάστηκαν, ο δείκτης του σταθμισμένου κόστους αποθήκευσης (LCOS) που υπολογίστηκε στα 48 €/MWh, τονίζει την ανταγωνιστική λειτουργία του συστήματος, σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης. Λαμβάνοντας υπόψη, την διάρκεια ζωής του έργου των 60 ετών, ο χρόνος αποπληρωμής των 12 ετών, θεωρείται αρκετά ικανοποιητικός για τέτοια έργα μεγάλης κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ανάλυση ευαισθησίας, συνεισέφερε ουσιαστικά στην αναγνώριση των κύριων παραγόντων που επιδρούν στην οικονομική ελκυστικότητα του έργου. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν, την διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας, την διαφορά των τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (spread) και σε μικρότερο βαθμό το αρχικό κόστος επένδυσης (Capex). Συνεπώς, η βιωσιμότητα της επένδυσης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες της αγοράς και από το επίπεδο αξιοποίησης της εγκατάστασης, κατά την διάρκεια της ζωής της. Παρά την ύπαρξη αβεβαιοτήτων, τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν, ότι η δημιουργία αντλησιοταμιευτικού συστήματος στην περιοχή του Χωρεμίου, αποτελεί μια ρεαλιστική και επενδυτικά ενδιαφέρουσα επιλογή, ιδιαίτερα υπό συνθήκες αύξησης της διείσδυσης των ΑΠΕ.

6.3 Αξιολόγηση των παραμέτρων βελτιστοποίησης

Βασικό στόχο της παρούσας εργασίας, αποτέλεσε η διερεύνηση των παραμέτρων που διαμορφώνουν την επιτυχία ενός έργου αντλησιοταμίευσης σε ένα εξαντλημένο ορυχείο. Με τον συνδυασμό της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης, της ανάλυσης ευαισθησίας, αλλά και της πολυκριτηριακής αξιολόγησης, προέκυψε ένα σύνολο αλληλεξαρτώμενων παραμέτρων, με διαφορετικές βαρύτητες η κάθε μια, οι οποίες επηρεάζουν την επιτυχία ενός συστήματος HPHS. Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης, ανέδειξαν την ευστάθεια των πρυνών ως τον σημαντικότερο παράγοντα για την ανάπτυξη ενός τέτοιου έργου. Υψηλή η σημασία αυτής, κυρίως για πρώην μεταλλευτικές περιοχές, όπου το ανάγλυφο έχει υποστεί ήδη παρεμβάσεις από την μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα. Για την ασφαλή λειτουργία τέτοιου συστήματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γεωτεχνική σταθερότητα των πρυνών, ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενες αστοχίες στη λειτουργία του συστήματος, αλλά και κατολισθητικά φαινόμενα. Λόγω αυτού, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, αλλά και η μηχανική συμπεριφορά του υπεδάφους, εξετάζονται από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Στην συνέχεια, ακολουθεί το υδατικό ισοζύγιο και η διαχείριση των υδάτινων πόρων, βασικό στοιχείο για την σταθερή λειτουργία του συστήματος. Η επάρκεια του νερού, η στεγανότητα των ταμιευτήρων και οι πιθανές απώλειες κυρίως λόγω διαρροών, επηρεάζουν σημαντικά τη μακροχρόνια απόδοση τέτοιου έργου. Σε περιοχές εξαντλημένων ορυχείων, παρατηρείται αυξημένη διαπερατότητα στο έδαφος, άρα η εξασφάλιση σταθερού υδατικού ισοζυγίου, καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμη. Σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρει η εξεταζόμενη περιοχή της Μεγαλόπολης, αποτελεί η ύπαρξη δύο γειτονικών ποταμών, προσφέροντας την δυνατότητα εκτροπής νερού στους ταμιευτήρες, σε περιόδους που το υδατικό ισοζύγιο κινδυνεύει να μειωθεί κάτω από τα απαιτούμενα όρια. Επομένως, η ορθή διαχείριση του νερού εκτός από

