



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Υπολογιστικό πλαίσιο τεχνικο-οικονομικής αξιολόγησης έργων
αντλησιοταμίευσης υπό το πρίσμα της αγοράς επόμενης ημέρας
Computational framework for the technical and financial assessment of pumped
hydropower storage systems under the day-ahead market prism

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΑΜΑΓΚΑΚΙ

Επιβλέπων καθηγητής : Ανδρέας Ευστρατιάδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2026

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δική μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

*Στην μητέρα και τον πατέρα μου,
και στη μνήμη της αγαπημένης μου θείας.*



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξανόμενη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα ενισχύει την ανάγκη για μεγάλης κλίμακας τεχνολογίες αποθήκευσης, ικανές να προσφέρουν ευελιξία, αξιοπιστία και οικονομική αξία. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο ώριμη και ευρέως χρησιμοποιούμενη επιλογή αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πλαίσιο για την τεχνοοικονομική αξιολόγηση έργων αντλησιοταμίευσης, εστιασμένο στην λειτουργία του ενεργειακού αρμπιτράζ στην Αγορά Επόμενης Ημέρας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδυάζει υδραυλικές προσομοιώσεις που λαμβάνουν υπόψη γεωμετρικούς και λειτουργικούς περιορισμούς, με αναλυτικές εκτιμήσεις κόστους, ενώ ο προσδιορισμός των εσόδων βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα της Αγοράς Επόμενης Ημέρας. Ως πιλοτική εφαρμογή, αξιολογείται το έργο αντλησιοταμίευσης που θα αξιοποιεί ως κάτω δεξαμενή τον υφιστάμενο ταμιευτήρα της Σφηκιάς (αναφέρεται ως αντλησιοταμιευτικό έργο Μπράβας), για μια σειρά εναλλακτικών λειτουργικών σεναρίων, μέσω συστηματικής διερεύνησης συνδυασμών της εγκατεστημένης ισχύος και της διάρκειας άντλησης/παραγωγής, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την τεχνική εφικτότητα και την οικονομική ελκυστικότητα του έργου. Η οικονομική αξιολόγηση βασίζεται σε καθιερωμένα κριτήρια βιωσιμότητας επενδύσεων, και συγκεκριμένα στην Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (ΕΒΑ) και τις σωρευτικές ταμειακές ροές, ενώ εφαρμόζεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς κρίσιμες γεωμετρικές παραμέτρους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντλησιοταμίευση καθίσταται οικονομικά βιώσιμη όταν οι ενδοημερήσιες διακυμάνσεις των τιμών είναι επαρκώς μεγάλες, ώστε να εξασφαλίζουν ουσιαστική διαφορά μεταξύ των φάσεων άντλησης και παραγωγής, και όχι λόγω του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου εισροών ή εκροών του συστήματος. Το αναπτυγμένο υπολογιστικό εργαλείο αποτελεί μια διαφανή και προσαρμόσιμη προσέγγιση προ-αξιολόγησης για την προκαταρκτική εκτίμηση έργων αντλησιοταμίευσης, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη βέλτιστη γεωμετρική και λειτουργική διαμόρφωση υπό συνθήκες λειτουργίας της αγοράς.

ABSTRACT

The increasing penetration of Renewable Energy Sources into the electricity system intensifies the need for large-scale energy storage technologies capable of providing flexibility, reliability, and economic value. Pumped storage constitutes the most mature and widely used large-scale energy storage option. The present study introduces a comprehensive computational framework for the techno-economic evaluation of pumped storage projects, focused on the operation of energy arbitrage in the Day-Ahead Market.

The proposed methodology combines hydraulic simulations that account for geometric and operational constraints with analytical cost assessments, while revenue estimation is based on historical data from the Day-Ahead Market. As a pilot application, the pumped storage project that will utilize as lower tank the existing reservoir at Sfikia (it is referred to as Mprava pumped-storage system) is evaluated for a series of alternative operational scenarios, through a systematic investigation of combinations of installed capacity and pumping/generation duration, with the aim of drawing conclusions regarding the technical feasibility and economic attractiveness of the project. The economic evaluation is based on established investment viability criteria, namely Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), cumulative cash flows, while a sensitivity analysis is also applied with respect to critical geometric parameters.

The results indicate that pumped storage becomes economically viable when intra-day price fluctuations are large enough to ensure a substantial difference between the pumping and generation phases, rather than on the basis of the total energy inflow or outflow balance of the system. The developed computational tool constitutes a transparent and adaptable pre-screening approach for the preliminary assessment of pumped storage projects, providing valuable information regarding the optimal geometric and operational configuration under market operating conditions.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	3
2.1	Εισαγωγή στο σύστημα αντλησιοταμίευσης.....	3
2.2	Λειτουργική αρχή και ενεργειακό ισοζύγιο	4
2.3	Δομικά στοιχεία συστημάτων αντλησιοταμίευσης	4
2.3.1	Άνω ταμιευτήρας.....	4
2.3.2	Κάτω ταμιευτήρας.....	5
2.3.3	Σήραγγες/Αγωγοί Πίεσης	5
2.3.4	Σταθμός παραγωγής – στροβιλοαντλητικά συγκροτήματα.....	5
2.3.5	Υδροληψίες, υπερχειλιστές και βοηθητικά έργα.....	5
2.4	Τεχνικές παράμετροι και υδραυλικοί υπολογισμοί	5
2.5	Τύποι συστημάτων αντλησιοταμίευσης	6
2.5.1	Συστήματα φυσικών ταμιευτήρων	6
2.5.2	Συστήματα κλειστού κυκλώματος (closed-loop PSP)	7
2.5.3	Συστήματα ταμιευτήρων σε σειρά	7
2.5.4	Υβριδικά συστήματα με ΑΠΕ	9
2.5.5	Συστήματα πολλαπλών ταμιευτήρων.....	10
2.5.6	Θαλάσσια αντλησιοταμίευση.....	10
2.6	Ενεργειακός και λειτουργικός ρόλος στο ηλεκτρικό δίκτυο	11
2.7	Περιορισμοί και μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης	12
2.8	Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	13
3	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ	15
3.1	Σκοπός και πεδίο εφαρμογής της υδραυλικής ανάλυσης.....	15
3.2	Δεδομένα και Κύριες Παραδοχές.....	15
3.3	Ύψος πτώσης	15
3.4	Υδραυλικές απώλειες	16
3.4.1	Απώλειες τριβών	16
3.4.2	Τοπικές απώλειες.....	16
3.5	Σχέση παροχής, ισχύος και ενέργειας	17
3.6	Προσέγγιση λειτουργίας ταμιευτήρα	17
3.7	Αποδόσεις και σταθερές παράμετροι	17
3.8	Περιορισμοί και απλοποιήσεις.....	18

4	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	19
4.1	Σκοπός και ρόλος της οικονομικής ανάλυσης.....	19
4.2	Οικονομικό πλαίσιο λειτουργίας.....	19
4.3	Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας και Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM)	20
4.4	Εκτίμηση επενδυτικού κόστους (CAPEX).....	21
4.5	Εκτίμηση κόστους λειτουργίας και συντήρησης (OPEX)	21
4.6	Έσοδα συστήματος.....	21
4.7	Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης	22
4.8	Οικονομικές παραδοχές και περιορισμοί	22
5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	24
5.1	Γενική περιγραφή υπολογιστικής προσέγγισης	24
5.2	Δομή και ροή υπολογιστικού μοντέλου	24
5.3	Ορίσματα εισόδου και ορισμός παραμέτρων μοντέλου.....	25
5.3.1	Τεχνικές και λειτουργικές παράμετροι έργου	25
5.3.2	Δεδομένα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (DAM)	25
5.4	Υδραυλικοί υπολογισμοί (<i>compute_trapump()</i>).....	26
5.4.1	Γεωμετρία και μήκη αγωγών	26
5.4.2	Υπολογισμός συντελεστή τριβών (Swamee–Jain).....	26
5.4.3	Απώλειες φορτίου για δεδομένη παροχή (Q).....	27
5.4.4	Πραγματικό μανομετρικό ύψος σε παραγωγή και άντληση.....	28
5.4.5	Σύνδεση ισχύος–παροχής και αριθμητική επίλυση.....	28
5.5	Προσδιορισμός γεωμετρικών μεγεθών φράγματος βάσει του ρυθμιστικού όγκου (<i>compute_dam()</i>).....	29
5.5.1	Μετατροπή όγκου σε στάθμη μέσω καμπύλης στάθμης–όγκου	29
5.5.2	Υπολογισμός κατώτατης-ανώτατης στάθμης λειτουργίας και στάθμης στέψης 29	
5.5.3	Γεωμετρικά μεγέθη φράγματος.....	30
5.6	Υπολογισμός εσόδων από την Αγορά Επόμενης Ημέρας	31
5.6.1	Σενάρια 1–2: 24ωρη και 48ωρη ευελιξία με ταξινομημένες τιμές	31
5.6.2	Σενάριο 3: Ημερήσια λειτουργία με διαδοχικά ωριαία “blocks”	31
5.7	Εκτίμηση συνολικού κόστους επένδυσης και λειτουργίας (<i>compute_total_cost()</i>).....	32
5.8	Οικονομική αξιολόγηση και δείκτες απόδοσης (<i>evaluate_psp()</i>).....	34
5.9	Βασικές συναρτήσεις εκτέλεσης και οργάνωσης (<i>master scripts</i>).....	35
6	ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	36

6.1	Εισαγωγή και πλαίσιο ανάλυσης αποτελεσμάτων	36
6.2	Συνοπτική περιγραφή περιοχής μελέτης έργου αναφοράς.....	36
6.3	Συγκεντρωτικά αριθμητικά δεδομένα παραμέτρων εισόδου	37
6.4	Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης.....	40
6.4.1	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σεναρίου 24ωρης λειτουργίας.....	40
6.4.2	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σεναρίου 48ωρης λειτουργία.....	43
6.4.3	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για σενάριο 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες.....	45
6.5	Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων λειτουργικών σεναρίων.....	47
6.6	Ανάλυση ευαισθησίας	49
6.6.1	Οριζόντια απόσταση (παράμετρος horiz.dist).....	50
6.6.2	Κατακόρυφη απόσταση (παράμετρος zlower)	51
6.6.3	Διάμετροι αγωγών (μεταβλητές σχεδιασμού D1 και D2).....	52
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	55
7.1	Σύνοψη εργασίας.....	55
7.2	Παραδοχές και περιορισμοί	56
7.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	57
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ / ΑΝΑΦΟΡΕΣ	59

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σύγχρονες κοινωνίες χαρακτηρίζονται από μια αδιάκοπη ανάγκη για ενέργεια, η οποία στηρίζει κάθε πτυχή της ζωής μας. Παράλληλα, ο κόσμος, σχεδόν σύσσωμος, μεταβαίνει σε πιο πράσινες μορφές παραγωγής ενέργειας στοχεύοντας, μεταξύ άλλων, τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος όσο και στην ανεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ένα από τα μεγαλύτερα στοιχεία των ανανεώσιμων πηγών, ιδίως της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, είναι η αποθήκευση, ώστε να μεγιστοποιείται η αξιοποίησή τους και η συνολική τους απόδοση. Μέσα σε αυτό το εξελισσόμενο ενεργειακό τοπίο, η αντλησιοταμίευση καθίσταται απαραίτητη, καθώς ρυθμίζει και εξομαλύνει τις διακυμάνσεις του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, με ελάχιστο περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Τα αντλησιοταμιευτικά συστήματα είναι εκ φύσεως πολυπαραγοντικά, γεγονός που καθιστά σπάνια την ύπαρξη δύο έργων με υψηλό βαθμό ομοιότητας. Αυτό, ωστόσο, δεν θα έπρεπε να αποτρέπει την προσπάθεια δημιουργίας μιας κοινής μεθοδολογίας αξιολόγησης των συστημάτων αυτών. Η αξιολόγηση απαιτεί ολοκληρωμένη ανάλυση τόσο των υδραυλικών χαρακτηριστικών (απώλειες κατά την άντληση και την παραγωγή, απαιτούμενος ρυθμιστικός όγκος ταμιευτήρα κ.ά.), όσο και των οικονομικών παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από τις ημερήσιες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή των κατάλληλων ωραρίων λειτουργίας και της ισχύος του συστήματος αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα μιας τόσο μεγάλης επένδυσης.

Στο πλαίσιο αυτό, ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό, την προσομοίωση και την οικονομική αξιολόγηση ενός τυποποιημένου έργου αντλησιοταμίευσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύνολο υπολογιστικών εργαλείων στη γλώσσα προγραμματισμού R, το οποίο ενσωματώνει υδραυλικούς και οικονομικούς υπολογισμούς, ανάλυση τριών διαφορετικών προφίλ τιμών αγοράς και, με στόχο τη μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης, αναζητά τον βέλτιστο συνδυασμό ισχύος και ωραρίων λειτουργίας για κάθε προφίλ. Τέλος, για την παραγωγή αποτελεσμάτων σε κάθε στάδιο, χρησιμοποιείται ως βάση μελέτης το έργο αντλησιοταμίευσης στη θέση «Ταμιευτήρας ΥΗΣ Σφηκιάς (Μπράβας)».

Για την απλούστευση της ανάλυσης, η παρούσα εργασία υιοθετεί ορισμένες παραδοχές και περιορισμούς. Αρχικά, θεωρείται ότι ο κάτω ταμιευτήρας διαθέτει πρακτικά απεριόριστη χωρητικότητα, ώστε να μην περιορίζεται η άντληση ή η παραγωγή από τη μεταβολή της στάθμης του. Επιπλέον, οι υδρολογικές εισροές στον άνω ταμιευτήρα αγνοούνται, καθώς η επίδρασή τους στη συνολική υδρολογική ισορροπία του συστήματος θεωρείται μικρή σε σχέση με τα μεγέθη που εξετάζονται. Τέλος, η μελέτη δεν εξετάζει ζητήματα περιβαλλοντικών περιορισμών, αδειοδοτήσεων ή γεωτεχνικών ιδιαιτεροτήτων, εστιάζοντας αποκλειστικά στη λειτουργική, υδραυλική και οικονομική αξιολόγηση του συστήματος.

Η εργασία οργανώνεται ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της αντλησιοταμίευσης.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναπτύσσεται το υδραυλικό υπόβαθρο της μελέτης, μαζί με τις βασικές παραδοχές και απλοποιήσεις.

Στο **Κεφάλαιο 4** διαμορφώνεται το οικονομικό υπόβαθρο της ανάλυσης και παρουσιάζονται οι κύριες οικονομικές παράμετροι και δείκτες αξιολόγησης.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται η υπολογιστική μεθοδολογία και η υλοποίησή της στη γλώσσα R.

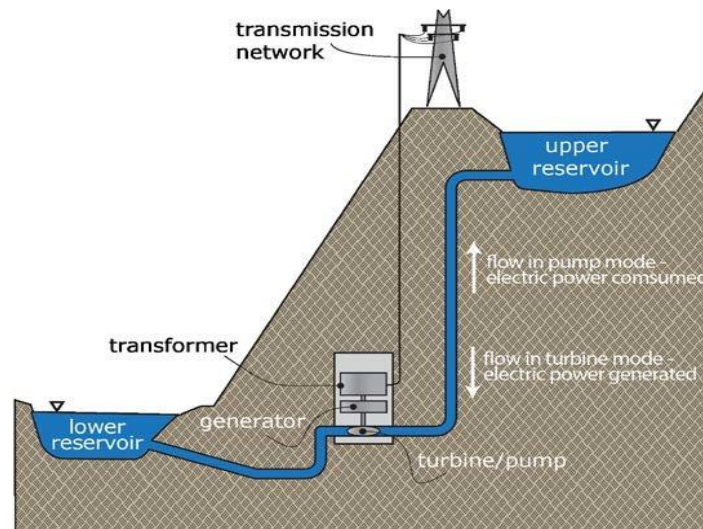
Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των εξεταζόμενων σεναρίων.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγή στο σύστημα αντλησιοταμίευσης

Η αντλησιοταμίευση (Pumped Storage Hydroelectricity – PSH ή και Pumped Hydroelectric Energy Storage- PHES) είναι ένας τύπος αποθήκευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από δύο ταμιευτήρες νερού σε διαφορετικά υψόμετρα, οι οποίοι μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καθώς το νερό μεταφέρεται από τον άνω στον κάτω (εκφόρτιση), περνώντας μέσα από υδροστρόβιλο. Το σύστημα απαιτεί επίσης ενέργεια για να αντλήσει το νερό πίσω στον άνω ταμιευτήρα (επαναφόρτιση). Η αντλησιοταμίευση λειτουργεί ουσιαστικά σαν μια γιγαντιαία «μπαταρία», επειδή μπορεί να αποθηκεύει ενέργεια και να την απελευθερώνει όταν χρειάζεται (*U.S. Department of Energy, n.d.*). Στην εικόνα 1 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης.



Εικόνα 2.1 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αντλησιοταμίευσης. Πηγή: Viadero et al. (2017)

Η αντλησιοταμίευση δεν είναι μια καινούργια τεχνολογία. Αντιθέτως, το πρώτο έργο αντλησιοταμιευτικής τεχνολογίας συναντάται στο Schaffhausen της Ελβετίας, του οποίου το έτος λειτουργίας χρονολογείται στο 1907. Μάλιστα, το συγκεκριμένο έργο βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία μετά από έργα συντήρησης και αναβάθμισης, δείχνοντας την μακροβιότητα τέτοιων έργων. Από τότε, η τεχνολογία αυτή έχει εξαπλωθεί παγκοσμίως, με τους σταθμούς αντλησιοταμίευσης σε λειτουργία ή σε κατασκευή που ξεπερνάνε το 1 GW εγκατεστημένης ισχύς ήδη να ξεπερνάνε τους 200 (συγκεκριμένα, ανέρχονται σε 211).

Σήμερα, η αντλησιοταμίευση μπορεί να θεωρηθεί ως η σημαντικότερη και τεχνικά ωριμότερη μέθοδος μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας. Λειτουργεί απορροφώντας την πλεονάζουσα (ή απορριπτέα) παραγωγή από ΑΠΕ και επαναδιοχετεύοντας την στο σύστημα σε ώρες υψηλής ζήτησης. Η παρουσία ενός τέτοιου «ενεργειακού εξομαλυντή», μεγάλης χωρητικότητας και μακροχρόνιας αξιοπιστίας, κρίνεται αναγκαία σε ένα ενεργειακό σύστημα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, χαρακτηριστικά των οποίων είναι η στοχαστικότητα και οι έντονες

διακυμάνσεις. Επομένως, η ένταξη των σταθμών αντλησιοταμίευσης θα μπορούσε να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της αγοράς και να διευκολύνει την ενσωμάτωση των σταθμών ανανεώσιμης ενέργειας με τη βέλτιστη διαχείριση της μεταβλητότητάς τους όχι μόνο σε καθημερινή αλλά και σε εποχιακή βάση (Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, 2022).

2.2 Λειτουργική αρχή και ενεργειακό ισοζύγιο

Η λειτουργία της αντλησιοταμίευσης βασίζεται στην μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική (δίκτυο) σε υδραυλική (άντληση) και στην συνέχεια πάλι σε ηλεκτρική (παραγωγή), μέσω ενός κυκλικού μηχανισμού δύο δεξαμενών σε μεγάλη υψομετρική διαφορά. Κατά την άντληση, το σύστημα χρησιμοποιεί την ενέργεια του δικτύου ώστε να ανυψώσει νερό από τον κάτω προς τον άνω ταμιευτήρα, ενώ αντίστροφη είναι η φάση παραγωγής, κατά την οποία το νερό ακολουθεί την αντίστροφη πορεία και μέσω ενός υδροστροβίλου παρέχει ενέργεια στο δίκτυο. Προφανώς, αν λογικώς αμελήσουμε τις όποιες υδρολογικές εισροές του άνω ταμιευτήρα, κατά την διαδρομή του νερού καταναλώνεται πάντα περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι παράγεται και για αυτό η αντλησιοταμίευση θεωρείται μέθοδος αποθήκευσης και όχι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Βασική εξίσωση για την λειτουργία του συστήματος είναι η (2.1), η οποία εκφράζει την παραγόμενη ισχύ:

$$P = \rho g Q H \eta \quad (2.1)$$

όπου $\rho g = \gamma$ είναι το ειδικό βάρος του νερού ($\gamma = 9.81 \text{ kN/m}^3$), Q η παροχή του συστήματος, H το καθαρό ύψος πτώσης, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες τριβών, ενώ το η εκφράζει την απόδοση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (κυρίως αφορά στις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στους στροβίλους, και δευτερευόντως στα άλλα τμήματα όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές, κτλ.). Αντίστοιχα, για την φάση άντλησης χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση, εισάγοντας το μανομετρικό ύψος και την παροχή για την αντίστροφη διαδρομή, και θέτοντας στον παρονομαστή τον συντελεστή απόδοσης του συστήματος άντλησης.

Στο ενεργειακό ισοζύγιο μεγάλο ρόλο παίζουν οι αποδόσεις των επιμέρους συστημάτων, όπως του στροβίλου, της αντλίας και των ηλεκτρολογικών συστημάτων, αλλά και η γεωμετρία και λοιπά χαρακτηριστικά του αγωγού προσαγωγής. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός κύκλου, που προκύπτει ως γινόμενο των επιμέρους αποδόσεων, κυμαίνεται μεταξύ 70-85% για σύγχρονα τέτοια έργα. Όπως θα δούμε στην συνέχεια, το ποσοστό αυτό επαρκεί ώστε τέτοιου μεγέθους έργα να λειτουργούν βιώσιμα.

2.3 Δομικά στοιχεία συστημάτων αντλησιοταμίευσης

Ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από δυο ταμιευτήρες, αγωγούς μεταφοράς νερού και έναν σταθμό παραγωγής και άντλησης. Παρακάτω εξετάζεται κάθε δομικό στοιχείο ξεχωριστά.

2.3.1 Άνω ταμιευτήρας

Ο άνω ταμιευτήρας (upper reservoir) είναι ουσιαστικά το έργο αποθήκευσης της δυναμικής ενέργειας σε μορφή νερού. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και τιμής ενέργειας, νερό αντλείται από το κάτω ταμιευτήρα προς αυτόν, έως ώστε να πληρωθεί ο ωφέλιμος όγκος του. Κατά κανόνα, στα σύγχρονα έργα αντλησιοταμίευσης ο άνω ταμιευτήρας είναι τεχνητός (διαμορφώνεται μέσω φραγμάτων) και μικρότερος σε έκταση και χωρητικότητα του κάτω.

Βασικό χαρακτηριστικό μέγεθός του είναι ο ωφέλιμος όγκος αποθήκευσης, που καθορίζει, μαζί με άλλα μεγέθη, την «ενεργειακή χωρητικότητα» του συστήματος. Ο τελευταίος καθορίζεται από την άνω (ΑΣΛ), την κάτω στάθμη λειτουργίας (ΚΣΛ) του και την καμπύλη στάθμη-όγκου του ταμιευτήρα.

2.3.2 Κάτω ταμιευτήρας

Ο κάτω ταμιευτήρας (lower reservoir) είναι υπεύθυνος για την παροχή νερού στον άνω ταμιευτήρα κατά την άντληση και για την υποδοχή του νερού στην φάση παραγωγής. Συχνά έχει πολλαπλές χρήσεις πέραν της αντλησιοταμίευσης (άρδευση, ύδρευση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά.). Καίριο για την λειτουργία του συστήματος είναι η διακύμανση της στάθμης του σε κάθε κύκλο (round trip) να είναι ήπια και να μην υπολείπεται της ελάχιστης στάθμης, κάτω από την οποία εμφανίζονται προβλήματα κατά την άντληση (π.χ., λόγω σπηλαιώσης).

2.3.3 Σήραγγες/Αγωγοί Πίεσης

Οι αγωγοί πίεσης είναι το μέσο μεταφοράς του νερού – και έμμεσα της ενέργειας – ανάμεσα στους δύο ταμιευτήρες. Για οικονομικούς και κατασκευαστικούς λόγους (π.χ. ανάγκη αγκυρώσεων αγωγών πολύ μεγάλης διαμέτρου σε απότομες κλίσεις), για τη μείωση των απωλειών (μικρότερη διαδρομή) αλλά και για περιβαλλοντικούς και αισθητικούς λόγους, επιλέγεται η κατασκευή σήραγγας για τη μεταφορά νερού. Ορισμένα έργα λειτουργούν με σήραγγα μεταφοράς που βρίσκεται καθολικά υπό πίεση, χωρίς δηλαδή αγωγό πίεσης, οπότε γίνεται η κατάλληλη επένδυση στην περίμετρο της και χαρακτηρίζεται ως σήραγγα υπό πίεση (pressure tunnel). Καθοριστικό ρόλο για την παροχή και τις απώλειες κατά την μεταφορά του νερού διαδραματίζουν η διάμετρος του αγωγού, η γεωμετρική του διαμόρφωση και το υλικό το οποία βρίσκεται σε επαφή με το νερό.

2.3.4 Σταθμός παραγωγής – στροβιλοαντλητικά συγκροτήματα

Στον σταθμό παραγωγής βρίσκονται τα στροβιλοαντλητικά συστήματα, λειτουργώντας είτε ως αντλίες είτε ως υδροστρόβιλοι, ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο. Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις συναντώνται αναστρέψιμες μηχανές διπλής λειτουργίας τύπου Francis. Για τη βέλτιστη λειτουργία του έργου, καθοριστικής σημασίας είναι η επιλογή του κατάλληλου υδροστρόβιλου, ο οποίος πρέπει να αντιστοιχίζεται στις τιμές σχεδιασμού της παροχής και της ισχύος, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση. Καθώς αποτελεί το κέντρο ελέγχου του συστήματος, σε αυτόν ενσωματώνονται συστήματα αυτοματισμού, προστασίας και διασύνδεσης με το δίκτυο.

