



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ  
ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Εφαρμογή στο φράγμα της Πύλης του νομού Τρικάλων

**Χαράλαμπος Σοφιάς**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Νοέμβριος 2022

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μέσω της διπλωματικής εργασίας αυτής ένας κύκλος πανεπιστημιακών σπουδών στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο φτάνει στο τέλος του. Σε όλη αυτή τη διαδρομή, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους αυτούς που στήριξαν την προσπάθεια μου για ακαδημαϊκή εξέλιξη.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο καθηγητή της σχολής, κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη που ανέλαβε το ρόλο του επιβλέποντα καθηγητή κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η συμβολή του όσον αφορά την επιλογή ενός επίκαιρου, αλλά και προσαρμοσμένου στις προτιμήσεις μου θέμα, καθώς και η μετέπειτα αφοσίωση και διαθεσιμότητα του για επίλυση αποριών και αξιολόγηση παρατηρήσεων, υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την ομαλή έκβαση της ερευνητικής αυτής διαδικασίας.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες μου προς την Υποψήφια Δρ. Τζωρτζίνα Σακκή που με τις καθοριστικές παρεμβάσεις και τις εύστοχες ιδέες της αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή κατάληξη της διπλωματικής εργασίας, αφιερώνοντας παράλληλα αμέτρητες ώρες για τον έλεγχο της διπλωματικής σε προγραμματιστικό επίπεδο.

Για την προσφορά τους σε εύρεση καθοριστικού, για τη διπλωματική εργασία, υλικού ευχαριστώ θερμά τον πατέρα μου Αναστάσιο Σοφιο για την όλη συνεισφορά του με τις γνώσεις του, τον κ. Ν. Μαυρονικολάου της μελετητικής εταιρείας ΥΔΡΕΤΜΕ, αλλά και τους κ. Αναστάσιο Γεώργα και κ. Ηλία Γκίκα από την υπηρεσία ΕΥΔΕ του Υπ.Ε.ΧΩ.ΔΕ και από το Υπ.Α.Α.Τ αντίστοιχα.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για τη στήριξη τους σε όλη αυτή τη προσπάθεια, καθώς οι αξίες που μου εμφύσησαν όλα αυτά τα χρόνια, υπήρξαν οι βάσεις για να φτάσω ως εδώ, αλλά και τους φίλους μου που μοιραζόμασταν τα όνειρα μας και ομόρφυναν τη φοιτητική ζωή μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση ενός υδροηλεκτρικού έργου υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας. Με στόχο την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης του έργου διερευνάται αν η μακροπρόθεσμη διαχείρισή του θα αποδειχτεί ανθεκτική σε μια σειρά αλλαγών που δυσχεραίνουν τη λειτουργία του, συγκρίνοντας με έναν συμβατικά βέλτιστο σχεδιασμό που βασίζεται σε ένα δεδομένο σενάριο υποθέσεων. Η σύγκριση των συμπεριφορών του έργου των δύο αυτών αναλύσεων καθορίζει την έκβαση της ερευνητικής αυτής προσπάθειας.

Αφού πραγματοποιηθεί η εισαγωγή στην υδροηλεκτρική ενέργεια και αποσαφηνιστούν οι βασικές έννοιες των υδροηλεκτρικών έργων, παρουσιάζονται οι προκλήσεις στον σύγχρονο σχεδιασμό τους. Οι συνεχείς αλλαγές στις διεθνείς εξελίξεις που επηρεάζουν την οικονομία και την πολιτική, οι κοινωνικές τάσεις αλλά και κλιματικά φαινόμενα, οδηγούν στην απαίτηση σχεδιασμού ανθεκτικότερων συστημάτων που να μπορούν να ανταποκρίνονται σε δυναμικές αλλαγές. Υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας, λοιπόν, εξετάζεται ένας νέος τρόπος σχεδιασμού που επικεντρώνεται περισσότερο στην αβεβαιότητα κρίσιμων υποθέσεων του μοντέλου σχεδιασμού που αναφέρονται στο μέλλον, απορροφώντας αποτελεσματικότερα τις αλλαγές αυτές.

Σε πρώτο στάδιο, ορίζεται ο στόχος της βελτιστοποίησης, ως ένα οικονομικό μέγεθος που αντιπαραβάλλει τα έσοδα του έργου από την πώληση νερού και ενέργειας, με τις δαπάνες της κατασκευής και λειτουργίας του σε ετήσια βάση. Για να προσδιοριστούν τα ιδιαίτερα πολύπλοκα κατασκευαστικά κόστη, διατυπώνονται εμπειρικές σχέσεις, με αναζήτηση στοιχείων από προϋπολογισμούς Ελληνικών φραγμάτων.

Παράλληλα, διατυπώνεται το μοντέλο προσομοίωσης του υδροηλεκτρικού ταμειυτήρα, με βάση το ισοζύγιο εισροών, ζητήσεων, εκροών και υπερχειλίσεων, σε μηνιαίο βήμα, με το οποίο εκτιμάται η διαχειριστική πολιτική (σε όρους στόχων ενεργειακής παραγωγής) που ικανοποιεί τις οικολογικές, ενεργειακές και άλλες πιθανές χρήσεις. Τα έσοδα από την παραγωγή ενέργειας εκτιμώνται με βάση τις τιμές πώλησης της αγοράς και ρήτρες που τίθενται για τα ελλείμματα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος σχεδιασμού του έργου είναι το ύψος του φράγματος, η διάμετρος του αγωγού προσαγωγής και ο στόχος ετήσιας παραγωγής ενέργειας. Με βάση αυτές, γίνεται η βελτιστοποίηση της οικονομικής επίδοσης του έργου. Η παραπάνω μεθοδολογία, που συνιστά μια πρώτη απόπειρα τυποποίησης του σχεδιασμού υδροηλεκτρικών συστημάτων υπό ανθεκτικότητα, υλοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον R.

Η μεθοδολογία αξιολογείται με βάση ένα πραγματικό έργο που είναι υπό σχεδιασμό, ήτοι το χωμάτινο φράγμα της Πύλης. Αρχικά, ο σχεδιασμός του ταμειυτήρα βελτιστοποιείται με βάση ένα αρχικό σύνολο υποθέσεων (σενάριο βάσης), ενώ σε επόμενο στάδιο διερευνώνται εναλλακτικά σενάρια που είναι πιο δυσμενή ως προς τη λειτουργία του έργου. Τελικά, πραγματοποιείται η συνδυαστική βελτιστοποίηση του έργου ως προς τα δέκα, συνολικά, σενάρια, που διατυπώθηκαν. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι με μια μικρή σχετικά μείωση της οικονομικής απόδοσης του έργου σε σχέση με το σενάριο βάσης, εξασφαλίζεται ένα ανθεκτικότερο σύστημα έναντι επερχόμενων προκλήσεων.

## ABSTRACT

The subject of this thesis is the optimization of a hydroelectric plant under the prism of resilience. With the aim of optimizing the financial viability of the project's investment, it is examined whether its long-term management will prove to be more resilient against a series of unfavorable changes, compared to a conventionally optimal design under a given set of assumptions. The comparison of the project behaviors against these two analyses determines the outcome of this research effort.

After a brief introduction to hydropower and clarification of key concepts of hydroelectric works, we present the challenges regarding their modern design. The perpetual changes in the global scene that affect economy and politics, render the necessity for designing more resilient systems that can respond to dynamic changes. Thus, we investigate a new design procedure, under the prism of resilience, focusing to the uncertainty induced by crucial assumptions of the design model that refer to future, in order to absorb these changes more effectively.

Initially, we define the optimization objective, in terms of a financial quantity that contrasts the revenues from water and energy selling, with the investment and maintenance costs, on an annual basis. In order to determine the highly complex construction costs, we configure empirical relationships, by looking for data from Greek dams' budgets.

Next, we formulate the simulation model of the hydroelectric reservoir, based on the inflow, demand, outflow and spill losses balance, using an annual time step, by which we estimate the management policy (in terms of hydropower generation targets) that fulfils the ecological, energy and other possible uses. The revenues from hydropower production are estimated on the basis of market values and penalties that are assigned to deficits. The independent variables of the design problem are the dam height, the penstock diameter and the firm energy production target. Based on these, the financial performance of the project is optimized. The aforementioned methodology, which is a first attempt to formalize the design of hydroelectric systems under resilience, is implemented in R environment.

The methodology is evaluated on the basis of a real-world project that is under design, namely the earth dam of Pyli. Firstly, the design of the reservoir is optimized under an initial set of assumptions (baseline scenario), while in next stage we investigate alternative scenarios that are less favorable with respect to the operation of the project. Eventually, we employ a combined optimization against ten, in total, scenarios. From the evaluation of results we conclude that through a relatively small reduction of the financial performance of the system with respect to the baseline scenario, we ensure a more resilient system against emerging challenges.

## Περιεχόμενα

<b>1.</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1	Αντικείμενο Έκθεσης & Στόχοι έρευνας .....	1
1.2	Διάρθρωση Εργασίας.....	1
<b>2.</b>	<b>Σχεδιασμός υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων .....</b>	<b>3</b>
2.1	Φράγματα και Υδροηλεκτρική Ενέργεια .....	3
2.2	Σταθμός ενεργειακής παραγωγής .....	8
<b>3.</b>	<b>Σύγχρονες προκλήσεις στη φιλοσοφία σχεδιασμού των υδροενεργειακών έργων &amp; η έννοια της ανθεκτικότητας.....</b>	<b>12</b>
3.1	Η αναγκαιότητα επαναπροσδιορισμού των τρεχουσών πρακτικών σχεδιασμού .....	12
3.2	Η έννοια της ανθεκτικότητας ως μέγεθος μακροπρόθεσμου σχεδιασμού συστημάτων .....	13
<b>4.</b>	<b>Ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας υδροηλεκτρικών έργων.....</b>	<b>19</b>
4.1	Τυποποίηση προβλήματος εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας υδροηλεκτρικών έργων ....	19
4.1.1	Μέσο ετήσιο κόστος .....	19
4.1.2	Μέσο όφελος ανά έτος .....	21
4.1.3	Κέρδος & Ζημία ενός υδροηλεκτρικού έργου .....	22
4.2	Οικονομικά Στοιχεία για φράγματα Ελλαδικού χώρου .....	22
<b>5.</b>	<b>Μεθοδολογία προσομοίωσης-βελτιστοποίησης υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας.....</b>	<b>30</b>
5.1	Μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα .....	30
5.2	Βελτιστοποίηση συστήματος .....	37
<b>6.</b>	<b>Εφαρμογή του σχεδιασμού στο φράγμα της Πύλης .....</b>	<b>38</b>
6.1	Περιοχή Μελέτης .....	38
6.2	Η λειτουργία του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα της Πύλης .....	55
6.3	Διερεύνηση σεναρίων λειτουργίας του ταμιευτήρα και βελτιστοποίηση .....	65
<b>7.</b>	<b>Ανάπτυξη μοντέλου σε γλώσσα προγραμματισμού R .....</b>	<b>73</b>
7.1	Στοιχεία εισόδου του κώδικα της R .....	73
7.2	Παράμετροι του κώδικα στην R.....	73
7.3	Συναρτήσεις του κώδικα στην R .....	74
<b>8.</b>	<b>Συμπεράσματα &amp; Προτάσεις .....</b>	<b>78</b>
<b>9.</b>	<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές .....</b>	<b>80</b>

# **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Αντικείμενο Έκθεσης & Στόχοι έρευνας**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο βασικός στόχος εστιάζεται στη διερεύνηση του σχεδιασμού υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας. Στόχος της έρευνας είναι η αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που επιφέρει ένας σχεδιασμός με βάση την υφιστάμενη κατάσταση και ένας αντίστοιχος, με βάση πιο δυσμενή σενάρια λειτουργίας του συστήματος. Απώτερος σκοπός της εργασίας είναι η τυποποίηση του γενικού προβλήματος σχεδιασμού, και η αξιολόγησή του με παράδειγμα εφαρμογής το υπό μελέτη χωμάτινο φράγμα στην περιοχή της Πύλης.

Επιμέρους ερευνητικοί στόχοι είναι:

- Η διατύπωση του προβλήματος αξιολόγησης της οικονομικής βιωσιμότητας των υπό σχεδιασμό υδροηλεκτρικών συστημάτων, αντιπαραβάλλοντας τα κόστη κατασκευής και συντήρησης με τα αναμενόμενα έσοδα από την παραγωγή ενέργειας
- Η αναζήτηση όσο το δυνατόν απλούστερων σχέσεων που συνδέουν τα κατασκευαστικά κόστη με χαρακτηριστικά μεγέθη του έργου
- Η διατύπωση των σεναρίων (σενάριο βάσης και σενάρια δυσμενούς λειτουργίας) σχεδιασμού του έργου
- Η διατύπωση του μέτρου ανθεκτικότητας και της διαδικασίας βελτιστοποίησή του

## **1.2 Διάρθρωση Εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει οκτώ (8) κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

Το παρόν πρώτο κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή του αντικειμένου μελέτης, στο οποίο διατυπώνονται οι στόχοι μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τους στόχους των φραγμάτων και παρατίθενται οι διαφορετικοί τύποι αναχωμάτων που κατασκευάζονται ενώ συσχετίζονται με την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα περιγράφονται τα μέρη ενός σταθμού παραγωγής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αξιολογείται ο συμβατικός τρόπος σχεδιασμού συστημάτων σύμφωνα με δεδομένο σενάριο υποθέσεων που εφαρμόζεται, και διατυπώνονται νέες προκλήσεις που θέτουν τον σχεδιασμό σε νέο επίπεδο αντιμετώπισης. Εισάγεται η έννοια της ανθεκτικότητας και συσχετίζεται με τον σχεδιασμό υδροηλεκτρικών έργων σε μια νέα βάση πολλαπλών σεναρίων υποθέσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εισάγονται τα βασικά οικονομικά μεγέθη που καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα ενός υδροηλεκτρικού έργου. Για φράγματα της Ελλάδας εξετάζεται το οικονομικό κόστος της κατασκευής και λειτουργίας τους. Με τον προσδιορισμό αυτών γίνεται η οικονομική αποτίμηση ενός υδροηλεκτρικού έργου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι υπολογισμού των σχέσεων που διέπουν τη λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα. Παρουσιάζεται θεωρητικά το μοντέλο προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου και εκτιμώνται τα κέρδη από την πώληση ενέργειας. Παράλληλα τίθεται το πλαίσιο βελτιστοποίησης ενός υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα για τις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν.

Στο έκτο κεφάλαιο εφαρμόζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στο φράγμα της Πύλης. Προτού συμβεί αυτό αναλύεται η περιοχή μελέτης και τα γεωμορφολογικά στοιχεία του συγκεκριμένου έργου και η διαμόρφωση του σταθμού παραγωγής που θα λειτουργήσει. Για το σενάριο βάσης πραγματοποιείται ο συμβατικός σχεδιασμός του έργου. Έπειτα διερευνώνται υποθετικά σενάρια λειτουργίας και εξετάζεται η ανθεκτικότητα του συστήματος της Πύλης για τον σχεδιασμό που πραγματοποιήθηκε καθώς και για εναλλακτικό, που λαμβάνει υπόψιν τα νέα σενάρια.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού μέσω γλώσσας προγραμματισμού R. Συγκεκριμένα συγκεντρώνεται σε μορφή πινάκων το σύνολο των σεναρίων στο σύστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα Πύλης και ερευνάται η ολική βελτιστοποίηση του συστήματος που αποτελεί τη βάση του δυσμενούς σχεδιασμού.

Στο όγδοο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και προτείνονται αντικείμενα μελλοντικής έρευνας.

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

### 2.1 Φράγματα και Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Με την κατασκευή ενός φράγματος επί υδατορέματος επιτυγχάνεται η βασική λειτουργία αυτού του έργου, δηλαδή η δυνατότητα συγκέντρωσης και αποθήκευσης των υδάτων της λεκάνης απορροής σε μια υδάτινη έκταση που δημιουργείται ανάντη του φράγματος, τον ταμιευτήρα.

Η δημιουργία αυτού του αποθηκευτικού χώρου προσφέρει δυνατότητες διαχείρισης του υδάτινου δυναμικού για την κάλυψη ανθρώπινων αναγκών για τις οποίες θα προοριστεί το σύστημα.

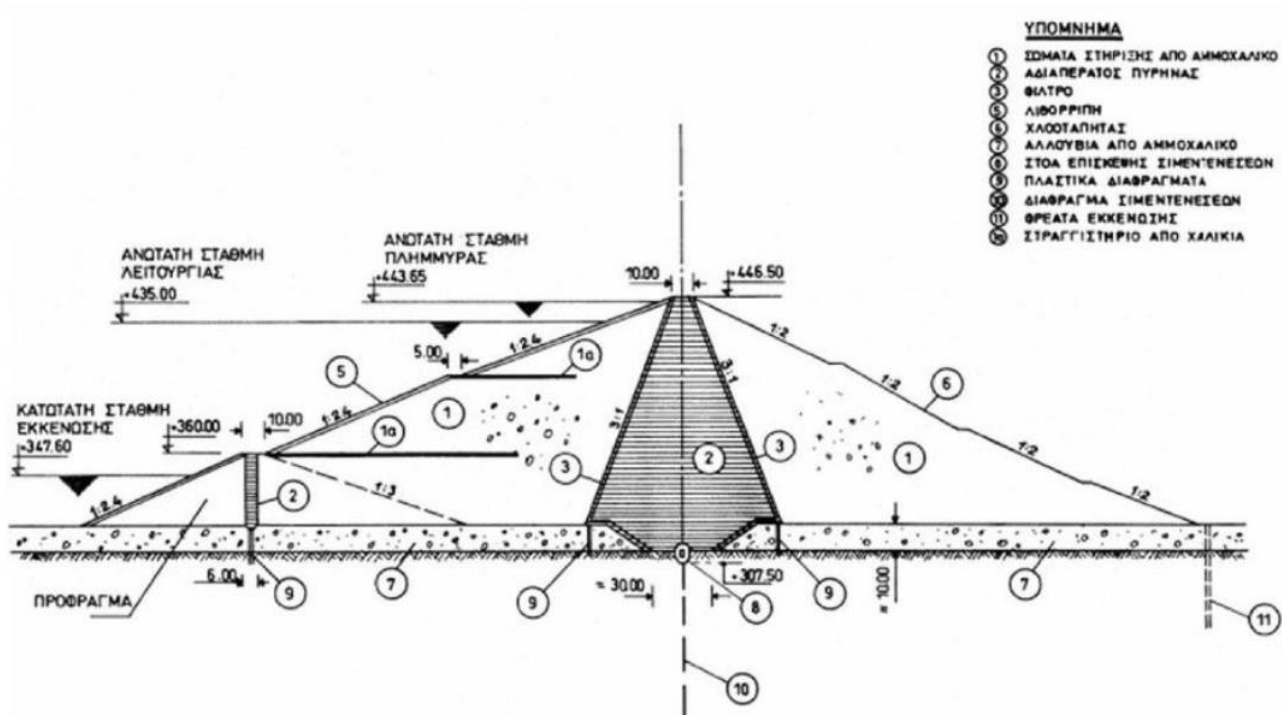
Οι βασικές ανθρώπινες ανάγκες που ικανοποιούνται με την ανέγερση ενός φράγματος είναι :

- η απόληψη νερού για ύδρευση και άρδευση καλλιεργειών ή χρήση του για άλλες ανάγκες των νοικοκυριών
- η αξιοποίηση του νερού που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα και της υψομετρικής διαφοράς που δημιουργείται με τον σταθμό παραγωγής κατάντη του φράγματος για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας
- προστασία από πλημμυρικά φαινόμενα

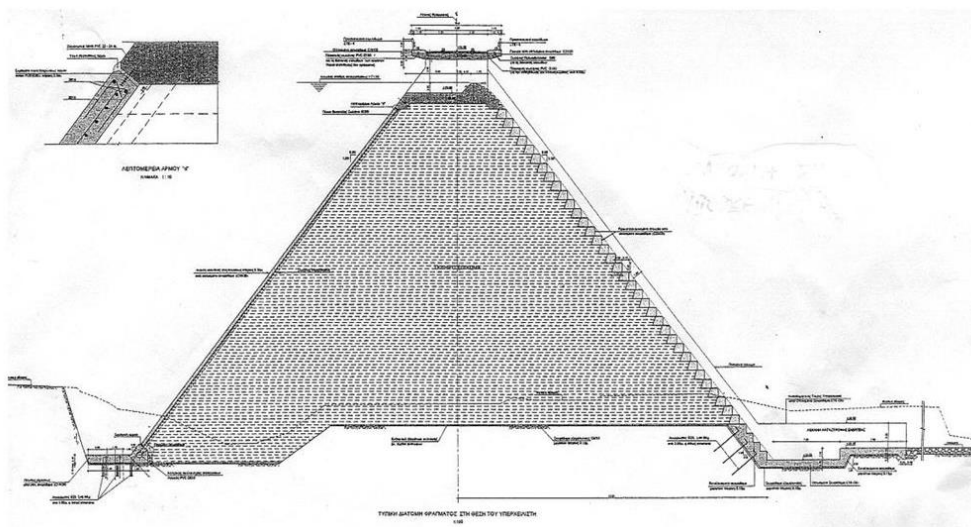
Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι φραγμάτων ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους, με τις εξής δύο βασικές κατηγορίες:

- Γεωφράγματα
  - Αποτελούνται από εδαφικά υλικά και αργιλικό πυρήνα και χωρίζονται σε :
    - Χωμάτινα (ομοιογενή ή διαζωνισμένα) (Εικόνα 1)
    - Λιθόρριπτα, που φέρουν λιθορριπή και αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα και σε αρκετές περιπτώσεις για λόγους στεγάνωσης έχουν ανάντη πλάκα σκυροδέματος
- Φράγματα Σκυροδέματος τα οποία εμφανίζονται ως:
  - Φράγματα βαρύτητας τα οποία κατασκευάζονται είτε από συμβατικό σκυρόδεμα είτε από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα RCC ενώ σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται σκληρό επίχωμα (Εικόνα 2)
  - Τοξωτά (Εικόνα 3)
  - Αντηριδωτά





Εικόνα 1: Τυπική Διατομή Χωμάτινου Φράγματος

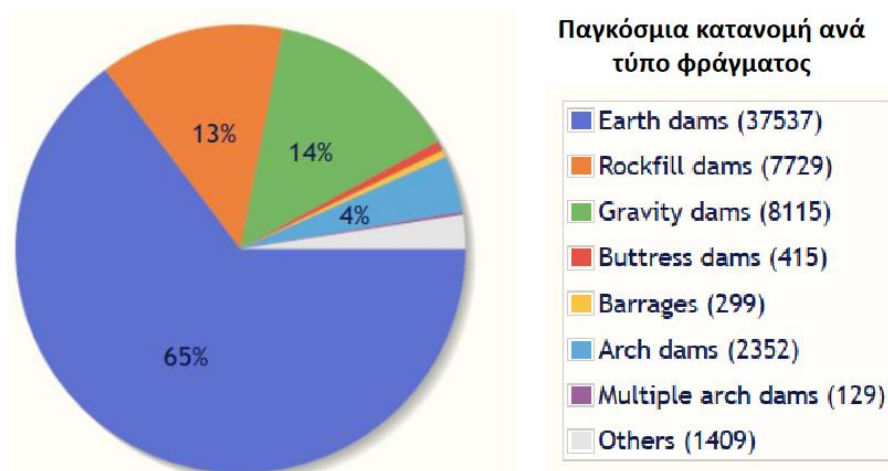


Εικόνα 2 : Τυπική Διατομή φράγματος σκληρού επιχώματος (Κόρης-Γεφύρι Χίος)

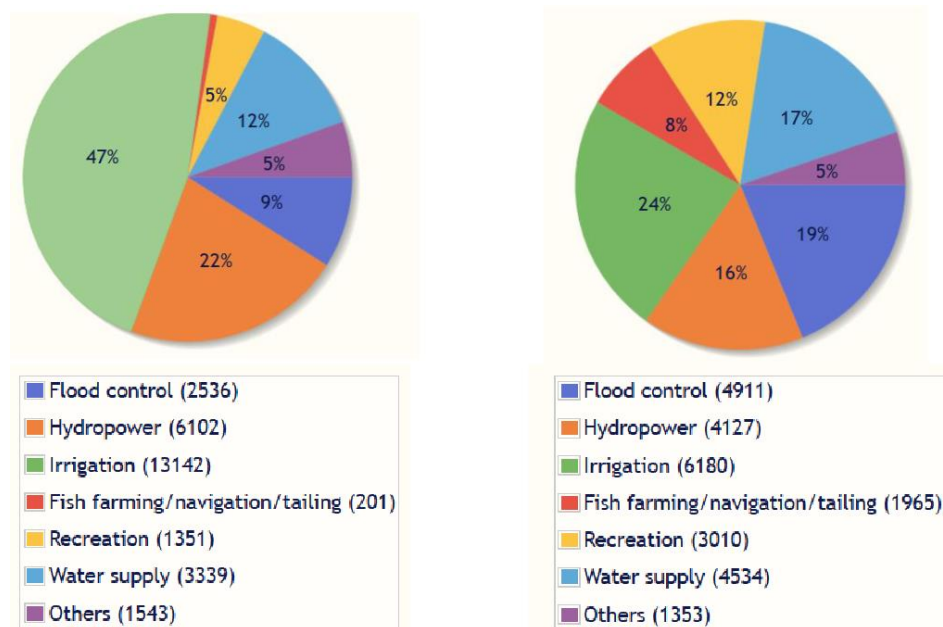


*Εικόνα 3: Τοξωτό φράγμα Πλαστήρα στον ποταμό Αχελώο*

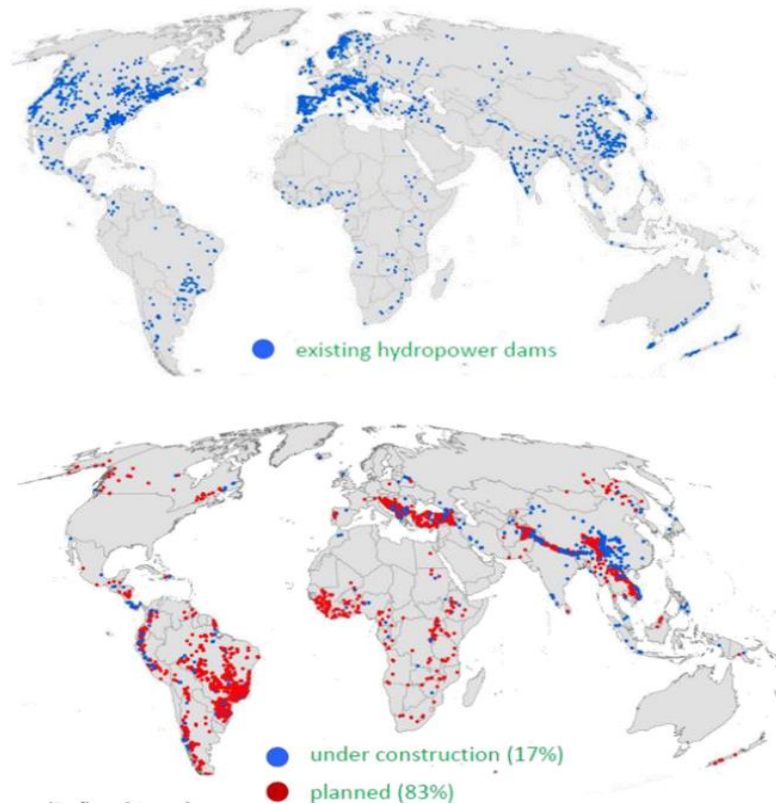
Στην Εικόνα 4 φαίνεται η κατανομή παγκοσμίως ανά τύπο φράγματος και ανάλογα τον σκοπό ή τους σκοπούς που εξυπηρετεί μέσω στατιστικών ερευνών (Εικόνα 5). Ακόμη μέσω επισκόπησης σκιαγραφείται η κατανομή των υδροηλεκτρικών φραγμάτων ανά τον κόσμο (Εικόνα 6).



Εικόνα 4: Παγκόσμια Κατανομή ανά τύπο φράγματος



Εικόνα 5: Παγκόσμια κατανομή φραγμάτων ανάλογα τον σκοπό ή σκοπούς που εξυπηρετούν



Εικόνα 6: Απεικόνιση υδροηλεκτρικών φραγμάτων παγκοσμίως

Όσον αφορά ένα φράγμα το οποίο προορίζεται για ενεργειακή παραγωγή, ο ταμιευτήρας του χαρακτηρίζεται ως υδροηλεκτρικός.

Ο υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας ενός φράγματος για να μπορέσει να αξιοποιηθεί κατάλληλα και να συμβάλει στην επίτευξη του ενεργειακού στόχου, συνοδεύεται από ένα σύνολο έργων που συνοδεύουν το κυρίως σώμα του φράγματος :

- Τον υπερχειλιστή, ο οποίος ανάλογα τον τύπο του φράγματος βρίσκεται στη στέψη του φράγματος (βαρύτητας) ή πλευρικά (γεωφράγματα) (Εικόνα 7) και είναι καθοριστικός για την ομαλή διέλευση των πλημμυρικών παροχών κατάντη του φράγματος. Με αυτό τον τρόπο προστατεύει τη χλωρίδα και τη πανίδα της κατάντη περιοχής σε περίπτωση ακραίων πλημμυρικών φαινομένων καθώς και την ανθρώπινη φύση σε περίπτωση κατοικημένης περιοχής πλησίον του φράγματος.
- Το σταθμό παραγωγής, στον οποίο η υδροδυναμική ενέργεια του νερού λόγω της υψομετρικής διαφοράς ανάντη και κατάντη του φράγματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Αποτελείται από τον αγωγό προσαγωγής, τους υδροστροβίλους και τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της εγκατάστασης.





Εικόνα 7: Πλευρικός υπερχειλιστής γεωφράγματος στο αριστερό αντέρεισμα

## 2.2 Σταθμός ενεργειακής παραγωγής

Τα βασικά υδροενεργειακά μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα σταθμό παραγωγής είναι τα εξής:

- Καθαρό Ύψος Πτώσης  $h_n$  : ορίζεται ως η ανά μονάδα μάζας υδραυλική ενέργεια που διατίθεται στους υδροστροβίλους. Λαμβάνει υπόψιν τις υδραυλικές απώλειες  $\Delta H$  κατά μήκος του αγωγού και αυτές στη διώρυγα φυγής, αν υπάρχει. Μέσω των απωλειών αυτών συσχετίζει τα ανάντη και κατόντη ενεργειακά υψόμετρα.

$$h_n = H_\alpha - H_k - \Delta H \quad (2.1)$$

Το ανάντη ενεργειακό υψόμετρο ταυτίζεται με τη στάθμη του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα. Το κατόντη εξαρτάται από το τι είδος στροβίλου θα χρησιμοποιηθεί στο έργο και αν αυτός θα είναι δράσης ή αντίδρασης. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται σταθερά στην έξοδο του ακροφυσίου κατά την είσοδο στον σταθμό παραγωγής ενέργειας ενώ στη δεύτερη στην έξοδο της διώρυγας φυγής.