περιβαλλοντική παράμετρο, συνιστά και καθοριστικό παράγοντα για την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Ακόμη μια σημαντική παράμετρος είναι η υψομετρική διαφορά μεταξύ των άνω και κάτω ταμιευτήρα, η οποία επιδρά άμεσα στην ενεργειακή απόδοση και την αποθηκευτική ικανότητα του έργου. Με την αύξηση της υψομετρικής διαφοράς, παράγεται υψηλότερη ποσότητα ενέργειας, με μικρότερες απαιτήσεις αποθηκευμένου όγκου νερού, ενισχύοντας τη αποτελεσματικότητα του συστήματος. Στην εξεταζόμενη περιοχή, η διαθέσιμη υψομετρική διαφορά κρίθηκε επαρκής, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη ενός τεχνικά εφαρμόσιμου έργου. Εξίσου κρίσιμη παράμετρος, η οποία επιδρά κυρίως στη διάρκεια αποθήκευσης και τη λειτουργική ευελιξία του συστήματος, συγκροτεί η χωρητικότητα των ταμιευτήρων. Η αποθήκευση μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας, ενισχύει την δυνατότητα της εξισορρόπησης του ηλεκτρικού δικτύου, ειδικά σε συνθήκες αυξημένης μεταβλητότητας των ΑΠΕ. Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή, καθώς η υπερδιαστασιολόγηση, αυξάνει τις επενδυτικές απαιτήσεις, γεγονός που τονίζει την ανάγκη για ισορροπία ανάμεσα στην τεχνική και την οικονομική απόδοση. Παράλληλα, η απόδοση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και οι συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η διαφορά τιμών μεταξύ χαμηλής και υψηλής ζήτησης, παρατηρήθηκε ότι επιδρούν καθοριστικά στην οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση ευαισθησίας παρουσίασε ότι μεταβολές στο κόστος κεφαλαίου (Capex), στις ώρες λειτουργίας και στο ενεργειακό spread, διαφοροποιούν έντονα τους οικονομικούς δείκτες της επένδυσης, όπως τον χρόνο αποπληρωμής, τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR), αλλά και την Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ). Για την επιτυχή ανάπτυξη ενός έργου HPHS σε ένα εξαντλημένο ορυχείο, απαιτείται μια πολύπλευρη αξιολόγηση, με την διατήρηση της ιεράρχησης των παραπάνω παραμέτρων.

6.4 Συμβολή της έρευνας

Σε θεωρητικό επίπεδο, η συμβολή της παρούσας εργασίας αφορά την συστηματική αποτύπωση της διεθνούς βιβλιογραφίας, που σχετίζεται με τα συστήματα αντλησιοταμίευσης σε πρώην λιγνιτωρυχεία, ένα πεδίο υψηλού ερευνητικού ενδιαφέροντος, λόγω της ενεργειακής μετάβασης. Η συγκριτική αξιολόγηση των επιστημονικών αυτών μελετών, ανέδειξε τις τεχνολογικές δυνατότητες αυτών των συστημάτων, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η επαναχρησιμοποίηση των υποβαθμισμένων εκτάσεων, αλλά και τους περιορισμούς που προκύπτουν από τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες. Παράλληλα, η έρευνα συνεισέφερε στην αναγνώριση και ιεράρχηση των βασικών παραμέτρων βελτιστοποίησης, που επιδρούν στην επιτυχία ενός έργου HPHS, σε εξαντλημένο ορυχείο. Με αυτό τον τρόπο, η έρευνα δεν εστιάζει μόνο στην περιγραφή των επιμέρους τεχνικών χαρακτηριστικών, αλλά επιχειρεί να διαμορφώσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης για μελλοντικές εφαρμογές. Ο συνδυασμός όλων των τεχνικών ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα και αναφέρθηκαν παραπάνω, προσέφερε μια ολοκληρωμένη μέθοδο αξιολόγησης της βιωσιμότητας τέτοιων έργων, ενισχύοντας την εξέταση διαφορετικών σεναρίων και παραμέτρων και συμβάλλοντας στην πληρέστερη κατανόηση των συνθηκών που επιτρέπουν σε ένα έργο HPHS, να καταστεί τεχνικά εφαρμόσιμο και οικονομικά αποδοτικό.