2.3.5 Υδροληψίες, υπερχειλιστές και βοηθητικά έργα

Απαραίτητα έργα για κάθε ταμιευτήρα είναι τα έργα υδροληψίας και οι υπερχειλιστές. Μέσω τον πρώτων εξασφαλίζεται η ομαλή και ελεγχόμενη εισαγωγή του νερού στους αγωγούς πίεσης, με την κατάλληλη παροχή, ενώ οι υπερχειλιστές παρέχουν την κατάλληλη διαφυγή κινδύνου του νερού σε περιπτώσεις ακραίων υδρολογικών εισροών. Τα παραπάνω, καθώς και τα λοιπά βοηθητικά έργα, όπως οδοποιίες, κτηριακές εγκαταστάσεις και δίκτυα επικοινωνίας, προσαρμόζονται στις ανάγκες του έργου και εξασφαλίζουν την βέλτιστη λειτουργία του.

2.4 Τεχνικές παράμετροι και υδραυλικοί υπολογισμοί

Αφού παρουσιάστηκαν τα βασικά δομικά στοιχεία ενός τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης, στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι κύριοι τεχνικοί παράμετροι που το

χαρακτηρίζουν. Παράλληλα, αναλύονται οι υδραυλικοί υπολογισμοί που αντιστοιχούν σε κάθε παράμετρο, με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή και λειτουργική αξιολόγηση του έργου.

Αφετηρία της ανάλυσης είναι ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα, ο οποίος προσδιορίζεται από τις καμπύλες στάθμης-όγκου, των οποίων οι τιμές εξάγονται από τοπογραφικό υπόβαθρο, σε συμβατική ή ψηφιακή μορφή, της υψομετρίας του εδάφους. Μέσω της σχέσης αυτής ουσιαστικά καθορίζεται το διαθέσιμο ενεργειακό περιεχόμενο του έργου, που δίνεται από τον ρυθμιστικό όγκο του άνω ταμιευτήρα. Εν συνεχεία η υψομετρική διαφορά των ταμιευτήρων (σημεία υδροληψίας και εκβολής) δίνουν το ύψος πτώσης τόσο ως ολικό (gross head) όσο και ως καθαρό (net head), κατόπιν αφαίρεσης δηλαδή των υδραυλικών απωλειών. Οι τελευταίες χωρίζονται σε γραμμικές κατά μήκος των αγωγών (τριβές) και στις τοπικές, λόγω καμπυλών, αλλαγής διαμέτρου αγωγού και σε οποιαδήποτε άλλη ασυνέχεια κατά την πορεία του νερού.

Όσον αφορά τις γραμμικές απώλειες (τριβή), καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η διάμετρος του αγωγού, το μήκος του και η τραχύτητα του. Ο συντελεστής τριβών υπολογίζεται μέσω κατάλληλων σχέσεων της υδραυλικής. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζονται οι προσεγγιστικές εξισώσεις των Swamee-Jain (*Παπακωνσταντής, Ροή σε αγωγούς υπό πίεση*). Έτσι, γνωρίζοντας το καθαρό ύψος πτώσης, υπολογίζεται η παροχή σε άντληση και παραγωγή μέσω της θεμελιώδους υδροδυναμικής σχέσης (σχέση 2.1).

Τέλος, η επιλογή του κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού βασίζεται στις καμπύλες λειτουργίας των στροβίλων και αντλιών. Έχοντας καθορίσει την παροχή και το ύψος πτώσης για κάθε λειτουργία, οι καμπύλες αυτές δίνουν την δυνατότητα να επιλέξουμε εξοπλισμό με την μέγιστη ενεργειακή απόδοση στις συνθήκες αυτές.

2.5 Τύποι συστημάτων αντλησιοταμίευσης

Ανά τον κόσμο συναντώνται διαφορετικές διαμορφώσεις συστημάτων αντλησιοταμίευσης που προσαρμόζονται στα τοπογραφικά και γεωλογικά δεδομένα αλλά και στις ανάγκες της περιοχής. Παρά τις διαφοροποιήσεις τους, η βασική λειτουργική αρχή που αναπτύχθηκε παραπάνω παραμένει κοινή. Ακολουθεί η ταξινόμηση μερικών μαζί με παραδείγματα.

2.5.1 Συστήματα φυσικών ταμιευτήρων

Ο τύπος αυτός είναι ο πιο παραδοσιακός τύπος αντλησιοταμίευσης και περιλαμβάνει έργα στα οποία τουλάχιστον ο ένας ταμιευτήρας είναι φυσικός και έχει φυσική υδρολογική σύνδεση (λίμνη, ποτάμι-ταμιευτήρας). Συχνά στα έργα αυτά υπάρχει παράλληλη υδροληψία για άλλες λειτουργίες (π.χ. άρδευση). Παράδειγμα: Northfield Mountain PSP (Μασαχουσέτη, ΗΠΑ) – Ο άνω ταμιευτήρας είναι χωρητικότητας 21,2 hm³ και εγκατεστημένης ισχύος 1.168 GW, ενώ ο κάτω ταμιευτήρας είναι ο ποταμός Connecticut.



Εικόνα 2.2 Northfield Mountain PSH. Πηγή: Google Earth

2.5.2 Συστήματα κλειστού κυκλώματος (closed-loop PSP)

Στα συστήματα αυτά και οι δύο ταμιευτήρες είναι τεχνητοί, έχουν ίδια χωρητικότητα, και η φυσική ροή προς αυτούς είναι αμελητέα (εξασφαλίζει μόνο την αναπλήρωση των απωλειών λόγω εξάτμισης).

Παράδειγμα: Dinorwig Pumped Storage (Ουαλία, Ηνωμένο Βασίλειο) – Χρησιμοποιεί φυσική ορεινή λίμνη (Marchlyn Mawr), η οποία είναι αποκομμένη από υδρολογική σύνδεση, ως άνω ταμιευτήρα και τεχνητό κάτω ταμιευτήρα. Είναι από τα μεγαλύτερα και ταχύτερα σε απόκριση συστήματα στην Ευρώπη.



Εικόνα 2.3 Το Dinorwig Power Station, γνωστό και ως Electric Mountain. Πηγή: Wikipedia

2.5.3 Συστήματα ταμιευτήρων σε σειρά

Σύστημα αντλιοσταμείωσης με ταμιευτήρες σε σειρά ονομάζεται η διάταξη κατά την οποία περισσότεροι από δύο ταμιευτήρες, εξοπλισμένοι με αντλιοστρόβιλους, βρίσκονται σε διαφορετικά υψομετρικά επίπεδα και παρουσιάζουν υδρολογική και λειτουργική αλληλεξάρτηση. Στις διατάξεις αυτές, η λειτουργία άντλησης ή παραγωγής σε έναν ταμιευτήρα μπορεί να επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα τη στάθμη και το ενεργειακό δυναμικό των γειτονικών ταμιευτήρων.

Παράδειγμα: ΥΗΣ Σφηκιάς και Ασωμάτων στο συγκρότημα Αλιάκμονα

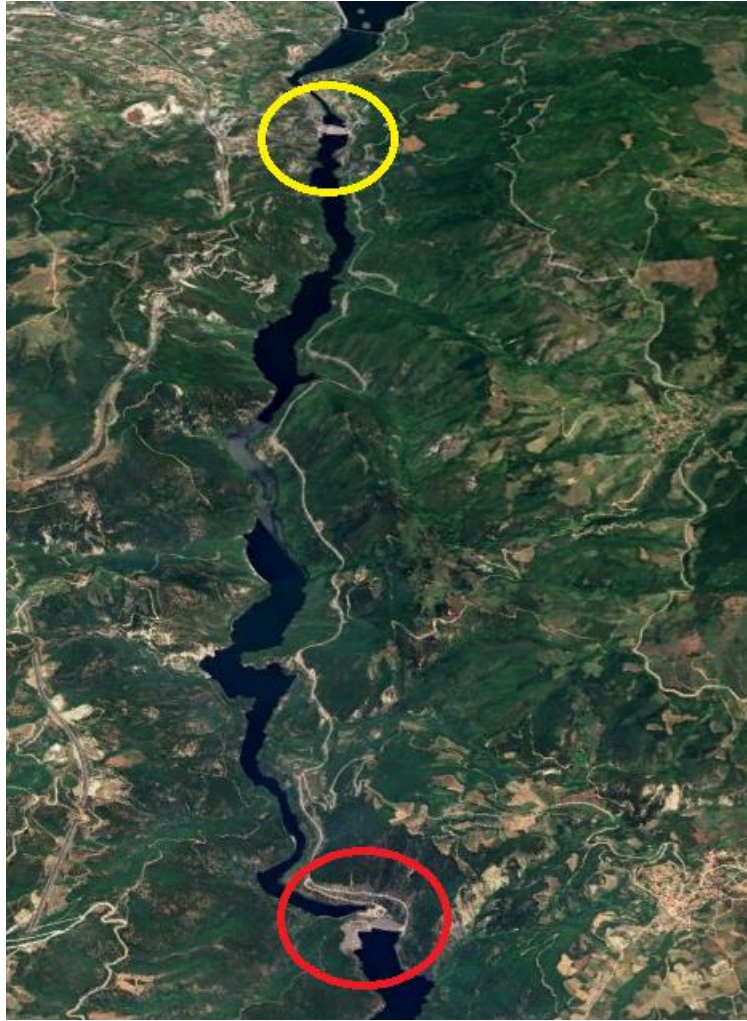
Στον ποταμό Αλιάκμονα, τα υδροηλεκτρικά φράγματα Σφηκιάς και Ασωμάτων είναι διατεταγμένα υδρολογικά σε σειρά και τέθηκαν σε λειτουργία το 1985 από την ΔΕΗ. Ο ΥΗΣ Σφηκιάς περιλαμβάνει αναστρέψιμες μονάδες (αντλιοστρόβιλους) και διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ 315 MW, ενώ ο κατάντη ΥΗΣ Ασωμάτων έχει εγκατεστημένη ισχύ 108 MW. Το σύμπλεγμα αυτό παρουσιάζει λειτουργικά χαρακτηριστικά έμμεσης σειριακής συμπεριφοράς κατά τη φάση άντλησης, λόγω της κοινής τους υδρολογικής διαίτας (ΔΕΗ n.d.).



Εικόνα 2.4 Ο ΥΗΣ Σφηκιάς. Πηγή: Google Earth



Εικόνα 2.5 Ο ΥΗΣ Ασωμάτων. Πηγή: Google Earth



Εικόνα 2.6 Στον κόκκινο κύκλο ο ΥΗΣ Σφηκιάς, στον κίτρινο ο ΥΗΣ Ασωμάτων. Πηγή: Google Earth

2.5.4 Υβριδικά συστήματα με ΑΠΕ

Τα συστήματα αυτά συνδέονται με αιολικά, φωτοβολταϊκά ή άλλες ΑΠΕ, ώστε η άντληση να γίνεται σε περιόδους πλεονάζουσας πράσινης ενέργειας και να μην αποβάλλεται. Έτσι, μεγιστοποιείται η αξιοποίηση των ΑΠΕ και δεν διακόπτεται η παραγωγή τους.

Παράδειγμα: Υβριδικός Σταθμός Αμαρίου Κρήτης (υπό κατασκευή) – Ο υβριδικός σταθμός βασίζεται στην ενεργειακή αξιοποίηση του φράγματος Ποταμών και συνδυάζει παραγόμενη ενέργεια από δύο αιολικά πάρκα εγκατεστημένης ισχύος 89,1 MW στο νομό Λασιθίου, έναν υδροηλεκτρικό σταθμό ισχύος έως 93 MW και ένα συγκρότημα αντλιών δυναμικότητας 140 MW (ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, n.d.).



Εικόνα 2.7 Το φράγμα των ποταμών. Πηγή: ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ

2.5.5 Συστήματα πολλαπλών ταμιευτήρων

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από περισσότερους από δύο ταμιευτήρες, τοποθετημένους σε διαφορετικές θέσεις γύρω από τον κάτω ταμιευτήρα. Τα συστήματα αυτά έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν συνδυαστικά, μεγιστοποιώντας την απόδοση του συστήματος.

Παράδειγμα: Σύστημα Αντλιοσταμείωσης στην Αμφιλοχία (υπό κατασκευή) – Αξιοποιεί δύο ανεξάρτητους τεχνητούς άνω ταμιευτήρες (χωρητικότητας $6,7 \text{ hm}^3$ και $2,0 \text{ hm}^3$) και την λίμνη Καστρακίου ως κάτω ταμιευτήρα. Κάθε ταμιευτήρας έχει ξεχωριστό σταθμό αντλιοσταμείωσης διαφορετικής εγκατεστημένης ισχύος, ενώ η συνολική ανέρχεται στα 680 MW για παραγωγή και 730 MW άντλησης.



Εικόνα 2.8 Σχηματική διάταξη έργου «Σύστημα Αντλιοσταμείωσης στην Αμφιλοχία». Πηγή: ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ

2.5.6 Θαλάσσια αντλιοσταμείωση

Σε αυτή την καινοτόμο μορφή αντλιοσταμείωσης, ο κάτω ταμιευτήρας ταυτίζεται με τη θάλασσα, ενώ ο άνω ταμιευτήρας κατασκευάζεται τεχνητά σε γειτονικό οροπέδιο. Παρά τις σημαντικές τεχνικές προκλήσεις που συνεπάγεται η χρήση θαλασσινού νερού, όπως διάβρωση, στεγανοποίηση, χρήση υλικών υψηλής αντοχής, κτλ. (Hiratsuka 1993, Zisos et al., 2023), η λύση αυτή μπορεί να αποτελέσει ελκυστική επιλογή για νησιωτικά ηλεκτρικά συστήματα με υψηλή διείδυση ΑΠΕ και περιορισμένη διαθέσιμη έκταση.

Παράδειγμα: *Okinawa Seawater Pumped Storage Plant* (Ιαπωνία) – Το πρώτο θαλάσσιο σύστημα αντλησιοταμίευσης παγκοσμίως, το οποίο λειτούργησε σε πιλοτική μορφή. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1999 και λειτούργησε έως το 2016, οπότε και εγκαταλείφθηκε λόγω μειωμένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο τοπικό δίκτυο. Παρά τη διακοπή λειτουργίας του, το έργο απέδειξε στην πράξη τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας θαλάσσιας αντλησιοταμίευσης σε νησιωτικά συστήματα.



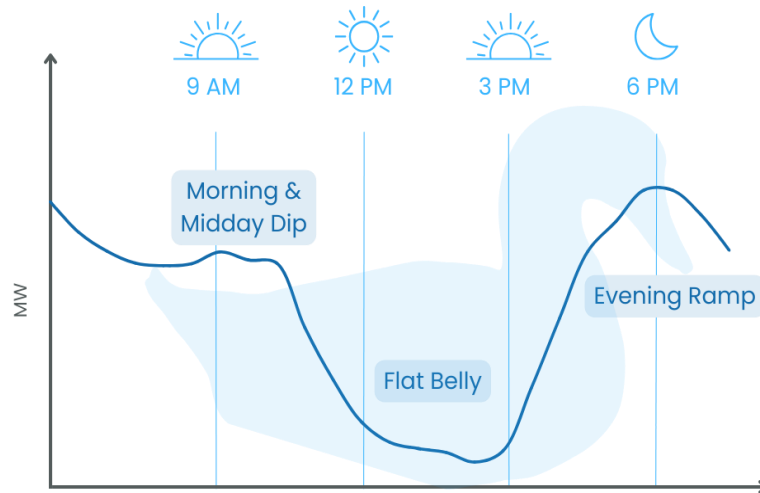
Εικόνα 2.9 Okinawa Seawater PSP. Πηγή εικόνας: Παροχή συγγραφέα (The Conversation)

2.6 Ενεργειακός και λειτουργικός ρόλος στο ηλεκτρικό δίκτυο

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί ίσως την πιο χαρακτηριστική τεχνολογία αποθήκευσης και συμβάλει ουσιαστικότερα στη λειτουργία των σύγχρονων ηλεκτρικών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικοί τρόποι με τους οποίους επηρεάζει θετικά τη λειτουργία του δικτύου.

1. Εξομάλυνση αιχμών και μετατόπιση φορτίου

Ως τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, η αντλησιοταμίευση δύναται να μετατοπίζει την κατανάλωση ενέργειας σε χρονικές περιόδους χαμηλής ζήτησης και να αποδίδει ισχύ σε περιόδους αιχμής. Ειδικότερα, σε συστήματα υψηλής διείσδυσης φωτοβολταϊκών έργων, παρουσιάζεται το φαινόμενο Duck Curve, το οποίο περιγράφει την ημερήσια καμπύλη του καθαρού φορτίου, μέσω της αφαίρεσης της καμπύλης της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ από την καμπύλη του φορτίου του συστήματος. Η καμπύλη αυτή έχει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές κατά τις μεσημβρινές ώρες λόγω αυξημένης ηλιακής παραγωγής και απότομη άνοδο κατά το απόγευμα, όταν η παραγωγή αυτή μειώνεται ενώ η ζήτηση αυξάνεται. Στο πλαίσιο αυτό, η αντλησιοταμίευση μπορεί να απορροφά τα πλεονάσματα ενέργειας κατά την διάρκεια μέσω άντλησης και να τα αποδίδει στις ώρες αιχμής, εξομαλύνοντας την καμπύλη και μειώνοντας την ανάγκη για ταχέως εκκινούμενες και δαπανηρές συμβατικές μονάδες.



Εικόνα 2.10 Σχηματική απεικόνιση της καμπύλης “Duck Curve” Πηγή: Synertics (2023)

2. Παροχή υπηρεσιών ευελιξίας

Πολλοί αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί λειτουργούν με μεταβαλλόμενοι ισχύ τόσο κατά την άντληση όσο και τη παραγωγή. Έτσι μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα σε ένα σύστημα μεγάλων διακυμάνσεων ζήτησης και παραγωγής, όπως αυτά με μεγάλο ποσοστό ΑΠΕ.

3. Στήριξη υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που εξαρτώνται με τις καιρικές συνθήκες (π.χ. αιολική και ηλιακή), χαρακτηρίζονται από έντονη μεταβλητότητα σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Η αντλησιοταμίευση μπορεί να αξιοποιεί τα πλεονάσματα παραγωγής όταν αυτά εμφανίζονται και να παρέχει ενέργεια σε περιόδους ελλείμματος, μειώνοντας τις περικοπές ΑΠΕ και διευκολύνοντας την ένταξή τους στο ενεργειακό μίγμα.

4. Σταθεροποίηση συστήματος και βοηθητικές υπηρεσίες

Η αντλησιοταμίευση μπορεί να συμβάλει σε υπηρεσίες όπως ρύθμιση συχνότητας, έλεγχο τάσης και παροχή αδράνειας μέσω των περιστρεφόμενων μαζών των υδροστροβίλων. Αν και δεν αποτελεί τη μοναδική τεχνολογία που παρέχει αυτές τις υπηρεσίες, προσφέρει μια ώριμη και δοκιμασμένη λύση για την υποστήριξη της σταθερότητας του δικτύου.

2.7 Περιορισμοί και μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης

Παρά την προαναφερθείσα σημασία της για τα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα, η αντλησιοταμίευση συνοδεύεται από σημαντικούς περιορισμούς. Συχνό εμπόδιο για την υλοποίηση τέτοιων έργων είναι οι γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής, καθώς τίθεται ως προαπαιτούμενη η ύπαρξη μεγάλης υψομετρικής διαφοράς σε σχετική μικρή οριζόντια απόσταση για τους ταμιευτήρες και η εξασφάλιση σταθερού υποβάθρου για την κατασκευή των έργων διασύνδεσης. Η μη πλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων συχνά καθιστά το έργο μη βιώσιμο οικονομικά και απορρίπτουν την θέση αυτή.

Θα ήταν λάθος να αγνοήσει κανείς την άρρηκτη σύνδεση τόσο μεγάλων έργων με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους. Κατά την λειτουργία τους τέτοια έργα είναι μεν φιλικά προς το περιβάλλον, η κατασκευή δε των ταμιευτήρων και της σήραγγας φέρνει αλλαγές στις

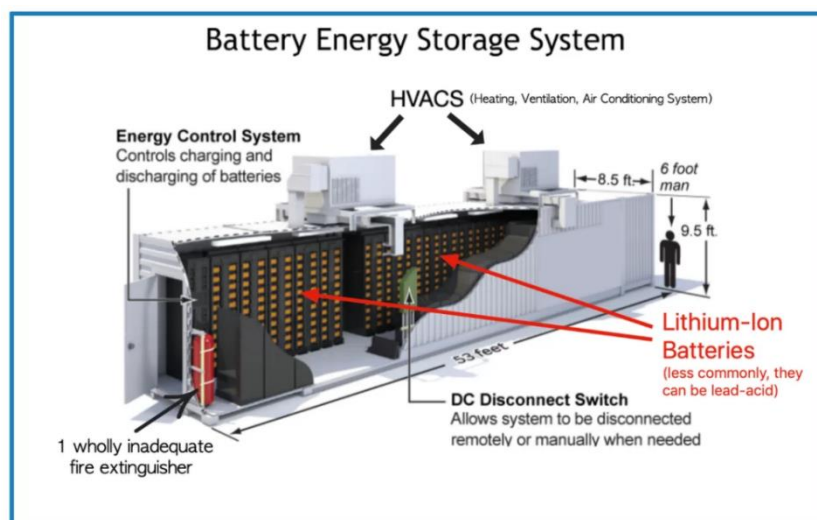
υδρολογικές συνθήκες της περιοχής και επηρεάζει τα τοπικά οικοσυστήματα. Έτσι, οι απαιτήσεις περιβαλλοντικής αδειοδότησης είναι συχνά χρονοβόρες, γεγονός που συχνά αυξάνει το κόστος, καθυστερεί ή ακόμα και διακόπτει το έργο.

Στο οικονομοτεχνικό επίπεδο, τα έργα αντλησιοταμίευσης, δεδομένου του μεγέθους τους, απαιτούν μεγάλο αρχικό κεφάλαιο για την κάλυψη τόσο των μεγάλων πολιτικών έργων όσο και του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η βιωσιμότητα ενός τέτοιου έργου απαιτεί σε ημερήσιο επίπεδο μεγάλες διακυμάνσεις στις συνθήκες αγοράς, οι οποίες ούτε αυτές είναι σταθερές. Τέλος, αν και τέτοια έργα χαρακτηρίζονται από την μακροβιότητα (περισσότερα από 50 έτη εγγυημένης λειτουργίας), η συχνή εναλλαγή άντλησης-παραγωγής αυξάνει τις ανάγκες συντήρησης, ιδιαίτερα σε συστήματα με υψηλή συμμετοχή ΑΠΕ.

2.8 Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Μπορεί η αντλησιοταμίευση να αποτελεί τη μακροβιότερη τεχνολογία μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας, το πεδίο όμως της αποθήκευσης ενέργειας είναι σταθερά υπό εξέλιξη, με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι αποθήκευσης. Οι τεχνολογικές αυτές εξελίξεις συνδέονται άμεσα με τις διακυμάνσεις της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και με τις αυξημένες ανάγκες που προκύπτουν για ευελιξία, εξισορρόπηση και διατήρηση της ευστάθειας του ηλεκτρικού συστήματος.

Μια από τις πλέον εμπορικά διαδεδομένες τεχνολογίες αποθήκευσης είναι οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες — και ειδικότερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου. Χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό απόδοσης κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης και εξαιρετικά γρήγορο χρόνο απόκρισης, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές βραχυπρόθεσμης έως μεσοπρόθεσμης διάρκειας, όπως η εξομάλυνση φορτίου και η παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Ωστόσο, η περιορισμένη διάρκεια ζωής σε κύκλους, η σταδιακή υποβάθμιση της χωρητικότητας και το υψηλότερο κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα για εφαρμογές μακροχρόνιας αποθήκευσης.



Εικόνα 2.11 Σχηματική διάταξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες. Πηγή εικόνας: Pilot Energy Storage

Όσον αφορά τις ηλεκτροχημικές τεχνολογίες, ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι μπαταρίες ροής. Η λειτουργία τους διαφέρει ουσιαστικά από αυτή των μπαταριών ιόντων λιθίου, καθώς

η ισχύς και η ενεργειακή χωρητικότητα μπορούν να κλιμακώνονται ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Τα χαρακτηριστικά αυτά τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας σε σύγκριση με τις μπαταρίες λιθίου. Παρ' όλα αυτά, η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και το υψηλότερο αρχικό επενδυτικό κόστος περιορίζουν προς το παρόν τη διεύρυσή τους σε ευρεία κλίμακα.

Πέραν των ηλεκτροχημικών συστημάτων, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας, όπως τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα και τα συστήματα μετατροπής ενέργειας σε υδρογόνο. Οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης διάρκειας, ακόμη και σε εποχική κλίμακα, όμως χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη συνολική απόδοση κύκλου και αυξημένη τεχνολογική πολυπλοκότητα. Ως εκ τούτου, βρίσκονται κυρίως σε πιλοτικό ή αναπτυσσόμενο στάδιο, με περιορισμένη μέχρι σήμερα εμπορική εφαρμογή.