- Ονομαστική παροχή αγωγού προσαγωγής  $Q$  : η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να διέλθει από τον αγωγό προσαγωγής ανά μονάδα χρόνου.
- Θεωρητική ισχύς  $P_o$  : Η ισχύς που αποδίδει το υδροηλεκτρικό έργο υποθέτοντας πλήρη εκμετάλλευση του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού, χωρίς υδραυλικές απώλειες. Ορίζεται ως

συνάρτηση της παροχής που διέρχεται από τον αγωγό και τους στροβίλους και της υψομετρικής διαφοράς της στάθμης του ταμιευτήρα και του ενεργειακού υψομέτρου κατάντη του σταθμού.

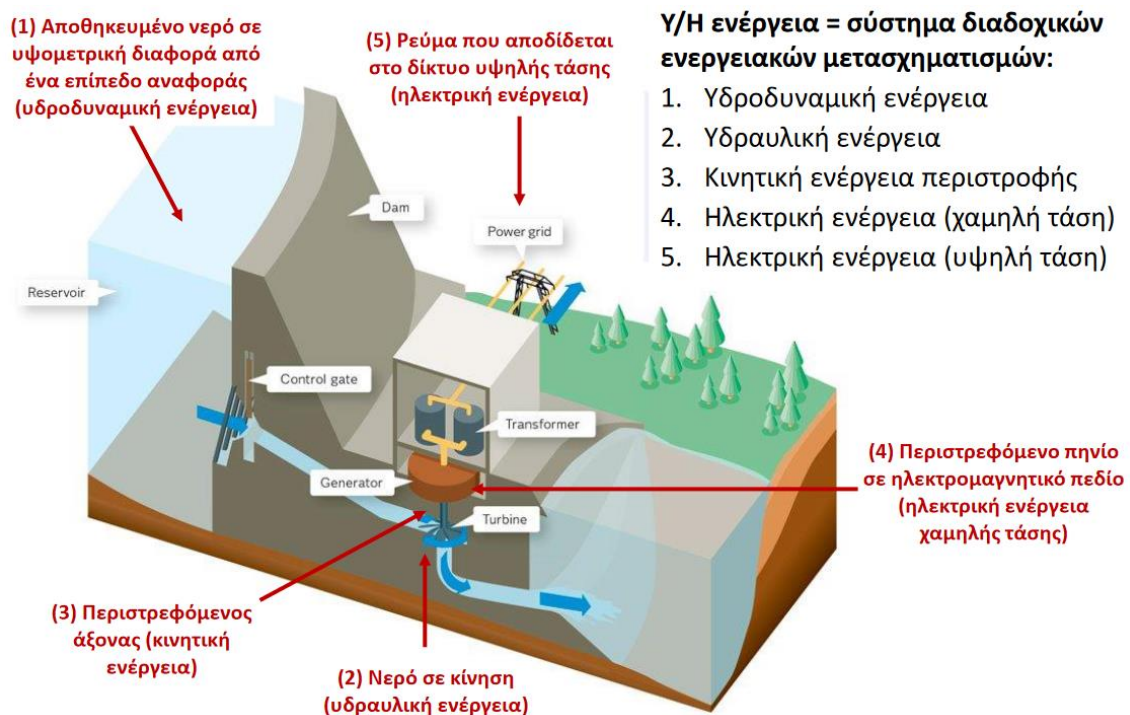
$$P_o = \gamma Q H \quad (2.2)$$

- Πραγματική ισχύς P : Σε αντίθεση με τη θεωρητική λαμβάνει υπόψη τη παροχή και την υψομετρική διαφορά ως μεταβαλλόμενα μεγέθη στο χρόνο και τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Στα μεγάλα Υ/Η έργα λαμβάνεται η εγκατεστημένη ισχύς για ένα ή περισσότερους στροβίλους και ορίζεται ως:

$$P = n \gamma Q H \quad (2.3)$$

- Παραγόμενη ενέργεια υδροηλεκτρικού σταθμού E : Η ενέργεια που παράγεται για εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η διαδικασία για τη παραγωγή ενέργειας προκύπτει μέσω συνεργασίας ενός συστήματος εξοπλισμού που περιγράφεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Απεικόνιση λειτουργίας υδροηλεκτρικού σταθμού

Τα βασικά στοιχεία του μετασχηματισμού του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια είναι:

- Αγωγός προσαγωγής

Ο αγωγός αυτός, συνήθως χαλύβδινος, μεταφέρει νερό από τον υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα στον σταθμό παραγωγής και συγκεκριμένα θέτοντας τους υδροστροβίλους σε κίνηση. Εξ' ορισμού, ο αγωγός αυτός λειτουργεί υπό πίεση.

- Υδροστρόβιλοι

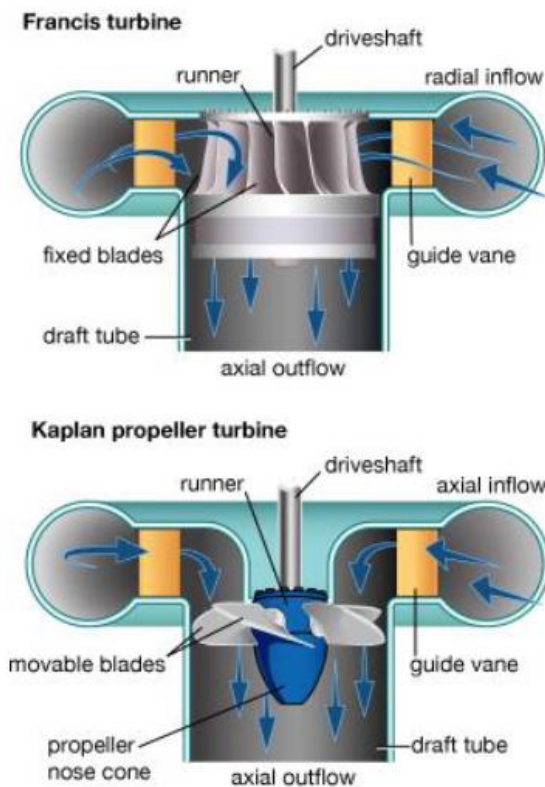
Μέσω της κίνησης τους που προκαλείται από την κινητική ενέργεια του νερού κατά την έξοδο του από τον αγωγό προσαγωγής θέτουν σε λειτουργία τη γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σταθμού παραγωγής ( $H_n$ ,  $Q$ ) (Εικόνα 11) επιλέγονται τύποι στροβίλων είτε δράσης (Cross-flow, Pelton (Εικόνα 10) ) είτε αντίδρασης (Francis, Kaplan) (Εικόνα 9) που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του έργου.

- Γεννήτρια

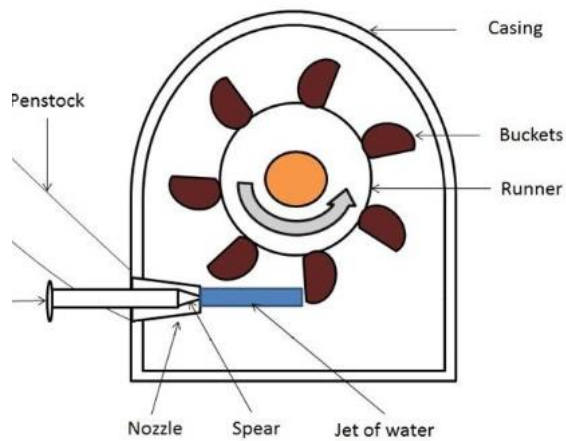
Η ηλεκτρογεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη τύπου και συμβάλλει στο σύστημα μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των μαγνητών του επαγωγέα και του πηνίου του ρότορα.

- Μετασχηματιστής ρεύματος

Ακολουθεί τη γεννήτρια, μετατρέποντάς την ηλεκτρική ενέργεια σε εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης.

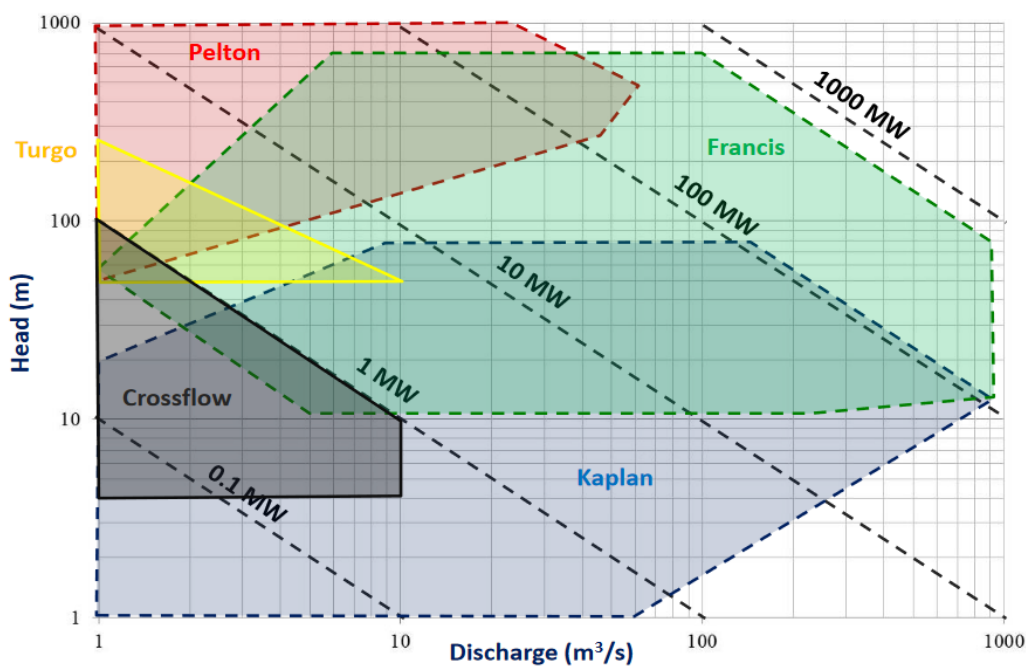


Εικόνα 9: Τρόπος λειτουργίας στροβίλων αντίδρασης



### Στρόβιλος δράσης

Εικόνα 10: Τρόπος λειτουργίας στροβίλων δράσης



Εικόνα 11: Επιλογή υδροστροβίλων ανάλογα με τα υδροενεργειακά μεγέθη ενός έργου

Το παραπάνω σύστημα ενεργειακής παραγωγής σχεδιάζεται για να ανταπεξέλθει στο σύνολο των αναγκών για τις οποίες προορίζεται (στόχος ενέργειας, ζήτηση νερού για άλλες χρήσεις), λειτουργώντας ταυτόχρονα σε αποδεκτά πλαίσια. Ο συμβατικός σχεδιασμός στοχεύει στη βελτιστοποίηση του με βάση τις παρούσες συνθήκες.

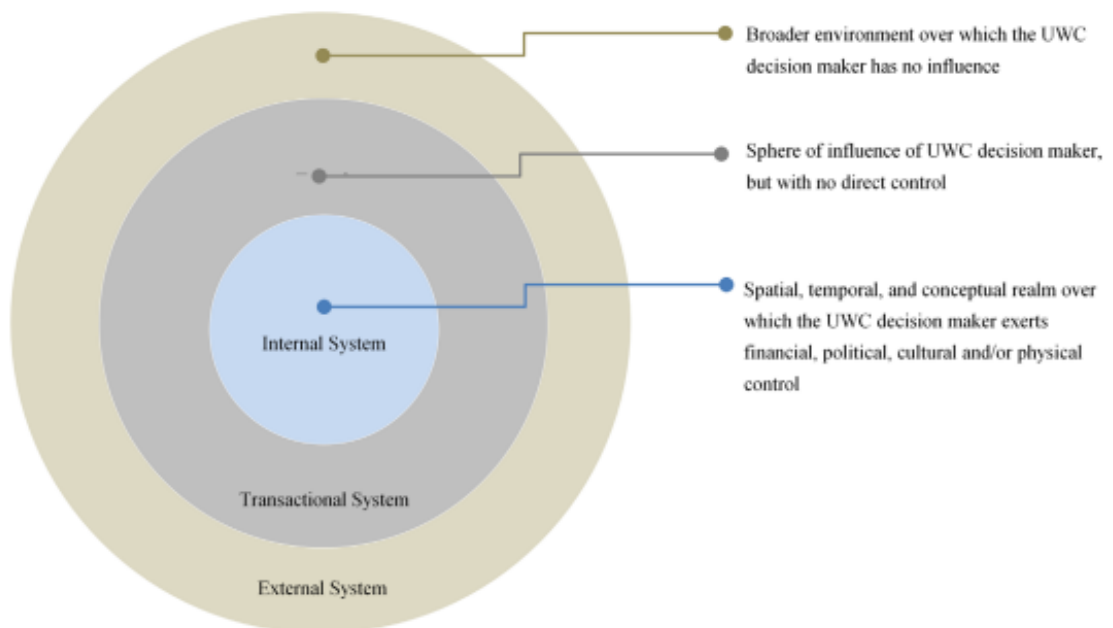


### 3. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΔΡΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ & Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

#### 3.1 Η αναγκαιότητα επαναπροσδιορισμού των τρεχουσών πρακτικών σχεδιασμού

Ο ορθολογικός σχεδιασμός και διαχείριση των υδροηλεκτρικών έργων συμβάλλει στη βιώσιμη ανάπτυξη των υδατικών και ενεργειακών πόρων και κάλυψη των αντίστοιχων ανθρώπινων αναγκών, ελαχιστοποιώντας όσο είναι δυνατόν το ρίσκο αποτυχίας κάλυψης των ζητήσεων σε νερό και ενέργεια.

Κάθε ενεργειακό σύστημα, και ειδικότερα τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, στη διάρκεια ζωής του καλείται να ανταπεξέλθει σε σημαντικές προκλήσεις που οδηγούν σε δυσκολίες στο να ανταποκρίνεται με αξιοπιστία στις λειτουργίες για τις οποίες σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε. Άλλες φορές, οι παράγοντες που αποσταθεροποιούν το σχεδιασμένο σύστημα προέρχονται από εξωτερικούς αστάθμητους παράγοντες (Μακροπουλος et al. 2018), όπως η αντιμετώπιση μιας παρατεταμένης περιόδου ξηρασίας (σχετίζεται με το κλίμα), ενώ άλλες οφείλονται σε καταστάσεις που μπορούν να προβλεφθούν από τον μηχανικό, όπως η φθορά του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ή του αγωγού προσαγωγής. Υπάρχει όμως και η περίπτωση ο σχεδιασμός να μπορεί να πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη εν μέρει κάποιες καταστάσεις που είναι πολύ δύσκολα προβλέψιμες, όπως δημογραφικές τάσεις με αύξηση του πληθυσμού ή κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και νερού των νοικοκυριών (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Συσχέτιση παραγόντων που επιδρούν στον σχεδιασμό του υδροηλεκτρικού έργου (Nikolopoulos et al. 2019)

Ο σκοπός του σχεδιασμού ενός ταμιευτήρα είναι πρωτίστως η κάλυψη των αναγκών σε νερό και ενέργεια (αν ο ταμιευτήρας είναι υδροηλεκτρικός), παράλληλα με την μεγαλύτερη δυνατή ελαχιστοποίηση του κόστους, λειτουργώντας σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές ανάγκες της περιοχής. Ωστόσο ο τρόπος που το σχεδιασμένο σύστημα αυτό ανταποκρίνεται στο πλήθος των παραπάνω παραγόντων που ενδέχεται να εμφανιστούν μακροπρόθεσμα ποικίλει σημαντικά. Όσο αποτελεσματικά και να ανταποκρίνεται το σχεδιασμένο σύστημα στο παρόν, ο τρόπος λειτουργίας του θεμελιώνεται στην υφιστάμενη κατάσταση, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάγκη τροποποίησής του με βάση μελλοντικές προκλήσεις που θα αντιμετωπίσει, ώστε να είναι σε θέση να τις απορροφήσει διατηρώντας, όσο είναι δυνατόν την αξιοπιστία του ως προς το μέγεθος που εξετάζεται. Ένας σχεδιασμός πιο ευέλικτος σε μακροπρόθεσμες αλλαγές είναι ιδανικός σε αυτή την περίπτωση. Έτσι, δημιουργείται μια νέα πρόκληση στον συμβατικό, βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό συστημάτων που εφαρμόζεται, με τον συσχετισμό του έργου με ένα πλήθος αβέβαιων επερχόμενων αλλαγών που δυσχεραίνουν τη λειτουργία του να αποτελεί τη νέα τάση.

Συνεπώς, μέσα από την διερεύνηση μελλοντικών σεναρίων αξιολογείται η συμπεριφορά του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα, ώστε ο σχεδιασμός του να λαμβάνει υπόψιν την ευαισθησία των παραπάνω παραγόντων (Efstratiadis et al. 2022). Τελικά, με την ενσωμάτωση της έννοιας της ανθεκτικότητας στον σχεδιασμό, εξασφαλίζεται η μακροπρόθεσμη λειτουργικότητα του ταμιευτήρα και η βιωσιμότητά της επένδυσης, καθώς ελαχιστοποιείται το ρίσκο αστοχιών λόγω μη προβλέψιμων καταστάσεων και εξωτερικών κινδύνων.

### **3.2 Η έννοια της ανθεκτικότητας ως μέγεθος μακροπρόθεσμου σχεδιασμού συστημάτων**

Στη συνέχεια επιχειρείται μια συσχέτιση του μεγέθους της ανθεκτικότητας, που εισάγει μια διαφορετική οπτική στο σχεδιασμό και τη διαχείριση έργων πολιτικού μηχανικού. Σε πρώτο στάδιο θα γίνει μια εισαγωγή στην έννοια της ανθεκτικότητας και θα αναλυθεί σύμφωνα με ιστορικές πηγές.

Η έννοια της ανθεκτικότητας εμφανίζεται σε ποικίλα πεδία επιστημών, από την γεωργία και την οικονομία, μέχρι την ενέργεια και τα υδάτινα συστήματα. Οι πολλαπλές έρευνες σχετικά με τον όρο αυτό, έχουν καταλήξει στο ότι η ανθεκτικότητα αφορά σε ένα σύστημα στο σύνολο του, και δεν πρόκειται για ιδιότητα ενός μεμονωμένου στοιχείου αλλά μέσο για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας του συστήματος (Makroroulos et al. 2018). Οι δύο εκδοχές της ορίζονται ως:

- Το πόση επιβάρυνση μπορεί να αντέξει το σύστημα λειτουργίας, χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουν τα δομικά στοιχεία με βάση τα οποία έχει σχεδιαστεί (Holling 1973).
- Το χρονικό περιθώριο που χρειάζεται το σύστημα για να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση μετά από αστοχία (Brede & de Vries 2009).

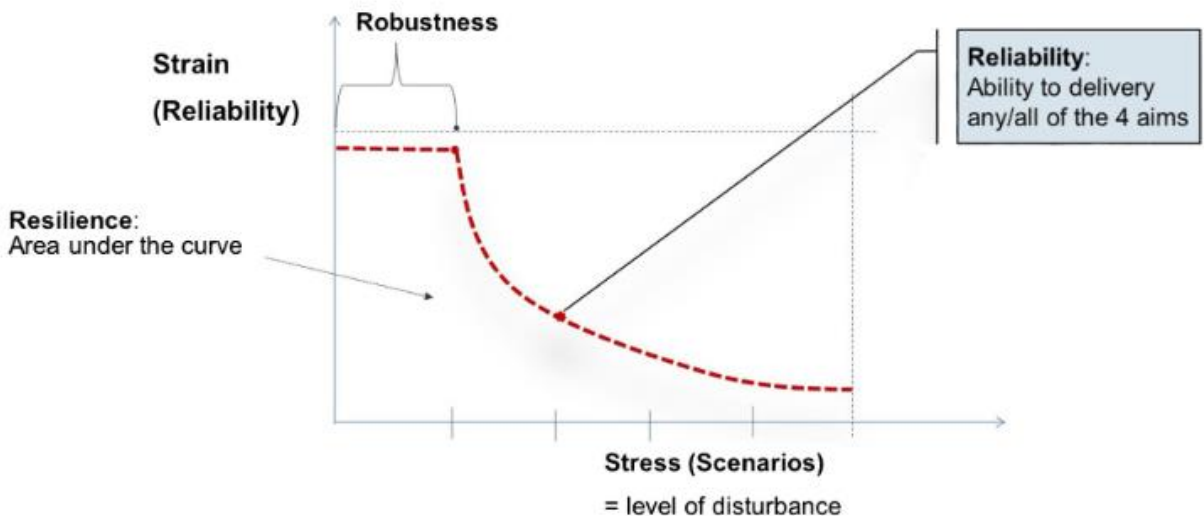
Όπως περιγράφει και ο Pizzol (2015), η ανθεκτικότητα εξαρτάται ταυτόχρονα από τα στοιχεία του συστήματος που διέπουν τη λειτουργία του ταμιευτήρα καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτά

συνδέονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, υψηλότερα επίπεδα ανθεκτικότητας του συστήματος επιτυγχάνονται όταν υπάρχουν περισσότερες αλληλοσυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων ή σε άλλες περιπτώσεις με την υπερδιαστασιοποίηση ενός εκ των μεγεθών.

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η ανθεκτικότητα διαφέρει με την απόδοση ενός συστήματος. Ενώ τα φυσικά συστήματα λειτουργούν κυρίως με την έννοια της ανθεκτικότητας, τα ανθρώπινα, όπως τα έργα μηχανικού, σχεδιάζονται με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Ωστόσο, συχνά τα συστήματα για να διαχειριστούν πιο αποτελεσματικά την επιβάρυνση που θα υποστούν από εξωτερικούς παράγοντες είναι σκόπιμο να σχεδιάζονται με τη μη βέλτιστη λύση από άποψη απόδοσης, αλλά με λιγότερο αποδοτική για τη βασική λειτουργία που θέλει να πετύχει.

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο της ανθεκτικότητας, σχεδιάζονται συστήματα με ικανότητα να απορροφούν καλύτερα τις αλλαγές που επέρχονται και το επιβαρύνουν, διατηρώντας παράλληλα τις σχέσεις που διέπουν τα μέρη του και τις σταθερές μεταβλητές που ορίζουν τη λειτουργία του.

Στην περίπτωση της εργασίας, ως ανθεκτικότητα πρακτικά ορίζουμε τον βαθμό στον οποίο το σύστημα του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα εξακολουθεί να λειτουργεί ομαλά (εξακολουθεί να κρίνεται ως οικονομικά συμφέρουσα επιλογή), κάτω από σταδιακά αυξανόμενη επιβάρυνση μέσω μιας σειράς σεναρίων. Στο προκείμενο σύστημα μελέτης, ως εξεταζόμενη μεταβλητή (strain) θα χρησιμοποιηθεί ένα οικονομικό μέγεθος που συσχετίζεται με την βιωσιμότητα του υδροηλεκτρικού έργου. Γραφικά, η συσχέτιση της ανθεκτικότητας με το εκάστοτε μέγεθος αξιολόγησης του συστήματος και τα σενάρια αυτά εκφράζεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Σχέση ανθεκτικότητας με μέγεθος βελτιστοποίησης του συστήματος (Makropoulos et al. 2018)

Το βασικό πλεονέκτημα της καμπύλης ανθεκτικότητας αποτελεί η ενσωμάτωση του πλαισίου της αβεβαιότητας με τρόπο που μπορεί να συσχετιστεί με τη λειτουργία του συστήματος (Nikolopoulos et al 2022). Μέσω των σεναρίων επιβάρυνσης του συστήματος, συγκεντρώνονται πλήθος στοχαστικών μεταβλητών και μεταβλητών παραμέτρων του προβλήματος που θέτουν το σύστημα

υπό σε συνεχείς αλλαγές στο τρόπο λειτουργίας του. Με αυτό τον τρόπο, εισάγεται η αβεβαιότητα βραχυπρόθεσμα, αλλά και μακροπρόθεσμα. Η διαχείριση του υδροηλεκτρικού έργου μελετάται σε ευρύτερη βάση και εξετάζεται υπό την επίδραση περισσότερων παραγόντων. Έτσι, λαμβάνονται υπόψη παράλληλα με τις παραμέτρους του προβλήματος πλήθος μελλοντικών φαινομένων. Τα σενάρια που περιγράφουν τα φαινόμενα αυτά προσαρμόζονται στις διαρκείς εξελίξεις και ανανεώνονται. Κάποιες βασικές κατηγορίες παρατίθεται στην Εικόνα 14.

Parameter
Population
Number of households
Age distribution (% > 65)
Ethnic composition (% non-western migrants)
Knowledge development (% Gross Domestic Product (GDP) for scientific research)
GDP per capita of area
Public Finances (% GDP for public spending, national)
Temperature (degrees Celsius)
Average rainfall (winter/summer)
Industrial demand (hm <sup>3</sup> /y)
Horticultural demand (hm <sup>3</sup> /y)
Basic domestic water use (behavioral/technological) l/person/d
Water Governance (public, public-private, private)
Risk acceptance (zero tolerance, acceptance)
Trust in corporations (low, medium, high)
Trust in government (low, medium, high)
Environmental values (low, medium high)
Dominant ideology (progressive, liberal, conservative)
Quality Standards Drinking Water (Netherlands (NL), World Health Organization (WHO))

Εικόνα 14: Ενδεικτικά σενάρια διερεύνησης μακροπρόθεσμου σχεδιασμού ενός υδροηλεκτρικού έργου (Nikolopoulos et al. 2019)

Παρόλα αυτά, το μέγεθος της ανθεκτικότητας είναι στατικό και ορισμένο και καθορίζεται από τις καμπύλες που ορίζουν τα επιλεγμένα σενάρια διερεύνησης. Με άλλα λόγια, η επίδραση ενός συνόλου αβεβαιοτήτων ποσοτικοποιείται μέσω των καμπυλών αυτών που εκφράζουν την ανθεκτικότητα του συστήματος και πως αυτή επηρεάζεται μέσω αλλαγών διαφορετικής φύσεως.

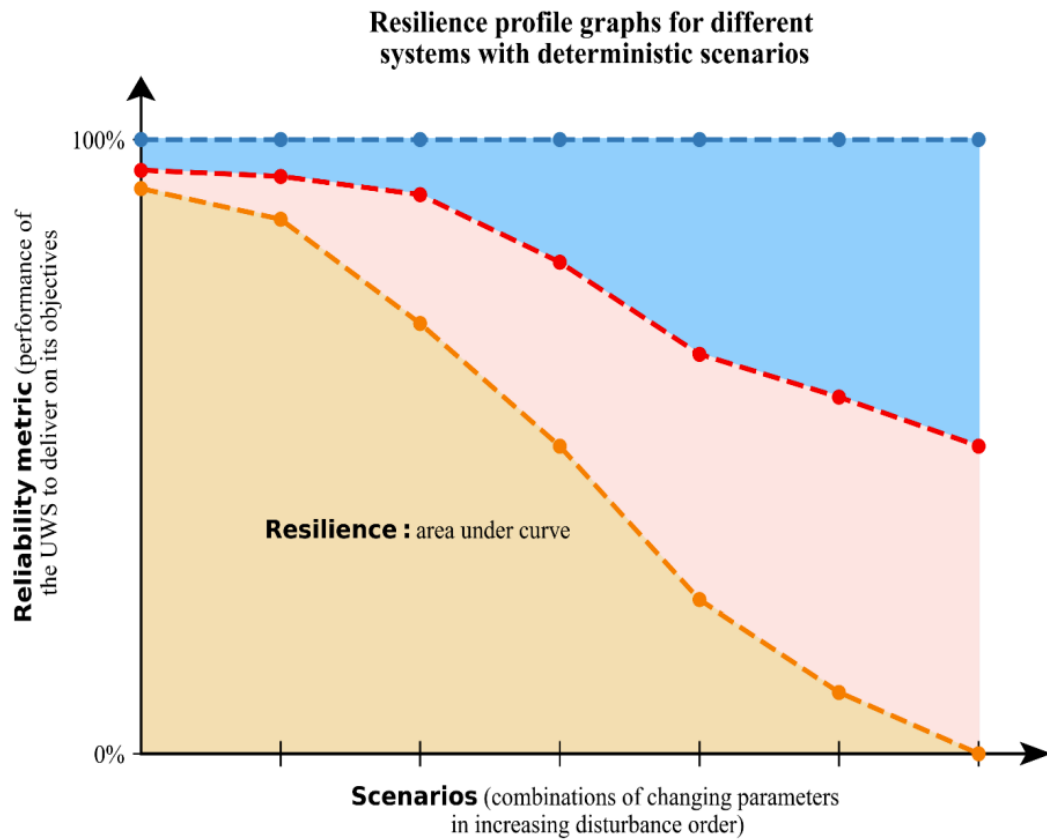
Στο επίπεδο των σεναρίων διερεύνησης συμπεριλαμβάνονται τόσο παράγοντες που δεν επηρεάζονται από τον σχεδιασμό όσο και από άλλους που μπορούν να προβλεφθούν. Αυτές οι πληροφορίες απεικονίζονται στην Εικόνα 13, και ειδικότερα στον οριζόντιο άξονα του γραφήματος, ενώ στον κατακόρυφο άξονα αναπαρίσταται η συμπεριφορά του συστήματος ως προς το μέγεθος που εξετάζεται στο πρόβλημα. Ο συνδυασμός αυτών είναι τα αντικείμενα επεξεργασίας των καμπυλών ανθεκτικότητας.

Σημαντικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος λειτουργίας που διακρίνεται στην Εικόνα 13 αποτελεί η έννοια της ευρωστίας (robustness), δηλαδή της δυνατότητα του συστήματος να μην αστοχεί σε σταδιακά αυξανόμενη πίεση. Το μέγεθος της ευρωστίας αντιστοιχεί στο οριζόντιο τμήμα του γραφήματος, κατά το οποίο το σύστημα παρά την αύξηση της επιβάρυνσης που του επιβάλλεται, καταφέρνει να διατηρήσει σε υψηλά επίπεδα το προς βελτιστοποίηση μέτρο επίδοσης, που αξιολογεί τη συμπεριφορά του συστήματος. Είναι προφανές πως συγκρίνοντας δύο συστήματα, αυτό με το μεγαλύτερο μέτρο ευρωστίας εμφανίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο πλήθος των ιδίων αλλαγών που θα συμβούν σε αυτά. Με άλλα λόγια, η ευρωστία και η ανθεκτικότητα είναι δύο αλληλοσυνδεόμενα μεγέθη, με το πρώτο να είναι ουσιαστικά υποσύνολο του δεύτερου, καθώς εκφράζει την ανθεκτικότητα του συστήματος σε μέρος των αλλαγών σταδιακά αυξανόμενης επιβάρυνσης.