Όσον αφορά το πρακτικό επίπεδο, η σημαντικότερη συνεισφορά της εργασίας, αφορά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας, στην περιοχή της Μεγαλόπολης και πιο συγκεκριμένα στο εξαντλημένο ορυχείο του Χωρεμίου. Αυτή η μελέτη περίπτωσης, επέτρεψε την διερεύνηση της τεχνικής καταλληλότητας της περιοχής, της ενεργειακής δυναμικής του προτεινόμενου συστήματος, αλλά και των οικονομικών προοπτικών του, υπό πραγματικές λειτουργικές συνθήκες. Ακόμη, τα αποτελέσματα της έρευνας, παρέχουν σημαντικά στοιχεία για τον ενεργειακό σχεδιασμό, προσφέροντας ένα ενδεικτικό πλαίσιο αξιολόγησης, για τον καθορισμό κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης τέτοιων έργων αντλησιοταμίευσης. Οι ιεραρχημένες παράμετροι βελτιστοποίησης, δύναται να αξιοποιηθούν από φορείς, επενδυτές και δημόσιους οργανισμούς, με στόχο την μείωση της επενδυτικής αβεβαιότητας και την βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

6.5 Περιορισμοί της έρευνας

Παρά τα χρήσιμα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την έρευνα, ουσιώδη είναι και η αναφορά των κύριων περιορισμών, οι οποίοι σχετίζονται τόσο με την διαθεσιμότητα των δεδομένων, όσο και με παραδοχές που απαιτήθηκαν ώστε να αναπτυχθεί η μεθοδολογία και η μελέτη περίπτωσης. Η αναγνώριση των περιορισμών αυτών, δεν μειώνει την σημασία των αποτελεσμάτων, αλλά βοηθά στην ορθότερη ερμηνεία τους και στην κατανόηση των ορίων της εφαρμογής τους. Ένας αρχικός περιορισμός, αφορά την χρήση δευτερογενών δεδομένων με στόχο τον προσδιορισμό κάποιων τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων του συστήματος. Για την εκτίμηση βασικών μεγεθών, όπως το Capex, το Opex, τις αποδόσεις εξοπλισμού και τα πιθανά έσοδα του έργου, χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές πηγές, διεθνείς μελέτες και δεδομένα αγοράς, τα οποία προσαρμόστηκαν στην μελέτη περίπτωσης της Μεγαλόπολης. Παρότι η προσέγγιση αυτή αποτελεί σύνηθες παράδειγμα για τεχνοοικονομικές αξιολογήσεις πρώιμου σταδίου, ενέχεται ο κίνδυνος να μην αποτυπώνονται πλήρως οι ιδιαιτερότητες του συστήματος, οι οποίες θα αξιολογούνταν πιο λεπτομερώς, με μια αναλυτική τεχνική μελέτη εφαρμογής. Εξίσου σημαντικός περιορισμός αφορά η απουσία αναλυτικής γεωτεχνικής και υδρογεωλογικής διερεύνησης της εξεταζόμενης περιοχής. Παρότι η έρευνα έλαβε υπόψη της την ευστάθεια πρανών, τη στεγανότητα του υπεδάφους και το υδατικό ισοζύγιο, η αξιολόγηση αυτών βασίστηκε κυρίως σε βιβλιογραφικά και θεωρητικά δεδομένα και όχι σε επιτόπιες γεωτεχνικές έρευνες, γεωτρήσεις κλπ. Επομένως, η τελική τεχνική αξιολόγηση της καταλληλότητας της περιοχής απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση σε επίπεδο λεπτομερούς σχεδιασμού.

Για την οικονομική αξιολόγηση του έργου, χρησιμοποιήθηκαν παραδοχές για τις μελλοντικές συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, χαρακτηριστικό που προσδίδει αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Η διαφορά ανάμεσα στις τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και ο βαθμός διείσδυσης των ΑΠΕ, αποτελούν μεταβλητές που διαμορφώνονται από κανονιστικές παρεμβάσεις, τεχνολογικές εξελίξεις και από τη συνολική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος. Για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιήθηκαν η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση σεναρίων, ώστε να περιοριστεί αυτή η αβεβαιότητα, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης των μελλοντικών συνθηκών αγοράς.

Τέλος, η παρούσα εργασία, εξέτασε μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, αυτή του Χωρεμίου στη Μεγαλόπολη, περιορίζοντας έτσι την δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε όλα τα εξαντλημένα ορυχεία. Κάθε περιοχή διαθέτει διαφορετικά γεωμορφολογικά, υδρολογικά και τεχνικά χαρακτηριστικά που επιδρούν στην ανάπτυξη τέτοιων έργων αντλησιοταμίευσης. Τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης θα πρέπει να ερμηνεύονται κυρίως ως πλαίσιο αξιολόγησης και όχι ως εφαρμόσιμο μοντέλο για κάθε μεταλλευτική περιοχή. Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η εφαρμογή συνδυασμένων μεθόδων αξιολόγησης επέτρεψε την ανάπτυξη επαρκώς τεκμηριωμένης εκτίμησης της σκοπιμότητας του έργου, προσφέροντας μια αξιόπιστη βάση για περαιτέρω έρευνα.