Συνολικά, όπως προκύπτει από τη συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών αποθήκευσης, καμία μέθοδος δεν υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα. Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και περιορισμούς ως προς την κλίμακα, τη διάρκεια αποθήκευσης, την απόδοση και το κόστος, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συμπληρωματική τους χρήση. Η αντλησιοταμίευση διατηρεί τον ρόλο της ως ώριμη λύση μεγάλης κλίμακας, ενώ οι ηλεκτροχημικές και χημικές τεχνολογίες καλύπτουν εξειδικευμένες ανάγκες ευελιξίας και χρονικής μετατόπισης της ενέργειας στο σύγχρονο ηλεκτρικό σύστημα (Mahadevan et al., 2025).

3 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

3.1 Σκοπός και πεδίο εφαρμογής της υδραυλικής ανάλυσης

Οι υπολογισμοί που αναπτύσσονται σε αυτό το κεφάλαιο αντιπροσωπεύουν τους βασικούς υδραυλικούς υπολογισμούς για την ανάλυση ενός τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης, με σκοπό την αξιολόγηση λειτουργικών παραμέτρων μέσω του μανομετρικού ύψους, των απωλειών τριβών και μιας συσχέτισης παροχής-ισχύος-ενέργειας κατά την παραγωγή και την άντληση. Στόχος είναι να τεκμηριωθεί η τεχνική επικύρωση αυτών των παραμέτρων για περαιτέρω εμπειρικό προσδιορισμό και οικονομική αξιολόγηση.

Η προσέγγιση που ακολουθείται είναι σχετικά απλή και δεν απαιτεί δυναμική ανάλυση ούτε μεταβατικές εμπειρικές δοκιμές των σταθμών των ταμιευτήρων, καθώς αυτό το μέρος της μελέτης δεν σχετίζεται με τη λειτουργική αλλά με την τεchnοοικονομική εφαρμοσιμότητα διαφορετικών λειτουργικών σεναρίων.

3.2 Δεδομένα και Κύριες Παραδοχές

Η υδραυλική αξιολόγηση λαμβάνει υπόψη τεχνικά μεγέθη που σχετίζονται με τη γεωμετρία του έργου, συμπεριλαμβανομένης της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του άνω ταμιευτήρα και του κάτω ταμιευτήρα, των μηκών και των διαμέτρων των αγωγών που συνδέονται με τις μονάδες αντλίας/στροβίλου, καθώς και των κατάλληλων χαρακτηριστικών, τα οποία είναι σταθερά και για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια.

Οι κατώτατες στάθμες λειτουργίας των δύο ταμιευτήρων λαμβάνονται ως πρότυπα για τους υψομετρικούς υπολογισμούς. Αυτό εφαρμόζεται για λόγους ευκολίας των υπολογισμών και είναι μία συντηρητική εκτίμηση, καθώς οι μεταβολές της στάθμης στους δύο ταμιευτήρες έχουν αντίθετη κατεύθυνση, περιορίζοντας την επίδρασή τους στο καθαρό ύψος πτώσης.

Το σύστημα μπορεί να αξιολογηθεί ως κλειστού βρόχου (closed loop), δηλαδή δεν υφίσταται φυσική εισροή ή εκροή. Η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή αμελούνται, ενώ θεωρείται πως ο κάτω ταμιευτήρας διαθέτει πάντοτε επαρκή ποσότητα νερού για τη λειτουργία του έργου.

Η καμπύλη στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα χρησιμοποιείται μόνο ως εργαλείο για τον καθορισμό των λειτουργικών του ορίων (κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας, συνολικός και ωφέλιμος/ρυθμιστικός όγκος), αλλά δεν ενσωματώνεται δυναμικά στους υδραυλικούς υπολογισμούς.

3.3 Ύψος πτώσης

Το ύψος πτώσης αποτελεί βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ισχύος. Στην παρούσα εργασία η υψομετρική διαφορά μεταξύ των ταμιευτήρων θεωρείται σταθερή και ορίζεται ως η διαφορά των κατώτατων σταθμών λειτουργίας:

$$\Delta H_{\text{ref}} = H_{\text{upper,K}\Sigma\Lambda} - H_{\text{lower,K}\Sigma\Lambda} \quad (3.1)$$

Το καθαρό ύψος πτώσης και το μανομετρικό ύψος, που αναφέρονται στις φάσεις παραγωγής και άντλησης, αντίστοιχα, προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές απώλειες του συστήματος. Για τις δύο φάσεις λειτουργίας ισχύει:

$$H_{\text{net}} = \begin{cases} \Delta H_{\text{ref}} - H_{\text{loss}}(Q), & \text{παραγωγή} \\ \Delta H_{\text{ref}} + H_{\text{loss}}(Q), & \text{άντληση} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$(3.3)$$

Η διαφοροποίηση του πρόσημου αποτυπώνει το γεγονός ότι οι απώλειες μειώνουν το διαθέσιμο ύψος κατά την παραγωγή και αυξάνουν το απαιτούμενο ύψος κατά την άντληση.

3.4 Υδραυλικές απώλειες

Οι υδραυλικές απώλειες του συστήματος περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών στους αγωγούς και τις τοπικές απώλειες σε υδραυλικά στοιχεία. Η συνολική απώλεια εκφράζεται ως:

$$H_{\text{loss}} = H_f + H_m \quad (3.4)$$

3.4.1 Απώλειες τριβών

Οι απώλειες τριβών υπολογίζονται με τη σχέση Darcy–Weisbach:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.5)$$

όπου f ο συντελεστής τριβών, L το μήκος του αγωγού, D η διάμετρος και v η μέση ταχύτητα ροής.

Ο συντελεστής τριβών υπολογίζεται με τη σχέση Swamee–Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.6)$$

η οποία προσεγγίζει τη λύση της εξίσωσης Colebrook–White και επιτρέπει άμεσο υπολογισμό χωρίς επαναληπτική διαδικασία.

3.4.2 Τοπικές απώλειες

Οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται με συντελεστές τοπικών απωλειών ζ σύμφωνα με τη σχέση:

$$H_m = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (3.7)$$

Στην παρούσα εργασία οι τοπικές απώλειες προσεγγίζονται συγκεντρωτικά μέσω ισοδύναμων συντελεστών για τον κύριο αγωγό και για τους κλάδους μετά τον διαχωρισμό της ροής. Εφόσον, ως είθισται, η ροή είναι ισοκατανομημένη σε επιμέρους αγωγούς, οι απώλειες υπολογίζονται για έναν αντιπροσωπευτικό κλάδο.

3.5 Σχέση παροχής, ισχύος και ενέργειας

Κατά τη φάση παραγωγής, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς υπολογίζεται από:

$$P_{\text{prod}} = \rho g Q H_{\text{net}} \eta_{\text{prod}} \quad (3.8)$$

Αντίστοιχα, κατά τη φάση άντλησης, η απαιτούμενη ισχύς δίνεται από:

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho g Q H_{\text{net}}}{\eta_{\text{pump}}} \quad (3.9)$$

όπου η_{prod} και η_{pump} οι συνολικοί βαθμοί απόδοσης στις δύο φάσεις λειτουργίας. Η ενέργεια που παράγεται ή καταναλώνεται σε διάρκεια t υπολογίζεται ως:

$$E = P \cdot t \quad (3.10)$$

3.6 Προσέγγιση λειτουργίας ταμιευτήρα

Η ωφέλιμη (ρυθμιστική) χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα θεωρείται σταθερή και καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου.

Δεν λαμβάνεται μία μοναδική τιμή ισχύος ούτε ένα σταθερό ωράριο λειτουργίας στην παρούσα ανάλυση. Αντίθετα, αξιολογείται ένα εύρος συνδυασμών ισχύος και χρόνου λειτουργίας, οι οποίοι καθορίζουν τους αντίστοιχους χρησιμοποιούμενους ρυθμιστικούς όγκους και αξιολογούνται στο πλαίσιο των εξεταζόμενων σεναρίων.

Για κάθε εξεταζόμενο σενάριο θεωρείται μία σταθερή φάση παραγωγής, η οποία καθορίζεται από την εγκατεστημένη ισχύ και τη διάρκειά της. Με βάση το εκάστοτε σενάριο, προσδιορίζεται ο απαιτούμενος ωφέλιμος όγκος λειτουργίας V_{useful} , ο οποίος αντιστοιχεί στον όγκο νερού που πρέπει να αξιοποιηθεί ώστε να ολοκληρωθεί η παραγωγή ενέργειας στον συγκεκριμένο κύκλο. Ο όγκος αυτός παραμένει σταθερός εντός κάθε σεναρίου και λειτουργεί ως συνδετικός περιορισμός μεταξύ της ισχύος, της διάρκειας λειτουργίας και της γεωμετρικής εφικτότητας του άνω ταμιευτήρα.

Στη συνέχεια, υπό την παραδοχή ενός κλειστού υδραυλικού συστήματος, θεωρείται ότι ο όγκος νερού που αντλείται κατά τη φάση της άντλησης είναι ίσος με τον όγκο νερού που χρησιμοποιείται ως κινητήρια δύναμη κατά τη φάση παραγωγής για κάθε κύκλο λειτουργίας. Κατά συνέπεια, με βάση τον απαιτούμενο αυτό όγκο και την εγκατεστημένη αντλητική ισχύ, προσδιορίζεται η αναγκαία διάρκεια της φάσης άντλησης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

3.7 Αποδόσεις και σταθερές παράμετροι

Οι συνολικές αποδόσεις κατά την παραγωγή (η_{prod}) και κατά την άντληση (η_{pump}) θεωρούνται σταθερές για κάθε σενάριο που αναλύεται. Οι αποδόσεις αυτές εκφράζουν την υδραυλική και ηλεκτρομηχανολογική λειτουργία των επιμέρους στοιχείων και δεν αποτελούν συναρτήσεις μεταβαλλόμενες με το φορτίο.

Επιπλέον, θεωρείται ότι τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των αγωγών (μήκη, διάμετροι, ισοδύναμη τραχύτητα), καθώς και οι συντελεστές τοπικών απωλειών, είναι σταθερά σε όλη τη διάρκεια της μελέτης. Μια τέτοια παραμετροποίηση διευκολύνει τη διατήρηση παρόμοιων χαρακτηριστικών μεταξύ των σεναρίων.

3.8 Περιορισμοί και απλοποιήσεις

Η υδραυλική μελέτη βασίζεται στην παραδοχή μόνιμης ροής και σταθερής γεωμετρίας του συστήματος. Οι μεταβατικές επιδράσεις στα υδραυλικά φαινόμενα, όπως το υδραυλικό πλήγμα και οι φάσεις εκκίνησης και παύσης των κινητήρων, καθώς και οι περιορισμοί τάσης που σχετίζονται με την ηλεκτροδότηση, δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Οι παραπάνω παραδοχές θεωρούνται απλοποιήσεις της μελέτης, καθώς το έργο αυτό δεν αποσκοπεί στη λεπτομερή υδροδυναμική προσομοίωση, αλλά σε μια συνολική τεχνοοικονομική αξιολόγηση του συστήματος αντλησιοταμίευσης.

4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 Σκοπός και ρόλος της οικονομικής ανάλυσης

Η οικονομική αξιολόγηση αποτελεί βασικό σκέλος της τεχνοοικονομικής διερεύνησης ενός αντλησιοταμιευτικού έργου, καθώς η βιωσιμότητά του δεν καθορίζεται πλέον αποκλειστικά από τεχνικά κριτήρια, αλλά πρωτίστως από τη δυνατότητά του να λειτουργεί αποδοτικά εντός του πλαισίου της ηλεκτρικής αγοράς. Κατά συνέπεια, το παρόν κεφάλαιο διαμορφώνει το οικονομικό πλαίσιο της μελέτης μέσω της παρουσίασης του λειτουργικού οικονομικού περιβάλλοντος, των οικονομικών εκτιμήσεων και παραδοχών για τα κόστη και τα έσοδα, καθώς και των οικονομικών δεικτών αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Όπως το Κεφάλαιο 3 βασίστηκε στη διαμόρφωση ενός υδραυλικού πλαισίου για την υποστήριξη των πορισμάτων του, χωρίς ωστόσο να αποδίδει αριθμητικά αποτελέσματα, έτσι και ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να θεμελιώσει μια αντίστοιχη οικονομική προσέγγιση για τον ίδιο σκοπό.

4.2 Οικονομικό πλαίσιο λειτουργίας

Η αντλησιοταμίευση λειτουργεί στο πλαίσιο της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως τεχνολογία αποθήκευσης, αξιοποιώντας τις χρονικές διακυμάνσεις των τιμών. Η λειτουργία της δεν βασίζεται στην καθαρή παραγωγή νέας ενέργειας, αλλά στη μετατόπιση της κατανάλωσης και της παραγωγής μεταξύ διαφορετικών χρονικών περιόδων της ημέρας, με σκοπό την επίτευξη οικονομικού οφέλους.

Ο όρος arbitrage περιγράφει γενικά την πρακτική εκμετάλλευσης διαφορών τιμής του ίδιου αγαθού σε διαφορετικές αγορές ή χρονικές στιγμές. Η βασική αρχή του arbitrage συνίσταται στην αγορά ενός προϊόντος σε χαμηλή τιμή και την πώλησή του σε υψηλότερη τιμή, χωρίς να μεταβάλλεται η ουσιαστική φύση του αγαθού. Το οικονομικό όφελος προκύπτει αποκλειστικά από τη διαφορά τιμής και τη χρονική ή χωρική μετατόπιση της συναλλαγής.

Στο πλαίσιο της ηλεκτρικής ενέργειας, ο όρος ενεργειακό arbitrage αναφέρεται στην αξιοποίηση των ενδοημερήσιων διακυμάνσεων των τιμών στην αγορά, μέσω της χρονικής μετατόπισης της κατανάλωσης και της παραγωγής ενέργειας. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ενεργειακού arbitrage, καθώς χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για άντληση κατά τις ώρες χαμηλών τιμών και την επιστρέφει στο σύστημα με τη μορφή παραγωγής κατά τις ώρες υψηλών τιμών.

Λόγω των αναπόφευκτων απωλειών του συστήματος και της συνολικής απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής, η καθαρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά την άντληση είναι μεγαλύτερη από την καθαρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός αυτό δεν αναιρεί την οικονομική βιωσιμότητα της αντλησιοταμίευσης, καθώς η βιωσιμότητα του συστήματος δεν εξαρτάται από το καθαρό ενεργειακό ισοζύγιο, αλλά από τη διαφορά τιμής μεταξύ των ωρών άντλησης και των ωρών παραγωγής.

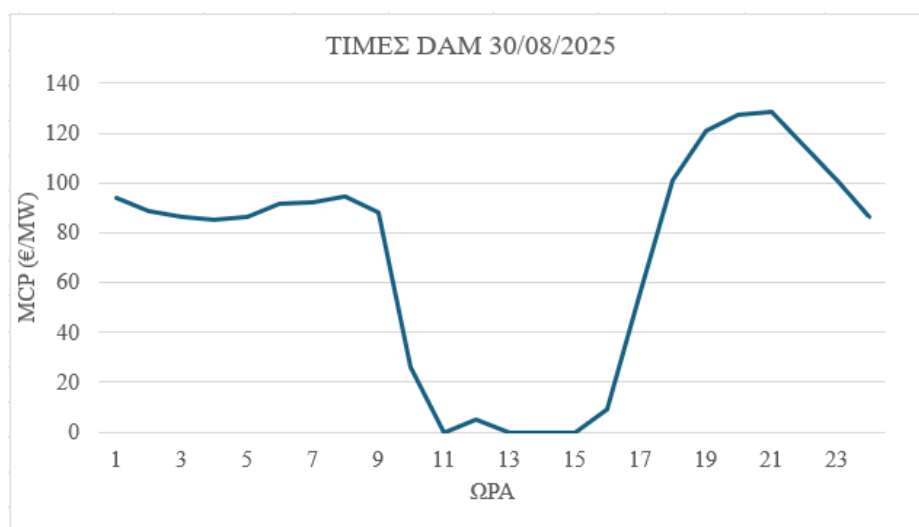
Κατά συνέπεια, η κερδοφορία ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται τόσο από το εύρος των ενδοημερήσιων διακυμάνσεων των τιμών όσο και από τους τεχνολογικούς περιορισμούς. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, θεωρείται ότι το σύστημα λειτουργεί αποκλειστικά ως μηχανισμός ενεργειακού αρμπιτράζ και δεν λαμβάνονται υπόψη άλλες λειτουργικές δυνατότητες, όπως η παροχή επικουρικών υπηρεσιών.

4.3 Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας και Αγορά Επόμενης Ημέρας (DAM)

Η οικονομική ανάλυση βασίζεται στο πλαίσιο λειτουργίας του ελληνικού χονδρεμπορικού ενεργειακού συστήματος, το οποίο ρυθμίζεται μέσω του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας (HEEX). Η αγορά που εξετάζεται είναι η Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market –θα αναφέρεται για απλούστευση και ως DAM), καθώς σε αυτή διαμορφώνονται οι ωριαίες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη ημέρα λειτουργίας, βάσει της αρχής της οριακής τιμολόγησης.

Σύμφωνα με το επίσημο κανονιστικό και πληροφοριακό υλικό του HEEX, στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας οι τιμές διαμορφώνονται με βάση την αλληλεπίδραση προσφοράς και ζήτησης. Στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, πωλητές και αγοραστές υποβάλλουν τις προσφορές τους για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Με τη χρήση του ευρωπαϊκού αλγορίθμου EUPHEMIA, οι προσφορές αυτές αντιστοιχίζονται μεταξύ διασυνδεδεμένων αγορών διαφορετικών χωρών, με στόχο την επίτευξη του βέλτιστου συνολικού οικονομικού αποτελέσματος.

Μέσω της διαδικασίας αυτής υπολογίζονται οι Τιμές Εκκαθάρισης Αγοράς (Market Clearing Prices – MCPs) ανά περιοχή, δηλαδή οι ωριαίες τιμές στις οποίες η προσφορά συναντά τη ζήτηση, ενώ παράλληλα προγραμματίζονται οι βέλτιστες διασυννοριακές ροές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι MCPs που προκύπτουν από την εκκαθάριση της Αγοράς Επόμενης Ημέρας είναι οι ωριαίες τιμές της DAM και αποτελούν τις επίσημες τιμές που δημοσιεύονται από το HEEX. Στην εικόνα απεικονίζονται διαγραμματικά οι δημοσιευμένες από το HEEX ωριαίες τιμές της DAM για μια τυχαία μέρα του δείγματος (30/08/2025).



Εικόνα 4.1 Ωριαίες τιμές DAM στις 30/08/2025. Πηγή: HEEX

Οι ωριαίες τιμές που προκύπτουν από την DAM αποτελούν το βασικό οικονομικό κριτήριο για τη λειτουργία συστημάτων αποθήκευσης, καθώς αποτυπώνουν τις ενδοημερήσιες μεταβολές προσφοράς και ζήτησης. Οι αυξομειώσεις αυτές δημιουργούν το απαιτούμενο περιθώριο τιμών, το οποίο καθιστά δυνατή την εφαρμογή του ενεργειακού αρμπιτράζ, δηλαδή τη μεταφορά ενέργειας από περιόδους χαμηλής αξίας σε περιόδους υψηλής αξίας.

Στις επόμενες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα τιμών της Αγοράς Επόμενης Ημέρας που προέρχονται από το HEnEx και καλύπτουν την περίοδο από τον Νοέμβριο του 2020 έως και τον Οκτώβριο του 2025. Το χρονικό αυτό διάστημα περιλαμβάνει πολλαπλές φάσεις του λειτουργικού κύκλου του έργου, προσφέροντας έτσι ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων ανάλυσης της οικονομικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Η ανάλυση προϋποθέτει ότι το σύστημα δραστηριοποιείται αποκλειστικά εντός της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και δεν εξετάζονται διασυνδέσεις ή αλληλεπιδράσεις με άλλες αγορές του Μοντέλου-Στόχου (όπως η ενδοημερήσια αγορά ή οι αγορές εξισορρόπησης).

4.4 Εκτίμηση επενδυτικού κόστους (CAPEX)

Το κόστος επένδυσης (Capital Expenditure –εν συντομία CAPEX) αντιπροσωπεύει τη συνολική δαπάνη που αναμένεται για την κατασκευή και την αρχική εγκατάσταση του έργου αντλησιοταμίευσης. Στην παρούσα μελέτη, το CAPEX εκτιμάται μέσω παραμετρικών σχέσεων, με σκοπό να γίνει μία αρκετά ικανοποιητική προσέγγισή και όχι ένας εκτενής κατασκευαστικός προϋπολογισμός.

Το συνολικό κόστος επένδυσης διαχωρίζεται σε κύριες κατηγορίες που αντιστοιχούν στα υδραυλικά έργα, στον εμπλεκόμενο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και στα γενικά κόστη του έργου, όπως μελέτες, αδειοδοτήσεις και απρόβλεπτα. Η κλιμάκωση του κόστους αντιμετωπίζεται ως συνάρτηση της εγκατεστημένης ισχύος και των σημαντικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του έργου.

4.5 Εκτίμηση κόστους λειτουργίας και συντήρησης (OPEX)

Το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure – εν συντομία OPEX) εκφράζεται μέσω των ετήσιων δαπανών που απαιτούνται για τη λειτουργία και τη συντήρηση του συστήματος αντλησιοταμίευσης. Οι δαπάνες αυτές περιλαμβάνουν κόστη συντήρησης του λειτουργικού εξοπλισμού, λειτουργία του σταθμού, γενικά κόστη συντήρησης και γενικά διοικητικά έξοδα. Γενικά, τα παραπάνω έξοδα είναι μικρά αν αντιπαρατεθούν με τα κατασκευαστικά κόστη.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει το OPEX ως ποσοστό του συνολικού κόστους επένδυσης, με την παραδοχή ότι το OPEX είναι ομοιόμορφο από έτος σε έτος. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με προκαταρκτικές μελέτες οικονομικής αξιολόγησης και εξυπηρετεί τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας.

4.6 Έσοδα συστήματος

Τα έσοδα της αντλησιοταμίευσης που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ της αξίας της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται κατά τη φάση παραγωγής και της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη φάση άντλησης. Η οικονομική απόδοση του συστήματος εξαρτάται άμεσα από τα ημερήσια προφίλ των ωριαίων τιμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και από τη συνδυασμένη επίδραση των δύο φάσεων λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές αποδόσεις του συστήματος.

Η λειτουργία του αντλησιοταμιευτικού συστήματος βασίζεται στην αρχή του ενεργειακού αρμπιτράζ, σύμφωνα με την οποία η άντληση πραγματοποιείται σε χρονικές περιόδους χαμηλών τιμών και η παραγωγή σε χρονικές περιόδους υψηλών τιμών. Θεωρείται ότι κύκλος άντλησης-παραγωγής πραγματοποιείται μόνο όταν η διαφορά τιμών μεταξύ των επιλεγμένων χρονικών περιόδων οδηγεί σε θετικό οικονομικό αποτέλεσμα· σε αντίθετη περίπτωση, το σύστημα δεν ενεργοποιείται για τη συγκεκριμένη ημέρα.

Τα έσοδα αποτιμώνται σε ετήσια βάση, με αξιοποίηση των ημερήσιων προφίλ των ωριαίων τιμών DAM, σε συνδυασμό με τις λειτουργικές παραδοχές του έργου. Στην παρούσα μελέτη δεν λαμβάνονται υπόψη πρόσθετα έσοδα από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών, αγορές εξισορρόπησης ή μηχανισμούς στήριξης.

4.7 Δείκτες οικονομικής αξιολόγησης

Οι δείκτες οικονομικής βιωσιμότητας προκύπτουν από παραδοχές προεξοφλημένων ταμειακών ροών. Η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV) επικρατεί ως ο κύριος δείκτης χρηματοοικονομικής αξίας, χαρακτηριζόμενη από τη διαφορά μεταξύ του επενδυτικού ορίου και των προεξοφλημένων μελλοντικών καθαρών ταμειακών ροών που αναμένονται από τη λειτουργία άντλησης. Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) λειτουργεί συμπληρωματικά, καθώς εκφράζει το προεξοφλητικό επιτόκιο r στο οποίο η NPV ισούται με μηδέν.

Οι δείκτες αυτοί επιλέγονται λόγω της καταλληλότητάς τους για επενδύσεις με μεγάλο χρόνο ζωής και υψηλό μοναδιαίο κόστος, όπως τα συστήματα αντλησιοταμίευσης. Στο εξής θα αναφέρονται για απλούστευση ως NPV και IRR αντιστοίχως.

4.8 Οικονομικές παραδοχές και περιορισμοί

Οι δείκτες οικονομικής βιωσιμότητας βασίζονται στην ανάλυση προεξοφλημένων ταμειακών ροών (Discounted Cash Flow), μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη η χρονική αξία του χρήματος. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την αξιολόγηση επενδύσεων μεγάλης χρονικής διάρκειας και υψηλού αρχικού κόστους, όπως τα έργα αντλησιοταμίευσης, και χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση εναλλακτικών τεχνικών και λειτουργικών λύσεων.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV) αποτελεί τον βασικό δείκτη χρηματοοικονομικής αξιολόγησης και εκφράζει τη συνολική καθαρή αξία που προκύπτει από το άθροισμα των προεξοφλημένων καθαρών ταμειακών ροών ενός έργου. Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (4.1)$$

όπου:

- CF_t είναι η καθαρή ταμειακή ροή στο έτος t ,
- r είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο,
- N είναι ο συνολικός χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης.

Θετική τιμή της NPV υποδηλώνει ότι το έργο δημιουργεί οικονομική αξία για το εξεταζόμενο προεξοφλητικό επιτόκιο, ενώ αρνητική τιμή υποδηλώνει οικονομικά μη αποδεκτή επένδυση.

Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) χρησιμοποιείται συμπληρωματικά και ορίζεται ως το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία μηδενίζεται. Μαθηματικά, ο IRR προκύπτει ως η λύση της εξίσωσης:

$$0 = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \quad (4.2)$$

Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί από το σύνολο των ταμειακών ροών και επιτρέπει τη σύγκριση της επένδυσης με εναλλακτικές επιλογές ή με το κόστος κεφαλαίου.

Το προεξοφλητικό επιτόκιο r αποτελεί κρίσιμη παράμετρο της οικονομικής αξιολόγησης, καθώς αποτυπώνει τη χρονική αξία του χρήματος, το κόστος κεφαλαίου και τον επενδυτικό κίνδυνο. Μέσω της προεξόφλησης, οι μελλοντικές ταμειακές ροές μετατρέπονται σε ισοδύναμες παρούσες αξίες, επιτρέποντας τη συνεπή σύγκριση οικονομικών μεγεθών που πραγματοποιούνται σε διαφορετικές χρονικές χρονικές στιγμές.

Για τον λόγο αυτό, η οικονομική αξιολόγηση δεν περιορίζεται σε μία μοναδική τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου, αλλά συμπληρώνεται από ανάλυση ευαισθησίας της NPV ως προς το r . Η εξέταση εύρους τιμών του προεξοφλητικού επιτοκίου επιτρέπει την εκτίμηση της ανθεκτικότητας της επένδυσης έναντι μη προβλέψιμων μεταβολών του κόστους κεφαλαίου, και συμβάλλει στην πληρέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της οικονομικής ανάλυσης.

5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1 Γενική περιγραφή υπολογιστικής προσέγγισης

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε για την τεχνοοικονομική αξιολόγηση ενός έργου αντλησιοταμίευσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία βασίζεται στη διασύνδεση των υδραυλικών και ενεργειακών υπολογισμών με την οικονομική αξιολόγηση και τη λειτουργία του έργου στο πλαίσιο της Αγοράς Επόμενης Ημέρας .

Ο κρίσιμος στόχος του υπολογιστικού μοντέλου είναι η αξιολόγηση εναλλακτικών λειτουργικών σεναρίων, ως προς την εγκατεστημένη ισχύ και τις ώρες άντλησης και παραγωγής, καθώς και η επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής λειτουργίας με βάση οικονομικά κριτήρια. Για τον σκοπό αυτό, το μοντέλο χρησιμοποιεί ως είσοδο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου, τις παραδοχές κόστους και τα ωριαία δεδομένα τιμών της DAM και παρέχει συγκρίσιμα αποτελέσματα σε ετήσιο επίπεδο.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με προσανατολισμό στα σενάρια, όπου κάθε σενάριο χαρακτηρίζεται από έναν συγκεκριμένο συνδυασμό τεχνικών και λειτουργικών παραμέτρων. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη διάκριση μεταξύ ημερήσιων (24h) και διήμερων (48h) λειτουργικών ρυθμίσεων, προκειμένου να αξιολογηθεί η σημασία της χρονικής ευελιξίας για τη μεγιστοποίηση των εσόδων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μοντέλο υλοποιείται σε περιβάλλον R, το οποίο επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς του να διαχειρίζεται εκτεταμένες βάσεις δεδομένων, της προσαρμοστικής του φύσης και της δυνατότητάς του να εκτελεί επαναληπτικούς και εκτεταμένους υπολογισμούς.

5.2 Δομή και ροή υπολογιστικού μοντέλου

Το υπολογιστικό μοντέλο ακολουθεί μία δομημένη και διαδοχική διαδικασία για δύο λόγους: α) για τη διευκόλυνση της σαφούς διάκρισης μεταξύ των διαφορετικών υπολογιστικών συνιστωσών και β) για να διασφαλιστεί ότι αυτές μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν ή να επεκταθούν στο μέλλον χωρίς να καταρρεύσει η συνολική δομή. Συνολικά, η ροή του μοντέλου παρέχει μια επαναληπτική συνοχή μεταξύ των επιμέρους μερών, η οποία εκτείνεται από τα αρχικά δεδομένα εισόδου έως τους τελικούς οικονομικούς δείκτες και διαμορφώνει μια διαφανή λογική υπολογισμών.

Για την αξιολόγηση του συστήματος και την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού λειτουργίας έχουν φτιαχτεί τρεις διαφορετικές βασικές συναρτήσεις οι οποίες εξετάζουν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Το πρώτο προσομοιώνει την ημερήσια λειτουργία του συστήματος με ανεξάρτητη επιλογή ωρών άντλησης και παραγωγής εντός κάθε 24ώρου, ενώ το δεύτερο επεκτείνει το χρονικό αυτό πλαίσιο στη 48ωρη κλίμακα, επιτρέποντας μετατόπιση της λειτουργίας μεταξύ διαδοχικών ημερών. Το τρίτο προσομοιώνει τη συνεχή ημερήσια λειτουργία του συστήματος με διαδοχικά χρονικά διαστήματα άντλησης και παραγωγής, όπως αυτή θα εφαρμοζόταν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του σταθμού.

Οι συναρτήσεις αυτές χρησιμοποιούν από κοινού μερικές άλλες βοηθητικές συναρτήσεις, αλλά και άλλες που είναι μοναδικές για κάθε σενάριο. Παρόλα αυτά η λογική παραμένει κοινή και αναπτύσσεται παρακάτω.

Αρχικά, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται και οργανώνονται. Τα δεδομένα εισόδου αποτελούνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και του συστήματος αγωγών, οικονομικές παραδοχές και ωριαία προφίλ της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία πρέπει να εισαχθούν πριν από την εφαρμογή οποιουδήποτε σεναρίου. Στη συνέχεια, ορίζεται το εύρος των συνδυασμών εγκατεστημένης ισχύος και ωρών παραγωγής.

Έπειτα, δεδομένου της εγκατάστασης αντλιοστροβίλου με κοινή ισχύ σε παραγωγή και άντληση, ακολουθούν οι υδραυλικοί και ενεργειακοί υπολογισμοί. Μέσω των τελευταίων υπολογίζεται ο ημερήσιος χρόνος άντλησης, με τη λογική ότι όση ποσότητα μεταφέρθηκε στον κάτω ταμιευτήρα κατά την παραγωγή, τόση θα αντληθεί μέσα στο ωράριο λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αυτά στη συνέχεια τροφοδοτούν το οικονομικό μέρος του μοντέλου, το οποίο υπολογίζει τα κόστη και τα έσοδα ανά σενάριο.

Τέλος, τα επιλεγμένα σενάρια συγκρίνονται μεταξύ τους βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων αξιολόγησης και παράγονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τα οποία επιτρέπουν την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής λειτουργίας. Ο στόχος μιας τέτοιας συνεκτικής δομής είναι η σαφήνεια όλων των υπολογισμών, οι οποίοι πρέπει να μπορούν να ανιχνευθούν έως τα επιμέρους συστατικά τους.

5.3 Ορίσματα εισόδου και ορισμός παραμέτρων μοντέλου

Η εκκίνηση του μοντέλου βασίζεται στον ορισμό όλων των παραμέτρων και δεδομένων εισόδου, είτε αυτές χαρακτηρίζουν το έργο είτε το πλαίσιο αλληλεπίδρασης με το οικονομικό περιβάλλον. Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο μοντέλο με δύο τρόπους και χωρίζονται ανάλογα με τη φύση τους σε δύο κατηγορίες: τις τεχνικές και λειτουργικές παραμέτρους του έργου και τα δεδομένα τιμών της DAM.

5.3.1 Τεχνικές και λειτουργικές παράμετροι έργου

Ο ορισμός των βασικών παραμέτρων του έργου πραγματοποιείται μέσω της κοινής για τα τρία σενάρια συνάρτησης `make_project_params()`. Η τελευταία συγκεντρώνει όλα τα απαιτούμενα μεγέθη σε μία ενιαία δομή δεδομένων. Τα μεγέθη αυτά είναι χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος (π.χ. υψόμετρα ταμιευτήρων, οριζόντια απόσταση μεταξύ τους), φυσικές σταθερές (π.χ. επιτάχυνση βαρύτητας), υδραυλικά μεγέθη (π.χ. τραχύτητα αγωγού), παραδοχές απόδοσης (κοινός συντελεστής απόδοσης αντλίας-τουρμπίνας και συντελεστής μείωσης εσόδων), γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών (κλίση, μήκος) και οικονομικοί συντελεστές. Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς του μοντέλου και εισάγονται αυτούσια σε όλες τις επιμέρους συναρτήσεις του μοντέλου.

Η παραμετροποίηση των σεναρίων αφορά την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού και την διάρκεια της φάσης παραγωγής ενός κύκλου. Για κάθε σενάριο, οι διάρκεια αυτή μαζί με την ισχύ καθορίζει τον χρησιμοποιούμενο όγκο ενός κύκλου ο οποίος δεν μεταβάλλεται χρονικά, καθώς επίσης δεν πραγματοποιείται χρονική προσομοίωση της στάθμης των ταμιευτήρων.

5.3.2 Δεδομένα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (DAM)

Οι ωριαίες τιμές DAM βρίσκονται συγκεντρωμένες σε υπολογιστικό φύλλο και αφορούν την χρονική περίοδο από Νοέμβριο 2020 έως και Οκτώβριο του 2025 (συνολικά 60 μήνες, ήτοι 5 χρόνια). Για την εισαγωγή τους στο μοντέλο, το πρώτο σενάριο (κανονικό 24ωρο) χρησιμοποιεί την `load_and_sort_rows()`, η 48ωρη λειτουργία μια παραλλαγή του

πρώτου ονόματι `load_and_sort_rows_48()` και το σενάριο 24ωρης λειτουργίας με συνεχή άντληση και συνεχή παραγωγή την `find_best_blocks_by_day()`.

Η λειτουργία των πρώτων δύο συναρτήσεων είναι πανομοιότυπη, καθώς ανακτούν τις ωριαίες τιμές DAM και τις ταξινομούν σε αύξουσα σειρά σε 24ωρη και 48ωρη βάση αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μορφή data frame, το οποίο παραμένει σταθερό για όλους τους εξεταζόμενους συνδυασμούς.

Στο τρίτο σενάριο, αντίθετα των προηγούμενων που λειτουργούν μόνο με τις φθηνότερες και τις ακριβότερες ώρες, η συνάρτηση `find_best_blocks_by_day()` αξιοποιεί τις ώρες παραγωγής και τις υπολογιζόμενες σε επόμενο στάδιο ώρες άντλησης, με στόχο τον εντοπισμό των οικονομικά βέλτιστων διαδοχικών χρονικών διαστημάτων άντλησης και παραγωγής. Προφανώς η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε συνδυασμό αφού διαφοροποιούνται τα ωράρια λειτουργίας, κάνοντας έτσι το τρίτο σενάριο πιο υπολογιστικά απαιτητικό.

Τέλος, σημειώνεται ότι σε περιπτώσεις όπου προκύπτουν κλασματικές διάρκειες λειτουργίας (π.χ. 8,5 ώρες παραγωγής), η συνεισφορά της κλασματικής ώρας υπολογίζεται αναλογικά, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική χρονική της βαρύτητα στους αντίστοιχους ενεργειακούς και οικονομικούς υπολογισμούς.

5.4 Υδραυλικοί υπολογισμοί (`compute_tpump()`)

Η κοινή και για τρία σενάρια συνάρτηση `compute_tpump()` επιλύει το υδραυλικό πρόβλημα λειτουργίας του αντλησιοταμιευτικού σταθμού για δεδομένη εγκατεστημένη ισχύ (P) και διάρκεια παραγωγής t_{prod} . Στόχος της είναι (i) να υπολογίσει την παροχή παραγωγής Q_{prod} που αντιστοιχεί στην ισχύ (P) υπό πραγματικό ύψος πτώσης ή μανομετρικό ύψος (με απώλειες), (ii) να υπολογίσει την αντίστοιχη παροχή άντλησης Q_{pump} για την ίδια ισχύ σε λειτουργία άντλησης, (iii) να προκύψει ο απαιτούμενος όγκος κύκλου (V) και τελικά οι ώρες άντλησης t_{pump} .

Η επίλυση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες τριβών και τις τοπικές απώλειες στους αγωγούς, ενώ το καθαρό/πραγματικό μανομετρικό ύψος προκύπτει ως συνάρτηση της παροχής. Παρακάτω αναλύονται τα βήματα των υδραυλικών υπολογισμών.

5.4.1 Γεωμετρία και μήκη αγωγών

Αρχικά υπολογίζονται τα ισοδύναμα μήκη των τμημάτων αγωγών από τα γεωμετρικά δεδομένα (οριζόντιες αποστάσεις, κλίση, κατακόρυφες διαφορές) και από το τμήμα διακλάδωσης (τέσσερις παράλληλοι κλάδοι). Τα μήκη αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στον υπολογισμό των απωλειών Darcy–Weisbach.

5.4.2 Υπολογισμός συντελεστή τριβών (Swamee–Jain)

Για κάθε αγωγό (κύριο τμήμα διαμέτρου D_1 και κλάδοι διαμέτρου D_2) ο συντελεστής τριβών f υπολογίζεται με:

- ροή στρωτή (Reynolds < 2300):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5.1)$$

- ροή τυρβώδης: εξίσωση Swamee–Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5.2)$$

όπου k είναι η απόλυτη τραχύτητα (χρησιμοποιούνται k_s για D_1 και k_{s2} για D_2), και

$$Re = \frac{|V|D}{\nu} \quad (5.3)$$

με ν το κινηματικό ιξώδες.

5.4.3 Απώλειες φορτίου για δεδομένη παροχή (Q)

Για δεδομένη συνολική παροχή Q , υπολογίζονται οι ταχύτητες ροής:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (5.4)$$

$$\text{με } A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.5)$$

και στη συνέχεια οι απώλειες φορτίου χωριστά:

1. Κύριος αγωγός (D_1):

$$\Phi_1 = \frac{V_1^2}{2g} \quad (5.6)$$

$$h_{\text{main}} = f_1 \left(\frac{L_1}{D_1} \right) \Phi_1 + K_1 \Phi_1 + 0.5 \Phi_1 \quad (5.7)$$

όπου L_1 το μήκος του κύριου αγωγού, K_1 συντελεστής τοπικών απωλειών στο κύριο τμήμα, που δύναται να εκτιμηθεί αναλυτικά (π.χ. έξοδος στον αγωγό φυγής), ενώ ο όρος $0.5\Phi_1$ εισάγει επιπλέον τοπικές απώλειες στις λοιπές θέσεις αλλαγής γεωμετρίας, για τις οποίες δεν υπάρχουν στοιχεία αναλυτικού σχεδιασμού, και συνεπώς εκτιμώνται προσεγγιστικά.

2. Κλάδοι (θεωρούνται τέσσερις παράλληλοι αγωγοί D_2):

Η παροχή ανά κλάδο θεωρείται:

$$Q_b = \frac{Q}{4} \quad (5.8)$$

$$\Phi_2 = \frac{V_2^2}{2g} \quad (5.9)$$

$$h_{\text{branch}} = f_2 \left(\frac{L_2}{D_2} \right) \Phi_2 + K_2 \Phi_2 \quad (5.10)$$

όπου L_2 το μήκος κάθε κλάδου και K_2 οι τοπικές απώλειες στο τμήμα διακλάδωσης. Επίσης καταγράφεται η ταχύτητα στους κλάδους V_2 .

Το συνολικό υδραυλικό φορτίο απωλειών προκύπτει ως:

$$h_L = h_{\text{main}} + h_{\text{branch}} \quad (5.11)$$

5.4.4 Πραγματικό μανομετρικό ύψος σε παραγωγή και άντληση

Το γεωδαιτικό ύψος ορίζεται ως:

$$H = z_{\text{upper}} - z_{\text{lower}} \quad (5.12)$$

και το πραγματικό μανομετρικό ύψος λαμβάνει διαφορετική μορφή ανά λειτουργία:

- Παραγωγή:

$$H_{m,\text{gen}}(Q) = H - h_L(Q) \quad (5.13)$$

- Αντληση:

$$H_{m,\text{pump}}(Q) = H + h_L(Q) \quad (5.14)$$

5.4.5 Σύνδεση ισχύος–παροχής και αριθμητική επίλυση

Η συνάρτηση επιλύει αριθμητικά την παροχή που αντιστοιχεί στην επιθυμητή ισχύ P μέσω εξισώσεων ισχύος που εξαρτώνται από το $H_m(Q)$:

- Ισχύς παραγωγής:

$$P_{\text{gen}}(Q) = \eta_{\text{gen}} \rho g Q H_{m,\text{gen}}(Q) \quad (5.15)$$

- Ισχύς άντλησης (ζητούμενη):

$$P_{\text{pump}}(Q) = \frac{\rho g Q H_{m,\text{pump}}(Q)}{\eta_{\text{pump}}} \quad (5.16)$$

Για την παραγωγή επιλύεται η ρίζα της $P_{\text{gen}}(Q) - P = 0$ και για την άντληση η ρίζα της $P_{\text{pump}}(Q) - P = 0$ με αριθμητική μέθοδο (uniroot), εξασφαλίζοντας ότι η λύση βρίσκεται σε κατάλληλο διάστημα τιμών.

Πριν την τελική επίλυση πραγματοποιείται έλεγχος εφικτότητας, όπου εκτιμάται αν για κάποιο εύρος παροχών η μέγιστη δυνατή P_{gen} προσεγγίζει την επιθυμητή ισχύ. Αν η παραγωγή κριθεί μη εφικτή (λόγω ανεπαρκούς καθαρού μανομετρικού ύψους υπό απώλειες), επιστρέφονται μη έγκυρες τιμές (NA) και σχετική ένδειξη.

Τέλος, αφού προσδιοριστεί η παροχή παραγωγής, ο όγκος νερού που διέρχεται στη φάση παραγωγής υπολογίζεται ως:

$$V = Q_{\text{prod}} t_{\text{prod}} 3600 \quad (5.17)$$

(με t_{prod} σε ώρες). Στη συνέχεια οι απαιτούμενες ώρες άντλησης προκύπτουν από:

$$t_{\text{pump}} = \frac{V}{Q_{\text{pump}} 3600} \quad (5.18)$$

Έτσι, το t_{pump} αποτελεί παράγωγο μέγεθος που προκύπτει από την υδραυλική επίλυση και όχι ανεξάρτητο όρισμα εισόδου.

5.5 Προσδιορισμός γεωμετρικών μεγεθών φράγματος βάσει του ρυθμιστικού όγκου (*compute_dam()*)

Η συνάρτηση *compute_tpump()* όπως προαναφέρθηκε υπολογίζει, μεταξύ άλλων των όγκο νερού που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο. Υποθέτοντας ότι οποιαδήποτε φάση λειτουργίας μπορεί να γίνει χωρίς να την διακόψει η άλλη, ο όγκος αυτός τίθεται ως ο ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμιστικός όγκος για την ολοκλήρωση ενός κύκλου.

Η συνάρτηση *compute_dam()* χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό βασικών γεωμετρικών μεγεθών που σχετίζονται με τον άνω ταμιευτήρα και το φράγμα, με είσοδο του ωφέλιμου όγκου αποθήκευσης V_{useful} που προκύπτει από τη λειτουργία του σεναρίου. Σκοπός της είναι να μετατρέψει τον απαιτούμενο ωφέλιμο όγκο σε αντίστοιχες στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα (ΚΣΛ και ΑΣΛ), να υπολογίσει τη στάθμη στέψης και, στη συνέχεια, να εκτιμήσει το ύψος και τον όγκο σώματος του φράγματος, μεγέθη τα οποία αξιοποιούνται στους επόμενους υπολογισμούς κόστους.

5.5.1 Μετατροπή όγκου σε στάθμη μέσω καμπύλης στάθμης-όγκου

Η σύνδεση όγκου-στάθμης υλοποιείται μέσω μιας παραμετρικής καμπύλης ταμιευτήρα δεύτερου βαθμού, της μορφής:

$$V(z) = az^2 + bz + c \quad (5.19)$$

όπου a , b , c είναι συντελεστές που περιγράφουν τη γεωμετρία του ταμιευτήρα. Για δεδομένο όγκο V (σε hm^3), η συνάρτηση επιλύει την αντίστροφη σχέση και υπολογίζει τη στάθμη z . Η επίλυση γίνεται αναλυτικά (λύση δευτεροβάθμιας εξίσωσης), ενώ εφαρμόζεται κατώφλι ελάχιστης στάθμης z_{min} ώστε να αποφεύγονται μη ρεαλιστικές τιμές.

5.5.2 Υπολογισμός κατώτατης-ανώτατης στάθμης λειτουργίας και στάθμης στέψης

Η ΚΣΛ υπολογίζεται με βάση τον νεκρό όγκο V_{dead} . Αρχικά υπολογίζεται η στάθμη που αντιστοιχεί στον νεκρό όγκο μέσω της καμπύλης στάθμης-όγκου και στη συνέχεια η τιμή προσαρμόζεται ώστε να μην είναι μικρότερη από το ελάχιστο υψόμετρο που έχει τεθεί για το έργο. Στο μοντέλο, η ΚΣΛ στρογγυλοποιείται προς τα πάνω σε ακέραιο μέτρο, ώστε να λαμβάνεται μία συντηρητική στάθμη αναφοράς.

Η ΑΣΛ προκύπτει από τον συνολικό λειτουργικό όγκο:

$$V_{\text{oper}} = V_{\text{dead}} + V_{\text{useful}} \quad (5.20)$$

Με τον τρόπο αυτό η ΑΣΛ αντιστοιχεί στη στάθμη πλήρωσης κατά τη λειτουργία, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον νεκρό όσο και τον χρησιμοποιούμενο όγκο αποθήκευσης.

Για τον υπολογισμό του υψομέτρου της στέψης λαμβάνονται υπόψη επιπλέον όγκοι πλημμύρας και το ελεύθερο ύψος ασφάλειας. Συγκεκριμένα, ο συνολικός όγκος αναφοράς για τη στέψη δίνεται ως:

$$V_{\text{flood,total}} = V_{\text{oper}} + V_{\text{flood}} \quad (5.21)$$

και η αντίστοιχη στάθμη υπολογίζεται από την ίδια καμπύλη, στην οποία προστίθεται το freeboard (ύψος ασφάλειας):

$$Z_{\text{crest}} = z(V_{\text{flood,total}}) + \text{freeboard} \quad (5.22)$$

Στο μοντέλο προβλέπεται προαιρετική στρογγυλοποίηση της στάθμης στέψης (στο 0,1 m), για ενιαία παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

5.5.3 Γεωμετρικά μεγέθη φράγματος

Το ύψος φράγματος υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ στάθμης στέψης και υψομέτρου κοιλάδας στον άξονα του φράγματος (z_{valley}), με πρόσθετο περιθώριο:

$$H_f = Z_{\text{crest}} - z_{\text{valley}} + 5 \quad (5.23)$$

Ο πρόσθετος όρος των 5 m αντιστοιχεί σε ένα τυπικό βάθος εκσκαφής για τη θεμελίωση του φράγματος κάτω από το φυσικό έδαφος της κοιλάδας και προστίθεται στο γεωμετρικό ύψος του φράγματος, ώστε το υπολογιζόμενο ύψος να αντανακλά το συνολικό κατασκευαστικό ύψος.

Τέλος, εκτιμάται ο όγκος σώματος φράγματος (m^3) μέσω παραμετρικής σχέσης κλιμάκωσης ως συνάρτηση του ύψους φράγματος (m):

$$V_d = k H_f^p \quad (5.24)$$

όπου k και p είναι συντελεστές που εξαρτώνται από την τυπολογία/παραδοχές του φράγματος. Η εκτίμηση των συντελεστών έχει γίνει από δεδομένα ελληνικών φραγμάτων διαφόρων τύπων, που ελήφθησαν από πρόσφατη ερευνητική έκθεση του ΕΜΠ (Efstratiadis and Sakki, 2025).

Η τιμή μετατρέπεται κατάλληλα σε hm^3 ώστε να είναι συγκρίσιμη με τα υπόλοιπα μεγέθη όγκου που χρησιμοποιούνται στη μελέτη.

Η `compute_dam()` επιστρέφει τα υπολογισμένα επίπεδα (ΚΣΛ, ΑΣΛ, στάθμη στέψης), καθώς και τα βασικά μεγέθη του φράγματος (ύψος H_f και όγκος σώματος V_d), τα οποία χρησιμοποιούνται άμεσα στην επόμενη ενότητα για την εκτίμηση του επενδυτικού κόστους.

Πίνακας 5.1 Συντελεστές εκτίμησης όγκου φράγματος

ΤΥΠΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	k	p
-----------------	---	---

CFRD/ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΟ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ	0,47	3,53
EARTHFILL/ΧΩΜΑΤΙΝΟ	545	1,9
ROCKFILL/ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΟ	3,84	3,16
HARDFILL/ΣΚΛΗΡΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ	11,36	2,55

5.6 Υπολογισμός εσόδων από την Αγορά Επόμενης Ημέρας

Για τον αντλησιοταμιευτικό σταθμό, τα έσοδα υπολογίζονται με βάση το ενεργειακό αρμπιτράζ, δηλαδή την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλότερες τιμές κατά τη φάση της άντλησης και την πώλησή της σε υψηλότερες τιμές κατά τη φάση της παραγωγής. Από τα ωριαία δεδομένα της Αγοράς Επόμενης Ημέρας (DAM) είναι δυνατόν να υπολογιστεί ένα οικονομικό αποτέλεσμα, το οποίο στη συνέχεια αναγάγεται σε ετήσια βάση και κεφαλαιοποιείται για περίοδο πέντε ετών, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο λειτουργίας, με βάση τις ώρες παραγωγής t_{prod} , τις υπολογισμένες ώρες άντλησης t_{pump} καθώς και την εγκατεστημένη ισχύ P .