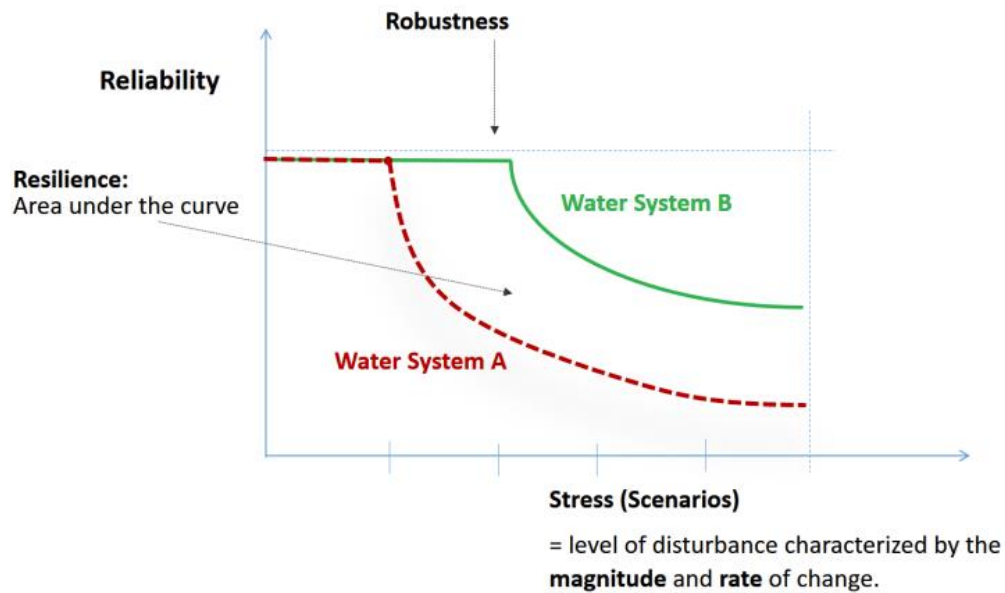
Στην Εικόνα 15, φαίνονται εποπτικά δύο υποθετικά συστήματα διαφορετικής ανθεκτικότητας στις ίδιες συνθήκες και ένα το οποίο διατηρεί πλήρως τα χαρακτηριστικά του και παραμένει ανεπηρέαστο από αυτές.

Ένα σύστημα με μεγαλύτερη ευρωστία, παρά το γεγονός ότι διατηρεί την ανθεκτικότητά του για τις συνθήκες αυτές σε σχέση με το άλλο και το μέγεθος του επηρεάζεται λιγότερο, ενδέχεται με μεγαλύτερη επιβάρυνση και εξέταση περαιτέρω σεναρίων λειτουργίας, η συμπεριφορά που παρουσιάζει να επιδεινώνεται δραστικά, με την καμπύλη ανθεκτικότητας να κατεβαίνει πολύ πιο απότομα. Σε μια τέτοια περίπτωση, το δεύτερο σύστημα που στις πρώτες αλλαγές φαινόταν να επηρεάζεται περισσότερο και να είναι λιγότερο ανθεκτικό, ενδέχεται στο σύνολο της διερεύνησης η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη ανθεκτικότητας του να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πρώτου, όντας συνολικά ανθεκτικότερο.

Υπάρχει βέβαια και η περίπτωση που το σύστημα με τη μεγαλύτερη ευρωστία (Water System B) να εξακολουθεί να είναι πιο ανθεκτικό σε επόμενες αλλαγές μεγαλύτερης επιβάρυνσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 15: Σύγκριση της συμπεριφοράς τριών συστημάτων υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας (Nikolopoulos et al 2022)



Εικόνα 16: Σύγκριση συστημάτων διαφορετικού robustness που διατηρούν ίδια συμπεριφορά σε επόμενες αλλαγές (Nikolopoulos et al. 2019)

Η εξέταση συστημάτων σε μεγάλο εύρος αλλαγών διαφορετικών φύσεων παρέχει μια πιο πλήρη αντίληψη για την συμπεριφορά τους και πιο αξιόπιστη σύγκρισή τους ως προς κοινά μεγέθη αξιολόγησης. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η υψηλή ανθεκτικότητα δεν εγγυάται απαραίτητα και υψηλή ευρωστία, όπως και το αντίθετο.

Παράλληλα, μέσα από τις καμπύλες ανθεκτικότητας μπορούν να συγκριθούν δύο συστήματα για συγκεκριμένα σενάρια, όπως μη προβλέψιμες γεωπολιτικές αλλαγές, που επηρεάζουν τα μακροοικονομικά μεγέθη, ή υδροκλιματικές αλλαγές, που δεν εξηγούνται στατιστικά από τα ιστορικά δεδομένα.

Όσον αφορά στον σχεδιασμό μεγάλων έργων υποδομής, που συμβατικά γίνεται με βάση ένα δεδομένο σύνολο υποθέσεων για τις συνθήκες του μέλλοντος, ενδέχεται να μην εξασφαλίζει επαρκή ανθεκτικότητα έναντι πιο δυσμενών σεναρίων. Η περίπτωση αυτή θα εξεταστεί εκτενώς στη παρούσα διπλωματική, με αναφορά στον σχεδιασμό υδροηλεκτρικών έργων.

## **4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

### **4.1 Τυποποίηση προβλήματος εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας υδροηλεκτρικών έργων**

Κάθε έργο που προορίζεται για παραγωγή ενέργειας έχει στόχο κατά τη διάρκεια ζωής του να αποκομίζει μέσω της πώλησης ενέργειας κέρδος τέτοιο, ώστε να αντισταθμίζει τις δαπάνες που απαιτήθηκαν για να κατασκευαστεί. Στη συνέχεια επιχειρείται να δοθεί μια μεθοδολογία τυποποιημένης αξιολόγησης της βιωσιμότητας των υδροηλεκτρικών έργων, με βάση δύο βασικά μεγέθη που αναπτύσσονται αναλυτικά παρακάτω, ήτοι το μέσο ετήσιο κόστος  $C_y$  και το μέσο ετήσιο όφελος ενός υδροηλεκτρικού έργου  $K_y$ . Μέσω αυτών αποτιμάται η οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

#### **4.1.1 Μέσο ετήσιο κόστος**

Ο όρος του μέσου ετήσιου κόστους συγκεντρώνει το σύνολο των δαπανών  $C$  για το σχεδιασμό και την κατασκευή του υδροηλεκτρικού έργου ανηγμένος σε ετήσια βάση, λαμβάνοντας υπόψιν τον χρόνο οικονομικής ανάλυσης του έργου. Αυτές αναφέρονται σε :

##### Μέρος 1

- Φράγμα & Συνοδά υδραυλικά έργα (υπερχειλιστής, έργα εκτροπής και εκκένωσης κατά την κατασκευή, σύνολο εκσκαφών ,οδοί προσπέλασης)
- Λειτουργικά Κόστη (απόσβεση, ασφάλιστρα ,απρόβλεπτα)
- Γενικά Έξοδα & Οφέλη Εργολάβου (Γ.Ε. & Ο.Ε.)
- Κόστος μελετών, αδειοδότησης , επίβλεψης έργου
- Κόστη έργου υδροληψίας & κτιρίου υδροηλεκτρικού σταθμού

##### Μέρος 2

- Κόστη αγοράς, εγκιβωτισμού, μεταφοράς και εκσκαφών του αγωγού προσαγωγής

##### Μέρος 3

- Κόστη Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (υδροστρόβιλοι, γεννήτρια, μετασχηματιστής, ηλεκτρικοί πίνακες και όργανα, ρυθμιστής στροφών, ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς)

Για να αναχθούν οι δαπάνες αυτές σε ετήσια μεγέθη κόστους απαιτείται να ληφθούν υπόψιν και να αναλυθούν βασικά οικονομικά μεγέθη και χαρακτηριστικά του έργου.



- Πληθωρισμός (inflation)

Χαρακτηρίζεται ως το φαινόμενο αυξομείωσης των τιμών αγαθών και υπηρεσιών κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου με μη ομοιόμορφο τρόπο για κάθε ένα από αυτά. Ο πληθωρισμός είναι μακροοικονομικό μέγεθος το οποίο καθορίζεται τόσο από την κατάσταση εθνικής οικονομίας όσο και από τις διεθνείς εξελίξεις. Στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών έργων που έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής η πρόβλεψη του οικονομικού αυτού μεγέθους συνοδεύεται με αβεβαιότητα.

- Επιτόκιο (interest rate)

Ως επιτόκιο θα χρησιμοποιηθεί η έννοια του προεξοφλητικού επιτοκίου. Το μακροοικονομικό αυτό μέγεθος λαμβάνεται μεγαλύτερο από το επιτόκιο δανεισμού για να καλυφθούν οι οικονομικές αβεβαιότητες της παραγωγής κατά τη διάρκεια ζωής και λειτουργίας του έργου. Λαμβάνει υπόψιν στον υπολογισμό της αξίας του έργου σήμερα του ποσού χρημάτων που θα δαπανηθούν ή θα εισπραχθούν μελλοντικά. Μέσω του επιτοκίου κρίνεται εάν η επένδυση είναι βιώσιμη ή όχι. Ουσιαστικά καθορίζει την ποσοστιαία προσαύξηση που καταβάλλεται στον δανειοδότη για το ποσό του δανείου με το οποίο καλύπτεται μέρος της συνολικής επένδυσης.

- Χρόνος απόσβεσης έργου

Ο χρόνος απόσβεσης αποτελεί ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται για την αναγωγή της συνολικής επένδυσης μιας παραγωγικής διαδικασίας σε ετήσιες δαπάνες με τη βοήθεια και του επιτοκίου. Ύστερα από τον χρονικό αυτό ορίζοντα το έργο παύει να αποφέρει δαπάνες.

Πέραν των παραπάνω δαπανών στο συνολικό κόστος τις υδροηλεκτρικού έργου οφείλουν να συμπεριληφθούν και τα κόστη αντικατάστασης του εξοπλισμού εφόσον απαιτείται.

Και τα δύο αυτά είδη δαπανών θα αναχθούν σε ετήσιες δαπάνες με βάση το προεξοφλητικό επιτόκιο  $i$  και τον χρόνο απόσβεσης  $T$  που αναλογούν σε κάθε μέρος του έργου. Για τις συνολικές δαπάνες των επιμέρους εργασιών των τμημάτων του έργου  $j$  προκύπτουν τα ανηγμένα κόστη  $A$ :

$$A_j = C_j * i * \frac{(1 + i)^T}{(1 + i)^T - 1} \quad (4.1)$$

Τα κόστη αντικατάστασης εξοπλισμού  $j$  υπολογίζονται ως:

$$A_{repj} = \frac{1}{(1 + i)^T} * A_j \quad (4.2)$$

Για το σύνολο των ετών οικονομικής ανάλυσης ενός έργου αθροίζοντας για κάθε έτος τις δαπάνες  $A$  και  $A_{rep}$  για όλα τα μέρη  $j$  του έργου έχουμε τις συνολικές ετήσιες δαπάνες  $A_{tot}$ .

Το μέσο ετήσιο κόστος  $C_y$  προκύπτει ως ο μέσος όρος των τιμών  $A_{tot}$  για χρονικό δείγμα ίσο με το χρόνο οικονομικής ανάλυσης του έργου.

#### 4.1.2 Μέσο όφελος ανά έτος

Για να εκτιμηθεί η βιωσιμότητα του υδροηλεκτρικού έργου και να γίνει η οικονομική αποτίμηση του, μέσω του μέσου ετήσιου οφέλους  $K_y$ , θα γίνει η σύγκριση με τις μέσες ετήσιες δαπάνες που προέκυψαν.

Τα έσοδα του έργου θα προκύψουν αποκλειστικά από τις χρήσεις για τις οποίες προορίζεται. Τα έργα υδροηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας αποκομίζουν κέρδος μέσω της πώλησης της παραγόμενης ενέργειας.

Αν εξυπηρετούν και άλλες χρήσεις νερού όπως άρδευσης και ύδρευσης αποκτούν πρόσθετο όφελος από την πώληση του νερού για την κάλυψή τους. Ασφαλώς, αν ο ταμιευτήρας εξυπηρετεί και άλλες χρήσεις νερού, τότε πρέπει να συμπεριληφθεί και η ρήτρα μη κάλυψης των παραπάνω ζητήσεων και κατά συνέπεια τίθεται πρόβλημα βελτιστοποίησης για την κερδοφορία του έργου.

Συγκεκριμένα, για ενεργειακό στόχο  $k$  μήνα  $P_{targetk}$  σε GWh και ζήτηση νερού  $Z_k$  για άλλες χρήσεις το όφελος ανά μήνα  $K_k$  προκύπτει:

$$K_k = C_p * \min(P_{targetk}, E_k) + C_s * (\max(0, E_k - P_{targetk}) + E_{envk}) - R_e * \max(0, P_{targetk} - E_k) + C' * \min(Z_k, r_k') - R' * \max(0, Z_k - r_k') \quad (4.3)$$

όπου:

$C_p$ : Η τιμή πώλησης της πρωτεύουσας ενέργειας όταν το ενεργειακό απόθεμα δεν υπερβαίνει τον στόχο που έχει τεθεί

$E$ : Η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα σε GWh

$E_{env}$ : Η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα σε GWh από το νερό οικολογικών εκροών

$C_s$ : Η τιμή πώλησης της δευτερεύουσας ενέργειας όταν το ενεργειακό απόθεμα ξεπερνάει τον στόχο που έχει τεθεί. Συνήθως υπολείπεται της  $C_p$

$R_e$ : Η ρήτρα που θα δοθεί σε περίπτωση ελλείματος και παραγωγής ενέργειας μικρότερης του στόχου

$r'$ : Η ποσότητα του νερού που διατίθεται για πιθανές άλλες χρήσεις πέραν της ενέργειας

$R'$ : Η ρήτρα που θα δοθεί σε περίπτωση μη κάλυψης της ζήτησης  $Z_k$

$C'$ : Η τιμή πώλησης του νερού για άλλη χρήση πέραν της υδροηλεκτρικής ενέργειας

Ανάλογα με το μήκος της χρονοσειράς για το οποίο γίνεται η προσομοίωση του ταμιευτήρα για το σύνολο των μηνιαίων εσόδων  $K_k$  υπολογίζονται ανά ακέραιο πολλαπλάσιο του χρόνου οικονομικής ανάλυσης του έργου τα μέσα ετήσια οφέλη  $K_{y(L/t)}$ . Συνολικά, υπολογίζονται  $L/t$  τέτοια οφέλη όπου  $L$  το μήκος χρονοσειράς εισροών του ταμιευτήρα και  $t$  ο χρόνος οικονομικής ανάλυσης του έργου.

Το ζητούμενο μέσο ετήσιο όφελος για όλη τη περίοδο ανάλυσης  $K_y$  είναι ο μέσος όρος των  $K_{y(L/t)}$ .

### 4.1.3 Κέρδος & Ζημία ενός υδροηλεκτρικού έργου

Για γνωστό μέσο ετήσιο κόστος και μέσο ετήσιο όφελος για ένα υδροηλεκτρικό έργο, μέσω της διαφοράς των δύο μεγεθών αξιολογείται αν το έργο τελικά είναι οικονομικά βιώσιμο ή όχι, ήτοι:

$$f = Ky - Cy \quad (4.4)$$

Συγκεκριμένα, εάν :

- $f > 0$ , η λειτουργία του έργου επιφέρει κέρδος
- $f < 0$ , η λειτουργία του έργου είναι μη συμφέρουσα

Έχει εκτιμηθεί ένας μηχανισμός σύγκρισης των εσόδων και των εξόδων κατά μέσο όρο για ένα σύνολο χρονικής περιόδου οικονομικής ανάλυσης. Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται σε υπερετήσια βάση.

Με βάση το μέγεθος  $f$  θα αναλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού σε δύο πλαίσια λειτουργίας, τον συμβατικό και τον δυσμενή υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας.

Στην περίπτωση ανάλυσης ενός φράγματος για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, εάν  $f < 0$  σημαίνει πως δεν μπορεί με βάση τα προβλεπόμενα κόστη και έσοδα να ικανοποιήσει αυτό τον σκοπό .

Επιτυγχάνεται λοιπόν με αυτό τον τρόπο μια τυποποιημένη διαδικασία αξιολόγησης της βιωσιμότητας ενός έργου σχετικά με τον σκοπό ή τους πολλαπλούς σκοπούς για τους οποίους σχεδιάζεται.

### 4.2 Οικονομικά Στοιχεία για φράγματα Ελλαδικού χώρου

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα για την εκτίμηση του μέσου ετήσιου κόστους, απαιτείται ο προσδιορισμός των συνολικών δαπανών ενός φράγματος. Η διαδικασία αυτή συνδυάστηκε με εκτενή αναζήτηση οριστικών μελετών ήδη κατασκευασμένων ή σχεδιασμένων φραγμάτων του Ελληνικού χώρου προκειμένου να συγκεντρωθεί ικανοποιητικό δείγμα οικονομικών προϋπολογισμών. Αυτοί θα αξιοποιηθούν ως βάση δεδομένων για την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου.

Για τα φράγματα οι συνολικές δαπάνες  $C$  που αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται ως εξής :

- Κόστη Προϋπολογισμού Φράγματος  $C_{\text{φραγ.}}$ 
  - Φράγμα & Συνοδευτικά υδραυλικά έργα (υπερχειλίσης, εκτροπής και εκκένωσης κατά την κατασκευή, σύνολο εκσκαφών ,οδοί προσπέλασης)
  - Λειτουργικά Κόστη (απόσβεση, ασφάλιστρα ,απρόβλεπτα)
  - Γενικά Έξοδα & Οφέλη Εργολάβου (Γ.Ε. & Ο.Ε.)
- Κόστος μελετών, αδειοδότησης, επίβλεψης έργου  $C_{\text{μελ}}$

- Κόστη έργου υδροληψίας  $C_{υδρ}$
- κτιρίου υδροηλεκτρικού σταθμού  $C_{ΥΗΣ}$
- Κόστη αγωγού προσαγωγής
  - αγοράς & εγκιβωτισμού  $C_{αγωγού}$
  - μεταφοράς και εκσκαφών του αγωγού προσαγωγής  $C_{αγωγού}$
- Κόστη Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού  $C_{ΗΜΕ}$  (υδροστρόβιλοι, γεννήτρια, μετασχηματιστής, ηλεκτρικοί πίνακες και όργανα, ρυθμιστής στροφών, ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς)

Με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίηση των δαπανών του υδροηλεκτρικού έργου θα αναλυθεί η μεθοδολογία υπολογισμού αυτών με βάση ελληνικές προδιαγραφές και στατιστικές έρευνες φραγμάτων της Ελλάδας.

#### Κόστη Προϋπολογισμού Φράγματος $C_{φραγ.}$

Στην κατηγορία αυτή της οικονομικής ανάλυσης των έργων περιλαμβάνονται οι δαπάνες που αναγράφονται στον οικονομικό προϋπολογισμό των προκαταρκτικών ή οριστικών μελετών φραγμάτων που κατασκευάστηκαν ή απλά σχεδιάστηκαν. Να σημειωθεί ότι στον προϋπολογισμό αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται ο φόρος προστιθέμενης αξίας (Φ.Π.Α.), κόστη ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και απαλλοτριώσεις. Επίσης, λαμβάνονται απρόβλεπτα κόστη σε ποσοστό 9% του προϋπολογισμού και Γ.Ε.&Ο.Ε. σε ποσοστό 18% αυτού.

Επιλέχθηκαν τέτοιοι προϋπολογισμοί φραγμάτων του Ελλαδικού χώρου και μέσω στατιστικής ανάλυσης τους, προέκυψε η μεθοδολογία τυποποίησης της ανάλυσης του συγκεκριμένου κόστους για ένα τυχαίο φράγμα της Ελλάδας .

Ταυτόχρονα κατά τη συλλογή στοιχείων φραγμάτων από μελετητικά γραφεία (Σοφιός Α.Ε., ΥΔΡΕΤΜΕ) αλλά και δημόσιες υπηρεσίες (ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΑΑΤ) πρέπει να σημειωθεί ότι τα φράγματα που χρησιμοποιούνται στο δείγμα διαφέρουν στη χρονολογία μελέτης και κατασκευής τους μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα φράγμα που κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1980 με ένα άλλο της δεκαετίας του 2000 έχουν διαφορετική χρηματιστηριακή αξία ως προς τον προϋπολογισμό τους λόγω μεταβολής των μακροοικονομικών μεγεθών στο χρόνο. Για να αντιμετωπιστεί η πρόκληση αυτή ανάγονται όλοι οι προϋπολογισμοί μέσω κατάλληλων συντελεστών  $\lambda$  και  $TK$  σε κοινό έτος αναφοράς ώστε οι δαπάνες να δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα μεταξύ τους.

Για χρονολογία φράγματος πριν το 2010 χρησιμοποιούνται οι συντελεστές  $\lambda$  (**Πίνακας 1**).

**Πίνακας 1: Συντελεστές αναγωγής λ για έτη φραγμάτων πριν το 2010**

Έτος	Τρίμηνο	λ	Έτος	Τρίμηνο	λ	Έτος	Τρίμηνο	λ	Έτος	Τρίμηνο	λ
1986	α	0.0276	1992	α	0.0764	1998	α	0.1334	2004	α	0.1748
	β	0.0276		β	0.0779		β	0.1350		β	0.1748
	γ	0.0295		γ	0.0810		γ	0.1376		γ	0.1748
	δ	0.0295		δ	0.0821		δ	0.1376		δ	0.1783
1987	α	0.0341	1993	α	0.0863	1999	α	0.1400	2005	α	0.1822
	β	0.0341		β	0.0874		β	0.1400		β	0.1822
	γ	0.0363		γ	0.0946		γ	0.1420		γ	0.1822
	δ	0.0363		δ	0.0955		δ	0.1420		δ	0.1859
1988	α	0.0409	1994	α	0.1004	2000	α	0.1442	2006	α	0.1913
	β	0.0409		β	0.1004		β	0.1460		β	0.1913
	γ	0.0440		γ	0.1068		γ	0.1481		γ	0.1913
	δ	0.0440		δ	0.1068		δ	0.1481		δ	0.1968
1989	α	0.0502	1995	α	0.1109	2001	α	0.1508	2007	α	0.1968
	β	0.0502		β	0.1109		β	0.1508		β	0.1968
	γ	0.0528		γ	0.1153		γ	0.1530		γ	0.2069
	δ	0.0528		δ	0.1153		δ	0.1530		δ	0.2069
1990	α	0.0590	1996	α	0.1186	2002	α	0.1585	2008	α	0.2140
	β	0.0590		β	0.1195		β	0.1585		β	0.2204
	γ	0.0632		γ	0.1215		γ	0.1613		γ	0.2204
	δ	0.0632		δ	0.1215		δ	0.1585		δ	0.2204
1991	α	0.0685	1997	α	0.1252	2003	α	0.1681	2009	α	0.2204
	β	0.0685		β	0.1263		β	0.1681		β	0.2204
	γ	0.0726		γ	0.1303		γ	0.1681		γ	0.2325
	δ	0.0726		δ	0.1314		δ	0.1681		δ	0.2325

Ο επικαιροποιημένος προϋπολογισμός  $C'$  υπολογίζεται ως εξής:

$$C' = \frac{0.23}{\lambda} * C_{\text{φραγ.}} \quad (4.5)$$

Αντίστοιχα για φράγματα που μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν μετά το 2010 επικαιροποιούνται οικονομικά μέσω του συντελεστή  $T_k$  (Πίνακας 2).

**Πίνακας 2: Συντελεστές αναγωγής  $T_k$  για φράγματα μετά το 2010**

Έτος	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
$T_k$	1.159	1.159	1.249	1.259	1.237	1.205	1.203	1.203	1.211	1.218	1.227	1.199	1.26

**Πίνακας 3: Στοιχεία και προϋπολογισμοί γεωφραγμάτων Ελλάδας**

Φράγμα	Έτος Μελέτης	Η	V	Προϋπολογισμός Μελέτης	Επικαιρ. Προϋπολογισμός	Q <sub>υπερ.</sub>
		Από θεμελίωση m	hm <sup>3</sup>	Εκατ. €	Εκατ. €	m <sup>3</sup> /s
Φανός	1994	107	5.900	38,243	83,832	1,000
Ιάσιο	1999	53	1.389	30,500	50,271	300
Τολοφώνα	2013	54	1.109	16,774	16,787	269
Μύρτος	2002	45	0.666	16,525	32,223	
Τσικνιάς	1994	49	1.114	14,200	28,811	1,310
Κνίδη	2014	47	1.510	19,552	19,916	
Δόξα Φενεού	1988	53	0.675	2,551	13,571	
Μεταξοχώρι	1992	35	0.590	4,151	12,471	
Ασπροκλησιιά	2010	28	0.130	4,530	4,924	22.4
Ασωπός	2008	70	4.000	68,517	72,877	2.3
Πλατύ	2013	54	1.935	40,472	42,319	
Πύλη	2010	77	2.150	53,500	58,162	1,170
Βουκολιά Ψαρών	1994	18	0.161	2,055	4,625	
Χαβρία	1986	59	1.065	2,494	21,072	1,961
Κοντού Πυργίου	1995	19	0.268	2,432	5,037	
Αγιονέρι	1996	48	0.542	12,912	25,179	2,298
Ξεριά	2002	49.4	1.016	13,529	19,786	
Γρατινή	1998	53	1.682	27,462	46,906	480
Καλάμι	1995	35	0.3	7,034	14,314	210
Ίνι	1994	35.5	0.589	6,397	14,023	20
Λιθίνων	2005	58	3.25	50,000	64,285	707
Νεστόρι	2007	72	2.06	39,495	46,210	1,272
Αστερίου	2003	75	6.612	136,016	189,452	1,700
Αχυρών	1994	32.5	1.073	13,206	28,948	
Λευκογείων	1994	32	0.844	6,685	14,655	
Ερεσού	2002	41	0.780	9,059	13,249	
Φανερωμένη Ηρακλείου	2005	76	3.077	45,274	57,892	
Λιβαδιού Λάρισας	1993	38	0.349	3,669	9,134	

Φράγμα	Έτος Μελέτης	H	V	Προϋπολογισμός Μελέτης	Επικαιρ. Προϋπολογισμός	Q <sub>υπερ.</sub>
		Από θεμελίωση m	Φράγματος hm <sup>3</sup>	Εκατ. €	Εκατ. €	m <sup>3</sup> /s
Σχοινά Καρπάθου	2006	31	0.421	8,017	9,809	
Πλακιώτισσα	2002	53	1.000	23,650	34,588	420
Φερέκαμπος	2005	25	0.322	5,361	6,893	148
Κομποτίου	2014	78	2.774	53,241	54,231	605
Ναρθάκι - Λουτζιακόρεμα	2011	32	0.205	4,277	4,649	369
Παπαδιάς	1999	72	3.280	65,864	110,094	420
Καλαμιώτισσας	2003	31	0.284	11,440	15,925	39
Πουρνάρι-Αμπελάκια	2015	38	0.206	5,666	5,925	
Αλμωπαίου	2014	70	1.030	32,800	33,409	4,090
Αμιρά	1994	48	0.543	7,600	17,786	280
Κλείνων Κρατερού	1994	72	3.450	36,390	79,768	
Τριανταφυλλιάς	2002	75	2.700	58,300	85,800	375
Λαγκούβαρδο	2002	39	0.600	19,130	28,153	145

Στην περίπτωση αυτή η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

$$C' = \frac{1.26}{TK} * Cφραγ. \quad (4.6)$$

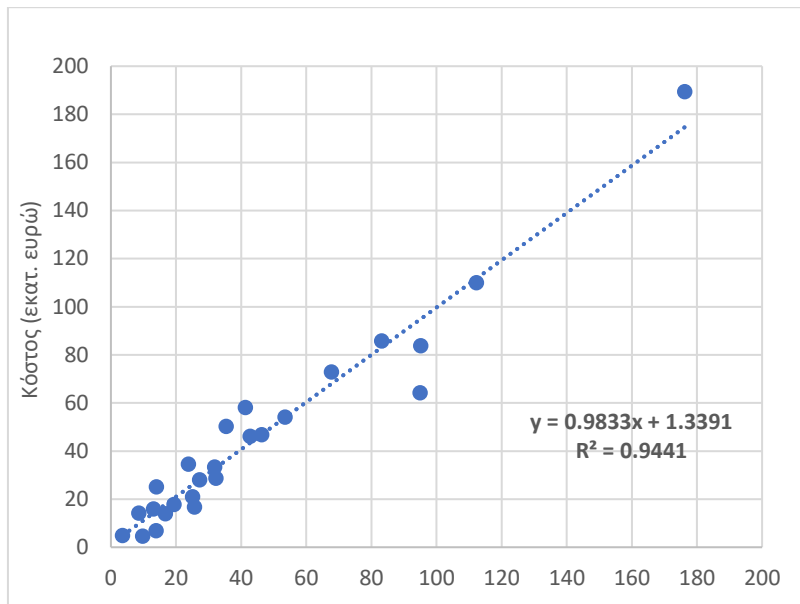
Η έρευνα και η ανάλυση που φαίνεται παρακάτω αναφέρεται σε γεωφράγματα χωμάτινου τύπου και λιθόρριπτα.

Τα φράγματα του **Πίνακα 3** αποτελούν το δείγμα στο οποίο θα προσαρμοστεί σχέση που θα συνδέει βασικά χαρακτηριστικά ενός φράγματος (όγκος αναχώματος, ύψος, παροχή υπερχειλιστή) και θα δίνει μια καλή προσέγγιση του επικαιροποιημένου προϋπολογισμού του σε εκατομμύρια ευρώ.

Με βάση τα χαρακτηριστικά των φραγμάτων που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3** εξάγονται οι παρακάτω σχέσεις :

- Για δείγμα φραγμάτων όσων η παροχή υπερχειλιστή είναι γνωστή, εξάγεται η εξής σχέση που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 1 :

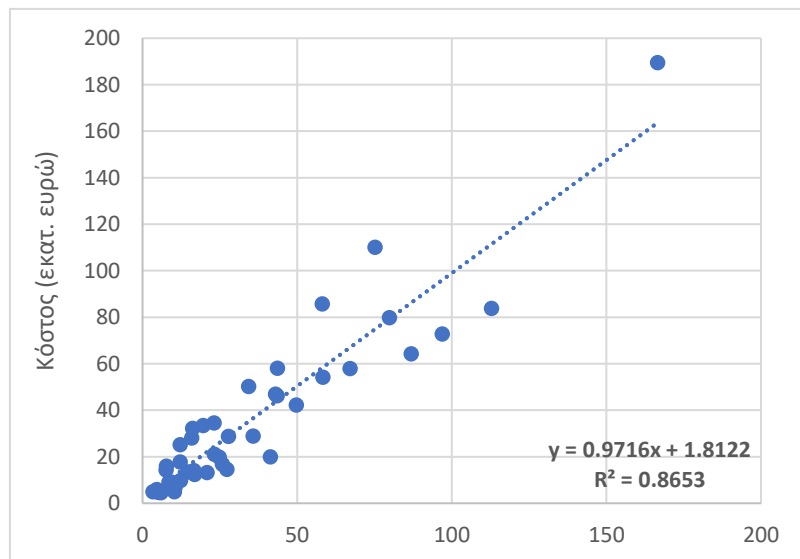
$$C' = 2207.2 * \left(\frac{V}{H}\right)^{1.24} * Qυπερ^{0.063} + 1.34 \quad (4.7)$$



Διάγραμμα 1: Συσχέτιση προϋπολογισμού με  $V/H$  και  $Q_{υπερ}$ .