6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Δεδομένης της πολυπλοκότητας τέτοιων έργων, αλλά και της αλληλεπίδρασης τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων, ουσιαστική μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει σε πιο εξειδικευμένες αναλύσεις, ενισχύοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και ωθώντας στη μετάβαση από την προκαταρκτική αξιολόγηση στον πιο λεπτομερή σχεδιασμό. Όσον αφορά την τεχνική έρευνα, ένα βασικό πεδίο αφορά την ανάπτυξη αναλυτικότερων υδρογεωτεχνικών μοντέλων σε τέτοιες περιοχές μελέτης. Για την περίπτωση της Μεγαλόπολης, η περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών θα μπορούσε να δημιουργήσει σαφέστερη εικόνα ως προς την μακροχρόνια ασφάλεια του έργου. Τέτοια παραδείγματα δράσεων που συνεισφέρουν στη μείωση της αβεβαιότητας των προκαταρκτικών μελετών, αφορούν τις γεωτρήσεις και γεωτεχνικές δοκιμές. Ακόμη, ενδιαφέρουσα πρόταση έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη δυναμικών προσομοιώσεων λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η αλληλεπίδραση του συστήματος αντλησιοταμίευσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο πραγματικός λειτουργικός ρόλος τέτοιων εγκαταστάσεων θα μπορούσε να αποτυπωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, μέσω της διερεύνησης διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης και εκφόρτισης, σε συνάρτηση με τη μεταβλητότητα των ΑΠΕ και τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιοποίηση ψηφιακών μοντέλων, ώστε να παρακολουθείται και να βελτιώνεται η λειτουργία των συστημάτων. Αυτά τα μοντέλα θα ενσωματώνουν δεδομένα λειτουργίας, υδρολογικές μεταβολές και συνθήκες αγοράς, βελτιώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα, προβλέποντας πιθανές αστοχίες και μειώνοντας τον λειτουργικό κίνδυνο.

Σε οικονομικό επίπεδο, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εστιάσουν στην ανάπτυξη πιο σύνθετων σεναρίων αγοράς, με διαφορετική εξέλιξη των τιμών, των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ και μεταβολές στο θεσμικό πλαίσιο. Υψηλό ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση πιθανών μηχανισμών χρηματοδότησης, όπως επιδοτήσεις, ευρωπαϊκά προγράμματα και μηχανισμοί αποζημίωσης για υπηρεσίες εξισορρόπησης δικτύου. Η ένταξη τέτοιων παραμέτρων στην οικονομική ανάλυση επιδρά ουσιαστικά στους δείκτες βιωσιμότητας και στην επενδυτική ελκυστικότητα τέτοιων έργων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες πρώην λιγνιτικές περιοχές επιφανειακών ορυχείων, με αντίστοιχα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Επομένως, η επέκταση της παρούσας μεθοδολογίας σε περισσότερες περιοχές, αλλά και η συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων θα μπορούσε να συνεισφέρει καθοριστικά στη διερεύνηση ένταξης τέτοιων συστημάτων στον μακροπρόθεσμο ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας.

Η μετάβαση των μεταλιγνιτικών περιοχών σε ένα νέο ενεργειακό πρότυπο αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση των εξαντλημένων επιφανειακών ορυχείων με στόχο την ανάπτυξη συστημάτων αντλησιοταμίευσης διακρίνεται ως μια προσέγγιση στην οποία συνδυάζεται η περιβαλλοντική αποκατάσταση, η ενεργειακή ευελιξία και η επαναχρησιμοποίηση εκτάσεων στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης.