5.6.1 Σενάρια 1–2: 24ωρη και 48ωρη ευελιξία με ταξινομημένες τιμές

Στα δύο πρώτα σενάρια, η επιλογή των ωρών άντλησης και παραγωγής βασίζεται σε ταξινομημένες τιμές DAM εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού παραθύρου (24 ώρες για το πρώτο σενάριο και 48 ώρες για το δεύτερο). Οι τιμές ανά ημέρα ή ζεύγος διαδοχικών ημερών διατάσσονται σε αύξουσα σειρά και χρησιμοποιούνται οι φθηνότερες ώρες για την άντληση και οι ακριβότερες ώρες για την παραγωγή. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης `compute_total_profit()` (και της αντίστοιχης 48ωρης), η οποία αθροίζει:

- ο κόστος άντλησης ως άθροισμα των t_{pump} φθηνότερων ωριαίων τιμών,
- τα έσοδα παραγωγής ως άθροισμα των t_{prod} ακριβότερων ωριαίων τιμών.

Σε περιπτώσεις κλασματικών ωρών (π.χ. 8,5 h), η συνεισφορά της κλασματικής ώρας υπολογίζεται αναλογικά, εφαρμόζοντας συντελεστή βαρύτητας στο αντίστοιχο οριακό ωριαίο επίπεδο τιμής (π.χ. 0,5 της επόμενης φθηνότερης/ακριβότερης ώρας). Για κάθε ημέρα (ή 48ωρο ζεύγος) το ημερήσιο κέρδος υπολογίζεται ως:

$$\Pi_{\text{day}} = P(\sum_{\text{sell}} \lambda_h - \sum_{\text{buy}} \lambda_h) \quad (5.25)$$

όπου λ_h είναι η ωριαία τιμή DAM και P η ισχύς σε MW. Επιπλέον, εφαρμόζεται υπόθεση μη λειτουργίας σε ζημιογόνες περιόδους, θέτοντας μηδενικό κέρδος όταν προκύπτει αρνητική ημερήσια διαφορά.

5.6.2 Σενάριο 3: Ημερήσια λειτουργία με διαδοχικά ωριαία “blocks”

Η τρίτη περίπτωση δημιουργίας εσόδων από την Αγορά Επόμενης Ημέρας διαφέρει από τις δύο πρώτες, καθώς οι ώρες άντλησης και παραγωγής ορίζονται με διαφορετικό τρόπο. Συνοπτικά, η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση τη μέγιστη δυνατή ημερήσια οικονομική διαφορά τιμών (spread) για δεδομένες ώρες άντλησης t_{pump} και ώρες παραγωγής t_{prod} .

Η προσέγγιση αυτή υλοποιείται μέσω της συνάρτησης `find_best_blocks_by_day()`. Η συνάρτηση αυτή, για κάθε ημέρα, εξετάζει όλα τα πιθανά συνεχόμενα χρονικά μπλοκ ωρών που μπορούν να καλύψουν την περίοδο άντλησης και την περίοδο παραγωγής. Στην πράξη, η

μέγιστη ημερήσια οικονομική διαφορά προκύπτει από έναν συνδυασμό συνεχόμενων ωρών άντλησης και συνεχόμενων ωρών παραγωγής. Για τον λόγο αυτό, για κάθε πιθανό χρονικό μπλοκ, η συνάρτηση υπολογίζει το οικονομικό αποτέλεσμα που μπορεί να προκύψει και επιστρέφει εκείνο που εμφανίζει τη μεγαλύτερη ημερήσια οικονομική διαφορά, η οποία ορίζεται ως:

$$Spread_{day} = (\sum_{sell} \lambda_h - \sum_{buy} \lambda_h) \quad (5.26)$$

όπου λ_h είναι η ωριαία τιμή της DAM.

Το ημερήσιο οικονομικό αποτέλεσμα προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το βέλτιστο ημερήσιο spread με την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού, ενώ αρνητικές τιμές μηδενίζονται, υπό την παραδοχή ότι ο σταθμός δεν λειτουργεί σε ζημιογόνες συνθήκες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ημέρα του εξεταζόμενου χρονικού ορίζοντα και το συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα προκύπτει από το άθροισμα των ημερήσιων κερδών.

Το συνολικό κέρδος προκύπτει από το άθροισμα των 24ωρων ή 48ωρων κερδών και εκφράζεται σε εκατομμύρια ευρώ (MEUR). Στους οικονομικούς υπολογισμούς δύναται να εφαρμοστεί προαιρετικός συντελεστής προσαρμογής (*profit_factor*), ο οποίος λειτουργεί πολλαπλασιαστικά επί του υπολογιζόμενου οικονομικού αποτελέσματος. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τη συνολική κλιμάκωση των εσόδων, επιτρέποντας την προσεγγιστική ενσωμάτωση επιδράσεων της αγοράς ή άλλων παραγόντων που δεν μοντελοποιούνται ρητά, όπως αποκλίσεις μεταξύ ωριαίων spreads και τελικού οικονομικού αποτελέσματος.

Το παραγόμενο μέγεθος αποτελεί το ακαθάριστο κέρδος από την αγορά ενέργειας για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα και χρησιμοποιείται στο επόμενο στάδιο σε συνδυασμό με τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας για την τελική οικονομική αξιολόγηση.

5.7 Εκτίμηση συνολικού κόστους επένδυσης και λειτουργίας (*compute_total_cost()*)

Η βοηθητική και κοινή συνάρτηση *compute_total_cost()* υπολογίζει το συνολικό κόστος ενός αντλησιοταμιευτικού έργου σε επίπεδο σεναρίου, συνδυάζοντας το επενδυτικό κόστος (CAPEX) και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (OPEX). Είσοδοι της συνάρτησης είναι η εγκατεστημένη ισχύς P, το σύνολο παραμέτρων του έργου (params), ενώ απαιτείται επιπλέον η ύπαρξη των αποτελεσμάτων της γεωμετρικής εκτίμησης φράγματος, τα οποία προκύπτουν προηγουμένως από τη *compute_dam()* και περιλαμβάνουν το ύψος φράγματος H_f και τον όγκο σώματος V_d .

Οι παραμετρικές σχέσεις κλιμάκωσης κόστους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, του υδραυλικού συστήματος και του φράγματος βασίζονται σε μεθοδολογία και συντελεστές που έχουν προταθεί στη σχετική τεχνική τεκμηρίωση για έργα υδατικών υποδομών μεγάλης κλίμακας, όπως παρουσιάζονται στο πλαίσιο τεχνικών υπηρεσιών υποστήριξης για την υποβολή επενδυτικών προτάσεων (Efstratiadis & Sakki, 2025).

Αρχικά υπολογίζεται το ακαθάριστο ύψος πτώσης H (m) (σχέση 3.1, αφού υψόμετρα αναφοράς οι ΚΣΛ ταμιευτήρων) και λαμβάνεται το συνολικό μήκος υδραυλικών αγωγών $L_{tot}(m)$, τα οποία χρησιμοποιούνται σε παραμετρικές σχέσεις κλιμάκωσης κόστους. Το κόστος

του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (τουρμπίνα/ηλεκτρικά) εκτιμάται μέσω σχέσης ισχύος (MW) –ύψους(m):

$$C_t = a_1 P^{b_1} H^{g_1} \quad (5.27)$$

όπου $a_1=3.22$, $b_1=0.88$ και $g_1=-0.192$. Το κόστος του υδραυλικού συστήματος (αγωγοί/υδραυλικά έργα) υπολογίζεται αντίστοιχα ως συνάρτηση ισχύος, ύψους και συνολικού μήκους:

$$C_{wt} = 100 a_2 P^{b_2} H^{g_2} L_{tot}^{d_2} \quad (5.28)$$

με $a_2 = 0.86$, $b_2 = 0.885$, $g_2 = -0.238$ και $d_2 = 0.376$.

Το κόστος του φράγματος προκύπτει αποκλειστικά από τα γεωμετρικά μεγέθη που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο, και συγκεκριμένα από το H_f και το V_d , μέσω παραμετρικής σχέσης κλιμάκωσης:

$$C_{dam} = 1000 a H_f^\beta V_d^\gamma \quad (5.29)$$

όπου $\beta = 0,47$ και $\gamma = 0,60$, ενώ οι τιμές του συντελεστή a είναι 4,35 για χωμάτινα φράγματα (earthfill), 5,85 για λιθόρριπτα φράγματα (rockfill), 10,09 για λιθόρριπτα φράγματα με ανάντι πλάκα σκυροδέματος (CFRD) και 3,86 για φράγματα σκληρού επιχώματος (hardfill), αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, τα επιμέρους κατασκευαστικά κόστη αθροίζονται και προσαρμόζονται μέσω του συντελεστή `overheads_factor`, ο οποίος ενσωματώνει τα γενικά έξοδα και το εργολαβικό όφελος που σχετίζονται με τις κατασκευαστικές εργασίες. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζεται ενιαίος συντελεστής προσαύξησης ίσος με 18%, οδηγώντας στον προσδιορισμό του κατασκευαστικού κόστους του έργου (CAPEX).

Ακολούθως, το CAPEX προσαρμόζεται με την εφαρμογή του συντελεστή `contingencies_factor`, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 9% και χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση απρόβλεπτων δαπανών, ώστε να προκύψει η εκτιμώμενη τιμή του συνολικού επενδυτικού κόστους του έργου (MEUR).

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M) αντιστοιχεί στις ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης του έργου. Για την εκτίμησή του χρησιμοποιούνται σχετικές ποσοστιαίες τιμές, με μεταβλητούς συντελεστές για το υδραυλικό/πολιτικό σκέλος του έργου (0,5% του CAPEX/έτος) και για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό(1,5% του CAPEX/έτος). Το O&M υπολογίζεται για τα έτη λειτουργίας, με παράλληλο υπολογισμό του ετήσιου ισοδύναμου κόστους λειτουργίας και συντήρησης (`annual_OM_MEUR`). Το συνολικό κόστος για τη εξεταζόμενη διάταξη, αφού πολλαπλασιαστεί το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης με τα χρόνια λειτουργίας και δώσει το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (OPEX), δίνεται από:

$$C_{total} = CAPEX + OPEX \quad (5.30)$$

Τέλος επιστρέφεται είτε ως μία συνολική τιμή (MEUR) είτε, όταν ζητηθεί, ως αναλυτική διάσπαση επιμέρους τιμών κόστους για την οικονομική αξιολόγηση.

5.8 Οικονομική αξιολόγηση και δείκτες απόδοσης (*evaluate_psp()*)

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται μια οικονομική αξιολόγηση του τελικού σεναρίου των παραμέτρων λειτουργίας. Ο συνδυασμός/σενάριο που επιλέγεται για την αξιολόγηση είναι αυτός με το μέγιστο λόγω ακαθάριστου κέρδους προς κόστους. Η αξιολόγηση αυτή γίνεται μέσω της συνάρτησης *evaluate_psp()*, η οποία χειρίζεται τα καθαρά κέρδη από την αγορά (ετήσια για τα έτη 1–5) και μια εκτίμηση κόστους (CAPEX και O&M), ώστε να διαμορφωθούν οι αντίστοιχες χρηματοροές του έργου. Οι απαιτούμενες εισοδοί είναι οι κρίσιμες οικονομικές παράμετροι του σεναρίου (ισχύς, ώρες άντλησης/παραγωγής, ημερησία ποσότητα και γεωμετρικά μεγέθη του φράγματος) και το διάλυμα των ετήσιων κερδών, το οποίο χρησιμοποιείται εδώ για τη δημιουργία των λειτουργικών χρηματοροών.

Αρχικά, η συνάρτηση ανακτά τις χρονικές παραδοχές της οικονομικής μελέτης, δηλαδή τη διάρκεια κατασκευής T_{constr} , την περίοδο λειτουργίας T_{oper} και το προεξοφλητικό επιτόκιο r . Στη συνέχεια, καλεί τη συνάρτηση *compute_total_cost* για το τρέχον σενάριο, καθώς τα αποτελέσματα για το φράγμα (ύψος H_f και όγκος σώματος V_d). Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι το κόστος του φράγματος και τα πρόσθετα επιμέρους κόστη υπολογίζονται σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του βέλτιστου σεναρίου. Από τη συνολική εκτίμηση κόστους προκύπτουν το συνολικό CAPEX, η συνολική διάρκεια λειτουργίας για το O&M και το ισοδύναμο ετήσιο O&M.

Οι χρηματοροές της κατασκευής θεωρείται ότι κατανέμονται ομοιόμορφα εντός των ετών κατασκευής, γεγονός που σημαίνει ότι το CAPEX κατανέμεται ισόποσα σε T_{constr} ετήσιες αρνητικές χρηματοροές. Για το O&M, οι χρηματοροές που αντιμετωπίζονται ως αρνητικές κατά τη φάση λειτουργίας υπολογίζονται αφαιρώντας το ετήσιο O&M από τα ετήσια κέρδη. Για τα πρώτα πέντε έτη χρησιμοποιούνται τα πραγματικά ετήσια κέρδη από το πενταετές διάλυμα (1–5). Για τα έτη 6 και μετά, ωστόσο, η συνάρτηση χρησιμοποιεί μια προσέγγιση μέσου όρου από τα έτη 1 έως 5 για να επεκτείνει τη χρονική ακολουθία των κερδών.

Από αυτές τις χρηματοροές (cash flows), η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) υπολογίζεται για το επιτόκιο r μέσω της προεξόφλησης κάθε έτους. Στη συνέχεια, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) υπολογίζεται ως το επιτόκιο που καθιστά την NPV των χρηματοροών ίση με μηδέν, μέσω αριθμητικής επίλυσης. Επιπλέον, ο χρόνος αποπληρωμής (payback period) υπολογίζεται ως το έτος στο οποίο η συσσωρευτική χρηματοροή καθίσταται μη αρνητική. Τέλος, για σκοπούς ευαισθησίας, δημιουργείται η καμπύλη NPV για ένα πλέγμα τιμών επιτοκίου, το οποίο απεικονίζει την εξάρτηση της NPV από το προεξοφλητικό επιτόκιο.

Τελικά, η συνάρτηση *evaluate_psp* επιστρέφει πίνακες αποτελεσμάτων που συνοψίζουν όλα τα στοιχεία που αφορούν το βέλτιστο σενάριο (τεχνικά χαρακτηριστικά, κόστη, κέρδη και δείκτες), έναν αναλυτικό πίνακα χρηματοροών και σωρευτικών τιμών, την καμπύλη NPV ως συνάρτηση του επιτοκίου και μια ανάλυση κατανομής κόστους (C_t , C_{wt} , C_{dam} , CAPEX, O&M). Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται στο τελικό αποτέλεσμα και για τη σύγκριση των οικονομικών αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

5.9 Βασικές συναρτήσεις εκτέλεσης και οργάνωσης (master scripts)

Η συνολική εφαρμογή της υπολογιστικής μεθοδολογίας γίνεται μέσω τριών βασικών scripts, τα οποία αντιστοιχούν στα λειτουργικά σενάρια που εξετάζονται:

master_script_24hours(), *master_script_24hours_contiguous_final()* και *master_script_48hours()*. Τα scripts αυτά δεν περιλαμβάνουν νέους υπολογισμούς, αλλά λειτουργούν κυρίως ως μηχανισμοί συντονισμού, οι οποίοι αναλαμβάνουν να οργανώσουν, να ρυθμίσουν και να εκτελέσουν τη συνολική διαδικασία των συναρτήσεων που έχουν ήδη παρουσιαστεί και αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Τα κύρια scripts ξεκινούν με τον καθορισμό των συνολικών παραμέτρων του έργου και την εισαγωγή των δεδομένων της Αγοράς Επόμενης Ημέρας (DAM), προσαρμοσμένων κάθε φορά στη χρονοσειρά που εξετάζεται. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα πλέγμα υπολογισμών για κάθε συνδυασμό εγκατεστημένης ισχύος και ωρών λειτουργίας, μέσα στο οποίο, για κάθε συνδυασμό ανεξάρτητα, εκτελούνται διαδοχικά οι υδραυλικοί υπολογισμοί (*compute_tpump()*), οι γεωμετρικοί προσδιορισμοί (*compute_dam()*) και η διαμόρφωση των εσόδων μαζί με την εκτίμηση του κόστους (*compute_total_cost()*).

Χαρακτηριστικό των βασικών scripts είναι ότι συμπεριλαμβάνουν μηχανισμούς ασφάλειας και ελέγχους, ώστε κάθε υπολογισμός να εκτελείται μόνο εφόσον τα προηγούμενα αποτελέσματα παρέχουν δεδομένα που είναι υπαρκτά και φυσικά αποδεκτά. Για παράδειγμα, απορρίπτονται συνδυασμοί για τους οποίους δεν προκύπτουν εφικτές ώρες άντλησης (μηδενικές ή αυθαίρετες ώρες λόγω όγκου), εμφανίζονται μηδενικοί ή μη ρεαλιστικοί όγκοι ή δεν είναι δυνατόν να συνυπάρξουν συγκεκριμένες υδραυλικές και γεωμετρικές παράμετροι. Οι έλεγχοι αυτοί διασφαλίζουν ότι το πλέγμα των υπολογισμών μπορεί να εφαρμοστεί συνεχώς χωρίς σφάλματα και ότι τα παραγόμενα αποτελέσματα αποτελούν μια εγγενώς αξιόπιστη βάση πληροφορίας, χωρίς να απαιτείται πρόσθετη παρέμβαση από τον χρήστη.

Τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα πλέγματος (data frame), στον οποίο περιλαμβάνονται τόσο οι τεχνικές παράμετροι (ισχύς, ώρες άντλησης και παραγωγής, όγκοι και γεωμετρικά χαρακτηριστικά) όσο και οι σημαντικότεροι οικονομικοί δείκτες (συνολικά έσοδα, συνολικό κόστος, καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα, λόγος κόστους προς έσοδα και IRR). Μέσω ενός κριτηρίου επιλογής, κάθε master script επιλέγει το βέλτιστο σύνολο λειτουργικών παραμέτρων, πάνω στο οποίο πραγματοποιείται στη συνέχεια η οικονομική αξιολόγηση με τη συνάρτηση *evaluate_psp()*.

Τελικά, όλα τα αποτελέσματα καταγράφονται με ενιαίο τρόπο μέσω εξαγωγής σε αρχεία Excel, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο συνοπτικές παρουσιάσεις όλων των σεναρίων όσο και ξεχωριστά φύλλα με αναλυτική οικονομική ανάλυση του επιλεγμένου βέλτιστου συνδυασμού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται μια σαφής καταγραφή των αποτελεσμάτων, ενώ τα master scripts λειτουργούν ως το τελικό συνδετικό στοιχείο ανάμεσα στη θεωρητική υπολογιστική μεθοδολογία και τα εμπειρικά αποτελέσματα για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

6 ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

6.1 Εισαγωγή και πλαίσιο ανάλυσης αποτελεσμάτων

Το παρόν κεφάλαιο εισάγει και παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της υπολογιστικής μεθοδολογίας, για την πραγματοποίηση μιας τεχνοοικονομικής ανάλυσης ενός πραγματικού έργου αντλησιοταμίευσης, το οποίο βρίσκεται υπό σχεδιασμό. Το έργο που αποτελεί τη βάση της συγκεκριμένης τεχνοοικονομικής ανάλυσης είναι το ΥΗΣ Σφηκιάς, το οποίο χρησιμοποιείται ως έργο αναφοράς για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά έργων αντλησιοταμίευσης όταν λειτουργούν ως συμμετέχοντες στην Αγορά Επόμενης Ημέρας.

Η τεχνοοικονομική ανάλυση πραγματοποιείται για ένα σύνολο λειτουργικών σεναρίων, τα οποία ορίζονται από διαφορετικούς συνδυασμούς εγκατεστημένης ισχύος και διάρκειας παραγωγής και άντλησης. Οι ίδιοι υδραυλικοί και γεωμετρικοί περιορισμοί εφαρμόζονται στην αξιολόγηση όλων των σεναρίων, όπως αυτοί έχουν καθοριστεί στα Κεφάλαια 3 και 5, διασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους και ότι οι εξεταζόμενες λύσεις είναι τεχνικά εφικτές.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται με σαφή και δομημένο τρόπο. Αρχικά, γίνεται παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Οι παράμετροι αυτές αποτελούν τις τιμές εισόδου του έργου αναφοράς και καθορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες εκτελούνται οι υπολογισμοί των αποτελεσμάτων, ενώ συγκεντρώνονται στη συνάρτηση `make_project_params`. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια, με έμφαση στον προσδιορισμό του συνδυασμού εγκατεστημένης ισχύος και διάρκειας λειτουργίας που μεγιστοποιεί την οικονομική απόδοση του έργου.

Ακολουθεί σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων, κατά τις οποίες συνοψίζονται βασικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις, ενώ εξετάζονται επιλεγμένες τεχνικές παράμετροι ως προς την επίδρασή τους στα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό, το παρόν κεφάλαιο συνδέει τη λογική ακολουθία της υπολογιστικής ανάλυσης με τα συμπεράσματα που διαμορφώνονται και αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 7.

6.2 Συνοπτική περιγραφή περιοχής μελέτης έργου αναφοράς

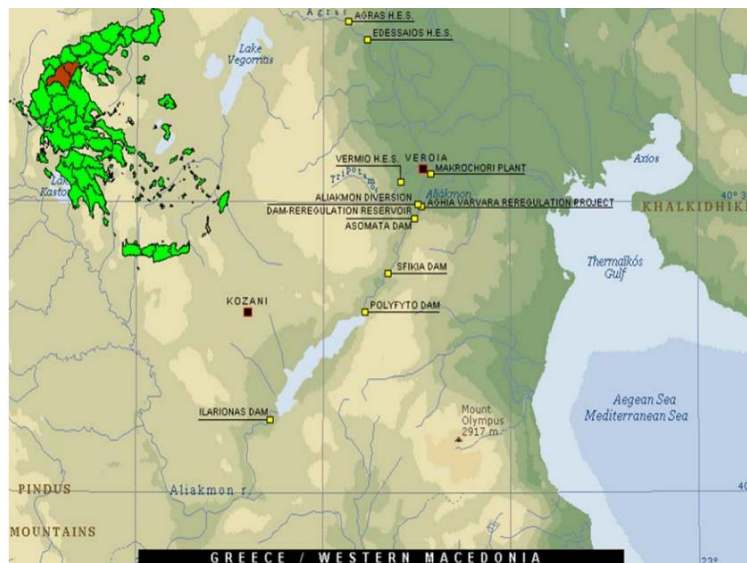
Το έργο αναφοράς είναι το υπό σχεδιασμό έργο «Αντλησιοταμίευσης μέγιστης ισχύς έγχυσης 475 MW και μέγιστης ισχύος απορρόφησης 448MW, στη θέση «ταμιευτήρας ΥΗΣ Σφηκιάς (Μπράβας)». Η περιοχή μελέτης του έργου υπάγεται διοικητικά στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και πιο συγκεκριμένα βρίσκεται στον Νομό Ημαθίας, στις όχθες του ποταμού Αλιάκμονα.

Ο κάτω ταμιευτήρας του έργου είναι αυτός που δημιουργείται από το φράγμα Σφηκιάς, ενώ ο άνω βρίσκεται στην λεκάνη που διαμορφώνεται μεταξύ των θέσεων-υψωμάτων Μπράβας και Κωστή Ράχη, 1,6 km νοτιοδυτικά του οικισμού της Σφηκιάς. Ο Σταθμός Παραγωγής-Αντλησης θα κατασκευαστεί στην όχθη του ταμιευτήρα του ΥΗΣ Σφηκιάς, κατάντη και ανατολικά από το νοτιοανατολικό τμήμα της Άνω Δεξαμενής. Στην εικόνα 6.1 φαίνονται οι παραπάνω διατάξεις.



Εικόνα 6.1 Θέση άνω ταμιευτήρα και σταθμού παραγωγής-άντλησης. Πηγή: Google Earth

Σε γενικότερο πλαίσιο, κατά μήκος του ποταμού Αλιάκμονα έχει κατασκευαστεί μια σειρά τεχνητών ταμιευτήρων, καθώς ο ποταμός αποτελεί έναν από τους κυριότερους υδατικούς πόρους της Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας. Οι ταμιευτήρες (σε υδρολογική σειρά) είναι του Ιλαρίωνα, Πολυφύτου, της Σφηκιάς, των Ασωμάτων, της Αγ. Βαρβάρας και του Ιλαρίωνα και είναι έργα πολλαπλού σκοπού, καλύπτοντας ζητήσεις όπως είναι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η άρδευση, η ύδρευση, αλλά παρέχοντας και αντιπλημμυρική προστασία στην περιοχή. Οι θέσεις των αντίστοιχων φραγμάτων φαίνονται στην Εικόνα 3.



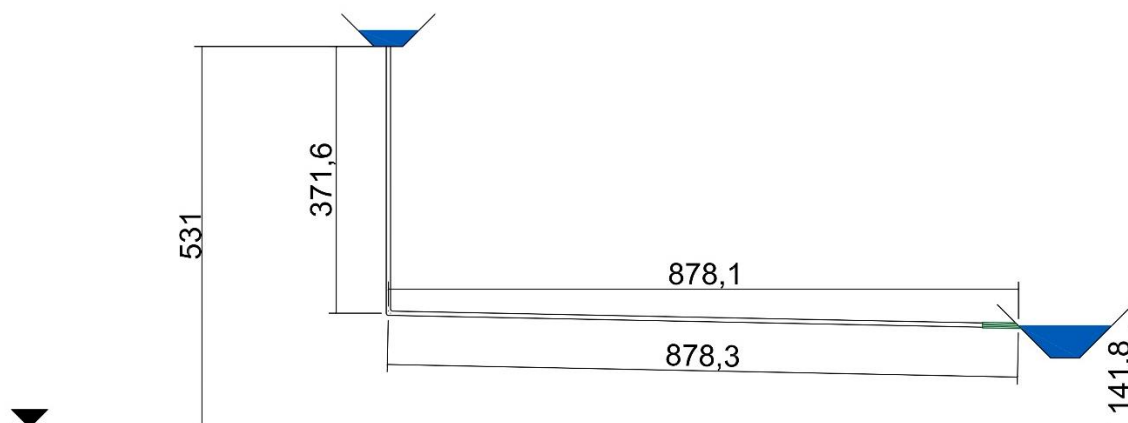
Εικόνα 6.2 Θέσεις ΥΗΕ της ΔΕΗ στον ποταμό Αλιάκμονα (Πηγή: Καραγιαννίδης και Παπαϊωάννου, 2008).