- Για το πλήρες δείγμα φραγμάτων του πίνακα αξιολογήθηκαν οι παρακάτω λύσεις :
  - Επικαιροποιημένος προϋπολογισμός συναρτήσει των  $V$ ,  $H$  που περιγράφεται με την εξίσωση:

$$C' = 388.9 * H^{-0.72} * V^{1.18} \quad (4.8)$$

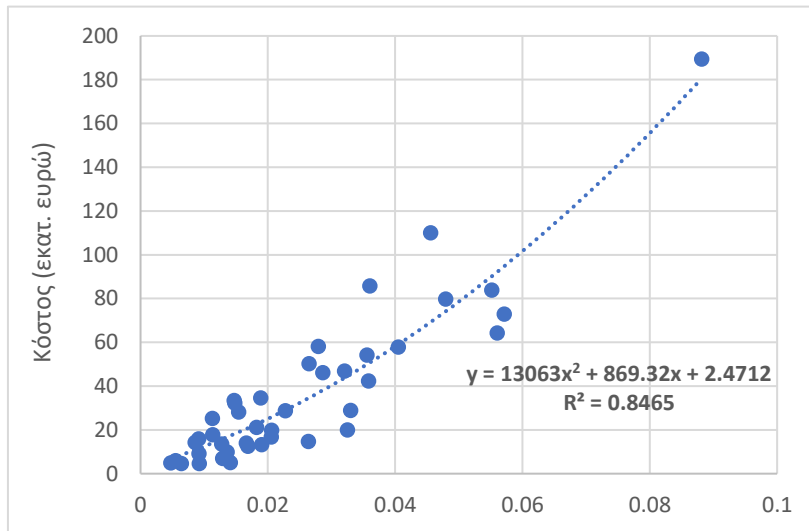


Διάγραμμα 2: Συσχέτιση προϋπολογισμού με  $V$ ,  $H$



- Επικαιροποιημένος προϋπολογισμός συναρτήσει του λόγου V/H

$$C' = 13063 * \left(\frac{V}{H}\right)^2 + 869.32 * \frac{V}{H} + 2.47 \quad (4.9)$$



Διάγραμμα 3: Συσχέτιση προϋπολογισμού με V/H

Συνεπώς, μέσα από τις σχέσεις που παράχθηκαν από τα τρία αυτά διαγράμματα, υπολογίζεται με ικανοποιητική προσέγγιση η επικαιροποιημένη συνολική δαπάνη  $C_{\text{φραγ}}$  ενός γεωφράγματος στην Ελλάδα.

#### Κόστος μελετών, αδειοδότησης, επίβλεψης έργου $C_{\text{μελ}}$

Τα κόστη αυτά σύμφωνα με τον βιβλίο “Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα” του Παπαντώνη υπολογίζονται γενικεύοντας τις σχέσεις για μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα και προκύπτουν σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος P σε MW και το μέσο καθαρό ύψος πτώσης  $H_n$  του συστήματος που εκτιμάται θεωρώντας μια μέση στάθμη ταμειυτήρα στα 2/3 της ανώτατης στάθμης λειτουργίας.

$$C_{\text{μελ}} = 370000 * \left(\frac{P}{H_n^{0.3}}\right)^{0.54} \quad (4.10)$$

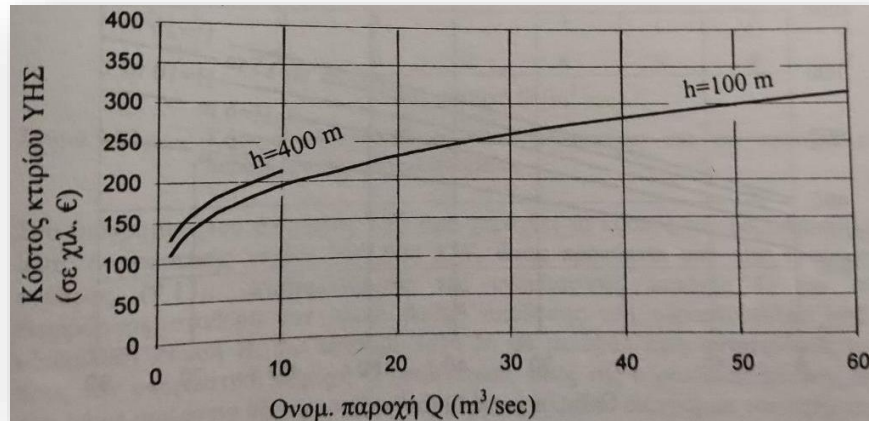
#### Κόστη έργου υδροληψίας $C_{\text{υδρ}}$

Όπως και για το κόστος μελετών, το κόστος για το σύστημα υδροληψίας προκύπτει μέσω της παροχτευτικότητας του υδροηλεκτρικού έργου ως :

$$C_{\text{υδρ}} = 9236 * Q^{0.72} \quad (4.11)$$

### Κόστη κτηρίου υδροηλεκτρικού σταθμού $C_{YH\Sigma}$

Όσον αφορά το κτήριο του υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής, σύμφωνα με τον Παπαντώνη (2008, σελ. 357, σχήμα 9.9), ανάλογα με τη παροχетеυτικότητα του αγωγού προσαγωγής για συγκεκριμένη τιμή του  $h_n$  αντιστοιχίζεται συγκεκριμένη καμπύλη που δίνει τη δαπάνη σε χιλιάδες ευρώ.



### Κόστη αγωγού προσαγωγής

Το κόστος αγοράς και εγκιβωτισμού του αγωγού προσαγωγής  $C_{αγωγού}$  προκύπτει με βάση τη μάζα του αγωγού σε kg με κόστος μονάδας στην ελληνική αγορά στα 3 €/kg.

Το κόστος εκσκαφών και μεταφοράς του εξαρτάται από το μήκος  $L$  του αγωγού και τη διάμετρο του  $D$  και έναν συντελεστή αναγωγής  $SE$  που εξαρτάται από τον πληθωρισμό και υπολογίζεται ως το άθροισμα του πληθωρισμού του 2008 με τη μονάδα υψωμένο στα έτη που πέρασαν από τότε έως σήμερα (2022):

$$C_{αγωγού'} = 100 * D^2 * L * SE \quad (4.12)$$

### Κόστη Ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού $C_{HME}$

Το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που απαιτείται για την λειτουργία του σταθμού παραγωγής συνοψίζοντας τη δαπάνη όλων των τμημάτων που τον συνθέτουν και αναφέρθηκαν παραπάνω, διαφέρει από τον τρόπο υπολογισμού στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα και περιγράφεται για ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό φράγμα από τη σχέση :

$$C_{HME} = 14400 * (P(KW))^{0.56} * Hn^{-0.112} \quad (4.13)$$

## 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

### 5.1 Μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα

Για να εκτιμηθεί το συνολικό κέρδος που θα προκύψει από την ανάλυση του σχεδιασμού του έργου, απαιτείται ο υπολογισμός των παραγόμενων ενεργειών σε μηνιαία βάση.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσομοίωση του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα του έργου με μηνιαίο βήμα, ώστε να εκτιμηθούν οι στάθμες ύδατος και το υδάτινο δυναμικό του ταμιευτήρα, καθώς και ο τρόπος που αυτό θα αξιοποιηθεί για να εξυπηρετήσει τους στόχους του.

Σε πρώτο στάδιο θα οριστούν οι χαρακτηριστικές στάθμες του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα. Στην προσομοίωση ενός υδροηλεκτρικού έργου συμμετέχουν:

- Η στάθμη στην οποία θα βρίσκεται ο υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής  $z_0$ . Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ταυτίζεται με τον πυθμένα  $z_b$  του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα ενώ σε άλλες να βρίσκεται χαμηλότερα, μακριά από το σώμα του φράγματος.
- Η ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα (Α.Σ.Λ.)  $Z_{ΑΣΛ}$ , η οποία είναι άμεση συνάρτηση του ύψους του φράγματος  $H$  και του περιθωρίου που λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό για τη στέψη  $d_{crest}$ :

$$Z_{ΑΣΛ} = H - d_{crest} + z_b \quad (5.1)$$

- Η κατώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα (Κ.Σ.Λ.)  $Z_{ΚΣΛ}$ , η οποία κάνοντας τη παραδοχή ότι αξιοποιείται όλο το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό του ταμιευτήρα διαχωρίζει το αξιοποιήσιμο μέρος του ταμιευτήρα από τις φερτές ύλες. Προσδιορίζεται μέσα από τη σχέση της καμπύλης στάθμης-όγκου του εκάστοτε φράγματος που εξαρτάται από το ανάγλυφο της περιοχής στην οποία κατασκευάζεται:

$$S = a * (h - z_b)^b \quad (5.2)$$

όπου  $a$ ,  $b$  συντελεστές κλίμακας και σχήματος και καθορίζουν τη χωρητικότητα της λίμνης του ταμιευτήρα,  $h$  το απόλυτο υψόμετρο της εκάστοτε στάθμης και  $S$  το απόθεμα νερού του ταμιευτήρα.

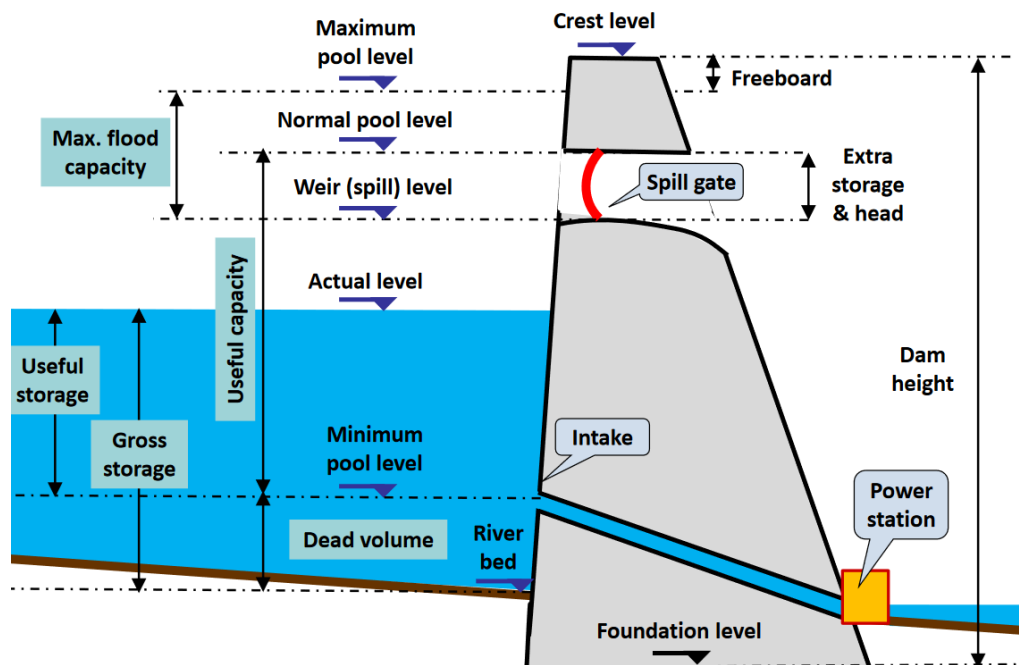
Για το νεκρό όγκο  $S_{min}$  που καθορίζεται από τη στερεοαπορροή και τη πυκνότητα των φερτών υλών της περιοχής μελέτης αλλά και από παράγοντες όπως η ωφέλιμη διάρκεια ζωής του έργου και η λεκάνη απορροής της περιοχής, προκύπτει η  $Z_{ΚΣΛ}$  ως εξής:

$$Z_{ΚΣΛ} = \left( \frac{S_{min}}{a} \right)^{\frac{1}{b}} + z_b \quad (5.3)$$

Αφού προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές στάθμες του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα, προσδιορίζονται και οι χαρακτηριστικοί όγκοι του :

- *Μέγιστος όγκος  $S_{max}$  φράγματος*: Ορίζεται από την σχέση της καμπύλης στάθμης-όγκου, αντικαθιστώντας τη μεταβλητή της στάθμης με την ανώτατη στάθμη λειτουργίας.
- *Ελάχιστος όγκος  $S_{min}$  φράγματος*: Όπως ειπώθηκε και παραπάνω προκύπτει από αντικατάσταση στον τύπο της καμπύλης στάθμης - όγκου με την κατώτατη στάθμη λειτουργίας ή στάθμη φερτών υλών.
- *Ωφέλιμος όγκος  $K$* : Ο όγκος αυτός είναι ο μέγιστος αξιοποιήσιμος για τους σκοπούς του έργου και προκύπτει ως η διαφορά των άνω δύο :

$$K = S_{max} - S_{min} \quad (5.4)$$



Εικόνα 17: Στάθμες και όγκοι ενός υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα με σταθμό παραγωγής στον πόδα του φράγματος

Ένας ταμιευτήρας, με σκοπό παραγωγή ενέργειας, δέχεται νερό μέσω των εισροών του από το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, ενώ παράλληλα δίνει νερό με τη μορφή εκροών για την ικανοποίηση των σκοπών για τους οποίους σχεδιάστηκε. Παράλληλα, χάνει νερό λόγω περιστασιακών υπερχειλίσεων, σε περιπτώσεις πλημμύρας, καθώς και λόγω υπόγειων διαφυγών και εξατμίσεων. Σε προκαταρκτικό στάδιο, οι τελευταίες μπορούν να αγνοηθούν (όπως και η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα).

Όσον αφορά την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα με βάση τα παραπάνω, θα περιγραφεί για έναν ορισμένο μήνα  $k$ , ενώ θα αναφέρεται σε μηνιαίο βήμα.

Έστω αρχικό απόθεμα ταμιευτήρα  $S_0$  όπου  $S_{\min} < S_0 < S_{\max}$  ενός μήνα κ. Η στάθμη του ταμιευτήρα για το απόθεμα αυτό θα βρίσκεται σε υψόμετρο  $h_k$  που υπολογίζεται με βάση τη καμπύλη στάθμης - όγκου του εκάστοτε ταμιευτήρα μελέτης.

- Για τη παραπάνω κατάσταση το καθαρό ύψος πτώσης  $h_n$  ορίζει το αξιοποιήσιμο υδάτινο δυναμικό για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Προκύπτει ως:

$$h_{nk} = h_k - z_0 - \Delta H \quad (5.5)$$

Ο παράγοντας του καθαρού ύψους εξαρτάται πέρα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα από τις υδραυλικές απώλειες  $\Delta H$  κατά μήκος του αγωγού προσαγωγής. Συγκεκριμένα:

$$\Delta H = J * L + h_{loc} \quad (5.6)$$

Όπως φαίνεται λοιπόν αποτελούνται από τις γραμμικές απώλειες λόγω των τριβών κατά μήκος του σωλήνα αλλά και των τοπικών απωλειών λόγω της γεωμετρίας εισόδου του αγωγού. Οι πρώτες εξαρτώνται από την υδραυλική κλίση  $J$  και το μήκος  $L$  του αγωγού. Για αγωγούς υπό πίεση η κλίση υπολογίζεται με τον τύπο του Darcy-Weisbach ως συνάρτηση της ταχύτητας  $V$  του ρευστού, της διαμέτρου του αγωγού  $D$  και ενός συντελεστή τριβής  $f$ :

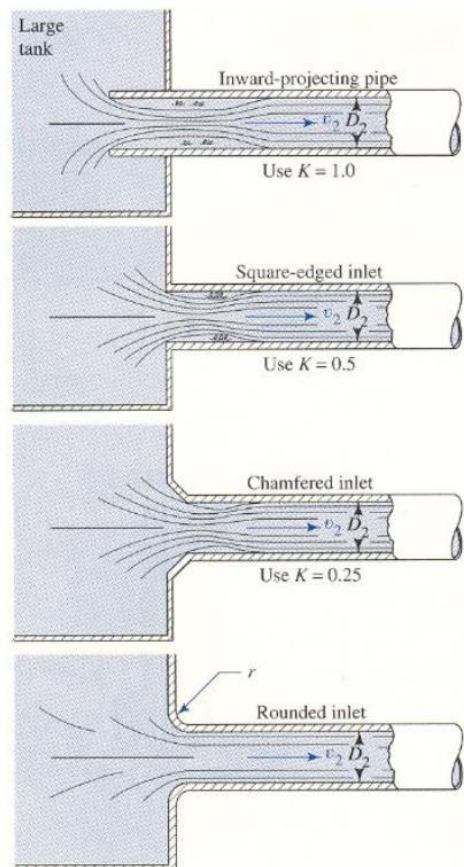
$$J = f * \frac{V^2}{2 * g * D} \quad (5.7)$$

Ο συντελεστής τριβής  $f$  εξαρτάται από τις ιδιότητες του αγωγού και την υδραυλική ροή που εκτιμάται μέσω της εξίσωσης Colebrook-White με δοκιμές. Η εξίσωση αυτή συσχετίζει τον ζητούμενο συντελεστή με τον αριθμό Reynolds της ροής, τη διάμετρο του αγωγού και τη τραχύτητα  $\epsilon$ .

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -2 * \log \left( \frac{\epsilon}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re * f^{0.5}} \right) \quad (5.8)$$

Οι τοπικές απώλειες  $h_{loc}$  υπολογίζονται από τη σχέση:

$$h_{loc} = k * \frac{V^2}{2 * g} \quad (5.9)$$



Εικόνα 18: Ο συντελεστής  $k$  τοπικών απωλειών με βάση τη γεωμετρία εισόδου

- Άλλο ένα βασικό μέγεθος που συνεισφέρει στη προσομοίωση ενός υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα είναι η παροχευτικότητα του αγωγού προσαγωγής (ονομαστική παροχή), η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να διέλθει σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Για να οριστεί η ονομαστική παροχή προηγείται η ανάλυση του συντελεστή δυναμικότητας (Capacity Factor) του συστήματος. Για μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα που δουλεύουν με σταθερή ισχύ (εγκατεστημένη  $P$ ) ο CF ορίζεται ως οι συνολικές ώρες λειτουργίας του συστήματος του σταθμού παραγωγής του έτους προς το σύνολο των ωρών του έτους.

$$CF = \frac{Tfun}{8760} \quad (5.10)$$

Έτσι για μέση υπερετήσια τιμή  $V_a$  της χρονοσειράς των εισροών που χρησιμοποιείται, προκύπτει παροχευτικότητα αγωγού  $Q$ :

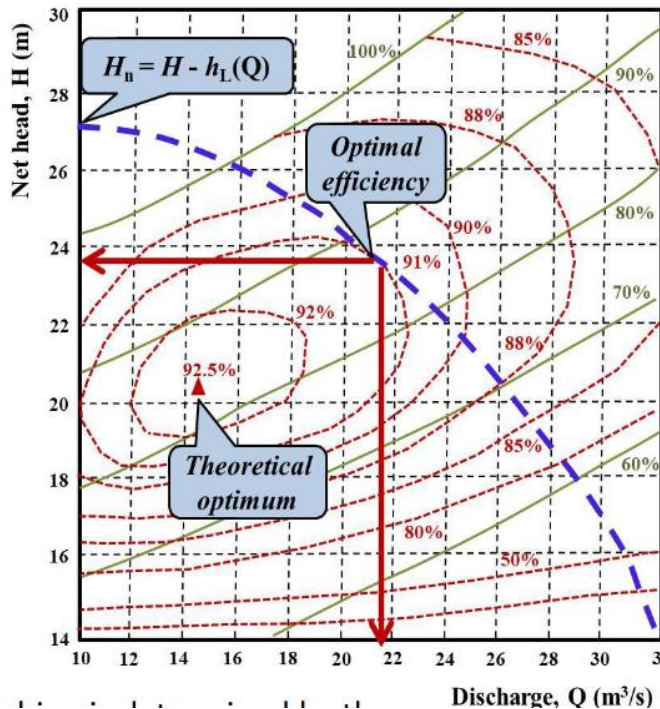
$$Q = \frac{1000}{3.6} * \left( \frac{V_a}{CF * 8760} \right) \quad (5.11)$$

Καθώς το ισοζύγιο αναφέρεται σε μηνιαία βάση, υπολογίζεται ο μέγιστος όγκος  $V_n$  που μπορεί να μεταφέρει σε κάθε βήμα της προσομοίωσης ο αγωγός προσαγωγής.

$$Vn = (Q * CF) * 30 * 24 * 3600 * \frac{1}{10^6} \quad (5.12)$$

- Βαθμός απόδοσης  $\eta$  του συστήματος λειτουργίας

Προηγουμένως υπολογίστηκε η παροχетеυτικότητα  $Q$  του αγωγού προσαγωγής. Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης  $\eta$  θα βασιστεί σε παραδοχές, που εξηγούνται με τη βοήθεια του παρακάτω νομογραφήματος:



Διάγραμμα 4: Νομογράφημα που συνδέει το  $h_n$ ,  $Q$ ,  $\eta$  ενός υδροηλεκτρικού έργου

Με την παραδοχή σταθερής  $Q$  για το σύνολο των μηνών της προσομοίωσης, ενώ το καθαρό ύψος  $h_n$  αλλάζει σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, συμπεραίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  δεν είναι σταθερός για διαφορετικά ζεύγη τιμών ( $h_n$ ,  $Q$ ).

Με ποιοτική ερμηνεία των γεωμετρικών τύπων των αποδόσεων του νομογραφήματος αναλύεται τρόπος υπολογισμού του βαθμού απόδοσης.

- Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών έγινε προσπάθεια τυποποίησης του παραπάνω νομογραφήματος ώστε ανάλογα το εύρος ύψους πτώσης, το οποίο θα συσχετίζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που λαμβάνει κατά μήκος της χρονοσειράς ανάλυσης, να κατηγοριοποιείται ο βαθμός απόδοσης που αναμένεται ανά «περιοχές»  $h_n$ .

Η βασική ιδέα που χρησιμοποιήθηκε παρατηρώντας το νομογράφημα είναι η εξής:

Κατηγοριοποιούνται περιοχές υψών πτώσης ανά 5 m όπου οι ενδιάμεσες τιμές της κάθε περιοχής να έχουν τον ίδιο βαθμό απόδοσης,  $\eta$ . Οι τιμές του βαθμού απόδοσης που θα λαμβάνουν οι περιοχές υψών πτώσης καθορίζονται από την ποιοτική ανάγνωση των

γεωμετρικών τόπων που αναφέρονται στο βαθμό απόδοσης από το νομογράφημα το οποίο εξάγεται και για τιμές πέρα από αυτές στις οποίες αναφέρονται παραπάνω.

Εποπτικά η μεθοδολογία απεικονίζεται στον Πίνακας 4:

**Πίνακας 4: Πίνακας αντιστοίχισης περιοχών  $h_n$  με αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης για 13 περιοχές συνδυασμών**

Κάτω Όριο Περιοχής $h_n$ (m)	Άνω Όριο Περιοχής $h_n$ (m)	Βαθμός απόδοσης $n$
$h_{n1} = \min(h_{nk})$	$h_{n2} = h_{n1}+5$	0.895
$h_{n2} = h_{n1}+5$	$h_{n3} = h_{n2}+5$	0.900
$h_{n3} = h_{n2}+5$	$h_{n4} = h_{n3}+5$	0.905
$h_{n4} = h_{n3}+5$	$h_{n5} = h_{n4}+5$	0.910
$h_{n5} = h_{n4}+5$	$h_{n6} = h_{n5}+5$	0.915
$h_{n6} = h_{n5}+5$	$h_{n7} = h_{n6}+5$	0.92
$h_{n7} = h_{n6}+5$	$h_{n8} = h_{n7}+5$	0.925
$h_{n8} = h_{n7}+5$	$h_{n9} = h_{n8}+5$	0.92
$h_{n9} = h_{n8}+5$	$h_{n10} = h_{n9}+5$	0.915
$h_{n10} = h_{n9}+5$	$h_{n11} = h_{n10}+5$	0.910
$h_{n11} = h_{n10}+5$	$h_{n12} = h_{n11}+5$	0.905
$h_{n12} = h_{n11}+5$	$h_{n13} = h_{n12}+5$	0.900
$h_{n13} = h_{n12}+5$	$h_{n14} = h_{n13}+5$	0.895

- Ειδική ενέργεια  $\psi$  της προσομοίωσης

Αφού προσδιορίστηκαν οι βαθμοί απόδοσης των βημάτων της προσομοίωσης ανάλογα με το καθαρό ύψος πτώσης σε εκείνο το βήμα, η ειδική ενέργεια  $\psi$  (GWh/hm<sup>4</sup>) κάθε μήνα  $\kappa$  δίνεται από τον τύπο :

$$\psi_{\kappa} = \frac{1}{3.6} * 9.81 * n_{\kappa} * h_{n\kappa} * (h_{\kappa} - z_b) \quad (5.13)$$

- Ζήτηση νερού για ενεργειακή παραγωγή  $\gamma_{\kappa}$  (hm<sup>3</sup>)

Για ορισμένο στόχο μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής  $P_{target}$  (GWh) και  $\psi$ , η ζήτηση νερού για παραγωγή της ενέργειας στόχου ορίζεται ως :

$$\gamma_{\kappa} = 100 * \frac{P_{target}}{\psi * h_{n\kappa}} \quad (5.14)$$



- Λειτουργία υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα

Ο υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας κατά τη διάρκεια ενός μήνα  $k$  της προσομοίωσης αποθηκεύει νερό που δέχεται από τις εισροές  $X_k$  και το παρέχει μέσω εκροών για χρήσεις ενεργειακές ή άλλες.

- Εισροές  $X_k$

Το νερό που φτάνει στη λίμνη του ταμιευτήρα από τα υδάτινα συστήματα της λεκάνης απορροής και τις βροχοπτώσεις αποτελεί τις εισροές του συστήματος.

Οι εισροές αυτές μπορεί να είναι ιστορικές, με βάση πραγματική χρονοσειρά ορισμένων ετών που καταγράφηκε στη περιοχή, ή συνθετικές που προσεγγίζουν στατιστικά το ιστορικό δείγμα και λαμβάνουν υπόψιν υδροκλιματικά γεγονότα.

Συνεπώς το αρχικό απόθεμα  $S_0$  αυξάνεται σε:

$$S1k = S0k + Xk \quad (5.15)$$

- Περιβαλλοντικές Εκροές  $r_{envk}$

Για τη διατήρηση και τη προστασία της τοπικής χλωρίδας και πανίδας δεσμεύεται μέρος των εκροών το οποίο διέρχεται από τους στροβίλους παράγοντας ταυτόχρονα δευτερεύουσα ενέργεια.

$$renvk = \max(\min(yenv, S1k - Smin), 0) \quad (5.16)$$

- Εκτροπή εκροών για χρήσεις εκτός της ενεργειακής  $r_{absk}$

Μετά τη δέσμευση οικολογικής παροχής για περιβαλλοντικούς λόγους, ακολουθεί η απόληψη νερού για κάλυψη αναγκών που απαιτούν άμεση χρήση νερού, αν προβλέπονται.

$$rabsk = \max(\min(yabsk, S1k - renvk - Smin, Vn - renvk), 0) \quad (5.17)$$

- Εκροές για παραγωγή ενέργειας  $r_k$

Σε περίπτωση που ακολουθούν τις εκροές  $r_{abs}$ , δεσμεύεται νερό τόσο ώστε ιδανικά να ανταποκρίνεται στις ενεργειακές απαιτήσεις  $y$ . Το νερό αυτό περνάει και αυτό από τους στροβίλους όπως και αυτό του οικολογικού στόχου παράγοντας πρωτεύουσα ενέργεια. Αν περισσεύει (overflow) διοχετεύεται ξανά από τους στροβίλους ως ποσότητα  $r'$  και αξιοποιείται για παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας. Αν περισσεύει ξανά, το φράγμα υπερχειλίζει και το επιπλέον νερό (waterspilling) χάνεται. Η παραπάνω διαδικασία αποτυπώνεται μαθηματικά με τις παρακάτω σχέσεις :

$$rk = \max(\min(yk, S1k - renvk - rabsk - Smin, Vn - renvk), 0) \quad (5.18)$$

$$ok = \max(0, S1k - renvk - rabsk - rk - Smax) \quad (5.19)$$

$$r'k = \min(ok, Vn - renvk - rk) \quad (5.20)$$

$$w_k = \max(0, S1_k - ren_k - rabs_k - r_k - r'_k, Smax) \quad (5.21)$$

Το απόθεμα πλέον αλλάζει με την προσθαφαίρεση των εισροών, εκροών και υπερχειλίσεων και αποτελεί το απόθεμα εκκίνησης για το επόμενο βήμα  $k+1$  της προσομοίωσης.

Η ενέργεια που παράγεται για κάθε μήνα της προσομοίωσης προέρχεται από τις εκροές στροβίλων για ηλεκτρική παραγωγή μέσω του κυρίου στροβίλου του συστήματος τις ώρες λειτουργίας του και τις οικολογικές μέσω μικρού εφεδρικού στροβίλου που λειτουργεί όλες τις ώρες.

Οι πρώτες δίνουν :

$$E_k = \frac{1}{100} * \psi_k * (r_k + r'_k) * \frac{h_{nk} + h_{nk} + 1}{2} \quad (5.22)$$

Ενώ οι δεύτερες :

$$E_{enk} = \frac{1}{100} * \psi_k * ren_k * \frac{h_{nk} + h_{nk} + 1}{2} \quad (5.23)$$

## 5.2 Βελτιστοποίηση συστήματος

Αφού παρουσιάστηκαν όλα τα στάδια του υδατικού ισοζυγίου και ορίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού έργου, θα αναλυθεί η βελτιστοποίηση ενός υδροηλεκτρικού έργου.

Οι μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι το ύψος  $H$  του φράγματος, η διάμετρος  $D$  του αγωγού προσαγωγής και ο στόχος παραγόμενης ενέργειας  $E_{tot}$  ανά έτος. Με δοκιμές σε αυτές τις ανεξάρτητες μεταβλητές επιχειρείται να επιτευχθούν τα μέγιστα έσοδα από πώληση νερού και ενέργειας και ελαχιστοποίηση των δαπανών του έργου.

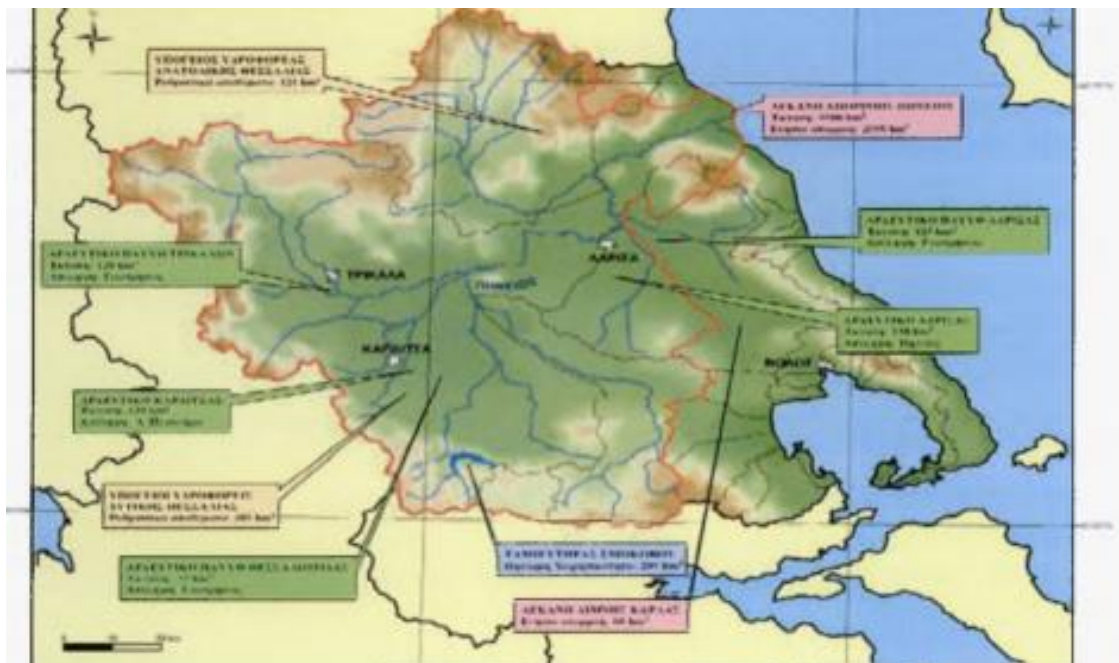
Στην παρούσα εργασία εξετάζονται δύο τρόποι βελτιστοποιήσεων. Αρχικά, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση για ένα σενάριο βάσης, για το οποίο σχεδιάζεται το φράγμα και πραγματοποιείται έλεγχος ανθεκτικότητας με τις τιμές βελτιστοποίησης του υφιστάμενου σεναρίου λειτουργίας, για μία σειρά πιθανών σεναρίων που αφορούν τροποποίηση λειτουργίας και συνθηκών του  $Y/H$  έργου κατά την διάρκεια ζωής του (συμβατικός σχεδιασμός). Εναλλακτικά, για όλα τα σενάρια γίνεται ολική βελτιστοποίηση, μέσω εξελικτικού αλγορίθμου υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας θεωρώντας ότι όλα τα σενάρια είναι πιθανά να συμβούν σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου (δυσμενής σχεδιασμός). Αξίζει να σημειωθεί ότι για όλες τις βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιούνται προκύπτουν οι βέλτιστες λύσεις  $f$  για συνδυασμό  $H, D, E_{tot}$ .