7. Βιβλιογραφία

- Bhimaraju, A., Mahesh, A., & Nirbheram, J. S. (2023). Feasibility study of solar photovoltaic/grid-connected hybrid renewable energy system with pumped storage hydropower system using abandoned open cast coal mine: A case study in India. *Journal of Energy Storage*, 72(July). <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108206>
- Caralis, G., Papantonis, D., & Zervos, A. (2012). The role of pumped storage systems towards the large scale wind integration in the Greek power supply system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2558–2565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.068>
- Deane, J. P., Ó Gallachóir, B. P., & McKeogh, E. J. (2010). Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1293–1302. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.015>
- Gallo, A. B., Simões-Moreira, J. R., Costa, H. K. M., Santos, M. M., & Moutinho dos Santos, E. (2016). Energy storage in the energy transition context: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 800–822. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>
- Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., Muntean, S., Novara, D., Pérez-Díaz, J. I., Quaranta, E., Schild, P., & Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113(June), 109257. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109257>
- Krassakis, P., Karavias, A., Zygouri, E., Roumpos, C., Louloudis, G., Pyrgaki, K., Koukouzas, N., Kempka, T., & Karapanos, D. (2023). GIS-Based Assessment of Hybrid Pumped Hydro Storage as a Potential Solution for the Clean Energy Transition: The Case of the Kardias Lignite Mine, Western Greece. *Sensors*, 23(2). <https://doi.org/10.3390/s23020593>
- Krassakis, P., Pyrgaki, K., Gemeni, V., Roumpos, C., Louloudis, G., & Koukouzas, N. (2022). GIS-Based Subsurface Analysis and 3D Geological Modeling as a Tool for Combined Conventional Mining and In-Situ Coal

- Conversion: The Case of Kardias Lignite Mine, Western Greece. *Mining*, 2(2), 297–314. <https://doi.org/10.3390/mining2020016>
- Kruczek, M., Markowska, M., Servou, A., Roumpos, C., Mertiri, E., Ernst, P., Darmos, J., & Kempka, T. (2025). Navigating Socio-Technical Challenges in Energy Efficiency: Case Studies on Hybrid Pumped-Hydropower Storage in Poland and Greece. *Energies*, 18(3). <https://doi.org/10.3390/en18030599>
 - Liu, F., Yang, K., Yang, T., Gao, Y., Li, J., Liu, Q., & Fu, Q. (2022). Pumped storage hydropower in an abandoned open-pit coal mine: Slope stability analysis under different water levels. *Frontiers in Earth Science*, 10(September), 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.941119>
 - Louloudis, G., Roumpos, C., Louloudis, E., Mertiri, E., & Kasfikis, G. (2022). Repurposing of a Closed Surface Coal Mine with Respect to Pit Lake Development. *Water (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/w14213558>
 - Lyu, X., Zhang, T., Yuan, L., Yang, K., Fang, J., Li, S., & Liu, S. (2022). Pumped Storage Hydropower in Abandoned Mine Shafts: Key Concerns and Research Directions. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142316012>
 - Martínez-López, S., Martínez-Sánchez, M. J., & Pérez-Sirvent, C. (2021). Do old mining areas represent an environmental problem and health risk? A critical discussion through a particular case. *Minerals*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/min11060594>
 - Papadakis N., Fafalakis M., & Katsaprakakis, D. (2023). A Review of Pumped Hydro Storage Systems. *Energies*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/en16114516>
 - Otto, C., Louloudis, G., Roumpos, C., Mertiri, E., Ernst, P., & Kempka, T. (2026). Economic feasibility of Pumped Hydropower Storage in a European open-pit lignite mine. *Energy Conversion and Management*, 347(July 2025), 120491. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120491>
 - Schnepfer, T., Kapusta, K., Strugała-Wilczek, A., Roumpos, C., Louloudis, G., Mertiri, E., Pyrgaki, K., Darmos, J., Orkisz, D., Najgebauer, D., Kowalczyk, D., & Kempka, T. (2025). Potential hydrochemical impacts of pumped hydropower storage operation in two European coal regions in transition: the Szczerców-Belchatów mining complex, Poland, and the Kardias

Mine, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 84(9).

<https://doi.org/10.1007/s12665-025-12198-0>

- Strugała-Wilczek, A., Basa, W., Bzowski, Z., Kempka, T., Schnepfer, T., Pyrgaki, K., Roumpos, C., Louloudis, G., Orkisz, D., Najgebauer, D., Kowalczyk, D., & Kapusta, K. (2025). Hydrogeochemical effects of pumped hydropower storage operation in open-pit lignite mines in Greece and Poland. *Journal of Cleaner Production*, 501(August 2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145286>