6.3 Συγκεντρωτικά αριθμητικά δεδομένα παραμέτρων εισόδου

Τα αριθμητικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο παρόν υποκεφάλαιο δεν έχουν ενιαία προέλευση, αλλά προκύπτουν από συνδυασμό έργο-ειδικών χαρακτηριστικών και τυπικών τεχνικών παραδοχών, όπως συνηθίζεται σε μελέτες αξιολόγησης.

Συγκεκριμένα, ένα μέρος των παραμέτρων αντλείται άμεσα από τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του έργου αναφοράς της Σφηκιάς ή από εύλογες προσεγγίσεις

αυτών (π.χ. υψομετρικές στάθμες, διαθέσιμος όγκος ταμιευτήρα, βασική γεωμετρία αγωγών). Οι παράμετροι αυτές αποτυπώνουν τη φυσική και χωρική διαμόρφωση του έργου και θεωρούνται αντιπροσωπευτικές της συγκεκριμένης θέσης. Παρακάτω στην Εικόνα 6.3 φαίνεται προσεγγιστικά η χωρική διαμόρφωση του έργου.



Εικόνα 6.3 Σκαρίφημα τομής του έργου αναφοράς (μονάδα μέτρησης το μέτρο)

Αντίθετα, ορισμένες παράμετροι υιοθετούνται ως τυπικές ή σχεδόν σταθερές τεχνικές παραδοχές, ανεξάρτητες του συγκεκριμένου έργου, όπως οι φυσικές σταθερές, το κινηματικό ιξώδες του νερού, καθώς και συντελεστές που αφορούν τη γενικευμένη υδραυλική και ηλεκτρομηχανολογική συμπεριφορά του συστήματος. Οι τιμές αυτές επιλέγονται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και την καθιερωμένη πρακτική προκαταρκτικών μελετών, με στόχο τη διατήρηση της συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων.

Φυσικές σταθερές και υδραυλικές παράμετροι

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Πυκνότητα νερού (ρ)	1000	kg/m ³
Επιτάχυνση βαρύτητας (g)	9.81	m/s ²
Συνολική απόδοση συστήματος (η)	0.90	–
Κινηματικό ιξώδες νερού (ν)	$1.1 \cdot 10^{-6}$	m ² /s

Υψομετρικά δεδομένα και στάθμες

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Ελάχιστη στάθμη άνω ταμιευτήρα (z_{\min})	531	m
Στάθμη αναφοράς άνω ταμιευτήρα (z_{upper})	531	m
Στάθμη κάτω ταμιευτήρα (z_{lower})	141.8	m
Υψόμετρο πυθμένα κοιλάδας στον άξονα φράγματος	525	m

Γεωμετρία αγωγών και απώλειες

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Διάμετρος κύριου αγωγού (D_1)	6.0	m
Διάμετρος κλάδων (D_2)	2.0	m
Κλίση κύριου αγωγού	0.02	–
Οριζόντιο μήκος αγωγού	878.14	m
Κατακόρυφη απόσταση	371.6	m
Μήκος κλάδων μετά τη διακλάδωση	50	m
Συνολικό ισοδύναμο μήκος αγωγών (L_{tot})	1299.74	m
Τραχύτητα κύριου αγωγού (k_s)	0.0015	m
Τραχύτητα κλάδων (k_{s2})	0.0010	m
Τοπικές απώλειες πριν τη διακλάδωση (K_1)	1.0	–
Τοπικές απώλειες μετάβασης $D_1 \rightarrow D_2$ (K_2)	0.373	–

Δεδομένα ταμιευτήρα και λειτουργικοί περιορισμοί

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Νεκρός όγκος	0.06	hm ³
Πλημμυρικός όγκος	0.28	hm ³
Ύψος ασφάλειας (freeboard)	1.0	m

Η καμπύλη στάθμης-όγκου του άνω ταμιευτήρα περιγράφεται από τη σχέση:

$$V(z) = az^2 + bz + c \quad (6.1)$$

με:

- $a = 0.0068$,
- $b = -7.0881$,
- $c = 1846.6$,

και ελάχιστη έγκυρη στάθμη $z = 525$ m.

Παράμετροι φράγματος και διάρκειες έργου

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος φράγματος	earthfill
Έτη κατασκευής	5

Παράμετρος	Τιμή
Έτη λειτουργίας	30

Οικονομικές και λοιπές σταθερές παραδοχές

Παράμετρος	Τιμή
Συντελεστής γενικών εξόδων	1.18
Συντελεστής απροβλέπτων	1.09
Ετήσιο O&M (υδραυλικά/πολιτικά)	0.005
Ετήσιο O&M (H/M εξοπλισμός)	0.015
Προεξοφλητικό επιτόκιο	0.05
Πλέγμα επιτοκίων	0–0.20 (βήμα 0.01)
Συντελεστής καθαρού κέρδους	0.85

Πλέγμα εξεταζόμενων σεναρίων

Παράμετρος	Τιμή
Ώρες παραγωγής	2–9 h (βήμα 0.5 h)
Εγκατεστημένη ισχύς	100–1000 MW (βήμα 10 MW)

6.4 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης

Για καθένα από τα τρία εξεταζόμενα σενάρια εφαρμόστηκε αξιολόγηση όλων των συνδυασμών εγκατεστημένης ισχύος και ωραρίου λειτουργίας που ορίζονται από το παραπάνω πλέγμα. Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του οικονομικά αποδοτικότερα συνδυασμού και παράλληλα τεχνικά αποδεκτού. Ως βασικός δείκτης βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ο λόγος κέρδος κατά την πενταετία /συνολικό κόστος του έργου, ενώ για το βέλτιστο συνδυασμό υπολογίζονται και άλλα οικονομικά στοιχεία.

6.4.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σεναρίου 24ωρης λειτουργίας

Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί από τη διαδικασία για το σενάριο 24ωρης λειτουργίας παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα 6.1, μαζί με άλλα χρήσιμα παραγόμενα μεγέθη.

Πίνακας 6.1 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 24ωρης λειτουργίας

Ωρες άντλησης (h)	Ωρες παραγωγής (h)	Ισχύς (MW)	Συνολικό Κέρδος 5ετίας (MEUR)	Συνολικό Κόστος (MEUR)	Κέρδος/Κόστος	IRR	V ωφέλιμο (hm ³)	ΑΣΛ (m)	Στέψη (m)
8,86	7	360	228,667	409,157	0,559	0,102	2,68	543,02	544,9
8,85	7	350	223,110	399,269	0,559	0,102	2,61	542,76	544,7
8,84	7	340	217,484	389,270	0,559	0,102	2,53	542,5	544,4
8,88	7	370	234,153	419,094	0,559	0,102	2,76	543,28	545,2
8,89	7	380	239,566	428,921	0,559	0,102	2,84	543,54	545,4
8,83	7	330	211,794	379,316	0,558	0,102	2,45	542,24	544,2
8,90	7	390	244,907	438,799	0,558	0,102	2,91	543,79	545,7
8,82	7	320	206,039	369,250	0,558	0,102	2,38	541,97	543,9
8,92	7	400	250,172	448,568	0,558	0,101	2,99	544,04	545,9
8,81	7	310	200,222	359,226	0,557	0,101	2,30	541,7	543,7

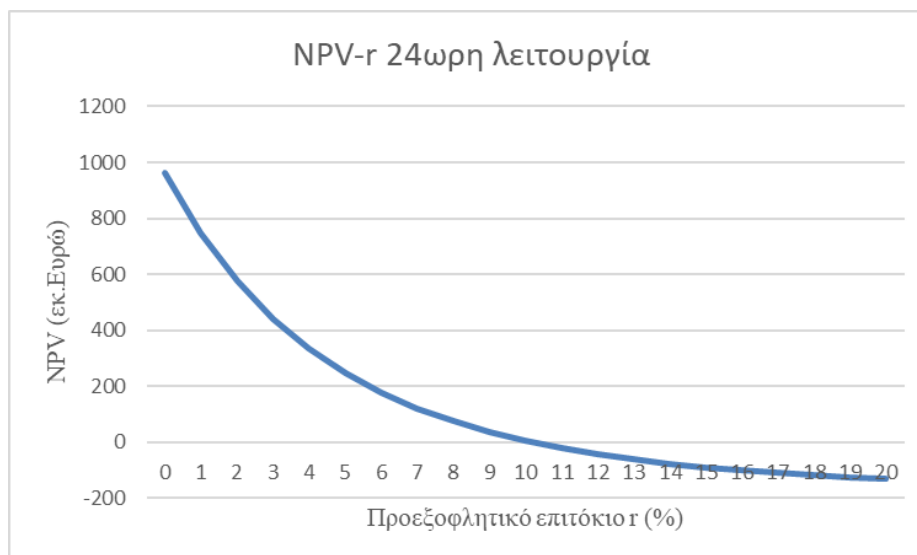
Ο βέλτιστος συνδυασμός που προέκυψε για το σενάριο 24ωρης λειτουργίας αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ **360 MW**, διάρκεια παραγωγής **7 h** και διάρκεια άντλησης **8.86 h**. Για τη συγκεκριμένη διάταξη, ο απαιτούμενος ημερήσιος όγκος αντλησιοταμίευσης ανέρχεται σε **2.68 hm³**, ενώ ο όγκος του φράγματος που προκύπτει από τη γεωμετρική προσαρμογή ισούται με **0.245 hm³** ύψους 24,9 m.

Το συνολικό επενδυτικό κόστος του έργου εκτιμάται σε **317.5 εκ. Ευρώ**, συμπεριλαμβανομένων γενικών εξόδων και απροβλέπτων, ενώ το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανέρχεται σε **3.05 εκ. Ευρώ**. Το μέσο ετήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα κατά τη φάση λειτουργίας υπολογίζεται σε **45.7 εκ. Ευρώ**.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και για προεξοφλητικό επιτόκιο $r = 5\%$, η καθαρή παρούσα αξία (NPV) του έργου ανέρχεται σε **247.5 εκ. Ευρώ**, ενώ ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) υπολογίζεται σε **10.17%**. Ο χρόνος αποπληρωμής του έργου εκτιμάται σε **13 έτη**. Η ανάλυση των χρηματοροών (cash flows) και η μεταβολή της NPV ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο (r) παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2 και στην εικόνα 6.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.2 Ταμειακές Ροές και ΚΠΑ ($r = 5\%$) για τον βέλτιστο συνδυασμό του σεναρίου 24ωρης λειτουργίας

Έτος	Ροή (MEUR)	Συσσωρευτική Ροή (MEUR)	Παρούσα Αξία (MEUR)	Συσσωρευτική ΠΑ (MEUR)
1	-63,5	-63,5	-63,5	-63,5
2	-63,5	-127,0	-60,5	-124,0
3	-63,5	-190,5	-57,6	-181,6
4	-63,5	-254,0	-54,9	-236,4
5	-63,5	-317,5	-52,2	-288,7
6	11,1	-306,4	8,7	-280,0
7	50,3	-256,1	37,6	-242,4
8	40,5	-215,6	28,8	-213,7
9	47,3	-168,4	32,0	-181,7
10	64,2	-104,1	41,4	-140,3
11	42,7	-61,4	26,2	-114,1
12	42,7	-18,8	25,0	-89,1
13	42,7	23,9	23,8	-65,4
14	42,7	66,6	22,6	-42,7
15	42,7	109,3	21,6	-21,2
16	42,7	151,9	20,5	-0,6
17	42,7	194,6	19,6	18,9
18	42,7	237,3	18,6	37,5
19	42,7	280,0	17,7	55,3
20	42,7	322,7	16,9	72,2
21	42,7	365,3	16,1	88,2
22	42,7	408,0	15,3	103,6
23	42,7	450,7	14,6	118,2
24	42,7	493,4	13,9	132,0
25	42,7	536,1	13,2	145,3
26	42,7	578,7	12,6	157,9
27	42,7	621,4	12,0	169,9
28	42,7	664,1	11,4	181,3
29	42,7	706,8	10,9	192,2
30	42,7	749,5	10,4	202,6
31	42,7	792,1	9,9	212,5
32	42,7	834,8	9,4	221,9
33	42,7	877,5	9,0	230,8
34	42,7	920,2	8,5	239,3
35	42,7	962,9	8,1	247,5



Εικόνα 6.4 Διαγραμματική απεικόνιση σχέσης NPV-r για το καλύτερο συνδυασμό του σεναρίου 48ωρης λειτουργίας

6.4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σεναρίου 48ωρης λειτουργία

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για το δεύτερο σενάριο, το οποίο διαφοροποιείται από το σενάριο 24ωρης λειτουργίας ως προς το ωράριο λειτουργίας. Οι δέκα επικρατέστεροι συνδυασμοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 48ωρης λειτουργίας

Ώρες άντλησης (h)	Ώρες παραγωγής (h)	Ισχύς (MW)	Συνολικό Κέρδος 5ετίας (MEUR)	Συνολικό Κόστος (MEUR)	Κέρδος/Κόστος	IRR	V ωφέλιμο (hm ³)	ΑΣΛ (m)	Στέψη (m)
11,54	9	440	265,728	489,749	0,543	0,099	4,25	547,78	549,5
11,56	9	450	270,958	499,485	0,543	0,099	4,35	548,06	549,8
11,52	9	430	260,442	480,075	0,543	0,099	4,15	547,50	549,3
11,50	9	420	255,100	470,290	0,542	0,099	4,05	547,22	549
11,59	9	460	276,130	509,197	0,542	0,099	4,45	548,34	550,1
11,48	9	410	249,705	460,479	0,542	0,099	3,95	546,93	548,7
11,61	9	470	281,241	518,887	0,542	0,099	4,56	548,62	550,4
11,47	9	400	244,259	450,642	0,542	0,099	3,85	546,64	548,4
11,63	9	480	286,291	528,465	0,542	0,099	4,66	548,89	550,6
11,45	9	390	238,762	440,864	0,542	0,099	3,75	546,35	548,2

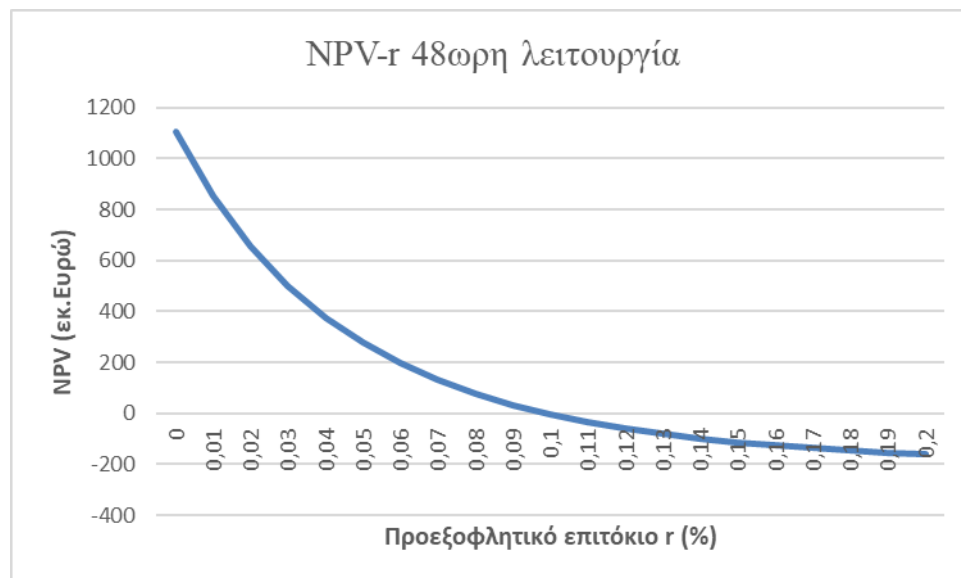
Ο βέλτιστος συνδυασμός αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ **440 MW**, διάρκεια παραγωγής **9** ώρες και άντλησης **11,54**. Για την περίπτωση αυτή απαιτείται άνω ταμιευτήρας χωρητικότητας **4,25 hm³** και φράγμα ύψος **29,5** μέτρων και όγκου **0,338 hm³**.

Για τον συνδυασμό αυτό, το συνολικό επενδυτικό κόστος ανέρχεται σε **380,2 εκ. Ευρώ**, ενώ το μέσο ετήσιο καθαρό αποτέλεσμα κατά την λειτουργία υπολογίζεται στα **49,5 εκ. Ευρώ**. Για προεξοφλητικό επιτόκιο $r=5\%$, η NPV ισούται με **276,74 εκ. Ευρώ**, ενώ ο IRR με **9,9%**. Ο χρόνος αποπληρωμής του έργου εκτιμάται σε **13 έτη**. Η ανάλυση των χρηματοροών και η μεταβολή της NPV ως προς το προεξοφλητικό επιτόκιο (r) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4 και στην Εικόνα 6.5 αντίστοιχα.

Πίνακας 6.4 Ταμειακές Ροές και ΚΠΑ ($r = 5\%$) για τον βέλτιστο συνδυασμό του σεναρίου 48ωρης λειτουργίας

Έτος	Ροή (MEUR)	Συσσωρευτική Ροή (MEUR)	Παρούσα Αξία (MEUR)	Συσσωρευτική ΠΑ (MEUR)
1	-76,05	-76,05	-76,05	-76,05
2	-76,05	-152,101	-72,429	-148,479
3	-76,05	-228,151	-68,98	-217,459
4	-76,05	-304,201	-65,695	-283,154
5	-76,05	-380,251	-62,567	-345,721
6	14,384	-365,867	11,27	-334,451
7	62,439	-303,428	46,593	-287,858
8	47,797	-255,632	33,968	-253,889
9	54,402	-201,23	36,821	-217,068
10	68,459	-132,772	44,129	-172,939
11	49,496	-83,276	30,386	-142,553
12	49,496	-33,78	28,939	-113,614
13	49,496	15,716	27,561	-86,053
14	49,496	65,212	26,249	-59,804
15	49,496	114,708	24,999	-34,805
16	49,496	164,204	23,808	-10,997
17	49,496	213,7	22,675	11,678
18	49,496	263,196	21,595	33,273
19	49,496	312,692	20,567	53,839
20	49,496	362,188	19,587	73,427
21	49,496	411,684	18,655	92,081
22	49,496	461,18	17,766	109,847
23	49,496	510,676	16,92	126,768
24	49,496	560,172	16,114	142,882
25	49,496	609,668	15,347	158,229
26	49,496	659,163	14,616	172,845
27	49,496	708,659	13,92	186,766
28	49,496	758,155	13,257	200,023
29	49,496	807,651	12,626	212,649
30	49,496	857,147	12,025	224,674
31	49,496	906,643	11,452	236,126
32	49,496	956,139	10,907	247,033
33	49,496	1005,635	10,388	257,421

34	49,496	1055,131	9,893	267,314
35	49,496	1104,627	9,422	276,735



Εικόνα 6.5 Διαγραμματική απεικόνιση σχέσης NPV-r για το καλύτερο συνδυασμό του σεναρίου 48ωρης λειτουργίας

6.4.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για σενάριο 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για το σενάριο 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες παραγωγής και άντλησης. Σε αντίθεση με το βασικό σενάριο 24ωρης λειτουργίας, στο συγκεκριμένο σενάριο οι ώρες λειτουργίας επιβάλλεται να είναι χρονικά συνεχόμενες εντός του ημερήσιου κύκλου. Μάλιστα η μεγιστοποίηση των οικονομικών δεικτών προκύπτει αν θεωρηθεί πως η πρώτη ώρα κάθε μέρας είναι η έβδομη (εξήγηση ακολουθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο).

Οι επικρατέστεροι συνδυασμοί που προέκυψαν από τη διαδικασία αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5, μαζί με τα αντίστοιχα παραγόμενα τεχνικά και οικονομικά μεγέθη. Σημειώνεται πως ο υπολογισμός του IRR σε αυτό το σενάριο δεν γίνεται για κάθε συνδυασμό, για μείωση του ήδη μεγάλου υπολογιστικού φόρτου.

Πίνακας 6.5 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες

Ώρες άντλησης (h)	Ώρες παραγωγής (h)	Ισχύς (MW)	Συνολικό Κέρδος 5ετίας (MEUR)	Συνολικό Κόστος (MEUR)	Κέρδος/Κόστος	V ωφέλιμο (hm ³)	ΑΣΛ (m)	Στέψη (m)
7,00	5,5	390	207,367	437,156	0,474	2,23	541,66	543,6
6,99	5,5	380	202,693	427,366	0,474	2,23	541,44	543,4
6,97	5,5	370	197,969	417,547	0,474	2,17	541,22	543,2
6,96	5,5	360	193,195	407,697	0,474	2,11	540,99	543
6,95	5,5	350	188,374	397,816	0,474	2,05	540,77	542,8

6,95	5,5	340	183,507	387,902	0,473	1,99	540,54	542,6
6,94	5,5	330	178,598	377,955	0,473	1,93	540,31	542,4
6,93	5,5	320	173,646	367,901	0,472	1,87	540,08	542,1
6,92	5,5	310	168,652	357,884	0,471	1,81	539,85	541,9
6,91	5,5	300	163,616	347,830	0,470	1,75	539,61	541,7

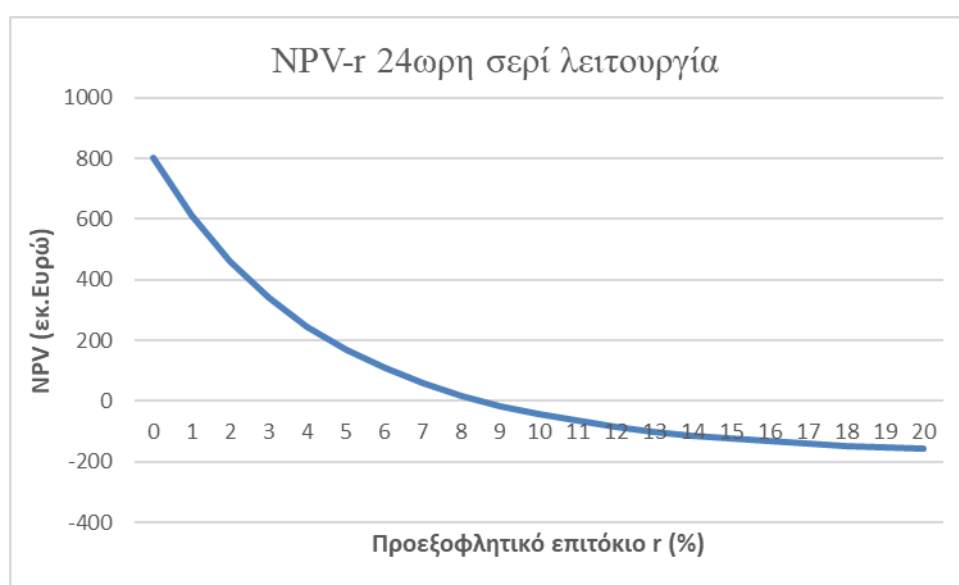
Ο βέλτιστος συνδυασμός αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ **390 MW**, διάρκεια παραγωγής **5,5 h** και διάρκεια άντλησης **7 h**. Για τη συγκεκριμένη διάταξη, ο απαιτούμενος ωφέλιμος όγκος άνω ταμιευτήρα ανέρχεται στα **2,23 hm³**, ενώ το ύψος και ο όγκος φράγματος στα **23,6 μέτρα** και **0,22 hm³** αντίστοιχα.

Το συνολικό επενδυτικό κόστος του έργου εκτιμάται σε 339,03 εκ. Ευρώ, ενώ το μέσο ετήσιο καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα υπολογίζεται σε 38,063 εκ. Ευρώ (μετά τα κόστη συντήρησης). Για προεξοφλητικό επιτόκιο 5%, η καθαρή παρούσα αξία NPV ανέρχεται σε 169,468 εκ. Ευρώ, ενώ IRR υπολογίζεται σε 8,51 %. Ο χρόνος αποπληρωμής εκτιμάται στα 14 έτη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 6.6 και Εικόνα 6.6.