## 6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΗΣ ΠΥΛΗΣ

Η μεθοδολογία και η ανάλυση σχεδιασμού που αναφέρθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο θα εφαρμοστεί στο φράγμα της Πύλης.

### 6.1 Περιοχή Μελέτης

Το φράγμα της Πύλης βρίσκεται στο νομό Τρικάλων στην περιφέρεια της Θεσσαλίας. Το γεωγραφικό διαμέρισμα αυτό σε γενικές γραμμές συμπίπτει με το αντίστοιχο υδατικό πλην μικρών εξαιρέσεων στο νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα. Τα όρια του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας φαίνονται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Όρια Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας

- Θέση, Γεωμορφολογία και κλίμα του νομού Τρικάλων

Ο νομός Τρικάλων είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος σε έκταση και τρίτος σε πληθυσμό από τους τέσσερις νομούς της Θεσσαλίας. Βρίσκεται βορειοδυτικά, συνορεύοντας με τους νομούς Γρεβενών στα βόρεια, της Λάρισας στα ανατολικά, της Καρδίτσας στα νότια, της Άρτας και των Ιωαννίνων στα δυτικά και έχει έκταση 3.367 km<sup>2</sup>. Ως επί το πλείστον είναι ορεινός και ημιορεινός νομός με ποσοστά κάλυψης 72% των εδαφών του και 11% αντίστοιχα και το υπόλοιπο 17% να είναι πεδινό. Στα ανατολικά του νομού υψώνεται ο Τίτανος (693 μ.) και τα βουνά του Ζάρκου, που διαχωρίζουν το νομό από το νομό της Λάρισας. Βόρεια βρίσκονται τα Αντιχάσια, με ψηλότερες κορυφές την Οξυά (1.416 μ.) και τα Μετερίζια (1.381 μ.). Στο Βόρειο τμήμα, στα σύνορα με το νομό Γρεβενών, βρίσκονται τα Χάσια (με ψηλότερες κορυφές το Κράτσοβο 1.554 μ. και το Ορθοβούνι 1.106 μ.). Δυτικά εκτείνεται το νότιο τμήμα της οροσειράς της Πίνδου που καταλαμβάνει αρκετά μεγάλο τμήμα του νομού. Συγκεκριμένα στα σύνορα με

το νομό Ιωαννίνων υψώνονται οι κορυφές Άσπρα Λιθάρια (1.823 μ.) και Κατάρρα (1.705 μ.). Νοτιότερα βρίσκονται τα βουνά Λάκμος (Περιστέρι 2.295 μ.), Τζουμέρκα (2.429 μ.)

Τα βασικά ποτάμια του νομού είναι παραπόταμοι του Πηνειού (Μαλακασιώτης, Μουργκάνης, Ληθαίος, Παλαιοχωρίτης, Αγιαμονιώτης, Νεοχωρίτικος, Πορταϊκός), είτε παραπόταμοι του Αχελώου Ασηροπόταμου. Να σημειωθεί ότι οι δύο μεγάλοι αυτοί ποταμοί πηγάζουν ουσιαστικά από το ίδιο το σημείο, στο ΒΔ άκρο του νομού Τρικάλων (από όπου πηγάζουν επίσης Αώος και Άραχθος).

Το κλίμα του νομού Τρικάλων είναι ηπειρωτικό, με δριμύ κρύο το χειμώνα και εξαιρετικά ζεστό καλοκαίρι. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται στους 16 - 17 °C στα πεδινά.

- Ευρύτερη Γεωλογία του διαμερίσματος

Γεωλογικά η περιοχή της Θεσσαλίας κατά κύριο λόγο εκτείνεται σε τρεις γεωτεκτονικές ζώνες. Οι ζώνες αυτές κατανέμονται από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά και είναι Πελαγονική και Υποπελαγονική ζώνη που ανήκουν στις εσωτερικές ελληνίδες και ζώνη της Πίνδου που ανήκει στις εξωτερικές Ελληνίδες (οι γεωτεκτονικές ζώνες ονομάζονται και «ελληνίδες ζώνες»). Ακόμη στην περιφέρεια της Θεσσαλίας αναπτύσσονται Ενότητα της Όσσας, τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας στο δυτικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, ένα πολύ μικρό μέρος της Ζώνης Γαβρόβου - Τριπόλεως καθώς και σύγχρονα τεταρτογενή και νεογενή ιζήματα στο πεδινό τμήμα της περιφέρειας (Μαντούζα, 2008).

- Πελαγονική ζώνη

Αποτελείται από Παλαιοζωικά κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του ηπειρωτικού φλοιού της παλιάς Κιμμερικής ηπείρου, μέσα στα οποία διείσδυσαν γρανιτικά σώματα του Άνω Λιθανθρακοφόρου. Περμοτριάδικά Μετακλαστικά ιζήματα και ανθρακικά πετρώματα Τριαδικού - Ιουρασικού αποτέθηκαν στα ηπειρωτικά περιθώρια της ζώνης και πάνω σε αυτά επωθήθηκαν οι οφιολιθικές μάζες προερχόμενες από τις εκατέρωθεν ωκεάνιες λεκάνες της Τηθύος. Συνίσταται από :

- επικλυσιογενή ιζήματα Μ-Α Κρητιδικού (κροκαλοπαγή, μαργ. ασβεστόλιθοι, μικρολατυποπαγή, φλύσχης),
- οφιόλιθους και συνοδά ιζήματα,
- ανθρακικά καλύμματα τριαδικού-Ιουρασικού νηριτικής φάσης,
- περμοτριάδικές μετακλαστικές ακολουθίες,
- γνευσιωμένους γρανίτες λιθανθρακοφόρου
- κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο (όρθο και παρα - γνεύσιοι, αμφιβολίτες, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι) (Μαντούζα, 2008).

- Υποπελαγονική ζώνη

Έχει σαν κύριο χαρακτηριστικό τις μεγάλες οφιολιθικές μάζες και την συνοδεύουσα σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Οι οφιολίθοι της Υποπελαγονικής συνιστούν την «εξωτερική οφιολιθική λωρίδα» και ζώνη θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την οφιολιθική συρραφή της παλιάς ωκεάνιας περιοχής δυτικά του Πελαγονικού ηπειρωτικού τεμάχους.

Το προαλπικό υπόβαθρο της Υποπελαγονικής συνίσταται από :

- τα Κ. Παλαιοζωικά πετρώματα της Πελαγονικής
- ιζηματογενή ημιμεταμορφωμένα πετρώματα Παλαιοζωικής ηλικίας.

Οι αλπικοί σχηματισμοί που μετέχουν στη συγκρότηση της ζώνης είναι:

- Τριαδικά ιζήματα: κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, πυριτικοί νηριτικοί ασβεστόλιθοι με χαρακτηριστικούς τους κόκκινους αμμωνιτοφόρους ασβεστόλιθους και τεφρούς ωολιθικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες.
- Πελαγικοί- Νηριτικοί Ασβεστόλιθοι Ιουρασικού, Σχιστοκερατολιθική διάπλαση Τριαδικού - Ιουρασικού: κόκκινοι, πράσινοι και μαύροι αργιλικοί σχιστόλιθοι, ραδιολαριτικοί κερατόλιθοι, μάργες, ψαμμίτες, πηλίτες.
- Παρεμβολές οφιολιθικών σωμάτων, λατεριτικά σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα, ιζήματα Μέσο - Άνω Κρητιδικής επίκλυσης: ασβεστόλιθοι - φλύσχης, μεταλικά ιζήματα μολασσικού τύπου (Μεσοελληνικής Αύλακας) (Μαντούζα, 2008).

- Ζώνη της Ωλονού - Πίνδου

Συνήθως αναφέρεται σαν το «Ελληνικό ευγεωσύγκλινο» του Μεσοζωικού. Μαζί με την Υποπελαγονική ζώνη αντιπροσωπεύει τον κατεστραμμένο ωκεανό της Νεοτηθύος. Από τα τέλη του κρητιδικού μέχρι το Ηώκαινο - Κ. Ολιγόκαινο στο χώρο της Πίνδου αποτίθενται ρυθμικές εναλλαγές ψαμμιτών, μαργών μαζί με κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθους που δομούν τον κύριο «δεύτερο φλύσχη της Πίνδου», τυπικό του ελληνικού χώρου. Καθ' όλη τη διάρκεια του Ιουρασικού στην Αύλακα της Πίνδου αποτίθενται ιζήματα βαθιάς θάλασσας κερατολιθοι, ραδιολαρίτες, άργιλοι, ψαμμίτες, πελαγικοί πυριτικοί ασβεστόλιθοι και ιάσπιδες που αποτελούν την «Σχιστοκερατολιθική διάπλαση». (Μαντούζα, 2008).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στη περιοχή της Θεσσαλίας είναι οι εξής :

- Πρόσφατα χαλαρά ιζήματα

Παράκτιες και ποτάμιες αποθέσεις από άμμο, άργιλο, πηλό και κροκάλες. Το πάχος τους κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως μερικά δεκάδες μέτρα που κατά θέσεις ξεπερνούν τα 100 m.

- Παλαιές προσχώσεις και πλευρικά κορήματα

Αμμώδεις άργιλοι, ψηφίδες, κροκάλες και λάτυπες μικρών διαστάσεων, που παρουσιάζουν σαφή εναλλαγή των αδρομερών και λεπτομερών λιθολογικών φάσεων. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 20 m και ηλικία τους είναι κυρίως Πλειστοκαινική

- Μολασσικοί σχηματισμοί

Μάργες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες με ενστρώσεις λεπτοπλακωδών μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν σαφή στρώση και το πάχος τους κυμαίνεται στα 1000 - 2000 m (Μεσοελληνικής Αύλακας)

- Οφιόλιθοι

Απαντώνται σε εκτεταμένες εμφανίσεις, ιδίως στο δυτικό τμήμα. Πρόκειται για βασικά έως υπερβασικά πυριγενή πετρώματα (βασάλτες, σερπεντίνες, περιδοτήτες, διορίτες κ.α.) με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό το πρασινωπό χρώμα τους, στο οποίο οφείλουν και το όνομά τους

- Φλύσχης

Κλαστικός ιζηματογενής σχηματισμός της ζώνης Πίνδου και της Υποπελαγονικής, αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών, πηλιτών και αργλικών σχιστόλιθων και εμφανίζεται κυρίως στο ορεινό τμήμα της Πίνδου.

- Ασβεστόλιθοι

Ανθρακικά πετρώματα του αλπικού υποβάθρου, συχνά συναντώνται ανακρυσταλλωμένα έως ελαφρά μεταμορφωμένα και αποτελούν αντικείμενο έντονης λατομικής δραστηριότητας στην περιοχή

- Μάρμαρα

Μαζί με κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και σιπολίτες, που έχουν μεγάλο πάχος συνήθως, υψηλή συνεκτικότητα και συνιστούν το γεωλογικό υπόβαθρο

- Σχιστόλιθοι

Μεταμορφωμένα πετρώματα του αλπικού υποβάθρου της Πελαγονικής ζώνης, όπου στην πλειοψηφία τους αποτελούνται από σχιστόλιθους, φυλλίτες και γνευσίους και απαντώνται κυρίως στις περιοχές Ολύμπου, Ελασσόνας και Πηλίου

- Σχιστόκερατόλιθοι

Στην Αύλακα της Πίνδου αποτίθενται ιζήματα βαθιάς θάλασσας, κερατόλιθοι, ραδιολαρίτες, άργιλοι, ψαμμίτες, πελαγικοί πυριτικοί ασβεστόλιθοι και ιάσπιδες που αποτελούν την «Σχιστοκερατολιθική διάπλαση» και εντός της εμφανίζονται περιδοτήτες, διαβάσεις και δολερίτες (Κουγιουμτζίδου, 2011).

Επειδή γεωλογία της περιοχής δεν προσφέρεται για την άμεση έκφανση συμπερασμάτων, προκειμένου να διευκολυνθεί αυτή η διαδικασία, ο Κωτούλας (2001) προχώρησε στην αδρομερέστερη κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων, στηριζόμενος σε κριτήρια όπως το είδος,

βαθμός έντασης, έκταση και συνδυασμός των χειμαρρικών φαινομένων που χαρακτηρίζουν κάθε ορυκτό πέτρωμα.

Με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια, προέκυψαν οι ακόλουθοι χειμαρρικοί - πετρολογικοί σχηματισμοί:

- Ασβεστολιθικός σχηματισμός

Περιλαμβάνει τους ασβεστόλιθους, τους δολομίτες και τους κερατόλιθους

- Φλυσικός σχηματισμός

Περιλαμβάνει το γεωλογικό σχηματισμό του φλύσχη

- Σχιστολιθικός σχηματισμός

Περιλαμβάνει τους πάσης φύσεως σχιστόλιθους (πυριτικοί, σερικιτικοί, αργιλικοί, φυλλίτες κ.α.

- Κρυσταλλοπυριγενής σχηματισμός

Περιλαμβάνει τους γνεΐσιους, τους γρανίτες, σερπεντινίτες, αμφιβολίτες, πρασινίτες, βασάλτες διορίτες κ.λπ.

- Νεογενής σχηματισμός

Περιλαμβάνει τα εξής: άμμοι, άργιλοι, μάργες, κροκαλώδη. Κροκαλοπαγή, λατυπώδη, λατυποπαγή, ψαμμίτες, ψαμμόλιθοι

- Προσχωσιγενής σχηματισμός

Περιλαμβάνει καλλιεργούμενα εδάφη, προσχωσιγενών, πεδινών ημιπεδινών περιοχών (λυτά πετρώματα). (Μαντούζα, 2008)

- Υδρολιθολογία του διαμερίσματος

Η Υδρολιθολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την πλούσια υδροφορία τόσο σε υπόγεια όσο και σε επιφανειακά ύδατα. Αυτό οφείλεται κύρια στο μεγάλο βαθμό καρστικοποίησης των ανθρακικών πετρωμάτων της περιοχής και στη μεγάλη περατότητα των χαλαρών σχηματισμών του Θεσσαλικού κάμπου που ευνοούν την αποθήκευση τεράστιων όγκων υπόγειου νερού. Εξάλλου, η πετρολογική σύσταση των σχηματισμών του κρυσταλλικού υπόβαθρου ευνοεί την επιφανειακή απορροή.

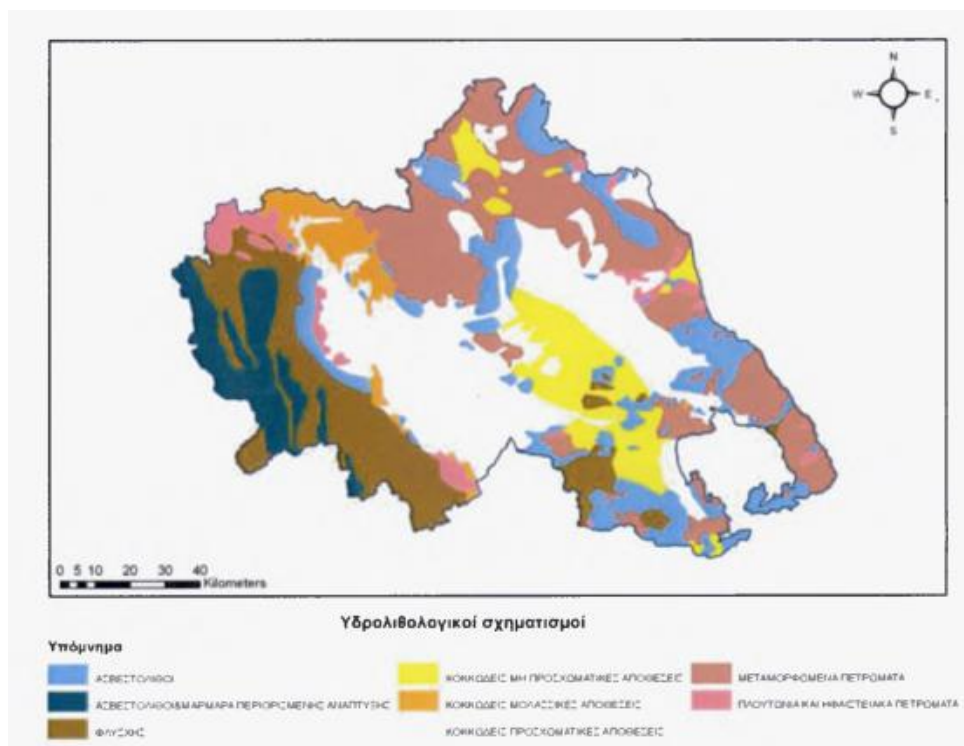
Ο εμπλουτισμός του προσχωματικού υδροφορέα εξασφαλίζεται άμεσα από τα ύδατα της βροχής και έμμεσα από την πλευρική τροφοδοσία του καρστικού υδροφορέα (Μπέλλος, 2004).

Ο Πηνειός σχηματίζεται από τη συμβολή του Μαλακασιώτικου ποταμού, που πηγάζει από το βουνό Λάκμος και του ρέματος Μουργκάνι (Ιων), που πηγάζει από τα Αντιχάσια. Μετά την είσοδο του στη πεδιάδα δέχεται από αριστερά όλα τα νερά των Χασίων, τα οποία φέρνουν σε αυτόν Ληθαίος και

Νεοχωρίτης. Από τα νότια χύνονται σε αυτόν τα ρέματα της Πίνδου και της Όθρυος, όπου είναι τα παρακάτω:

- Πορταϊκός, από τα νοτιοδυτικά των Τρικάλων
- Πάμισος, από τη χαράδρα του Μουζακίου
- Καλεντζής, το ρέμα της Καρδίτσας που έρχεται από τον Ίταμο
- Σοφαδίτης, που μαζεύει όλα τα ποτάμια της δολοπικής σχιστολιθικής οροσειράς Ενιπέας και απορρέει στον Σοφαδίτη .

Τα νερά του Καλεντζή, του Σοφαδίτικου και του Ενιπέα μετά από μικρό κοινό ρου χύνονται όλα μαζί στον Πηνειό. Σε αυτή τη περιοχή συγκεντρώνονται όλες οι μεγάλες υδάτινες αρτηρίες, που κατεβαίνουν από τις πλούσιες σε βροχές βόρειες πλαγιές της Πίνδου και της Όθρυος (Κουγιουμτζίδου, 2011). Αφού μαζέψει ο Πηνειός όλα τα νερά της δυτικής πεδιάδας, διασχίζει το δυτικό και ανατολικό άκρο των σκληρών ασβεστολιθικών βουνών και ανάντη της Λάρισας διχάζεται σε δύο κλάδους. Ο δεξιός κλάδος μαιανδρίζει, έχει μήκος 6,2 χλμ.. και αποτελεί την ιστορική κοίτη του ποταμού. Ο αριστερός κλάδος είναι ευθύγραμμος, μήκους 2,3 χλμ.. και κατασκευάστηκε το 1983 για την αντιπλημμυρική προστασία της πόλης (Κουγιουμτζίδου, 2011).



Εικόνα 20: Υδρολιθολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού



Οι σχηματισμοί που δομούν το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας ταξινομήθηκαν με βάση την ευκολία τη δυσκολία με την οποία διακινείται το νερό στη μάζα τους δηλαδή στους υδροπερατούς, ημιπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Η πεδιάδα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται σε δύο κύριες αυτοτελείς υδρολογικές λεκάνες, τη λεκάνη της Δυτικής και τη λεκάνη της Ανατολικής Θεσσαλίας (Τέγος, 2005). Οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί από τους οποίους αποτελείται η υπό εξέταση λεκάνη είναι διαφόρων ειδών και ονοματολογία τους παρουσιάζεται στην Εικόνα 20. Θεωρήθηκε χρήσιμο να πραγματοποιηθεί απεικόνιση τους σε χάρτη ώστε να υπάρχει μια συνολική εικόνα περί της δομής του «υπογείου» περιβάλλοντος της περιοχής αλλά και μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων που μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο των φυσικών λειτουργιών των υδάτων αλλά και άλλων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα (Μαντούζα, 2008).

Όπως προαναφέρθηκε, οι σχηματισμοί που εμφανίζονται είναι τριών ειδών, αδιαπέρατοι, καρστικοί και πορώδεις σχηματισμοί αλλιώς αδιαπέρατοι, ημιπερατοί και υδροπερατοί σχηματισμοί.

Στους αδιαπέρατους σχηματισμούς ανήκει ο φλύσχος, τα μεταμορφωμένα και τα πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα. Ο φλύσχος είναι γενικά αδιαπέρατος σχηματισμός. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι αδιαπέρατοι σχηματισμοί με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα στους οποίους όταν παρεμβάλλονται τοπικά ασβεστόλιθοι και μάρμαρα, συχνά αναπτύσσονται καρστικοί υδροφορείς. Τα πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα είναι γενικώς αδιαπέρατοι σχηματισμοί με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα. Σε αυτούς τους σχηματισμούς και ειδικότερα στους γρανίτες και περιδοτίτες αναπτύσσονται τοπικά υδροφορείς σε ζώνες έντονης διάρρηξης. Η υδροπερατότητα στις ζώνες αυτές κυμαίνεται από μικρή έως μέτρια. Γενικά σε όλους τους αδιαπέρατους σχηματισμούς αναπτύσσονται τοπικά περιορισμένοι, ελεύθεροι υδροφορείς στο ανώτερο αποσαθρωμένο τμήμα τους, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη φυτοκάλυψη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών μικρών πηγών σε διαφορετικά υψόμετρα με κυμαινόμενες παροχές (Μαντούζα, 2008).

Οι καρστικοί σχηματισμοί της περιοχής αποτελούνται από ασβεστόλιθους και μάρμαρα εκτεταμένης αλλά και περιορισμένης ανάπτυξης. Το πρώτο είδος σχηματισμών παρουσιάζει έντονη καρστικοποίηση, λόγω της χημικής διάβρωσης τους που ποικίλει μεταξύ ασβεστόλιθων και δολομιτών. Η συνήθως μεγάλη επιφανειακή τους ανάπτυξη, έντονη τεκτονική τους καταπόνηση, λιθολογική τους σύσταση και στρωματογραφική τους δομή συντελούν στην ανάπτυξη πορώδους ρωγμών και ασυνεχειών με αποτέλεσμα η υδροπερατότητα τους να κυμαίνεται από μέτρια έως υψηλή. Η μεγάλη επιφανειακή τους εξάπλωση ευνοεί την ανάπτυξη εκτεταμένων καρστικών συστημάτων. Το δεύτερο είδος σχηματισμών παρουσιάζει μέτρια καρστικοποίηση λόγω της χημικής διάβρωσης τους που περιορίζεται εξαιτίας των εναλλαγών με ημιπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή του υπόγειου νερού να ελέγχεται από τις παρεμβολές των αδιαπέρατων σχηματισμών και από τις μεγάλες τεκτονικές γραμμές (Μαντούζα, 2008).

Οι υδροπερατοί αποτελούνται από κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας, κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας έως πολύ μικρής υδροπερατότητας και κοκκώδεις μολασσικές αποθέσεις σχετικά μικρής υδροπερατότητας. Το πρώτο είδος σχηματισμών αναπτύσσεται κυρίως κατά τη ροή των ποταμών και των χειμάρρων. Συνήθως κατά τη διαδρομή των ποταμών από το εσωτερικό πεδινό τμήμα προς το δέλτα τους οι ελεύθεροι υδροφορείς που αναπτύσσονται μεταπίπτουν σε μερικώς υπό πίεση και τελικώς υπό πίεση, τροφοδοσία τους εξαρτάται από τη λιθολογική τους σύσταση (Μαντούζα, 2008).

Το δεύτερο είδος σχηματισμών εμφανίζει γενικά μέτρια έως μικρή υδροπερατότητα ανάλογα με τη συμμετοχή χονδρόκοκκου λεπτομερούς υλικού. Στις πλειοκαινικές και νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται κυρίως επάλληλοι υπό πίεση υδροφορείς. Στο τελευταίο είδος συχνή παρουσία κροκαλοπαγών, κυρίως αποθέσεις της Μεσοελληνικής Αύλακας δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη τοπικών υδροφόρων οριζόντων, ελευθέρων υπό πίεση. Η υδροπερατότητα τους εξαρτάται τόσο από τη μικρή παρουσία αργίλων στη σύσταση τους όσο και από το μικρό σχετικά βαθμό διαγένεσης τους (Μαντούζα, 2008).

- Η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού-Περιοχή Πύλης

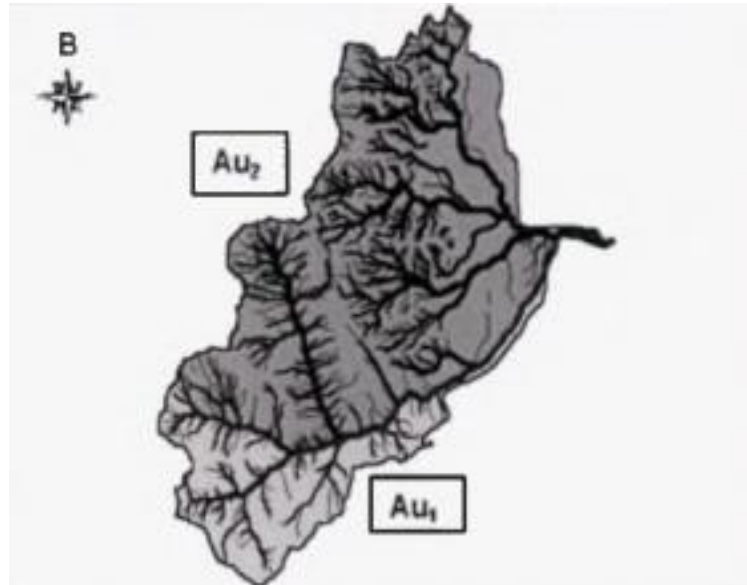
Η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού οριοθετείται δυτικά από την οροσειρά της νότιας Πίνδου και ανατολικά από την Θεσσαλική πεδιάδα, στο ύψος του Πηνειού ποταμού. Προς βορρά ξεκινάει περίπου 9 Km νότια της Καλαμπάκας ενώ νότια αποτελεί ουσιαστικά το όριο μεταξύ των νομών Τρικάλων και Καρδίτσας. Καλύπτει επιφάνεια περίπου 294 km<sup>2</sup>, η οποία διαρρέεται από ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο.

Η λεκάνη αυτή αποτελείται από δύο επιμέρους λεκάνες, οι οποίες διαχωρίζονται από την επιμήκη οροσειρά του Κόζιακα (Κερκέτιο όρος) και επικοινωνούν μεταξύ τους στην περιοχή των στενών της Πύλης (Εικόνα 21).

Η κύρια κοίτη του Πορταϊκού έχει συνολικό μήκος 31,9 Km, ενώ χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το μεγαλύτερο τμήμα αυτής βρίσκεται δίπλα στον υδροκρίτη της υδρολογικής λεκάνης με αποτέλεσμα το υδρογραφικό δίκτυο να παρουσιάζει μια εντελώς ασύμμετρη ανάπτυξη εκατέρωθεν του κυρίου κλάδου.

Η λεκάνη απορροής του π. Πορταϊκού στον υδρομετρικό σταθμό Πύλης του νομού Τρικάλων, αποτελεί στο σύνολό της την ορεινή περιοχή του ποταμού, λίγο πριν αυτός εισέλθει στα πεδινά και συμβάλει με τον Πηνειό, του οποίου είναι παραπόταμος. Η θέση της λεκάνης είναι ανάμεσα στα Όρη Κερκέτιο και Ίταμός, τα οποία ορίζουν στα βορειοδυτικά τη Θεσσαλική πεδιάδα. Στη θέση αυτή λεκάνη καταλαμβάνει ένα μέρος της ανατολικής ομβροπλευράς της Πίνδου. Έχει σχήμα που μοιάζει περισσότερο με κυκλικό τομέα, με το στόμιο της λεκάνης κοντά στο κέντρο του κύκλου, το οποίο ευρίσκεται στο ανατολικότερο άκρο της λεκάνης. Αντιστοίχως, το «τόξο» του κυκλικού τομέα συνιστά τον δυτικό υδροκρίτη της λεκάνης. Η κύρια μισγάγγεια διατρέχει τη λεκάνη απορροής από ΔΝΔ προς τα ΑΒΑ. Σημαντικό χαρακτηριστικό της λεκάνης είναι ότι σε μικρή απόσταση από το στόμιό της, λίγο μεγαλύτερη των τριών χιλιομέτρων, συμβάλλει με τον

κύριο κλάδο το ρέμα Ποτάμι που αποστραγγίζει όλο το βόρειο τμήμα της λεκάνης. Το νότιο και λίγο μεγαλύτερο τμήμα αυτής (περίπου το 60%) αποστραγγίζεται από τον κύριο κλάδο του Πορταϊκού. Το σύνολο της λεκάνης αποστραγγίζεται με σχετικά σύντομες διαδρομές, πράγμα που ευνοεί την εμφάνιση υψίκορφων και γρήγορων πλημμυρών.



Εικόνα 21: Υδρολογική Λεκάνη Απορροής του Πορταϊκού ποταμού

Το στόμιο της λεκάνης είναι σε υψόμετρο περίπου 250 m. Στη θέση αυτή υπάρχει υδρομετρικός σταθμός της ΔΕΗ, εξοπλισμένος με σταθμήμετρα, σταθμηγράφο και μόνιμη εγκατάσταση για τη μέτρηση της παροχής. Μερικές εκατοντάδες μέτρα ανάντη της θέσης υδρομετρήσεων, ευρίσκεται θέση του φράγματος. Από την άποψη της έκτασης, οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής διαφέρουν ελάχιστα. Από την άποψη των διερχομένων παροχών, είναι πρακτικά ταυτόσημες. Ο υδροκρίτης που αντιστοιχεί στη θέση του υδρομετρικού σταθμού, διανυόμενος με φορά δεξιόστροφη, ανεβαίνει προς ΝΑ το Όρος Ίταμός μέχρι την κορυφή του σε υψόμετρο +1130 περίπου, όπου στρέφεται σε ορθή γωνία προς τα ΝΔ. Στην πορεία αυτή, αφού περάσει από μια ζώνη ενδιάμεσων υψομέτρων, στα 600 - 700 m περίπου, ανεβαίνει στα υψώματα Καραμήτσου, Καραβούλα και Αχλαδιάς, σε υψόμετρα αντιστοίχως, +1416, +1862 και +1736. Από την περιοχή αυτή και πέρα, ο υδροκρίτης στρέφεται σε βόρεια γενική κατεύθυνση, διερχόμενος διαδοχικά από τις κορυφές Τσιούκες (+1706), Ξηροβούνι (+1731), Σπανουλάκι (+1573), Καραντζιούνη (+1717), Πυργάκι (+1619), Αυγό (+1631), Μαυροπούλι (+1721), Καρμές (+1872), Σκασμένη (+1388) και Πλάκα (περίπου +1420). Συνεχίζει μέχρι να συναντήσει την κορυφογραμμή του Κερκέτιου Όρους στο ύψωμα Καλτσές (+1860), αφού πρώτα περάσει από τα Τρία Έλατα (+1472). Από τις Καλτσές, με πορεία τώρα ΝΑ, διέρχεται από την Κακορράχη (+1817), τον Αμάρανθο (+1526), την Καστανιά και την Κρανιά. Από εκεί με μια μετατόπιση προς τα ανατολικά, περνά στη Μεγάλη Ράχη, σε υψόμετρα άνω του +1200, για να καταλήξει με απότομη κάθοδο στο στόμιο της λεκάνης, κοντά στην τοποθεσία Παναγιά.

Η συνολική λεκάνη έχει έκταση 132 km<sup>2</sup> και μέσο υψόμετρο 939 m. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πολύ ανεπτυγμένο, 5ης τάξεως, και πυκνό σε όλη τη λεκάνη. Το μήκος του κυρίου κλάδου είναι περίπου 14,95 Km από το στόμιο της λεκάνης μέχρι το απώτατο σημείο του υδροκρίτη. Η μέση κλίση του κυρίως ρεύματος (μετρημένη ανάμεσα στο 10% και στο 85% του μήκους του) είναι σχετικά ήπια, ίση προς 44,15 m/Km. Όπως προκύπτει από τον εδαφολογικό χάρτη της περιοχής σε κλίμακα 1:500000 που έχει εκδώσει Δασική Υπηρεσία του Υπουργείου Γεωργίας, λεκάνη καλύπτεται από δύο τύπους εδαφών, περίπου σε ίση μοίρα: πρώτον, από προϊόντα αποσάθρωσης φλύσχη, με υφή πηλώδη, τα οποία θεωρούνται πολύτιμα δασικά εδάφη και δεύτερον, από προϊόντα αποσάθρωσης σκληρών ασβεστόλιθων, με υφή αργιλώδη μέχρι αργιλοπηλώδη. Μικρό ποσοστό της λεκάνης είναι πρακτικά ακάλυπτο γυμνός βράχος, στις ανώτερες υψομετρικές ζώνες των ασβεστολιθικών εξάρσεων. Με την εξαίρεση αυτών των περιοχών που συχνά είναι και απόκρημνες, η λεκάνη παρουσιάζει πλούσια δασική βλάστηση.

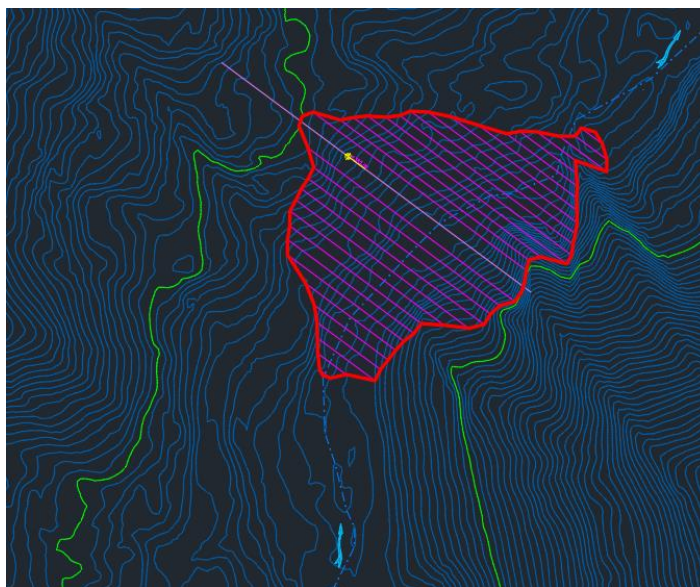
- Βασικά στοιχεία για το φράγμα Πύλης

Στην περιοχή της Πύλης σχεδιάζεται γεώφραγμα όπου στον ταμιευτήρα του συγκεντρώνονται τα ύδατα της λεκάνης του Πορταϊκού ποταμού όπως αναλύθηκε παραπάνω.

- Σε πρώτο στάδιο προσδιορίζεται ο όγκος του αναχώματος του φράγματος  $V_{dam}$

Η οριζοντιογραφία του φαίνεται παρακάτω πάνω στο ανάγλυφο του εδάφους της περιοχής μελέτης με τη παρουσία ισοϋψών για ενδεικτικό ύψος φράγματος  $H=80$  m.

Η θέση του φράγματος καθορίζεται από την λίμνη ταμιευτήρα που δημιουργεί, ο οποίος ενδείκνυται να αποθηκεύει το μέγιστο δυνατό νερό από τις απορροές υπό την παρουσία της οικονομικότερης δυνατής κατασκευής (Εικόνα 22).

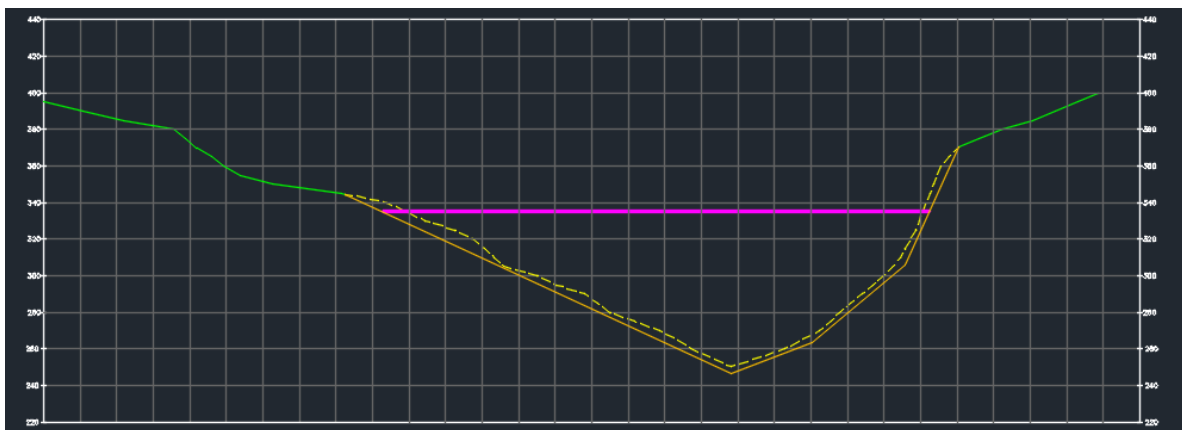


Εικόνα 22: Οριζοντιογραφία φράγματος Πύλης πάνω στη γεωμορφολογία της περιοχής για  $H=80$  m

Για να προσδιοριστεί ο όγκος του φράγματος απαιτείται ο σχεδιασμός της μηκοτομής του κατά μήκος του άξονα του έργου (διαμήκης τομή) για την εποπτεία του εδάφους θεμελίωσης καθώς και μια σειρά εγκάρσιων διατομών για την υλοποίηση της διαδικασίας ογκομέτρησης του φράγματος.

Όσον αφορά τη μηκοτομή του φράγματος της Πύλης σε συνδυασμό με την οριζοντιογραφία εξάγονται σημαντικά χαρακτηριστικά για τη γεωμορφολογία του εδάφους στη περιοχή (Εικόνα 19, Εικόνα 23, Εικόνα 22). Συγκεκριμένα:

- ✓ Στάθμη πυθμένα  $z_b$  που υπολογίζεται σε υψόμετρο +260 m
- ✓ Εκκαφές θεμελίωσης το πολύ 5 m βάθους κάτω από τη φυσική παρειά των πρανών
- ✓ Κλίση πρανών φυσικού εδάφους εκατέρωθεν του φράγματος με την παραδοχή σταθερής κλίσης των αντρεισμάτων  $J = 0.8$ , καθώς για υψομετρική διαφορά 85 m η οριζόντια απόσταση αγγίζει τα 106,5 m

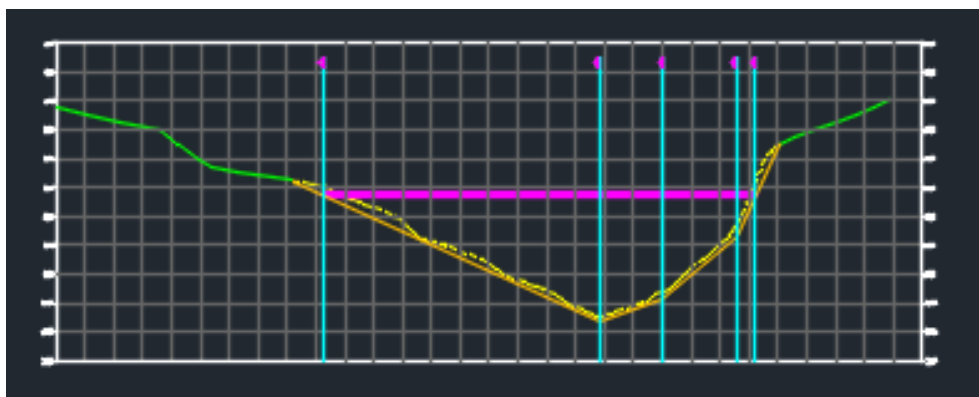


Εικόνα 23: Μηκοτομή άξονα γεωφράγματος Πύλης  $H=80$  m

Για την μέτρηση του όγκου των αναχωμάτων θα υπολογιστούν τυπικές εγκάρσιες στον άξονα του φράγματος διατομές για φράγματα υψών  $H=80$  m,  $H=105$  m και  $H=120$  m της ίδιας θέσης, διατηρώντας τα ίδια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά εδάφους

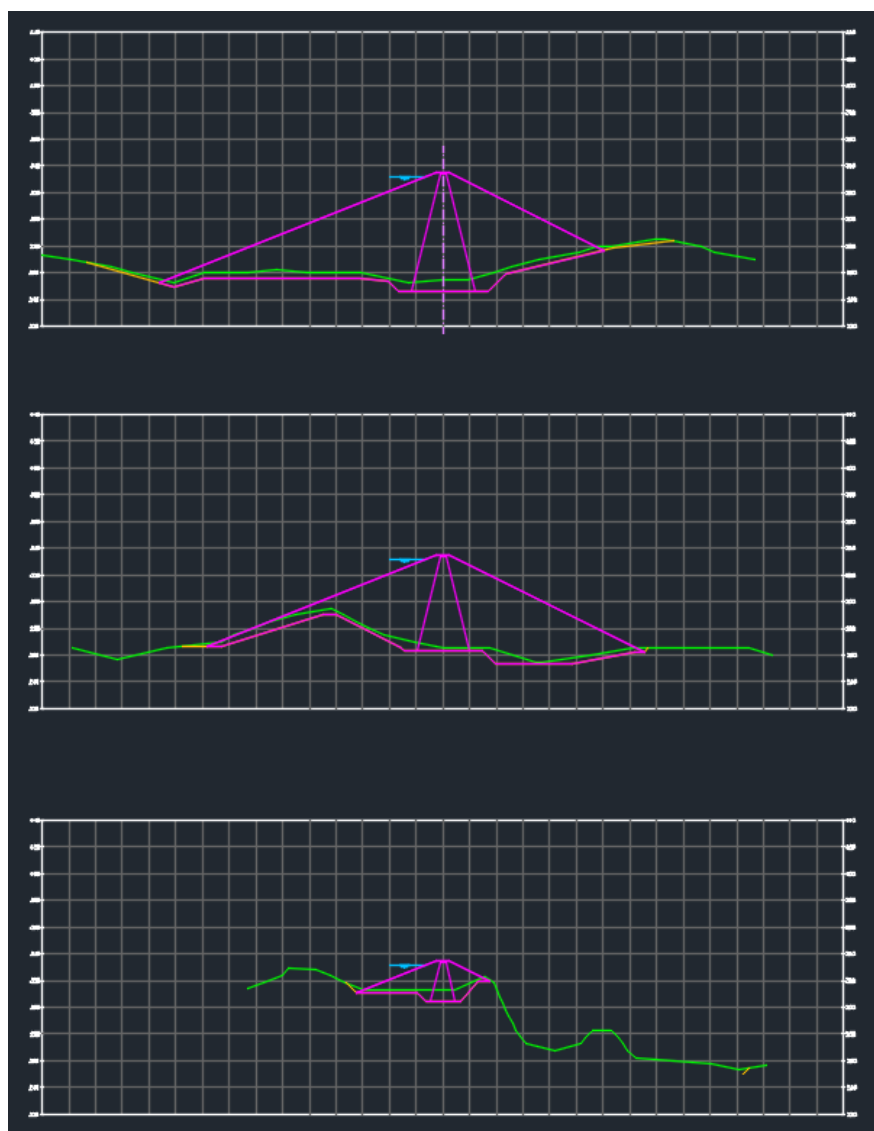
- Φράγμα ύψους  $H=80$  m

Η οριζοντιογραφία του φαίνεται στην Εικόνα 22, ενώ οι τυπικές του διατομές απεικονίζονται παρακάτω με τις θέσεις τους να προσδιορίζονται στη μηκοτομή (Εικόνα 24).



Εικόνα 24: Μηκομή φράγματος ύψους  $H=80\text{ m}$  με απεικόνιση των θέσεων των διατομών της ογκομέτρησης

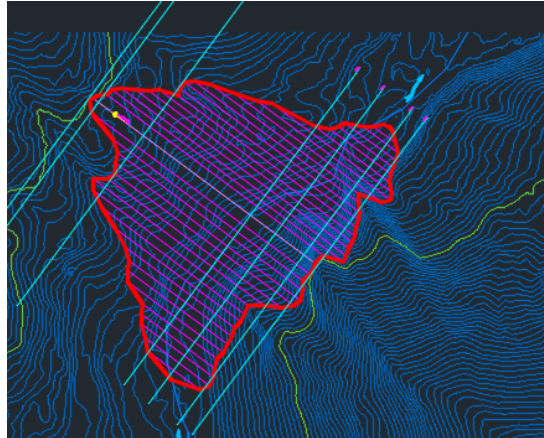
Με τις τρεις ενδιάμεσες διατομές (μη μηδενικού όγκου) να σκιαγραφούνται στην Εικόνα 25:



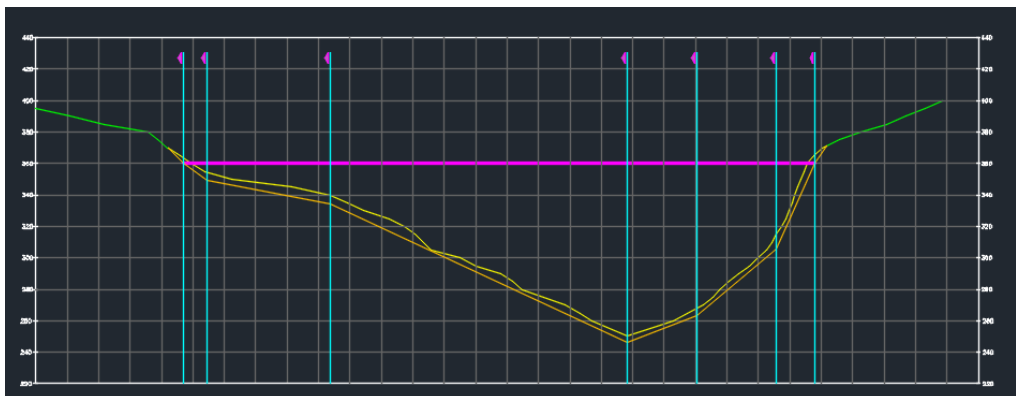
Εικόνα 25: Τυπικές Διατομές φράγματος ύψους  $H=80\text{ m}$

- Φράγμα ύψους  $H = 105 \text{ m}$

Η οριζοντιογραφία του φαίνεται στην Εικόνα 26, ενώ οι τυπικές του διατομές απεικονίζονται παρακάτω με τις θέσεις τους να προσδιορίζονται στη μηκτομή (Εικόνα 27).

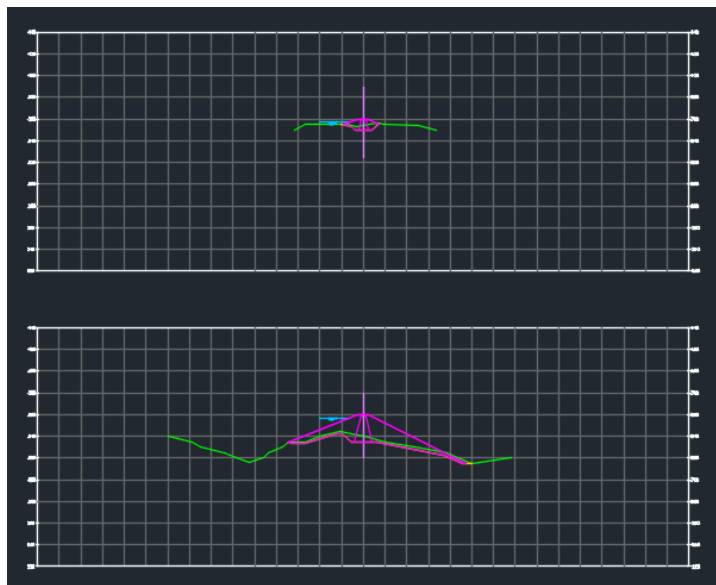


Εικόνα 26: Οριζοντιογραφία φράγματος ύψους  $H=105 \text{ m}$  με απεικόνιση των θέσεων των διατομών της ογκομέτρησης

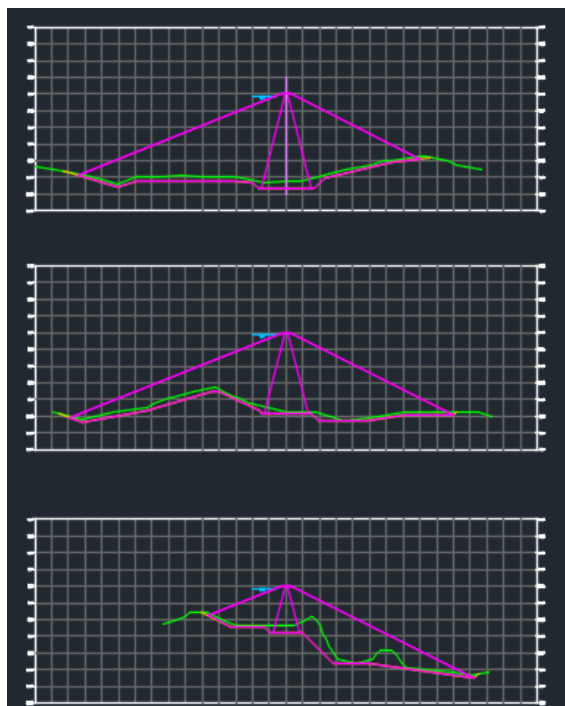


Εικόνα 27: Μηκτομή φράγματος ύψους  $H=105 \text{ m}$  με απεικόνιση των θέσεων των διατομών της ογκομέτρησης

Με τις πέντε ενδιάμεσες διατομές (μη μηδενικού όγκου) να σκιαγραφούνται στα παρακάτω σχήματα (Εικόνα 28, Εικόνα 29):



Εικόνα 28: Τυπικές Διατομές φράγματος ύψους  $H=105\text{ m}$

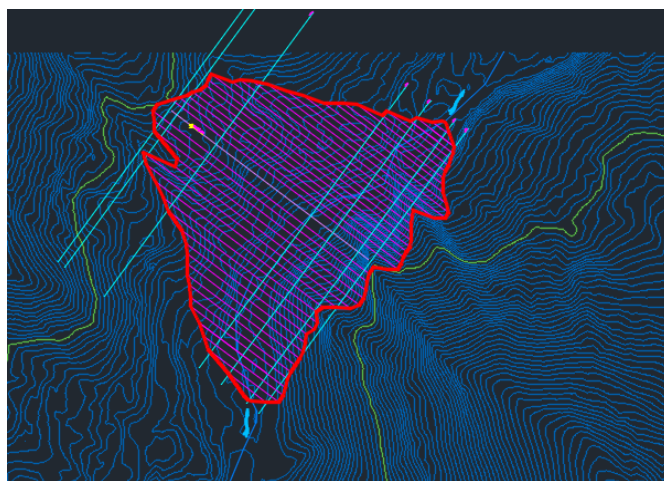


Εικόνα 29: Τυπικές Διατομές φράγματος ύψους  $H=105\text{ m}$

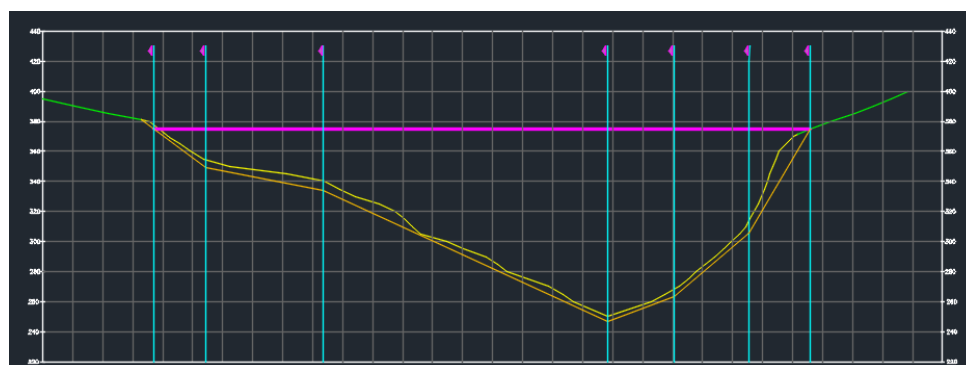
- Φράγμα ύψους  $H = 120\text{ m}$

Η οριζοντιογραφία του φαίνεται στην Εικόνα 30, ενώ οι τυπικές του διατομές απεικονίζονται παρακάτω με τις θέσεις τους να προσδιορίζονται στη μηκοτομή (Εικόνα 31).



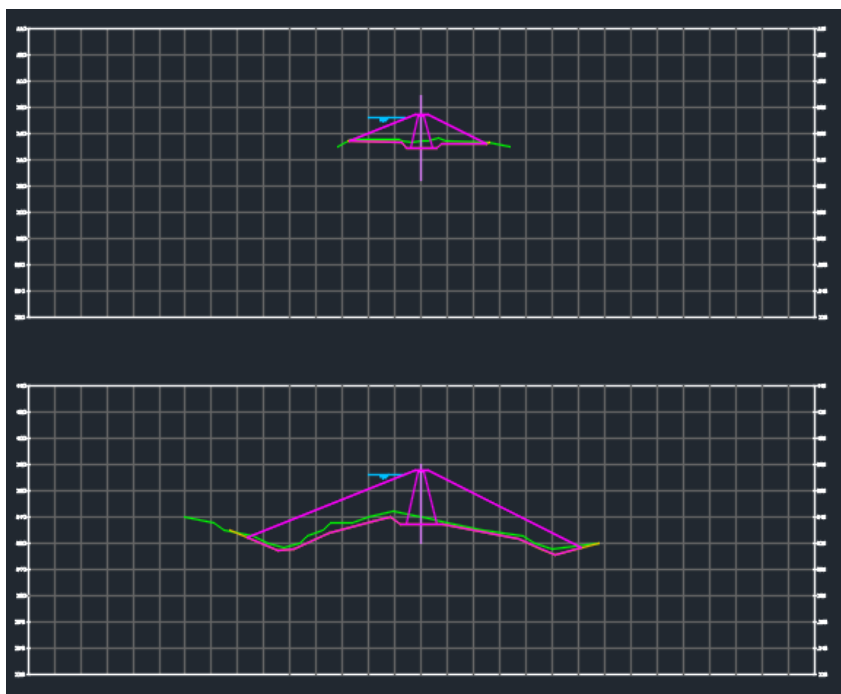


Εικόνα 30: Οριζοντιογραφία φράγματος ύψους  $H=120\text{ m}$  με απεικόνιση των θέσεων των διατομών της ογκομέτρησης

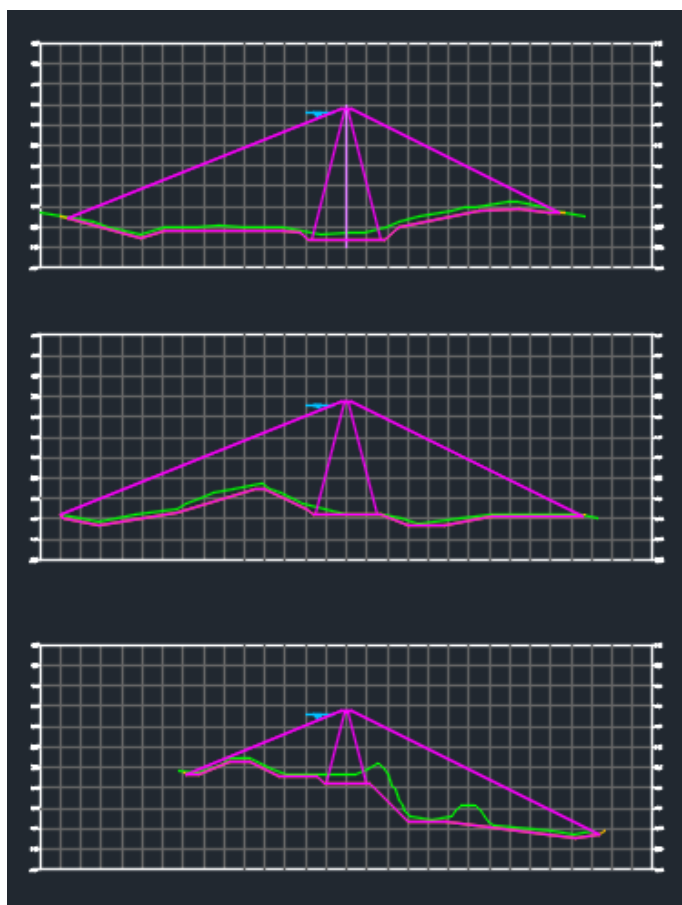


Εικόνα 31: Μηκτομή φράγματος ύψους  $H=120\text{ m}$  με απεικόνιση των θέσεων των διατομών της ογκομέτρησης

Με τις ενδιάμεσες διατομές (μη μηδενικού όγκου) να σκιαγραφούνται στα παρακάτω σχήματα (Εικόνα 32, Εικόνα 33):



Εικόνα 32: Τυπικές Διατομές φράγματος ύψους  $H=120\text{ m}$



Εικόνα 33: Τυπικές Διατομές φράγματος ύψους  $H=120\text{ m}$

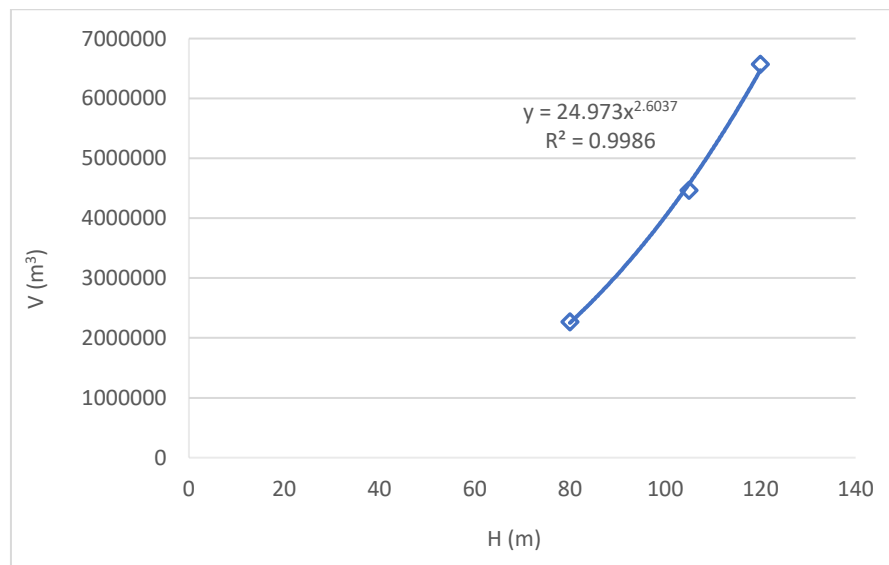
Αφού προσδιορίστηκαν οι τυπικές διατομές των τριών υψών φραγμάτων ο στόχος παραμένει η τυποποίηση της διαδικασίας ογκομέτρησης συναρτήσει του ύψους φράγματος για τη περιοχή της Πύλης. Ο όγκος του φράγματος ενός ύψους προκύπτει μέσω του αθροίσματος του εμβαδού των διαδοχικών διατομών του A και της απόστασης x που συνδέονται διαδοχικά μεταξύ τους, σύμφωνα με τον τύπο του τραπεζίου:

$$V_{φρ.} = \sum (A_p + A_{p+1}) * \frac{x_p}{2} \quad (6.1)$$

Με βάση τα παραπάνω σχέδια και την εξίσωση (6.1) προκύπτει ο Πίνακας 5:

**Πίνακας 5: Ογκομέτρηση φραγμάτων διαφορετικών υψών για την περιοχή της Πύλης**

H = 80 m				H = 105 m				H = 120 m			
ρ	A (m <sup>2</sup> )	X (m)	V (hm <sup>3</sup> )	ρ	A (m <sup>2</sup> )	X (m)	V (hm <sup>3</sup> )	ρ	A (m <sup>2</sup> )	X (m)	V (hm <sup>3</sup> )
Δ1	0	190.9	1.38	Δ1	0	14.8	0.002	Δ1	0	34.9	0.02
Δ2	14432	44.4	0.56	Δ2	229	78.5	0.08	Δ2	1364	78.5	0.28
Δ3	10981	50.4	0.32	Δ3	1894	189.3	2.42	Δ3	5866	189.3	3.47
Δ4	1576	13.4	0.01	Δ4	23690	44.4	0.99	Δ4	30833	44.4	1.31
Δ5	0		2.27	Δ5	21177	50.4	0.82	Δ5	28416	50.4	1.14
				Δ6	11459	24.8	0.14	Δ6	16729	40.5	0.34
				Δ7	0		4.47	Δ7	0		6.57



Διάγραμμα 5: Γενίκευση διαδικασίας ογκομέτρησης για φράγμα κάθε ύψους στην Πύλη

Λαμβάνοντας υπόψη τους συνολικούς όγκους των φραγμάτων για ύψη 80 m, 105 m, 120 m, αυτοί συσχετίζονται με τα ύψη αυτά εξάγοντας την παρακάτω εκθετική σχέση που ογκομετρεί ένα φράγμα της Πύλης ανάλογα το ύψος που επιλέγεται:

$$V_{φρ.} = 24.973 * H^{2.6037} \quad (6.2)$$

## 6.2 Η λειτουργία του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα Πύλης

Η εφαρμογή της ανάλυσης σχεδιασμού του προηγούμενου κεφαλαίου για τον υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα της Πύλης αναφέρεται στην υλοποίηση του συμβατικού σχεδιασμού μέσω των H, D, E<sub>tot</sub> και στη συνέχεια ερευνώνται εναλλακτικά σενάρια και μέθοδοι σχεδιασμού.