Πίνακας 6.6 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες

Έτος	Ροή (MEUR)	Συσσωρευτική Ροή (MEUR)	Παρούσα Αξία (MEUR)	Συσσωρευτική ΠΑ (MEUR)
1	-67,806	-67,806	-67,806	-67,806
2	-67,806	-135,612	-64,577	-132,383
3	-67,806	-203,418	-61,502	-193,885
4	-67,806	-271,224	-58,573	-252,459
5	-67,806	-339,03	-55,784	-308,243
6	8,793	-330,238	6,889	-301,354
7	41,879	-288,359	31,251	-270,103
8	35,171	-253,188	24,995	-245,108
9	44,281	-208,907	29,971	-215,137
10	60,191	-148,716	38,8	-176,337
11	38,063	-110,653	23,367	-152,97
12	38,063	-72,59	22,255	-130,715
13	38,063	-34,527	21,195	-109,52
14	38,063	3,536	20,186	-89,334
15	38,063	41,599	19,224	-70,11
16	38,063	79,662	18,309	-51,801
17	38,063	117,725	17,437	-34,364
18	38,063	155,788	16,607	-17,757
19	38,063	193,851	15,816	-1,941
20	38,063	231,914	15,063	13,121
21	38,063	269,977	14,346	27,467
22	38,063	308,04	13,662	41,129
23	38,063	346,102	13,012	54,141
24	38,063	384,165	12,392	66,533
25	38,063	422,228	11,802	78,335

26	38,063	460,291	11,24	89,575
27	38,063	498,354	10,705	100,28
28	38,063	536,417	10,195	110,475
29	38,063	574,48	9,71	120,185
30	38,063	612,543	9,247	129,432
31	38,063	650,606	8,807	138,239
32	38,063	688,669	8,388	146,627
33	38,063	726,732	7,988	154,615
34	38,063	764,795	7,608	162,223
35	38,063	802,858	7,245	169,468



Εικόνα 6.6 Διαγραμματική απεικόνιση σχέσης NPV-r για το καλύτερο συνδυασμό του σεναρίου 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες

6.5 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων λειτουργικών σεναρίων

Στο παρόν υποκεφάλαιο πραγματοποιείται συνοπτική συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα εξεταζόμενα λειτουργικά σενάρια, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 6.3.1–6.3.3. Η σύγκριση βασίζεται στους βέλτιστους συνδυασμούς κάθε σεναρίου και στα αντίστοιχα τεχνικά και οικονομικά μεγέθη (Πίνακας 6.7), με στόχο την ανάδειξη κοινών τάσεων, ουσιωδών διαφοροποιήσεων και της επίδρασης της χρονικής ευελιξίας στη συνολική αποδοτικότητα του έργου.

Πίνακας 6.7 Βέλτιστα αποτελέσματα τεχνοοικονομικής αξιολόγησης ανά σενάριο λειτουργίας

ΣΕΝΑΡΙΟ	Ωρες άντλησης (h)	Ωρες παραγωγής (h)	Ισχύς (MW)	V ωφέλιμο (hm ³)	Vd φράγματος (hm ³)	CAPEX (εκ. Ευρώ)	O&M (εκ.Ευρώ/έτος)	Μέσα ετήσια έσοδα	NPV (εκ.Ευρώ για r=5%)	IRR (%)	Χρόνος αποπληρωμής (έτη)
24h	8,86	7	360	2,7	0,245	317,5	3,1	45,7	247,5	10,2	13
48h	11,54	9	440	4,3	0,338	380,3	3,7	53,1	276,7	9,9	13
24h συνεχ.	7	5,5	390	2,2	0,22	339,0	3,3	41,3	169,5	8,5	14

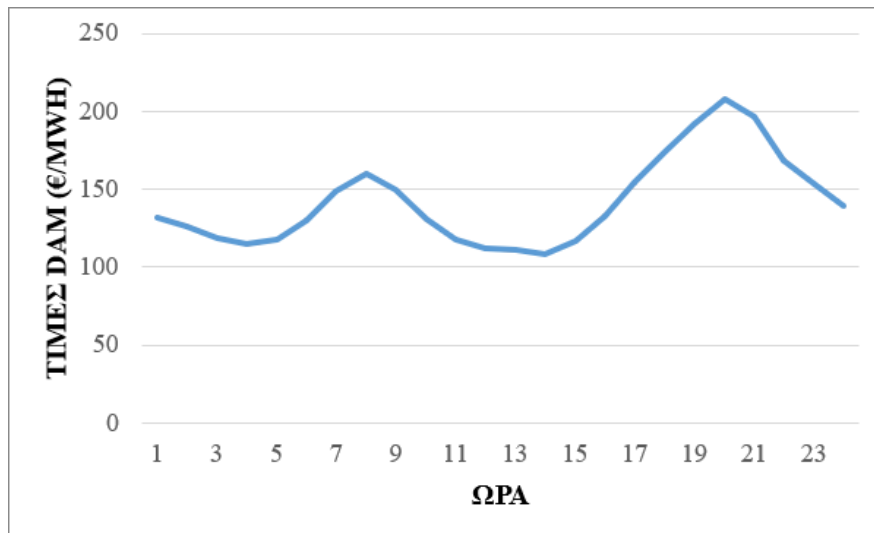
Αρχικά παρατηρείται ότι, για το εξεταζόμενο έργο, οι προκύπτοντες οικονομικοί δείκτες είναι ιδιαίτερα θετικοί. Η διαπίστωση αυτή είναι σημαντική αν ληφθεί υπόψη ότι η λειτουργία του έργου στην πράξη αναμένεται να διαφοροποιείται από την παρούσα προσομοίωση επιπέδου προμελέτης. Για τον λόγο αυτό έχουν υιοθετηθεί συντηρητικές παραδοχές (π.χ. περιορισμένη διάρκεια ζωής, συντελεστές εξομάλυνσης/απόδοσης κ.ά.). Παρ' όλα αυτά, ακόμη και στο πιο περιοριστικό σενάριο των συνεχόμενων ωρών, οι τιμές IRR = 8,51% και NPV = 169,5 εκ. € για r = 5% υποδεικνύουν έργο με έντονη οικονομική δυναμική. Συγκριτικά, τα δύο «ευέλκτα» σενάρια (24h και 48h) ενισχύουν περαιτέρω τα οικονομικά μεγέθη, καθώς επιτρέπουν καλύτερη αντιστοίχιση άντλησης–παραγωγής με τις ωριαίες διακυμάνσεις τιμών.

Στα δύο πρώτα σενάρια είναι αναμενόμενη, αλλά επισημάνσιμη, η πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του IRR και του λόγου κέρδους/κόστους στην πρώτη πενταετία. Η συσχέτιση αυτή (η οποία με χρήση υπολογιστικού φύλλου υπολογίζεται άνω του 0,99) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς τεκμηριώνει ότι ο δείκτης κέρδους/κόστους μπορεί να λειτουργήσει ως αξιόπιστο μέτρο κατάταξης των λύσεων, γεγονός που δικαιολογεί και την επιλογή μη υπολογισμού του IRR στο τρίτο σενάριο για μείωση του ήδη αυξημένου υπολογιστικού φόρτου.

Ως προς την εγκατεστημένη ισχύ, οι βέλτιστες λύσεις δεν εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις (360 MW στο βασικό 24ωρο, 440 MW στο 48ωρο και 390 MW στο σενάριο συνεχόμενων ωρών). Η αύξηση της ισχύος στο 48ωρο σενάριο συνδέεται με την απαίτηση για μεγαλύτερη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα, λόγω των περισσότερων ωρών λειτουργίας. Η σχετική σύγκλιση των τιμών ισχύος υποδηλώνει ότι η εγκατεστημένη ισχύς καθορίζεται κυρίως από τη γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου και τους περιορισμούς του, παρά από το ωράριο λειτουργίας. Παράλληλα, το γεγονός ότι οι βέλτιστες τιμές απέχουν σημαντικά από τα άκρα του εξεταζόμενου εύρους ισχύος αναδεικνύει τη μη μονοτονική σχέση ισχύος–οικονομικής απόδοσης: η αύξηση της ισχύος δεν σημαίνει μόνο αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής, αλλά και αύξηση του κόστους και των υδραυλικών απωλειών, ενώ πολύ χαμηλή ισχύς περιορίζει την αξιοποίηση του arbitrage.

Από καθαρά οικονομική σκοπιά, παρατηρείται ότι το σενάριο 48ωρης λειτουργίας τείνει να μεγιστοποιεί τα απόλυτα οικονομικά μεγέθη (υψηλότερα κέρδη και NPV), καθώς η διήμερη ευελιξία επιτρέπει εκμετάλλευση ευρύτερων διακυμάνσεων τιμών, όμως αυτό συνοδεύεται από υψηλότερες τεχνικές απαιτήσεις και αυξημένο επενδυτικό κόστος (μεγαλύτερος ωφέλιμος όγκος και υψηλότερο φράγμα). Αντίθετα, το βασικό 24ωρο σενάριο επιτυγχάνει πολύ ισχυρή οικονομική επίδοση με ηπιότερες απαιτήσεις σε ωφέλιμο όγκο και γεωμετρία, εμφανίζοντας πρακτικά μια «ισορροπία» μεταξύ απόλυτων οικονομικών μεγεθών και τεχνικο-κατασκευαστικού αποτυπώματος. Το σενάριο συνεχόμενων ωρών, τέλος, παρότι μπορεί να οδηγεί σε μικρότερους όγκους και χαμηλότερες γεωμετρικές απαιτήσεις, “τιμωρείται” οικονομικά λόγω της απώλειας ευελιξίας.

Όσον αφορά στο ωράριο λειτουργίας, σε κάθε σενάριο οι κορυφαίοι συνδυασμοί εμφανίζουν κοινό ωράριο παραγωγής και, δεδομένης της μικρής διακύμανσης της ισχύος, αντίστοιχα παρόμοιο ωράριο άντλησης. Η συνέπεια αυτή αναδεικνύει τη σημασία λειτουργίας του συστήματος εντός χρονικών παραθύρων που υπαγορεύονται από τη μέση ωριαία καμπύλη τιμών της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και ενισχύει την εγκυρότητα της ακολουθούμενης μεθοδολογίας. Η μέση ημερήσια καμπύλη τιμών (Εικόνα 6.7) εμφανίζει σαφές ενδοημερήσιο ελάχιστο κατά τις μεσημβρινές ώρες (περίπου 12η–15η) και έντονο απογευματινό–βραδινό μέγιστο μεταξύ 18ης και 21ης ώρας, με κορύφωση γύρω στην 21η, διαμορφώνοντας ένα καθαρό παράθυρο οικονομικού arbitrage.



Εικόνα 6.7 Μέσες ωριαίες τιμές DAM από 1/1/2020 έως 31/10/2025

Η επίδραση του ορισμού του ημερήσιου κύκλου γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στο σενάριο με συνεχόμενες ώρες, όπου η χρονική συνέχεια επιβάλλεται αυστηρά εντός του 24ώρου. Όταν το 24ωρο ορίζεται ημερολογιακά, ορισμένοι οικονομικά αποδοτικοί συνεχόμενοι συνδυασμοί αποκλείονται, καθώς απορρίπτονται κατά τη μετάβαση από την 24η στην 1η ώρα. Αντίθετα, με μετατόπιση του ημερήσιου ορίου στις ώρες μεταξύ 6ης και 8ης, η μεσημβρινή κάμψη και η βραδινή αιχμή της Εικόνας 6.7 εντάσσονται ενιαία στο ίδιο 24ωρο, επιτρέποντας καλύτερη χρονική ευθυγράμμιση άντλησης (σε χαμηλές τιμές) και παραγωγής (σε ώρες αιχμής). Έτσι, προκύπτει μεγιστοποίηση του οικονομικού αποτελέσματος στο σενάριο των συνεχόμενων ωρών, με τις δοκιμές να δείχνουν ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται για διαχωρισμό κατά την 7η ώρα.

Συνολικά, η σύγκριση καταδεικνύει ότι η χρονική ευελιξία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα της οικονομικής βελτιστοποίησης: το 48ωρο σενάριο μεγιστοποιεί κυρίως τα απόλυτα οικονομικά μεγέθη μέσω μεγαλύτερης ευελιξίας, το βασικό 24ωρο σενάριο συνιστά μια ιδιαίτερα αποδοτική και πιο «συμπαγή» τεχνικοοικονομική λύση, ενώ το σενάριο συνεχόμενων ωρών αναδεικνύει την απώλεια εσόδων που προκύπτει όταν περιορίζεται η δυνατότητα χρονικής προσαρμογής στις διακυμάνσεις της αγοράς.

6.6 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης ορισμένων βασικών τεχνικών και γεωμετρικών παραμέτρων στα οικονομικά αποτελέσματα

του προγράμματος. Μέσω της διαδικασίας αυτής αξιολογείται η ευρωστία και η αξιοπιστία των λύσεων που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα αναγνωρίζονται τα μεγέθη εκείνα τα οποία, λόγω της αυξημένης επίδρασής τους, θα πρέπει να λαμβάνονται με ιδιαίτερη προσοχή κατά το στάδιο της προμελέτης του έργου.

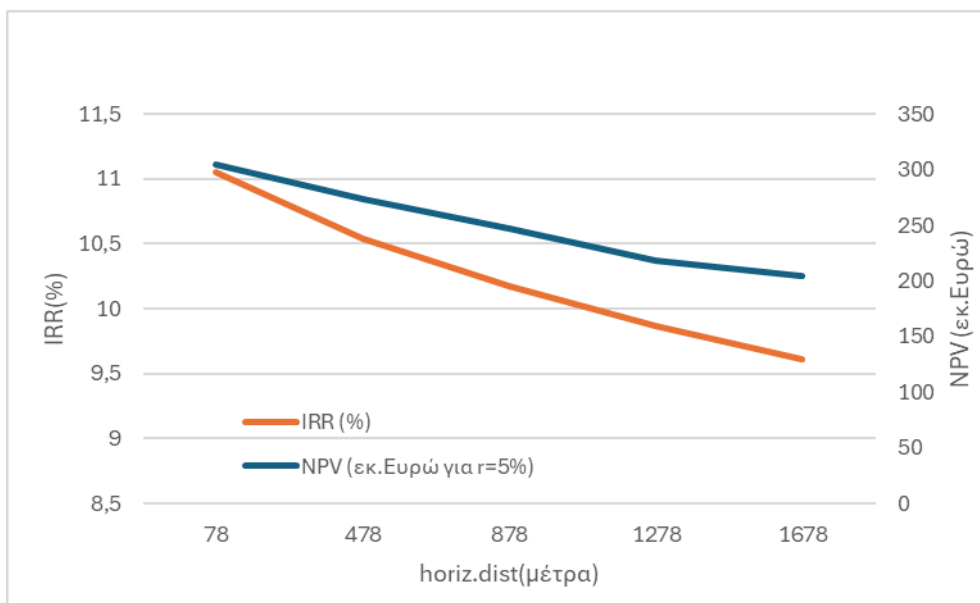
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με μεταβολή μίας παραμέτρου κάθε φορά, σε προκαθορισμένα διαστήματα άνω και κάτω της τιμής αναφοράς, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές, όπως αυτές ορίζονται από τη συνάρτηση `make_project_params`. Για λόγους υπολογιστικής ευκολίας και συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων, για κάθε μεταβολή εκτελέστηκε αποκλειστικά το πρόγραμμα του πρώτου σεναρίου λειτουργίας, ενώ επανυπολογίστηκαν οι ίδιοι τεchnοοικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν και στην αρχική ανάλυση.

6.6.1 Οριζόντια απόσταση (παράμετρος *horiz.dist*)

Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των σημείων τροφοδοσίας/υδροληψίας άνω και κάτω ταμιευτήρα επηρεάζει άμεσα το μήκος του οριζόντιου αγωγού προσαγωγής και κατ' επέκταση, τόσο τις υδραυλικές απώλειες όσο και το κόστος κατασκευής. Όπως φαίνεται και στο Πίνακα 6.8 και Εικόνα 6.8, η αύξηση της οριζόντιας απόστασης ισοδυναμεί με μείωση των οικονομικών δεικτών του έργου, χωρίς βέβαια να κάνει το έργο αποτρεπτικά αντικοινομικό. Αξίζει να σημειωθεί πως, η αύξησης της απόστασης μειώνει την βέλτιστη εγκατεστημένη ισχύ, ενώ διατηρεί το ωράριο ατόφιο.

Πίνακας 6.8 Ανάλυση ευαισθησίας των οικονομικών δεικτών ως προς την οριζόντια απόσταση

Οριζόντια απόσταση (m)	Ώρες άντλησης (h)	Ώρες παραγωγής (h)	Ισχύς (MW)	ΔNPV (%)	ΔIRR (%)
78,14	8,9	7	410	23,1	8,7
278,14	8,8	7	380	13,8	5,9
478,14	8,9	7	380	10,5	3,6
678,14	8,9	7	360	2,6	1,8
878,14	8,9	7	360	-	-
1078,14	8,9	7	350	-7,2	-1,6
1278,14	8,8	7	330	-11,6	-2,9
1478,14	8,9	7	330	-13,5	-4,2
1678,14	8,9	7	320	-17,5	-5,5



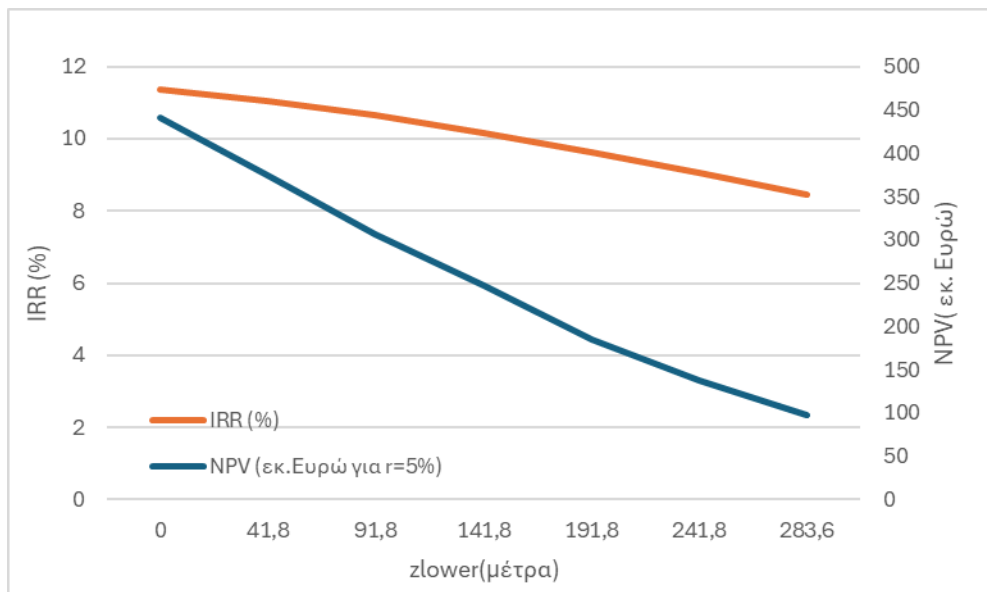
Εικόνα 6.8 Μεταβολή των οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την οριζόντια απόσταση

6.6.2 Κατακόρυφη απόσταση (παράμετρος zlower)

Η μεταβολή της κατακόρυφης απόστασης γίνεται με αυξομείωση της στάθμης του κάτω ταμιευτήρα, που στο πρόγραμμα περνιέται ως μεταβλητή zlower. Η μεταβολή αυτή συνεπάγεται σε αύξηση του μανομετρικού ύψους αλλά και του μήκους του κατακόρυφου αγωγού. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.9, η μεταβλητή αυτή μπορεί να επηρεάσει κατά πολύ την οικονομική ευημερία του έργου, και θα πρέπει να είναι από τις πρώτες παραμέτρους που βλέπουμε στην προμελέτη του έργου.

Πίνακας 6.9 Ανάλυση ευαισθησίας των οικονομικών δεικτών ως προς την κατακόρυφη απόσταση

zlower (m)	Κατακόρυφη απόσταση (m)	Ώρες άντλησης (h)	Ώρες παραγωγής (h)	Ισχύς (MW)	ΔNPV (%)	ΔIRR (%)
0	531	8,86	7	560	77,94	11,70
41,8	489,2	8,85	7	490	51,16	8,65
91,8	439,2	8,86	7	420	23,79	4,62
141,8	389,2	8,86	7	360	-	-
191,8	339,2	8,86	7	290	- 25,01	- 5,21
241,8	289,2	8,88	7	240	- 44,17	- 11,11
283,6	247,4	8,87	7	190	- 60,72	- 17,01



Εικόνα 6.9 Μεταβολή των οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την κατακόρυφη απόσταση

6.6.3 Διάμετροι αγωγών (μεταβλητές σχεδιασμού D1 και D2)

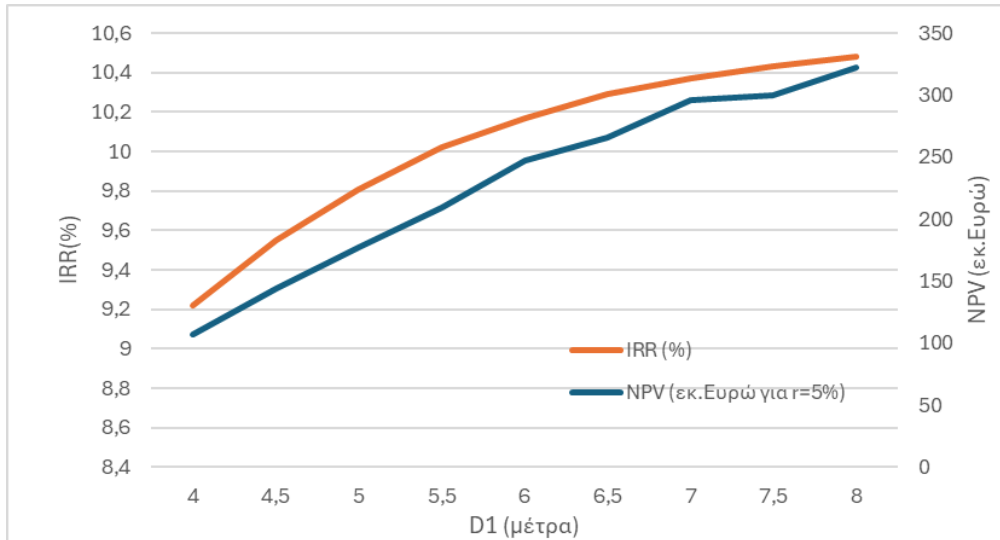
Οι διάμετροι των κύριων αγωγών επηρεάζουν άμεσα τις υδραυλικές απώλειες και, κατ' επέκταση, την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Στο πλαίσιο του παρόντος υπολογιστικού μοντέλου, η επίδραση της διαμέτρου στο κατασκευαστικό κόστος των αγωγών δεν λαμβάνεται υπόψη με ρητό τρόπο, γεγονός που συνιστά περιορισμό του μοντέλου και ενδέχεται να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της επίδρασης των διαμέτρων στο συνολικό επενδυτικό κόστος του έργου.

Όπως προκύπτει από τα παρακάτω σχήματα (Εικόνες 6.10.-6.11 και Πίνακες 6.10-6.11), η μείωση της διαμέτρου των αγωγών οδηγεί το σύστημα να λειτουργεί αποδοτικά μόνο για χαμηλές τιμές εγκατεστημένης ισχύος, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στις αντίστοιχα χαμηλές τιμές του NPV. Για ιδιαίτερα μικρές τιμές των διαμέτρων D1 και D2, το σύστημα καθίσταται μη τεχνικά εφικτό για συγκεκριμένες τιμές ισχύος και άνω, εξαιτίας των αυξημένων απωλειών τριβών κατά τη μεταφορά του νερού.

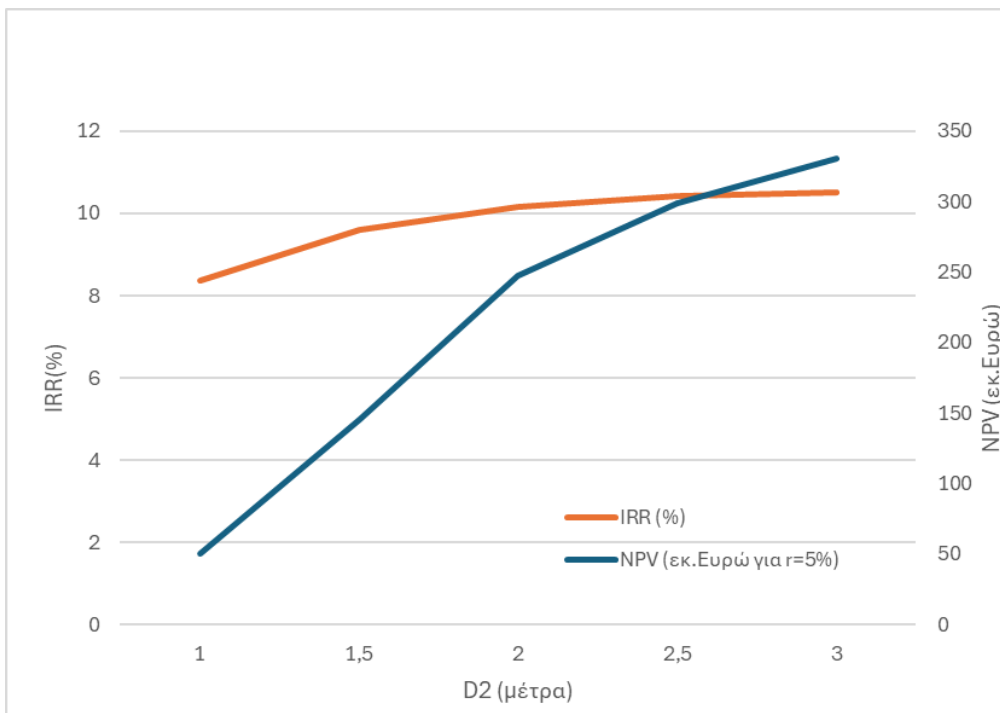
Αντίθετα, λόγω της μη ρητής ενσωμάτωσης της διαμέτρου στο κατασκευαστικό κόστος του έργου, παρατηρείται σχεδόν γραμμική βελτίωση των οικονομικών δεικτών με την αύξηση των διαμέτρων. Το αποτέλεσμα αυτό δεν αντανακλά απαραίτητα τη φυσική και οικονομική πραγματικότητα, αλλά αποτελεί άμεση συνέπεια της συγκεκριμένης παραδοχής του υπολογιστικού μοντέλου. Συνεπώς, στη μορφή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, το μοντέλο δεν μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο προσδιορισμού των βέλτιστων διαμέτρων αγωγών, αλλά μόνο ως μέσο αξιολόγησης της επίδρασης των διαμέτρων στα υδραυλικά και ενεργειακά μεγέθη. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, πως το βέλτιστο ωράριο λειτουργίας παραμένει σταθερό, όπως προκύπτει και στις άλλες αναλύσεις ευαισθησίας.