**Πίνακας 6: Μεταβλητές βελτιστοποίησης σεναρίου βάσης του φράγματος Πύλης**

Ύψος φράγματος H	82.6	m
Διάμετρος αγωγού D	5.2	m
Στόχος ενέργειας ανά έτος E <sub>tot</sub>	20.2	GWh

### Συμβατικός σχεδιασμός

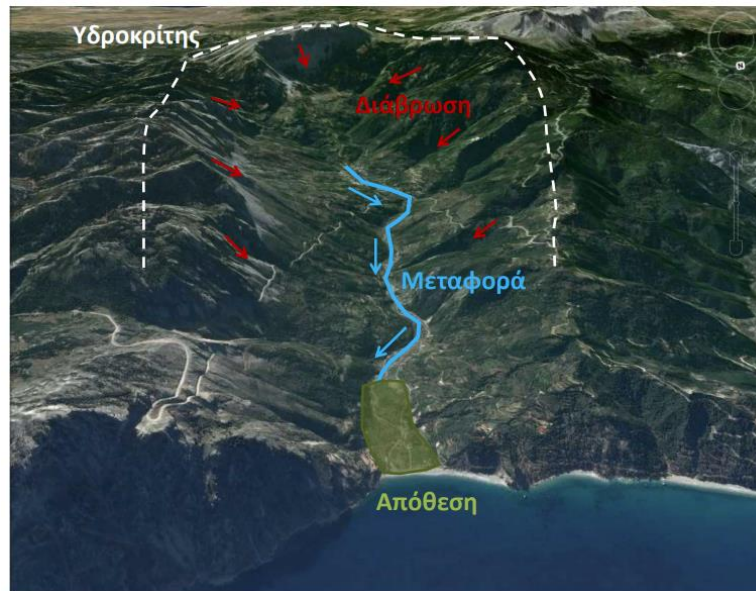
Βασίζεται στο σενάριο βάσης (baseline scenario) που αποτελεί το αρχικό σύνολο υποθέσεων της έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χρησιμοποιεί τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές του Πίνακας 6 μεγιστοποιώντας το οικονομικό μέγεθος f για το αρχικό πλαίσιο λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής. Θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς και μέτρο σύγκρισης για την εναλλακτική διερεύνηση του δυσμενούς σχεδιασμού που θα ακολουθήσει.

- **Νεκρός όγκος ταμιευτήρα Πύλης**

Όσον αφορά τις φερτές ύλες που συμπαρασύρονται μέχρι την λίμνη του ταμιευτήρα, αυτές αποτελούν συνάρτηση της στερεοαπορροής G, της λεκάνης απορροής A<sub>L</sub>, της μέσης πυκνότητας τους ρ, και της ωφέλιμης ζωής του έργου T<sub>d</sub> και υπολογίζονται ως νεκρός όγκος ταμιευτήρα:

$$S_{min} = \frac{A_L * G}{\rho * 10^6} * T_d \quad (6.3)$$

Η στερεοαπορροή της περιοχής της Πύλης G προκύπτει από τη μεταφορά των φερτών υλών της λεκάνης απορροής λόγω διάβρωσης των παρειών. Ανά km<sup>2</sup> η στερεοαπορροή που καταλήγει στο φράγμα της Πύλης εκτιμάται στους 800 tn ενώ η πυκνότητα των φερτών είναι 1.35 tn/y. Η τιμή αυτή επαληθεύεται από μετρήσεις (αιωρούμενων και θολότητας), εμπειρικές μεθόδους (καμπύλες παροχής στερεοαπορροής με βάση υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής) ή μοντέλα προσομοίωσης (πχ LISEM, SHETRAN).



Εικόνα 34: Στερεοαπορροή που καταλήγει στον ταμιευτήρα φράγματος

Προκύπτει ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα της Πύλης  $S_{min}$  σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά.

$A_{\lambda}$	132	$\text{km}^2$
$G$	800	$\text{tn}/\text{km}^2$
$\rho$	1.35	$\text{tn}/\text{m}^3$
$T_d$	100	yr
$S_{min}$	7.8	$\text{hm}^3$

- Καμπύλη στάθμης-όγκου ταμιευτήρα Πύλης

Για να εκτιμηθεί η χωρητικότητα του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα της Πύλης και η συσχέτιση της στάθμης ύδατος της λίμνης με τον όγκο που καταλαμβάνει κρίνεται απαραίτητη η εύρεση σχέσης που θα έχει ως βάση δείγματα μετρήσεων της επιφάνειας της λίμνης με τις εκάστοτε στάθμες (Πίνακας 7).

**Πίνακας 7: Δείγμα δεδομένων σχέσης στάθμης - επιφάνειας ταμιευτήρα Πύλης**

Υψόμετρο στάθμης h (m)	Καθαρό υψόμετρο h-z <sub>b</sub> (m)	Επιφάνεια λίμνης A (km <sup>2</sup> )
260	0	0.00
270	10	0.25
280	20	0.70
290	30	1.30
300	40	1.90
310	50	2.50
320	60	3.10
330	70	3.90
340	80	4.75
350	90	5.90
360	100	7.20
370	110	9.00

Με βάση τα δεδομένα του **Πίνακας 7** και με χρήση της μεθόδου του τραpezίου, όπως και στην περίπτωση της ογκομέτρησης του αναχώματος, υπολογίζουμε τους επιμέρους όγκους μεταξύ διαδοχικών στάθμεων ως :

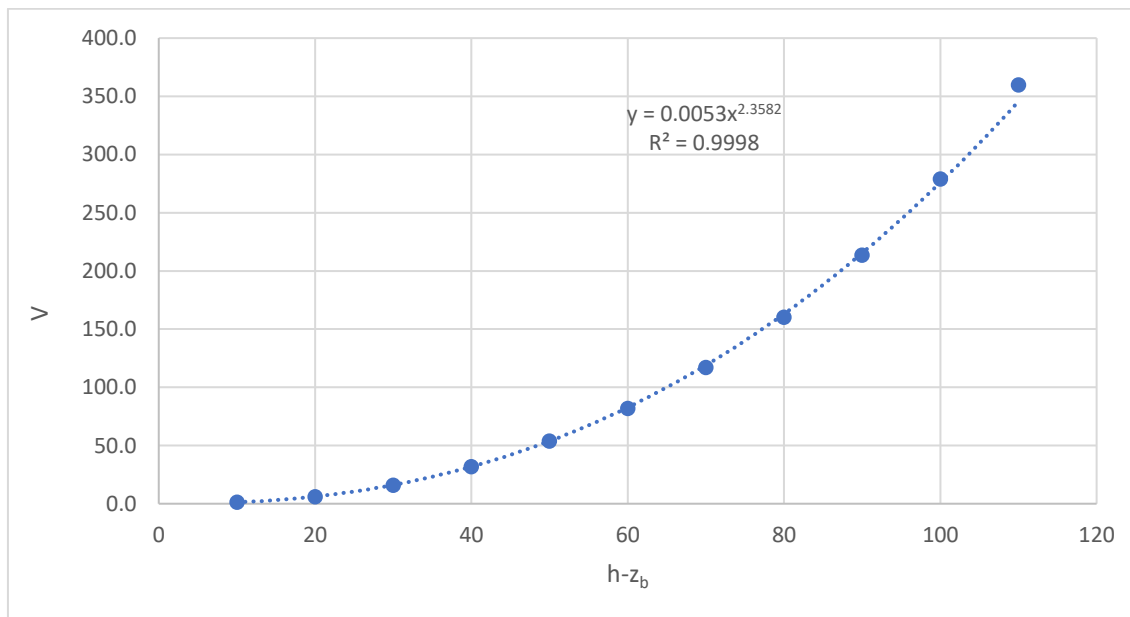
$$\Delta V_p = (A_p + A_{p-1}) * \frac{h_p - h_{p-1}}{2} \quad (6.4)$$

$$V_p = V_{p-1} + \Delta V_p \quad (6.5)$$

Μέσω των σχέσεων αυτών προκύπτει ο **Πίνακας 8** και η καμπύλη στάθμης – όγκου που φαίνεται στο Διάγραμμα 6.

**Πίνακας 8: Πίνακας τιμών όγκου ταμιευτήρα συναρτήσει της στάθμης ύδατος της Πύλης**

Καθαρό υψόμετρο h-z <sub>b</sub> (m)	ΔV <sub>p</sub> (hm <sup>3</sup> )	V <sub>p</sub> (hm <sup>3</sup> )
0	0.0	0.0
10	1.3	1.3
20	4.8	6.0
30	10.0	16.0
40	16.0	32.0
50	22.0	54.0
60	28.0	82.0
70	35.0	117.0
80	43.3	160.3
90	53.3	213.5
100	65.5	279.0
110	81.0	360.0



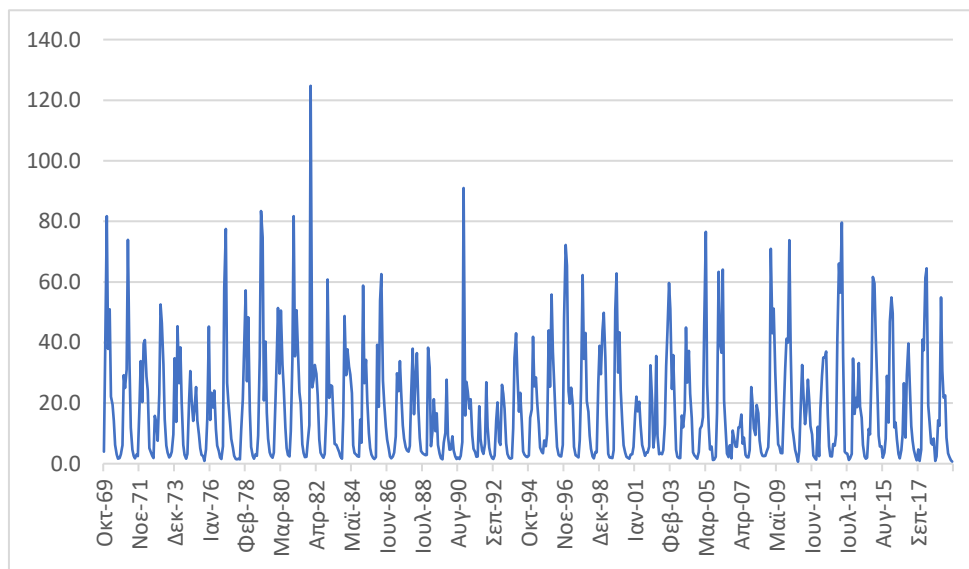
**Διάγραμμα 6: Καμπύλη στάθμης-όγκου υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα Πύλης**

Με την εξίσωση να είναι η εξής:

$$S = 0.0053 * (z - z_b)^{2.358} \quad (6.6)$$

- Χαρακτηριστικές Στάθμες & Όγκοι φράγματος Πύλης
  - Αντικαθιστώντας με  $S = S_{\min}$  στην σχέση, προκύπτει η στάθμη φερτών υλών ή Κ.Σ.Λ,  $z_{\min} = 282.1 \text{ m}$
  - Λαμβάνοντας ύψος φράγματος  $H = 82.6 \text{ m}$  που βελτιστοποιεί τον υπάρχων σχεδιασμό του υδροηλεκτρικού έργου ως προς το όφελος  $f$ , και στέψη  $d_{\text{crest}} 5 \text{ m}$  πάνω από την Α.Σ.Λ. του ταμιευτήρα, η ανώτατη στάθμη λειτουργίας θα είναι  $z_{\text{ΑΣΛ}} = 337.6 \text{ m}$ .
  - Μέγιστη χωρητικότητα ταμιευτήρα προκύπτει αντικαθιστώντας στη σχέση,  $z$  με  $z_{\text{ΑΣΛ}}$ ,  $S_{\max} = 151.8 \text{ hm}^3$ .
  - Έχοντας υπολογίσει νεκρό όγκο  $S_{\min} = 7.8 \text{ hm}^3$  και την μέγιστη χωρητικότητα της λίμνης, ο ωφέλιμος όγκος  $K = 144 \text{ hm}^3$  ως διαφορά των δύο.
  - Αρχικό απόθεμα ταμιευτήρα κατά την έναρξη της προσομοίωσης ίσο με το νεκρό όγκο με  $S_0 = 7.8 \text{ hm}^3$ .
- Εισροές στον ταμιευτήρα Πύλης

Σύμφωνα με τις μετρήσεις στην περιοχή της Πύλης εκτιμήθηκαν οι παρακάτω εισροές για περίοδο 50 ετών. Αναλυτικά απεικονίζονται στο Διάγραμμα 7:



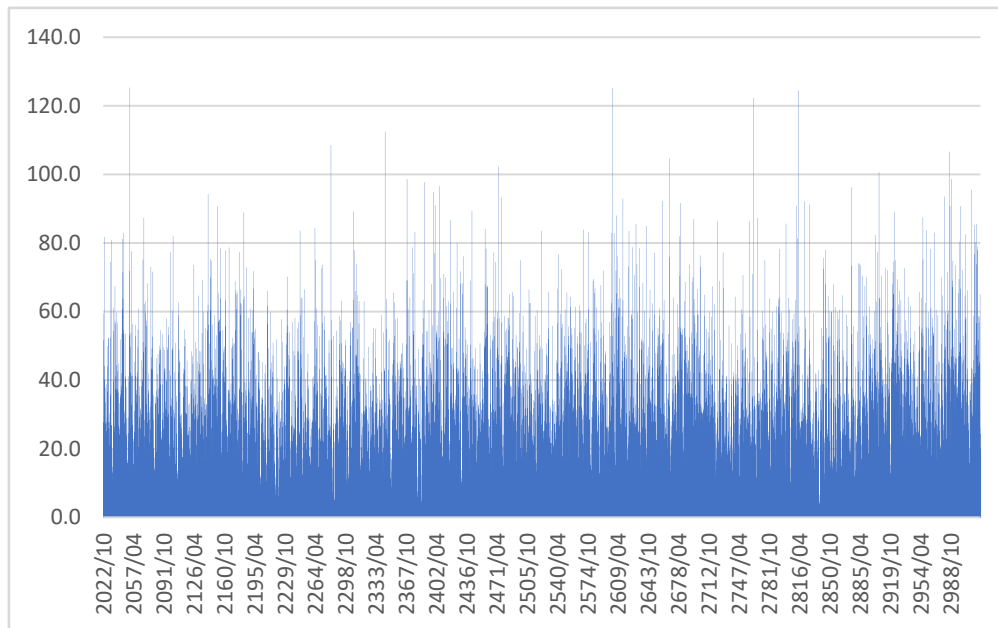
Διάγραμμα 7: Χρονοσειρά πραγματικών ιστορικών εισροών στον ταμιευτήρα της Πύλης για υδρολογικά έτη 1969-2019

Τα ετήσια στατιστικά χαρακτηριστικά της παραπάνω χρονοσειράς εισροών όσον αφορά τη μέση τιμή και τη διασπορά του δείγματος είναι  $\mu = 212.8$  και  $\sigma^2 = 332.4$  αντίστοιχα.



Με βάση αυτά τα μεγέθη ορίζονται συνθετικές χρονοσειρές εισροών μήκους 1.000 ετών που συμφωνούν στατιστικά με την ιστορική της 50ετίας.

Σε μηνιαία βάση οι χρονοσειρές αυτές που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα της Πύλης φαίνονται στο Διάγραμμα 8:



Διάγραμμα 8: Συνθετική χρονοσειρά προσομοίωσης ταμιευτήρα Πύλης μήκους 1000ετίας

Η μέση υπερετήσια απορροή  $V_a$  στον ταμιευτήρα με χρήση της συνθετικής χρονοσειράς είναι  $204.9 \text{ hm}^3$ .

- Ενεργειακοί στόχοι & πώληση ενέργειας υδροηλεκτρικού έργου Πύλης
  - Το μέσο καθαρό ύψος της προσομοίωσης του ταμιευτήρα είναι  $H_n = 59.1 \text{ m}$
  - Ο στόχος ειδικής ενέργειας  $\psi$  του συστήματος τίθεται ίση με  $0.23 \text{ GWh/hm}^4$
  - Ο στόχος μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ανάγοντας τον ετήσιο  $E_{\text{tot}}$  για κάθε μήνα ομοιόμορφα προκύπτει  $P_{\text{target}} = 1.7 \text{ GWh}$
  - Με βάση τη μέση υπερετήσια απορροή και τον ενεργειακό ετήσιο στόχο του έργου, ορίζεται ο απομειωτικός συντελεστής  $b$  που συσχετίζει αυτά τα δύο μεγέθη. Επιδιώκεται να είναι μεγαλύτερος του 0.5. Εκτιμάται 0.73 στην περίπτωση του σεναρίου βάσης για τη Πύλη και υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$b = \frac{E_{\text{tot}}}{V_a * \psi * H_n} * 100 \quad (6.7)$$

- Οι τιμές πώλησης ενέργειας στην αγορά είναι οι παρακάτω:

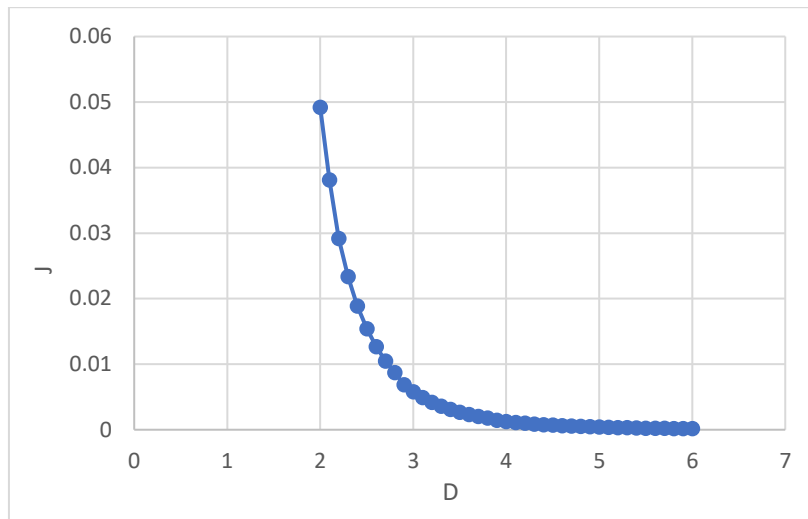
**Πίνακας 9: Τιμές πώλησης ενέργειας και ρήτρα ελλείμματος ενέργειας στην ελληνική αγορά**

Πώληση πρωτεύουσας Cp	105,000	€/GWh
Πώληση δευτερεύουσας Cs	80,000	€/GWh
Ρήτρα Ελλείμματος Re	105,000	€/GWh

- Οικονομικά μεγέθη δαπανών έργου Πύλης
  - Όσον αφορά το μέρος του υδροηλεκτρικού που αφορά τις δαπάνες του αγωγού προσαγωγής λαμβάνεται χρόνος απόσβεσης 40 έτη
  - Για το μέρος του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του έργου, αυτό αποσβένεται στα 20 έτη ενώ αντικαθίσταται ανά 50ετία
  - Το υπόλοιπο τμήμα του έργου αποσβένεται στα 40 έτη
  - Ο Η/Μ Εξοπλισμός ανάγεται σε ετήσια κόστη με αποπληθωρισμένο επιτόκιο τιμής 0.1 ενώ το υπόλοιπο μέρος του έργου με αντίστοιχο τιμής 0.04
  - Ο πληθωρισμός λαμβάνεται σε ποσοστό 4% ,συνεπώς ο συντελεστής SE = 1.73
  - Η συνολική οικονομική ανάλυση του υδροηλεκτρικού έργου γίνεται σε βάθος 50ετίας
- Στοιχεία υδροστροβίλων υδροηλεκτρικού έργου Πύλης
  - Για το υδροηλεκτρικό έργο της Πύλης χρησιμοποιείται ένας υδροστρόβιλος τύπου Francis, ο οποίος θα λειτουργεί 1,760 h ανά έτος (έργο αιχμής) και μικρός εφεδρικός που θα λειτουργεί αδιάκοπα, για τη διοχέτευση οικολογικής παροχής. Συνεπώς ο συντελεστής δυναμικότητας του έργου είναι 0.2
  - Η εγκατεστημένη ισχύς είναι P = 17.3 MW
- Στοιχεία αγωγού προσαγωγής υδροηλεκτρικού έργου Πύλης
  - Ο αγωγός προσαγωγής τοποθετείται κατά μήκος των πρανών των οποίων η κλίση έχει εκτιμηθεί  $J_0 = 0.8$ . Για ύψος φράγματος 82.6 m μέσω τριγωνομετρίας, το μήκος του αγωγού L εκτιμάται σε 132.5 m σύμφωνα με τη σχέση :

$$L = \frac{H}{\sin(\arctan(J_0))} \quad (6.8)$$

- Η υδραυλική κλίση του αγωγού προσαγωγής συναρτήσει της διαμέτρου απεικονίζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 9: Απεικόνιση υδραυλικής κλίσης αγωγού προσαγωγής συναρτήσει της διαμέτρου αυτού

- Για συντελεστή απωλειών ενέργειας κατά την είσοδο του νερού στον αγωγό, λαμβάνεται δυσμενώς  $k = 1.5$  με τις συνολικές απώλειες ενέργειας  $\Delta H$  να εκτιμώνται στα 0.2 m.
- Για να υπολογισθεί η μάζα του αγωγού προσαγωγής, σε πρώτο στάδιο θα εκτιμηθεί το πάχος του  $t$  σύμφωνα με έλεγχο ελάχιστου πάχους που απαιτείται για χειρισμό.

Σύμφωνα με το κεφάλαιο “Steel penstocks” του ASCE το πάχος  $t_1$  υπολογίζεται στα 17.95 mm (PG & Formula) και  $t_2$  στα 14.20 mm (USB). Εξ’ αυτών επιλέγεται το μεγαλύτερο  $t = 17.95$  mm.

$$t1(in) = \frac{D(in)}{288} \quad (6.9)$$

$$t2(in) = \frac{D(in) + 20}{400} \quad (6.10)$$

Για πυκνότητα χαλύβδινου σωλήνα  $\rho$  στα  $7,850 \text{ kg/m}^3$ , κυκλικής διατομής και διαμέτρου  $D$ , η μάζα του εκτιμάται στα 151,879 kg.

$$m = \rho * L * \pi * \left( \frac{D^2}{4} - \frac{(D - t)^2}{4} \right) \quad (6.11)$$

- Η παροχετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής  $Q$  με βάση το συντελεστή δυναμικότητας και τη μέση υπερετήσια απορροή στον ταμιευτήρα εκτιμάται στα  $32.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Συνολικές δαπάνες έργου Πύλης

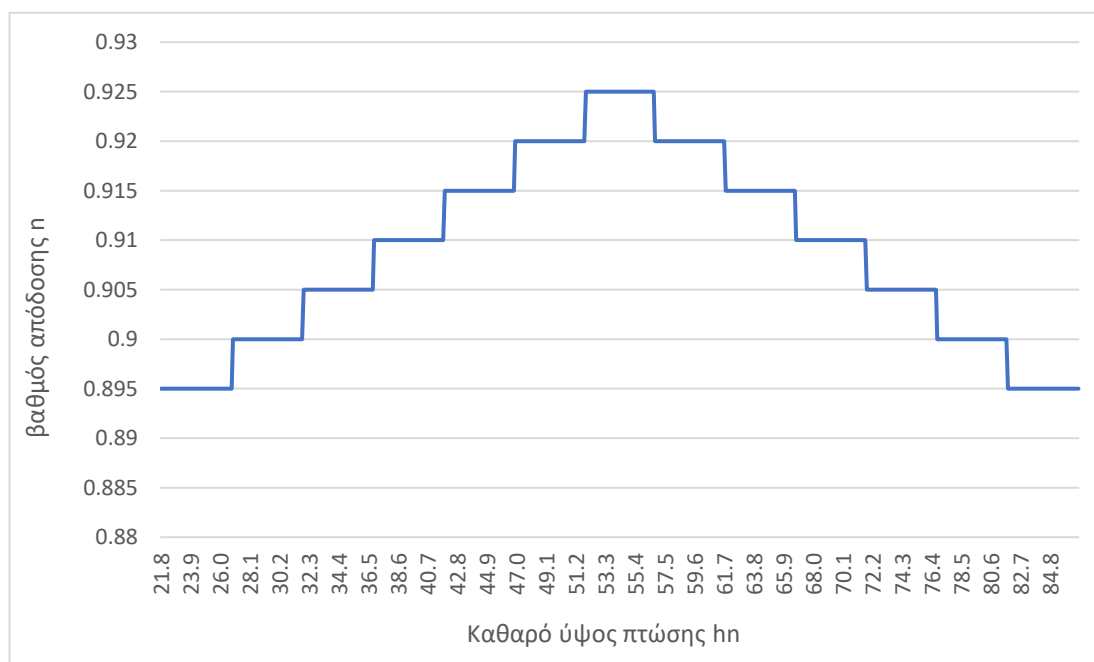
Με βάση τα οικονομικά μεγέθη που αναλύθηκαν παραπάνω, σε συνδυασμό με τις σχέσεις υπολογισμού των δαπανών από το προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων :

**Πίνακας 10: Πίνακας αποτελεσμάτων συνολικών δαπανών του υδροηλεκτρικού έργου της Πύλης**

<b>Μέρος 1</b>	C <sub>φραγ</sub>	39.721.720	€
	C <sub>μελ</sub>	891.492	€
	C <sub>υδρ</sub>	113.206	€
	C <sub>ΥΗΣ</sub>	255.000	€
<b>Μέρος 2</b>	C <sub>αγωγού</sub>	455.638	€
	C <sub>αγωγού'</sub>	617.508	€
<b>Μέρος 3</b>	C <sub>ΗΜΕ</sub>	2.155.934	€

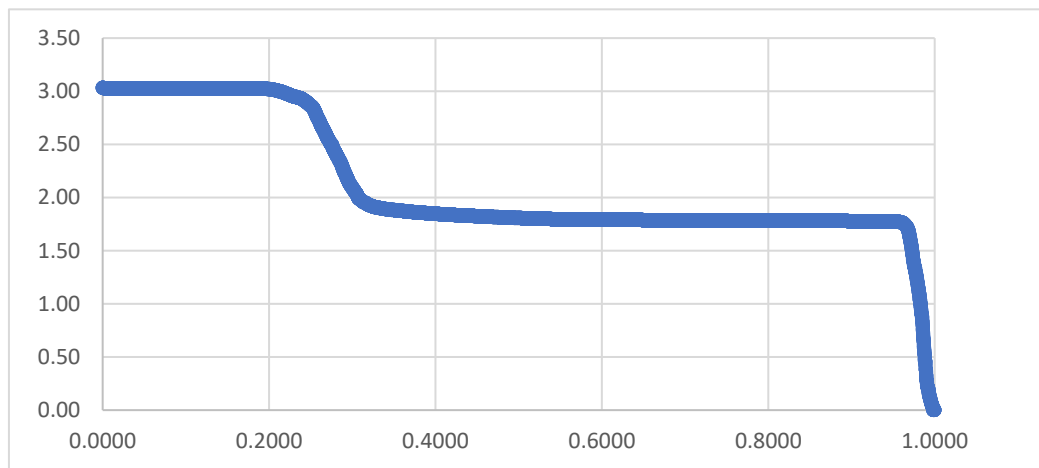
- Εκροές ταμειυτήρα έργου Πύλης
  - Με βάση όσων αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, θα εκτιμηθεί ο βαθμός απόδοσης με τον οποίο δουλεύει το σύστημα υδροηλεκτρικής παραγωγής ανάλογα το καθαρό ύψος πτώσης της προσομοίωσης. Με βάση αυτόν ορίζονται οι ειδικές ενέργειες  $\psi$  των βημάτων της προσομοίωσης, καθορίζονται οι ζητήσεις ενέργειας  $\gamma$  και προσαρμόζονται οι εκροές για παραγωγή ενέργειας  $r$ .

Εποπτικά φαίνεται στο Διάγραμμα 10 :



**Διάγραμμα 10: Βαθμός απόδοσης συστήματος υδροηλεκτρικού έργου Πύλης συναρτήσει του καθαρού ύψους πτώσης για τα βήματα της προσομοίωσης**

- Για το σενάριο βάσης της Πύλης, η ζήτηση για οικολογική παροχή που αποτελεί προτεραιότητα του έργου, ανέρχεται στο 5% της μέσης υπερετήσιας τιμής της συνθετικής χρονοσειράς εισροών που χρησιμοποιείται.
- Αφού δεσμευτεί στους στρόβιλους το απαιτούμενο δυνατό νερό για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας της περιοχής, ελέγχεται η ανάγκη για απόληψη νερού για ανάγκες άρδευσης και ύδρευσης. Στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχουν τέτοιες ζητήσεις ( $\gamma_{abs} = 0$ ) συνεπώς το υδροηλεκτρικό έργο φροντίζει να αξιοποιήσει το υπόλοιπο διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό για την παραγωγή της ενέργειας στόχου που έχει οριστεί.
- Με την εφαρμογή της ανάλυσης της προσομοίωσης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα ως προς τη παραγόμενη ενέργεια του συστήματος των εκροών που προορίζονταν για αυτόν τον σκοπό φαίνονται στο Διάγραμμα 11:



Διάγραμμα 11: Παραγόμενη ενέργεια στρόβιλων σε μηνιαία βάση κατά φθίνουσα σειρά

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει ποιοτικά τα εξής χαρακτηριστικά για τον συμβατικό σχεδιασμό του συστήματος της Πύλης :

- ✓ Το 24% της συνολικής περιόδου της προσομοίωσης παράγεται περισσότερη ενέργεια από τον στόχο συνεπώς οι στρόβιλοι επαναλειτουργούν παράγοντας δευτερεύουσα ενέργεια, ενώ η επιπλέον περίσσεια νερού οδηγεί το σύστημα σε υπερχειλίση
- ✓ Το 6% του χρόνου (από 0.24 μέχρι 0.30) το σύστημα παράγει περισσότερη ενέργεια από τον ορισμένο στόχο χωρίς να παρουσιάζεται επιπλέον περίσσεια για υπερχειλίση
- ✓ Το 68% του χρόνου το σύστημα παράγει ακριβώς την ενέργεια στόχο  $P_{target}$  (σταθερό τμήμα του σχήματος)
- ✓ Το 2% του χρόνου το σύστημα δεν ανταποκρίνεται στο στόχο ενέργειας παρουσιάζοντας έλλειμμα νερού

- Αξιολόγηση λειτουργίας ταμιευτήρα Πύλης

Πέραν της παραγόμενης ενέργειας που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 11, παράγεται και δευτερεύουσα ενέργεια από τους στροβίλους λόγω της οικολογικής παροχής.

Ανάγοντας σε ετήσια βάση και για οικονομική ανάλυση 50ετίας, υπολογίζονται 20 οφέλη για την συνθετική χρονοσειρά 1000ετίας.

Το μέσο ετήσιο όφελος  $K_y$  που προκύπτει εκτιμάται στα 2.633.346 €/γ.

Με αναγωγή των συνολικών δαπανών του Πίνακας 10 προκύπτει το μέσο ετήσιο κόστος  $C_y$  στα 1.754.282 €/γ.

Συνεπώς, το υδροηλεκτρικό έργο της Πύλης υπό το πλήθος υποθέσεων του σεναρίου βάσης κρίνεται βιώσιμο και δίνει βέλτιστο κέρδος  $f = 879.064 \text{ €}$  με συμβατικό σχεδιασμό.