Παρότι το κόστος των αγωγών αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό μέγεθος, το οποίο διαφοροποιείται σημαντικά από έργο σε έργο και εξαρτάται από πλήθος τεχνικών και κατασκευαστικών παραμέτρων, η ενσωμάτωση μίας προσεγγιστικής σχέσης κόστους ως συνάρτηση της διαμέτρου θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με σχετική ευκολία από

υπολογιστική άποψη. Ωστόσο, η επιλογή και βαθμονόμηση μίας τέτοιας σχέσης προϋποθέτει πρόσθετες παραδοχές και αξιόπιστα δεδομένα κόστους, τα οποία υπερβαίνουν το επίπεδο ανάλυσης της παρούσας εργασίας. Για τον λόγο αυτό, η διερεύνηση των βέλτιστων διαμέτρων αγωγών δεν εξετάζεται περαιτέρω, αλλά αναγνωρίζεται ως πιθανή κατεύθυνση μελλοντικής επέκτασης του μοντέλου.



Εικόνα 6.10 Μεταβολή οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την διάμετρο του κεντρικού αγωγού (D1)



Εικόνα 6.11 Μεταβολή οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την διάμετρο των αγωγών προσαγωγής (D2)

Πίνακας 6.10 NPV ως συνάρτηση των διαμέτρων του κεντρικού αγωγού (D1) και των αγωγών προσαγωγής (D2)

NPV									
D2/D1	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
1	47,911	49,212	49,871	50,228	50,431	50,555	50,633	50,679	50,711
1,5	91,608	108,163	128,878	137,864	145,794	153,082	154,199	160,593	161,145
2	107,027	144,3	176,996	209,536	247,466	266,255	296,142	300,171	322,098
2,5	108,453	153,027	200,161	249,175	299,085	355,586	399,127	441,714	469,927
3	114,15	154,066	208,207	265,308	330,896	391,817	460,211	522,368	584,188

Πίνακας 6.11 IRR ως συνάρτηση των διαμέτρων του κεντρικού αγωγού (D1) και των αγωγών προσαγωγής (D2)

IRR									
D2/D1	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
1	8,23	8,31	8,35	8,37	8,38	8,39	8,40	8,40	8,40
1,5	9,02	9,26	9,41	9,52	9,59	9,64	9,67	9,69	9,70
2	9,22	9,55	9,81	10,02	10,17	10,29	10,37	10,43	10,48
2,5	9,27	9,63	9,94	10,20	10,42	10,60	10,74	10,86	10,95
3	9,28	9,66	9,99	10,27	10,52	10,73	10,92	11,08	11,21

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Σύνοψη εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέπτυξε και εφάρμοσε ένα δομημένο υπολογιστικό πλαίσιο τεχνοοικονομικής ανάλυσης έργων αντλησιοταμίευσης, το οποίο εφαρμόστηκε πιλοτικά στο υπό μελέτη έργο του ΥΗΣ Σφηκιάς (Μπράβας). Ο βασικός στόχος της εργασίας δεν ήταν η αναλυτική σχεδίαση ενός έργου μέχρι το επίπεδο της οριστικής μελέτης, αλλά η ανάπτυξη μιας συνεκτικής μεθοδολογίας που συνδέει: (i) τη φυσική και υδραυλική εφικτότητα, (ii) την απαιτούμενη γεωμετρία ταμιευτήρα–φράγματος και (iii) την οικονομική συμπεριφορά του έργου ως συμμετέχοντα στην Αγορά Επόμενης Ημέρας), με στόχο την παραγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιλογές εγκατεστημένης ισχύος και ωρών λειτουργίας.

Η ανάλυση βασίζεται σε ωριαία δεδομένα τιμών της DAM για την περίοδο Νοέμβριος 2020 – Οκτώβριος 2025, ενώ εξετάστηκαν τρία σενάρια λειτουργίας: (α) ημερήσια (24h) ευελιξία, με επιλογή των φθηνότερων και ακριβότερων ωρών μέσω κατάταξης τιμών, (β) 48h ευελιξία με την ίδια λογική, και (γ) ημερήσια λειτουργία με συνεχόμενα (διαδοχικά) μπλοκ άντλησης και παραγωγής. Η κοινή παραμετροποίηση των υδραυλικών, γεωμετρικών και οικονομικών δεδομένων μέσω της συνάρτησης `make_project_params()`, σε συνδυασμό με τους ελέγχους εφικτότητας που ενσωματώνονται στα master scripts, διασφαλίζει ότι οι λύσεις που συγκρίνονται είναι τεχνικά εφικτές και όχι απλώς «οικονομικά αποδεκτές» σε θεωρητικό επίπεδο.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των σεναρίων δείχνει ότι, για το εξεταζόμενο έργο, οι βέλτιστες λύσεις συγκλίνουν σε τιμές εγκατεστημένης ισχύος της τάξεως των 360 έως 440 MW, με ωφέλιμους όγκους περίπου ~ 2,20 έως 4,25 hm³, παρουσιάζοντας θετικούς οικονομικούς δείκτες σε όλα τα σενάρια. Ενδεικτικά, το σενάριο 24h οδήγησε σε βέλτιστο συνδυασμό 360 MW / 7 h παραγωγής / 8,86 h άντλησης, με NPV ≈ 247,5 εκατ. € (r = 5%) και IRR ≈ 10,17%, ενώ το σενάριο 48h παρήγαγε βέλτιστη λύση 440 MW / 9 h παραγωγής / 11,54 h άντλησης, με NPV ≈ 276,7 εκατ. € και IRR ≈ 9,9%. Το σενάριο Συνεχόμενων Ωρών εμφανίζει συγκριτικά ασθενέστερους οικονομικούς δείκτες (NPV ≈ 169,5 εκατ. €, IRR ≈ 8,51%), καθώς η επιβολή διαδοχικών περιορισμών περιορίζει τη δυνατότητα του συστήματος να «προσαρμόξει» τη λειτουργία του στα ενδοημερήσια χαμηλά και υψηλά της αγοράς.

Η σύγκριση των σεναρίων οδηγεί σε ένα βασικό συμπέρασμα: η ευελιξία αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα οικονομικής απόδοσης. Το σενάριο των 48h αυξάνει τα απόλυτα κέρδη και την NPV, αξιοποιώντας μεγαλύτερο εύρος διαφορών τιμών, όμως απαιτεί μεγαλύτερους ωφέλιμους όγκους και συνεπώς αυστηρότερες γεωλογικές και κατασκευαστικές προϋποθέσεις. Το σενάριο των 24h αποτελεί μια ιδιαίτερα ισορροπημένη επιλογή, με ισχυρούς οικονομικούς δείκτες και ταυτόχρονα μικρότερες απαιτήσεις σε ωφέλιμο όγκο. Το σενάριο λειτουργίας με συνεχόμενα μπλοκ λειτουργεί ως ρεαλιστικός περιορισμός και αναδεικνύει —τόσο θεωρητικά όσο και οικονομικά— το «κόστος» της μειωμένης ευελιξίας.

Επιπλέον, η διερεύνηση της μετατόπισης του ημερήσιου ορίου στο σενάριο των συνεχόμενων μπλοκ έδειξε ότι ο «ημερολογιακός» περιορισμός της λειτουργίας στην αρχή και το τέλος της ημέρας δεν είναι απαραίτητα ο βέλτιστος για την οικονομική εκμετάλλευση του συστήματος. Όταν η διαδικασία μετατόπισης επιτρέπει την ένταξη τόσο της μεσημβρινής πτώσης όσο και

της βραδινής αιχμής τιμών στην ίδια ακολουθία λειτουργίας, το μοντέλο εντοπίζει αποδοτικότερους συνδυασμούς. Με άλλα λόγια, ακόμη και χωρίς μεταβολή των ίδιων των καμπυλών τιμών της αγοράς, η σωστή πλαίσίωση του λειτουργικού κύκλου μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά την απόδοση του συστήματος υπό περιορισμούς.

Τέλος, η ανάλυση ευαισθησίας επέτρεψε την επιβεβαίωση ορισμένων μεταβλητών ως «κρίσιμων» για τον λεπτομερή καθορισμό τους ήδη από το στάδιο του προ-σχεδιασμού. Η μεταβολή της κατακόρυφης διαφοράς στάθμης (zlower) επηρεάζει έντονα την οικονομική λειτουργία του συστήματος μέσω του μανομετρικού ύψους και της εφικτότητας των παροχών, ενώ η οριζόντια απόσταση (horiz.dist) δρα επιβαρυντικά μέσω αυξημένων απωλειών και της εκτίμησης του κόστους. Οι διάμετροι D1 και D2 επηρεάζουν επίσης σημαντικά την εφικτότητα και τις απώλειες, γεγονός που αναδεικνύει όμως και έναν περιορισμό του μοντέλου: η διάμετρος δεν «ποινικοποιείται» στο κόστος και, ως εκ τούτου, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστο εργαλείο για τον προσδιορισμό μιας οικονομικά βέλτιστης διαμέτρου.

7.2 Παραδοχές και περιορισμοί

Παρά το εύρος και τη συστηματικότητα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, η παρούσα εργασία βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές και απλοποιήσεις, οι οποίες είναι αναγκαίες στο πλαίσιο μίας τεχνοοικονομικής αξιολόγησης επιπέδου προμελέτης και επηρεάζουν τον τρόπο ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Καταρχήν, η οικονομική αξιολόγηση του έργου περιορίζεται αποκλειστικά στην περίπτωση λειτουργίας του ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market). Πιθανές πρόσθετες πηγές εσόδων, όπως η συμμετοχή στην αγορά εξισορρόπησης, η παροχή επικουρικών υπηρεσιών ή οι μηχανισμοί αποζημίωσης για την παρεχόμενη ισχύ και ευελιξία, οι οποίοι στην πράξη θα μπορούσαν να ενισχύσουν σημαντικά τη βιωσιμότητα ενός έργου αντλησιοταμίευσης, δεν λαμβάνονται υπόψη. Ως εκ τούτου, τα οικονομικά αποτελέσματα θα πρέπει να θεωρούνται συντηρητικά ως προς τη συνολική δυναμική λειτουργία του έργου.

Επιπλέον, το υδρολογικό σύστημα αντιμετωπίζεται ως κλειστό, με τον κάτω ταμιευτήρα να θεωρείται πρακτικά απεριόριστος και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη φυσικές εισροές ή εκροές ή αλληλεπιδράσεις με άλλα έργα (στην προκειμένη περίπτωση, το σύστημα αντλησιοταμίευσης Σφηκιά-Ασώματα). Η παραδοχή αυτή επιτρέπει την απομόνωση της επίδρασης της λειτουργικής στρατηγικής και των τιμών της αγοράς, ωστόσο περιορίζει την εφαρμοσιμότητα των αποτελεσμάτων σε περιπτώσεις όπου υδρολογικοί περιορισμοί ή ανταγωνιστικές χρήσεις νερού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Περαιτέρω, οι αποδόσεις των φάσεων άντλησης και παραγωγής θεωρούνται σταθερές και όχι δυναμικές, ενώ το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη στιγμιαίες λειτουργικές συνθήκες, όπως μεταβατικά καθεστάτα, περιορισμούς παροχής ή τις λειτουργικές επιπτώσεις συχνών εκκινήσεων και παύσεων. Κατά συνέπεια, το μοντέλο αποτυπώνει τις γνωστές δομές και επαναλαμβανόμενες συμπεριφορές του συστήματος και όχι τις στιγμιαίες λειτουργικές του καταστάσεις που επηρεάζουν την λειτουργία του συστήματος στα δύο πρώτα σενάρια.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι περιορισμοί που αφορούν την εκτίμηση του κόστους. Το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος υπολογίζεται μέσω παραμετρικών σχέσεων, κατάλληλων για ανάλυση επιπέδου προμελέτης, και δεν αντικαθιστά αναλυτικό κατασκευαστικό

προϋπολογισμό. Στο πλαίσιο αυτό, ορισμένα επιμέρους κόστη που σχετίζονται με ειδικές γεωτεχνικές συνθήκες, περιβαλλοντικές απαιτήσεις, πρόσβαση ή χρονικές καθυστερήσεις δεν ενσωματώνονται ρητά στο μοντέλο.

Ένας σημαντικός ειδικός περιορισμός αφορά την απουσία ρητής συσχέτισης μεταξύ των διαμέτρων των αγωγών και του κατασκευαστικού κόστους. Παρότι οι διάμετροι επηρεάζουν άμεσα τις υδραυλικές απώλειες και, κατ' επέκταση, το λειτουργικό κόστος, η αύξησή τους στο μοντέλο δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση του κόστους κατασκευής. Η παραδοχή αυτή οδηγεί σε αδικαιολόγητη βελτίωση των οικονομικών δεικτών για μεγαλύτερες διαμέτρους και περιορίζει τη δυνατότητα του μοντέλου να χρησιμοποιηθεί ακόμη και για την υπόδειξη οικονομικά βέλτιστων διαστάσεων. Ο περιορισμός αυτός, ωστόσο, αναγνωρίζεται ρητά κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Συνολικά, οι παραδοχές και οι περιορισμοί που υιοθετούνται δεν αναιρούν την αξία του υπολογιστικού πλαισίου που αναπτύχθηκε, αλλά προσδιορίζουν με σαφήνεια τα όρια εγκυρότητάς του. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως εργαλείο σύγκρισης και αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων, χωρίς να υποκαθιστά την ανάγκη για λεπτομερή τεχνική και οικονομική ανάλυση στα τελικά στάδια σχεδιασμού.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το υπολογιστικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία έχει σχεδιαστεί με παραμετρική δομή, γεγονός που επιτρέπει τη μελλοντική αξιοποίησή του πέραν του συγκεκριμένου έργου αναφοράς. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται ορισμένες βασικές κατευθύνσεις μελλοντικής χρήσης και βελτίωσης.

Μία πρώτη κατεύθυνση αφορά τη διεύρυνση της οικονομικής αξιολόγησης, μέσω της ενσωμάτωσης πρόσθετων μηχανισμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η συμπερίληψη αγορών εξισορρόπησης, επικουρικών υπηρεσιών ή μηχανισμών αποζημίωσης ισχύος θα επέτρεπε την πληρέστερη αποτύπωση της πραγματικής οικονομικής δυναμικότητας ενός έργου αντλησιοταμίευσης και τη διερεύνηση εναλλακτικών στρατηγικών λειτουργίας πέραν του απλού ενεργειακού αρμπιτράζ.

Παράλληλα, το μοντέλο θα μπορούσε να εξελιχθεί ώστε να υποστηρίζει πιο αναλυτική τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση γεωμετρικών παραμέτρων. Η ενσωμάτωση προσεγγιστικών σχέσεων κόστους για βασικά κατασκευαστικά στοιχεία, όπως οι αγωγοί και τα έργα πολιτικού μηχανικού, θα επέτρεπε τον ταυτόχρονο συνυπολογισμό υδραυλικών ωφελειών και κατασκευαστικών επιβαρύνσεων, οδηγώντας σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

Επιπλέον, μια σημαντική δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης αφορά στη δυναμικότερη προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος. Η συνεκτίμηση μεταβατικών φαινομένων, περιορισμών ρυθμού μεταβολής ισχύος και μεταβολής των αποδόσεων σε μερικό φορτίο θα επέτρεπε τη μετάβαση από μια μακροχρόνια, μέση προσέγγιση σε μία πιο λεπτομερή επιχειρησιακή ανάλυση.

Ενδιαφέρουσα κατεύθυνση μελλοντικής αξιοποίησης του μοντέλου αποτελεί η μετάβαση από σταθερά ωράρια λειτουργίας σε σχήματα δυναμικής ημερήσιας βελτιστοποίησης. Στην παρούσα μορφή του, το μοντέλο αξιολογεί προκαθορισμένους συνδυασμούς ωρών άντλησης και παραγωγής, οι οποίοι εφαρμόζονται ομοιόμορφα σε όλη την περίοδο ανάλυσης. Ωστόσο, στην πράξη, οι συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλονται σημαντικά από

ημέρα σε ημέρα, γεγονός που καθιστά ελκυστική την ιδέα επιλογής διαφορετικού, βέλτιστου ωραρίου λειτουργίας για κάθε ημέρα ξεχωριστά. Η ενσωμάτωση μίας τέτοιας ημερήσιας βελτιστοποίησης, με στόχο τη μεγιστοποίηση του ημερήσιου οικονομικού αποτελέσματος, θα επέτρεπε στο μοντέλο να προσαρμόζει τη λειτουργία του έργου στις εκάστοτε συνθήκες τιμών. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο θα μπορούσε να εξελιχθεί από εργαλείο αξιολόγησης σεναρίων σε εργαλείο υποστήριξης επιχειρησιακής απόφασης, πιο κοντά στην πραγματική καθημερινή λειτουργία ενός έργου αντλησιοταμίευσης.

Το μοντέλο μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί ως εργαλείο συγκριτικής αξιολόγησης διαφορετικών έργων αντλησιοταμίευσης, επιτρέποντας τη διερεύνηση της επίδρασης γεωμετρικών, υδραυλικών και αγοραίων χαρακτηριστικών στη βιωσιμότητα των έργων. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υποστηρικτικά σε πρώιμα στάδια σχεδιασμού, για την ιεράρχηση εναλλακτικών λύσεων πριν την εκπόνηση λεπτομερών μελετών.

Τέλος, η επέκταση της ανάλυσης σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες και σεσενάρια τιμών, συμπεριλαμβανομένων συνθετικών ή μελλοντικών σεναρίων με αυξημένη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, θα μπορούσε να συμβάλει στην αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των επενδυτικών αποφάσεων σε μεταβαλλόμενες συνθήκες αγοράς.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ / ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αργυράκης, Ι. Γ. (έτος). *Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί της ΔΕΗ Α.Ε. και η συμβολή τους στην κάλυψη των Ενεργειακών Αναγκών της Χώρας.*
 - ΔΕΗ Α.Ε. (Απρίλιος 2024). *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το έργο Αντλησιοταμίευσης μέγιστης ισχύος έγχυσης 467 MW και μέγιστης ισχύος απορρόφησης 441 MW στη θέση «Ταμειυτήρας ΥΗΣ Σφηκιάς (Μπράβας)», Δημοτική Ενότητα Βέροιας, Π.Ε. Ημαθίας, Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας.* Γενική Διεύθυνση Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Παραγωγής, Διεύθυνση Αδειοδοτήσεων Παραγωγής, Ελλάδα.
 - Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (HEEx) (n.d.). *Επίσημη ιστοσελίδα και πληροφορίες αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.* Διαθέσιμο στο: <https://www.enexgroup.gr>
 - Κουζέλης, Β., Λαδά, Μ., Μαμαγκάκης, Ν., & Τσουρέλης, Ι. (2025). *Σχεδιασμός έργων αντλησιοταμίευσης Σφηκιάς (Αλιάκμονας).* Εργασία μαθήματος «Ολοκληρωμένο Θέμα Υδραυλικού Σχεδιασμού», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
 - Παπακωνσταντής, (έτος). *Ροή σε αγωγούς υπό πίεση.*
 - ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή (n.d.). *Έργο αντλησιοταμίευσης Αμφιλοχίας.*
 - ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή (n.d.). *Το μεγαλύτερο υβριδικό έργο στην Ευρώπη.*
 - Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) (n.d.).
-
- Centre for Land Use Interpretation (n.d.). *Pumped storage facilities in the USA: Northfield Mountain.* Available at: <https://clui.org/projects/offstream/pumped-storage-facilities-usa/northfield-mountain>
 - Efstratiadis, A., & Sakki, G.-K. (2025). *Technical support services in the context of the establishment of the Islands' Decarbonization Fund: Documentation report of Investment Submission Form for subcategory "Multi-purpose dams/reservoirs" (revised edition).* Athens, May 2025.
 - Hiratsuka, A., Arai, T., & Yoshimura, T. (1993). *Seawater pumped-storage power plant in Okinawa Island, Japan.*
 - Mahadevan, V., Raja, S. S., Rusho, M. A., & Yishak, S. (2025). *Critical review of energy storage systems: A comparative assessment of mechanisms, advantages, challenges, and integration with renewable energy.* Results in Engineering, 26.
 - Scott, T. (2023). *Britain's largest battery is actually a lake.* YouTube. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=6Jx_bJgIFhI
 - Synertics (2023). *Understanding the Duck Curve.*
 - U.S. Department of Energy (n.d.).
 - Zisos, A., G.-K. Sakki, and A. Efstratiadis (2023), *Mixing renewable energy with pumped hydropower storage: Design optimization under uncertainty and other challenges*, *Sustainability*, 15(18), 13313, doi:10.3390/su151813313.

Εικόνα 2.1 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αντλιοσταμείωσης. Πηγή: Viadero et al. (2017)	3
Εικόνα 2.2 Northfield Mountain PSH. Πηγή: Google Earth.....	7
Εικόνα 2.3 Το Dinorwig Power Station, γνωστό και ως Electric Mountain. Πηγή: Wikipedia. 7	
Εικόνα 2.4 Ο ΥΗΣ Σφηκιάς. Πηγή: Google Earth.....	8
Εικόνα 2.5 Ο ΥΗΣ Ασωμάτων. Πηγή: Google Earth.....	8
Εικόνα 2.6 Στον κόκκινο κύκλο ο ΥΗΣ Σφηκιάς, στον κίτρινο ο ΥΗΣ Ασωμάτων. Πηγή: Google Earth	9
Εικόνα 2.7 Το φράγμα των ποταμών. Πηγή: ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	10
Εικόνα 2.8 Σχηματική διάταξη έργου «Σύστημα Αντλιοσταμείωσης στην Αμφιλοχία». Πηγή: ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	10
Εικόνα 2.9 Okinawa Seawater PSP. Πηγή εικόνας: Παροχή συγγραφέα (The Conversation) 11	
Εικόνα 2.10 Σχηματική απεικόνιση της καμπύλης “Duck Curve” Πηγή: Synertics (2023)....	12
Εικόνα 2.11 Σχηματική διάταξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες. Πηγή εικόνας: Pilot Energy Storage	13
Εικόνα 4.1 Ωριαίες τιμές DAM στις 30/08/2025. Πηγή: HEnEx	20
Εικόνα 6.1 Θέση άνω ταμιευτήρα και σταθμού παραγωγής-άντλησης. Πηγή:Google Earth..	37
Εικόνα 6.2 Θέσεις ΥΗΕ της ΔΕΗ στον ποταμό Αλιάκμονα (Πηγή: Καραγιαννίδης και Παπαϊωάννου, 2008).	37
Εικόνα 6.3 Διαγραμματική απεικόνιση σχέσης NPV- r για το καλύτερο συνδυασμό του σεναρίου 48ωρης λειτουργίας.....	43
Εικόνα 6.4 Διαγραμματική απεικόνιση σχέσης NPV- r για το καλύτερο συνδυασμό του σεναρίου 48ωρης λειτουργίας.....	45
Εικόνα 6.5 Διαγραμματική απεικόνιση σχέσης NPV- r για το καλύτερο συνδυασμό του σεναρίου 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες.....	47
Εικόνα 6.6 Μέσες ωριαίες τιμές DAM από 1/1/2020 έως 31/10/2025.....	49
Εικόνα 6.7 Μεταβολή των οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την οριζόντια απόσταση.....	51
Εικόνα 6.8 Μεταβολή των οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την κατακόρυφη απόσταση.....	52
Εικόνα 6.9 Μεταβολή των οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την διάμετρο του κεντρικού αγωγού (D1).....	53
Εικόνα 6.10 Μεταβολή των οικονομικών δεικτών IRR και NPV ως προς την διάμετρο των αγωγών προσαγωγής (D2)	53

Πίνακας 5.1 Συντελεστές εκτίμησης όγκου φράγματος.....	30
Πίνακας 6.1 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 24ωρης λειτουργίας	41
Πίνακας 6.2 Ταμειακές Ροές και ΚΠΑ ($r = 5\%$) για τον βέλτιστο συνδυασμό του σεναρίου 24ωρης λειτουργίας.....	42
Πίνακας 6.3 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 48ωρης λειτουργίας	43
Πίνακας 6.4 Ταμειακές Ροές και ΚΠΑ ($r = 5\%$) για τον βέλτιστο συνδυασμό του σεναρίου 48ωρης λειτουργίας.....	44
Πίνακας 6.5 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες.....	45
Πίνακας 6.6 Οι δέκα καλύτεροι συνδυασμοί σεναρίου 24ωρης λειτουργίας με συνεχόμενες ώρες.....	46
Πίνακας 6.7 Βέλτιστα αποτελέσματα τεχνοοικονομικής αξιολόγησης ανά σενάριο λειτουργίας	48
Πίνακας 6.8 Ανάλυση ευαισθησίας των οικονομικών δεικτών ως προς την οριζόντια απόσταση.....	50
Πίνακας 6.9 Ανάλυση ευαισθησίας των οικονομικών δεικτών ως προς την κατακόρυφη απόσταση.....	51
Πίνακας 6.10 NPV ως συνάρτηση των διαμέτρων του κεντρικού αγωγού (D1) και των αγωγών προσαγωγής (D2)	54
Πίνακας 6.11 IRR ως συνάρτηση των διαμέτρων του κεντρικού αγωγού (D1) και των αγωγών προσαγωγής (D2)	54