### 6.3 Διερεύνηση νέων σεναρίων λειτουργίας του ταμιευτήρα και βελτιστοποίηση

Αφού αναλύθηκε το σενάριο βάσης του συμβατικού σχεδιασμού στο κεφάλαιο 6.2, θα διερευνηθούν εναλλακτικές συνθήκες λειτουργίας του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα, λιγότερο αποδοτικές ως προς το σενάριο βάσης.

- Σενάριο ζήτησης μεγαλύτερης οικολογικής παροχής (stress scenario 1)

Στην περιοχή αναπτύσσονται νέες μορφές χλωρίδας και πανίδας και οι απαιτήσεις σε νερό για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας αυξάνονται.

Στη περίπτωση αυτή το σενάριο λειτουργίας του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα δίνει ως προτεραιότητα οικολογική παροχή με ζήτηση ίση με το 10% της μέσης υπερετήσιας εισροής της συνθετικής χρονοσειράς (διπλάσια του baseline scenario).

Πέραν του οικολογικού ο μοναδικός στόχος του σεναρίου είναι η κάλυψη της ενέργειας στόχου  $E_{tot}$  με το διαθέσιμο νερό του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα.

- Σενάριο ζήτησης πολλαπλών χρήσεων νερού 1 (stress scenario 2)

Στο σενάριο λειτουργίας αυτό ο υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας της Πύλης περνάει από τους στροβίλους κατά προτεραιότητα οικολογική παροχή ίση με το baseline scenario, ωστόσο εξυπηρετεί και αρδευτικές και υδρευτικές χρήσεις νερού (**Πίνακας 11**) προτού επαναφέρει νερό στους στροβίλους για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ετήσιου στόχου  $E_{tot}$ .

**Πίνακας 11: Πίνακας ζητήσεων άρδευσης και ύδρευσης για το σύνολο της προσομοίωσης**

Μήνες Έτους	Αρδευτική ζήτηση (hm <sup>3</sup> )	Υδρευτική ζήτηση (hm <sup>3</sup> )
Οκτώβριος	0	3
Νοέμβριος	0	3
Δεκέμβριος	0	3
Ιανουάριος	0	3
Φεβρουάριος	0	3
Μάρτιος	0	3
Απρίλιος	7	3
Μάιος	7	3
Ιούνιος	29	3
Ιούλιος	29	3
Αύγουστος	29	3
Σεπτέμβριος	2	3

Για την πώληση του νερού για αυτούς τους δύο στόχους η τιμή ανά hm<sup>3</sup> ανέρχεται στα 100.000 €. Σε περίπτωση ελλείμματος για την απόληψη ύδρευσης η ρήτρα ανέρχεται στα 500.000 €/hm<sup>3</sup>.

- Σενάριο ζήτησης πολλαπλών χρήσεων νερού 2 (stress scenario 3)

Σε αντίθεση με το stress scenario 2 , ενώ ο υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας της Πύλης εξυπηρετεί οικολογικές, αρδευτικές, υδρευτικές και ενεργειακές χρήσεις, η προτεραιότητα στην απόληψη νερού για την κάθε μια εξ αυτών αλλάζει.

Σε πρώτη φάση δεσμεύεται νερό για τις ανάγκες του οικοσυστήματος της περιοχής με ίδια ζήτηση με το σενάριο βάσης (baseline scenario) του κεφαλαίου 6.2.

Το έργο στην προκειμένη περίπτωση προορίζει τις εκροές για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ως προτεραιότητα, με τις απολήψεις για άλλες χρήσεις να ακολουθούν. Αυτό απεικονίζεται και στις εξισώσεις που τροποποιούν τη λειτουργία του ισοζυγίου και φαίνονται παρακάτω:

$$r_k = \max(\min(\gamma_k, S1_k - ren_k - S_{min}, V_n - ren_k), 0) \quad (6.12)$$

$$r_{absk} = \max(\min(\gamma_{absk}, S1_k - ren_k - r_k - S_{min}, V_n - ren_k), 0) \quad (6.13)$$

Το γεγονός ότι οι χρήσεις άρδευσης και ύδρευσης δεν αποτελούν προτεραιότητα στο σενάριο λειτουργίας αυτό, διαφοροποιούν την τιμή πώλησης νερού σε 120.000 €/hm<sup>3</sup> και την ρήτρα σε 120.000 €/hm<sup>3</sup>.

- Σενάριο αύξησης του πληθυσμού της περιοχής της Πύλης (stress scenario 4)

Λόγω αύξησης του πληθυσμού της περιοχής με βάση την τελευταία δημογραφική καταγραφή, απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες νερού για να ικανοποιήσουν την ζήτηση σε υδροηλεκτρική ενέργεια.

Ο όρος της μέσης ειδικής ενέργειας του στόχου ενέργειας,  $\psi$  μεταβάλλεται από 0.24 σε 0.21 ορίζοντας μεγαλύτερες ζητήσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας  $\gamma$  για τα βήματα της προσομοίωσης.

Στο σενάριο αυτό ο υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας ικανοποιεί μόνο οικολογικές (του baseline scenario) και υδροηλεκτρικές χρήσεις νερού.

- Σενάριο μεταβολής μακροοικονομικών μεγεθών (stress scenario 5)

Το σενάριο αυτό μελετάει πιθανή αύξηση του αποπληθωρισμένου επιτοκίου  $i$  κατά 30%. Συγκεκριμένα στο πρόβλημα από 4% ανέρχεται πλέον στο 5.2%.

Αυτή η αλλαγή επιδρά στις συνολικές δαπάνες του υδροηλεκτρικού έργου καθώς τα ανηγμένα κόστη σε ετήσια βάση αυξάνονται, επιδρώντας δυσμενώς στο όφελος  $f$  του υδροηλεκτρικού έργου της Πύλης.

Μελετώνται οικολογικές (του baseline scenario) και υδροηλεκτρικές χρήσεις για τον ταμιευτήρα στην περίπτωση αυτή.

- Σενάριο τροποποίησης της λειτουργίας των στροβίλων (stress scenario 6)

Επιλέγεται για το υδροηλεκτρικό έργο να λειτουργεί λιγότερες ώρες ανά έτος. Παραμένει να θεωρείται έργο αιχμής με τον συντελεστή δυναμικότητας του CF να ελαττώνεται κατά 5% και πλέον να λειτουργεί το 15% του χρόνου αντί για το 20% που πρότερα είχε σχεδιαστεί (baseline scenario).

Η τροποποίηση αυτή οδηγεί σε μικρή απομείωση του μέσου ετήσιου οφέλους  $K_y$  από την πώληση της ενέργειας από οικολογικές και υδροηλεκτρικές χρήσεις.

- Ταμιευτήρας Πύλης & υδροκλιματικοί παράγοντες (stress scenario 7)

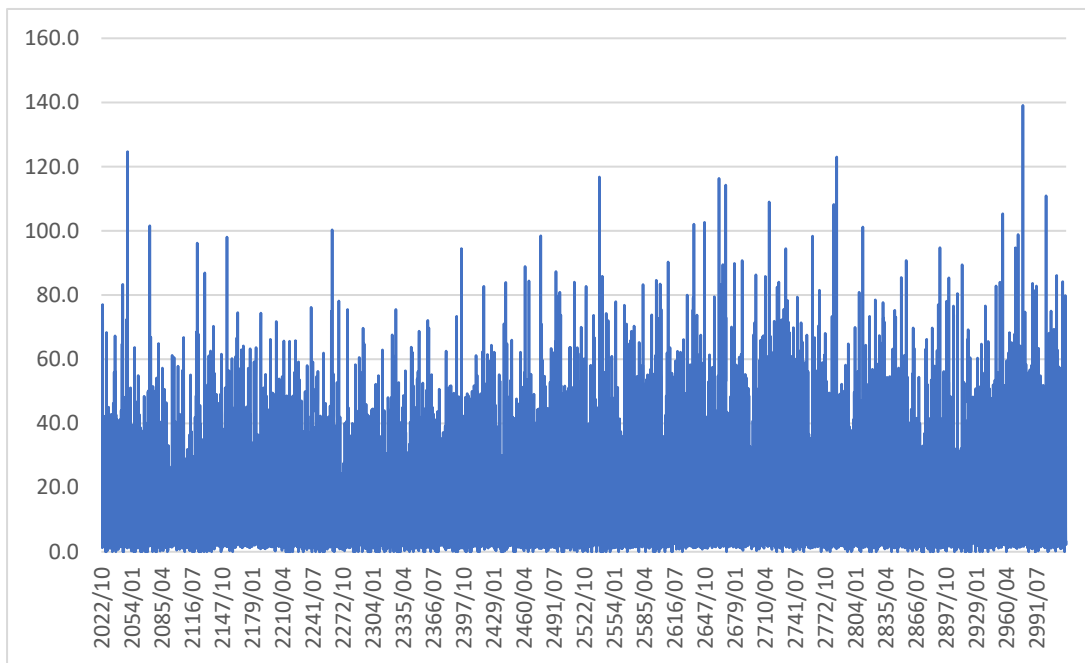
Λόγω της κλιματικής αλλαγής ενδέχεται να παρουσιαστούν ποικίλες αλλαγές στις χρονοσειρές εισροών του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα της Πύλης του baseline scenario.

Η εμφάνιση παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας ή πλημμυρών στην περιοχή της Πύλης δημιουργούν την ανάγκη να προσαρμοστούν ανάλογες εισροές που να λαμβάνουν υπόψιν την έννοια της εμμονής στο σχεδιασμό.

Ενώ ο συμβατικός σχεδιασμός στηρίχθηκε σε συνθετικές χρονοσειρές 1000ετίας, αυτές δεν έχουν λάβει υπόψιν τέτοια υδροκλιματικά φαινόμενα.



Στο σενάριο αυτό τροποποιούνται οι εισροές στον ταμιευτήρα της Πύλης με άλλες συνθετικές παρόμοιων στατιστικών χαρακτηριστικών που λαμβάνουν υπόψιν την εμμονή (Διάγραμμα 12). Τέτοιες είναι οι Hurst-Kolmogorov που χρησιμοποιούνται και στο παράδειγμα της Πύλης.



Διάγραμμα 12: Συνθετικές χρονοσειρές εισροών 1000ετίας με προσαρμογή στην εμμονή μέσω του συντελεστή Hurst

Οι χρονοσειρές αυτές είναι δυσμενείς για το σύστημα καθώς ομαδοποιούν τις ακραίες τιμές εισροών του συστήματος δυσχεραίνοντας την λειτουργία του ταμιευτήρα που περιγράφηκε στο σενάριο βάσης.

- Αλλαγές στις τιμές ενέργειας στην ελληνική αγορά (stress scenario 8)

Στα πλαίσια αυξομειώσεων των τιμών πώλησης και ρήτρας για την υδροηλεκτρική ενέργεια μελετάται η αύξηση της ρήτρας ελλείμματος ενέργειας κατά 40%. Οι τιμές ενέργειας διαμορφώνονται ως εξής:

**Πίνακας 12: Τροποποιημένες τιμές πώλησης ενέργειας και ρήτρα ελλείμματος ενέργειας στην ελληνική αγορά**

Πώληση πρωτεύουσας $C_p$	105,000	€/GWh
Πώληση δευτερεύουσας $C_s$	80,000	€/GWh
Ρήτρα Ελλείμματος $R_e$	147,000	€/GWh

- Εισαγωγή ρυθμιστικού όγκου στο σύστημα της Πύλης (stress scenario 9)

Για λόγους διαφορετικής διαχείρισης της λίμνης του ταμιευτήρα (πχ ως τουριστικό αξιοθέατο) με βάση νέα νομοθετικά πλαίσια η Κ.Σ.Λ. του ταμιευτήρα παύει να ταυτίζεται με τη στάθμη των φερτών υλών αλλά αποφασίζεται να βρίσκεται μόνιμα στα 7 m κάτω από την Α.Σ.Λ. Στην

περίπτωση αυτή εισάγεται μια νέα στάθμη για το σύστημα η  $z_{\text{λειτ}}$  που στα προηγούμενα σενάρια, όπως και στο baseline ήταν η  $z_{\text{κζλ}}$ .

Το νερό που αξιοποιείται πλέον ορίζεται από απόθεμα ύψους στάθμης μεγαλύτερου της στάθμης  $z_{\text{λειτ}}$ . Επομένως, το υδάτινο δυναμικό που θα αξιοποιείται θα είναι πολύ μικρότερου εύρους (μέγιστο εύρος 7 m).

- Έλεγχος ανθεκτικότητας συμβατικού σχεδιασμού

Σε πρώτο στάδιο θα μελετηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν ως προς τον δείκτη κέρδους  $f$  για τα εννιά εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν παραπάνω αν εφαρμοσθούν σε αυτό οι τιμές των μεταβλητών του **Πίνακας 6** που βελτιστοποιούν τη λειτουργία του baseline scenario.

**Πίνακας 13: Αποτελέσματα του ελέγχου ανθεκτικότητας ως προς το  $f$  του υδροηλεκτρικού έργου**

scenarios	Baseline optimal $f$ (€)
Baseline scenario	879.064
Stress scenario 1	841,867
Stress scenario 2	433.157
Stress scenario 3	577.477
Stress scenario 4	837.938
Stress scenario 5	572.060
Stress scenario 6	841.303
Stress scenario 7	751.511
Stress scenario 8	865.223
Stress scenario 9	649.344

- Ολική βελτιστοποίηση δυσμενούς σχεδιασμού

Όπως έχει διατυπωθεί και νωρίτερα ο στόχος του έργου είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του σε εναλλακτικούς σχεδιασμούς υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας. Δηλαδή μέσω προγραμματιστικού περιβάλλοντος να γίνει ολική βελτιστοποίηση μέσω κατάλληλου αλγορίθμου (Κεφάλαιο 7.3), λαμβάνοντας υπόψιν τα εναλλακτικά σενάρια ώστε οι μεταβλητές (Πίνακας 14) που θα επιλεγθούν για το σχεδιασμένο σύστημα να δίνουν ταυτόχρονα τα μέγιστα δυνατά οφέλη για το επιβαρυσμένο από τα σενάρια σύστημα της Πύλης υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας. Τα αποτελέσματα αναφέρονται πλέον σε resilient optimized scenarios και δίνουν τις εξής λύσεις (Πίνακας 15) :

Γραφικά τα σενάρια των Πίνακας 13, Πίνακας 15 συναρτήσε της περιβάλλουσας καμπύλης που απεικονίζει τα τοπικά βελτιστοποιημένα σενάρια ξεχωριστά, φαίνεται στο Διάγραμμα 13:

**Πίνακας 14: Μεταβλητές ολικής βελτιστοποίησης δυσμενούς σχεδιασμού του φράγματος Πύλης**

Υψος φράγματος H	75.6	m
Διάμετρος αγωγού D	6.6	m
Στόχος ενέργειας ανά έτος Etot	16.44	GWh

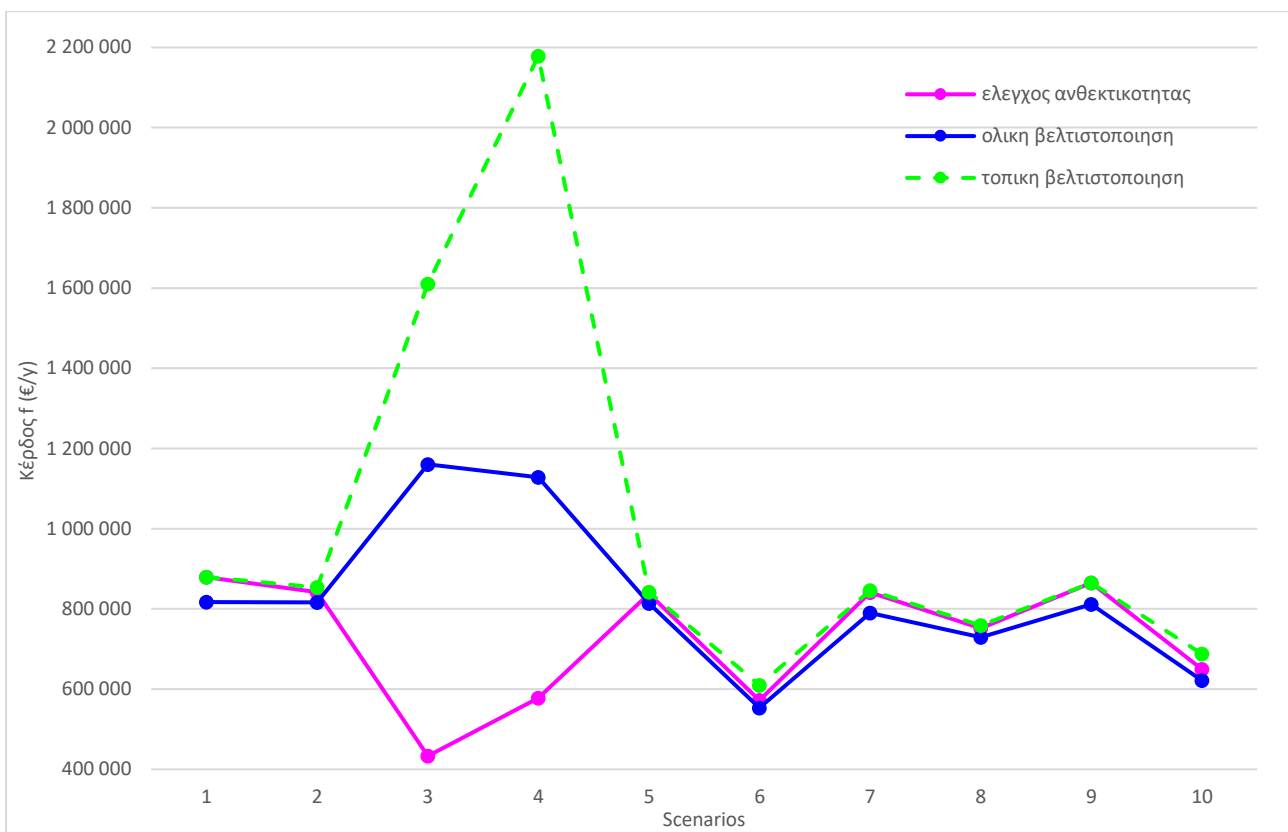
**Πίνακας 15: Αποτελέσματα ολικής βελτιστοποίησης ως προς  $f$  του υδροηλεκτρικού έργου**

scenarios	Resilient optimal f (€)
Baseline scenario	817.035
Stress scenario 1	816.408
Stress scenario 2	1.160.528
Stress scenario 3	1.128.116
Stress scenario 4	813.576
Stress scenario 5	553.289
Stress scenario 6	790.186
Stress scenario 7	729.380
Stress scenario 8	811.406
Stress scenario 9	621.474

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως παρουσιάστηκε και εποπτικά στο Διάγραμμα 13, τα αποτελέσματα των σεναρίων λειτουργίας του υδροηλεκτρικού έργου της Πύλης παρουσιάζουν ενδιαφέρον σχετικά με το προκείμενο σύστημα μελέτης ως προς την οικονομική βιωσιμότητα του.

Όσον αφορά τις τιμές κέρδους  $f$  που απεικονίζονται από την καμπύλη της τοπικής βελτιστοποίησης, αυτές αποτελούν εύλογα μια σειρά τιμών άνω περιβάλλουσας για τα αποτελέσματα των δύο κύριων αναζητήσεων του προβλήματος, του ελέγχου ανθεκτικότητας και της ολικής βελτιστοποίησης. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση της τοπικής βελτιστοποίησης αναζητήθηκαν οι βέλτιστες λύσεις  $f$  για κάθε σενάριο με έρευνα αυτού ως ανεξάρτητο του όλου συστήματος. Με άλλα λόγια οι τιμές αυτές αποτελούν θεωρητικά άνω όρια για κάθε σενάριο και συμβάλλουν στην λογική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων μελέτης.



Διάγραμμα 13: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του ελέγχου ανθεκτικότητας, ολικής βελτιστοποίησης εντός του πλαισίου των τοπικά βελτιστοποιημένων λύσεων για τον υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα Πύλης

Για την περίπτωση μελέτης του ελέγχου ανθεκτικότητας παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των σεναρίων σύμφωνα με τις μεταβλητές ελέγχου του Πίνακα 6, ενώ για την περίπτωση ολικής βελτιστοποίησης (2) υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας, σύμφωνα με τις μεταβλητές ελέγχου του Πίνακα 14.

Όπως είναι λογικό για το σενάριο βάσης (1) της Πύλης ο έλεγχος ανθεκτικότητας συμβατικού σχεδιασμού παρουσιάζει μεγαλύτερο δείκτη κέρδους συγκριτικά με την ολική βελτιστοποίηση δυσμενούς σχεδιασμού μιας και οι μεταβλητές του πρώτου σχεδιασμού βελτιστοποιούν αποκλειστικά το σενάριο αυτό.

Αυτό όμως δε συμβαίνει απαραίτητα για τα υπόλοιπα σενάρια λειτουργίας του ταμιευτήρα.

Ο έλεγχος ανθεκτικότητας εγγυάται ευνοϊκότερα αποτελέσματα για το σενάριο βάσης ωστόσο σε περίπτωση προσθήκης άλλων χρήσεων νερού στο σύστημα πέραν της υδροηλεκτρικής, η ολική βελτιστοποίηση αποφέρει διπλάσια οφέλη για το σύστημα. Συνεπώς ο συμβατικός σχεδιασμός δεν είναι ιδανικός για τα σενάρια αυτά.

Για τα υπόλοιπα σενάρια που μελετήθηκαν, τα οφέλη που προέκυψαν από τον έλεγχο ανθεκτικότητας ήταν μεγαλύτερα με τάξη μεγέθους μεγαλύτερης αύξησης του 3% από αυτά της ολικής βελτιστοποίησης.

Με βάση τα παραπάνω ενώ για τα περισσότερα σενάρια ο συμβατικός σχεδιασμός δίνει μεγαλύτερα κέρδη, η τάξη των διαφορών για τις δύο καμπύλες στο σύνολο τους έχει ως αποτέλεσμα ο δυσμενής να καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή εμβαδού από ότι ο συμβατικός. Έτσι η ολική βελτιστοποίηση αποφέρει ανθεκτικότερο σύστημα στο σύνολο των επιβαρύνσεων και μπορεί να διατηρήσει σε υψηλότερα επίπεδα το κέρδος του στο σύνολο των εξεταζόμενων συνθηκών.

## 7. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ R

Για την παρούσα διπλωματική εργασία η ανάλυση της βελτιστοποίησης του υδροηλεκτρικού έργου της Πύλης με το εργαλείο της ανθεκτικότητας, απαιτεί διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων. Ενώ, η προσομοίωση του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα και ο υπολογισμός του κέρδους των σεναρίων, υπολογίστηκε σε φύλλα Excel, το μεγάλο πλήθος δεδομένων εισροών των συνθετικών χρονοσειρών για ένα πλήθος εναλλακτικών σεναρίων οδήγησε στην ανάγκη χρήσης προγραμματιστικού περιβάλλοντος.

Η γλώσσα προγραμματισμού R προσφέρει δυνατότητα μοντελοποίησης του όλου προβλήματος και αντιμετώπισης του ως ένα ενιαίο σύστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα διαφορετικών περιπτώσεων λειτουργίας, με εισαγωγή και επεξεργασία ταυτόχρονα με ευκολία του μεγάλου όγκου δεδομένων.

Ο κώδικας της προσομοίωσης του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα της Πύλης λειτουργεί για το σύνολο των εναλλακτικών σεναρίων που μελετήθηκαν εξάγοντας αποτελέσματα για όλα ταυτόχρονα.

### 7.1 Στοιχεία εισόδου του κώδικα της R

Για να επιτευχθεί αυτό καταρχάς μέσα στο περιβάλλον του προγράμματος εισάγονται αρχεία τύπου csv στη βάση δεδομένων της R τα οποία θα διαβάζονται από τον κώδικα script του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τα αρχεία αυτά που αποτελούν τις εισόδους του συστήματος περιλαμβάνουν:

- Υδροενεργειακά μεγέθη του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα Πύλης (CF , L,  $V_a$ ,  $\psi$ )
- Χαρακτηριστικές στάθμες και όγκοι ταμιευτήρα ( $z_b$ ,  $S_{min}$ )
- Τιμές πώλησης και ρήτρες ελλείμματος υδροηλεκτρικής ενέργειας ή άλλων χρήσεων νερού
- Πίνακας αντιστοίχισης καθαρών υψών πτώσης με βαθμό απόδοσης
- Ζητήσεις άρδευσης και ύδρευσης σε περίπτωση πολλαπλών χρήσεων ταμιευτήρα
- Εισροές στον ταμιευτήρα Πύλης
- Οικονομικά μεγέθη δαπανών έργου (επιτόκια, πληθωρισμός, χρόνοι απόσβεσης μερών έργου)

Τα παραπάνω αρχεία εμφανίζονται ως data.frames περιλαμβάνοντας επικεφαλίδες των στοιχείων εισόδου και καλύπτουν το σύνολο των δέκα σεναρίων που μελετώνται συνολικά.

### 7.2 Παράμετροι του κώδικα στην R

Κατά τη συγγραφή του κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού, πέραν των αρχείων που θα διαβάζονται από τη βάση δεδομένων του περιβάλλοντος της R, εισάγονται ξεχωριστά οι ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος βελτιστοποίησης (parameters) που αποτελούν τιμές μιας διάστασης.

Αυτές είναι το ύψος  $H$  του φράγματος, η διάμετρος  $D$  του αγωγού προσαγωγής και ο ετήσιος στόχος ενέργειας  $E_{tot}$ .

Οι τιμές αυτές καθορίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τροποποιούνται, έτσι ώστε να βρεθεί η βελτιστοποιημένη εκδοχή του συστήματος του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα ανάλογα τον σχεδιασμό που εξετάζεται.

### 7.3 Συναρτήσεις του κώδικα στην R

- Η συνάρτηση `sim_scenario` (Εικόνα 35)

Η συνάρτηση αυτή διαβάζει τα δεδομένα εισόδου και τις παραμέτρους που περιγράφηκαν παραπάνω και επεξεργαζόμενη αυτά, εκτελεί την προσομοίωση του ισοζυγίου του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα υπολογίζοντας τα οφέλη από τις πωλήσεις ενέργειας και νερού. Ταυτόχρονα υπολογίζει τα κόστη ανηγμένα σε ετήσια βάση και αποτιμιά οικονομικά το έργο εκτιμώντας το μέγεθος  $f$ .

Δημιουργεί τα μεγέθη του ισοζυγίου (απόθεμα, εκροές, ζητήσεις, ενέργειες) σε μορφή πινάκων οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν τις τιμές του συνόλου των βημάτων της προσομοίωσης (για όλους τους μήνες  $\kappa$  της 1000ετίας εισροών) για κάθε ένα από τα δέκα σενάρια (μαζί με το baseline) λειτουργίας του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα. Η διαδικασία εξόδου των αποτελεσμάτων αυτών σε πινακοποιημένη μορφή βασίζεται στην δομή των επαναλήψεων για το σύνολο των μηνών της προσομοίωσης για όλα τα σενάρια.

Όσον αφορά το μέγεθος  $f$  προκύπτει διάνυσμα δέκα τιμών που συγκεντρώνει τα κέρδη της αποτίμησης του έργου της Πύλης για όλα τα σενάρια που μελετώνται.

```
1 sim_scenario=function(params, inflows, char1, char2, char3, char5, char6){
2
3   H=params[1]
4   D=params[2]
5   Etot=params[3]
6
7
8   s1final<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
9   s0<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
10  s1<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
11  h<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
12  hn<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
13  n<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
14  psi<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
15  y<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
16  r<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
17  overflow<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
18  rnew<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
19  w<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
20  Emon<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
21  EnvEmon<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
22  Kmon<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
23
24  j<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
25  dcapacity<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
26  b<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
27  hf<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
28  yabs<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
29  renv<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
30  rabs<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
31  hn<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
```

```

32 Smax<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
33 zmax<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
34 zfun<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
35 Q<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
36 P<-matrix(rep(0),nrow=1,ncol=nrow(char1))
37
38 for (k in 1:nrow(char1)){
39   Smin<-7.8
40   zmax[,k]<-H-5+char2[k,2]
41   Smax[,k]<-0.0053*(zmax[,k]-char2[k,2])^2.3582
42   if (k==10){
43     zfun[,k]<-zmax[,k]-7
44     s0[,k]<-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582
45   }else{
46     zfun[,k]<-(Smin/0.0053)^(1/2.3582)+char2[k,2]
47     s0[,k]<-Smin
48   }
49   Hn[,k]<-2/3*(zmax[,k]-zfun[,k])+zfun[,k]-char2[k,2]
50   inflows_sim<-as.matrix(inflows[,k])
51   sifinal[,k]<-char2$so[k]
52   Q[,k]<-(char1$va[k]*1000)/(3.6*char1$cf[k]*8760)
53   P[,k]<-9.81*0.92*Q[,k]*Hn[,k]/1000
54   dcapacity[,k]<-Q[,k]*char1$cf[k]*30*24*3600/10^6
55   hf[,k]<-0.0155/D*(4*Q[,k]/(3.14*D^2))^2/2/9.81*char1$sl[k]+3/2*(char1$V[k])^2/2/9.81
56   b[,k]<-Etot/(char1$va[k]*char1$psim[k]*Hn[,k])*100
57 }
58 #RESERVOIR
59 for (k in 1:nrow(char1)){
60   for (i in 2:length(inflows_sim)){
61     s0[i,k]<-sifinal[i-1,k]

```

```

62   h[i,k]<-(s0[i,k]/0.0053)^(1/2.3582)+char2[k,2]
63   hn[i,k]<-h[i,k]-char2[k,2]-hf[,k]
64   s1[i,k]<-s0[i,k]+as.numeric(inflows_sim[i-1])
65   if (hn[i,k]>char5[s1,k] | hn[i,k]>char5[601,k]){
66     n[i,k]<-0.995
67   }else if (hn[i,k]>char5[s1,k] & hn[i,k]>char5[101,k] | hn[i,k]>char5[551,k] & hn[i,k]>char5[601,k]){
68     n[i,k]<-0.900
69   }else if (hn[i,k]>char5[101,k] & hn[i,k]>char5[151,k] | hn[i,k]>char5[501,k] & hn[i,k]>char5[551,k]){
70     n[i,k]<-0.905
71   }else if (hn[i,k]>char5[151,k] & hn[i,k]>char5[201,k] | hn[i,k]>char5[451,k] & hn[i,k]>char5[501,k]){
72     n[i,k]<-0.910
73   }else if (hn[i,k]>char5[201,k] & hn[i,k]>char5[251,k] | hn[i,k]>char5[401,k] & hn[i,k]>char5[451,k]){
74     n[i,k]<-0.915
75   }else if (hn[i,k]>char5[251,k] & hn[i,k]>char5[301,k] | hn[i,k]>char5[351,k] & hn[i,k]>char5[401,k]){
76     n[i,k]<-0.920
77   }else if (hn[i,k]>char5[301,k] & hn[i,k]>char5[351,k]){
78     n[i,k]<-0.925
79   }
80   psi[i,k]<-9.81*n[i,k]/36*hn[i,k]/(h[i,k]-char2[k,2])
81   if (k==2){
82     renv[i,k]<-max(min(0.1*mean(as.numeric(inflows_sim)),s1[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582),0)
83   }else{
84     renv[i,k]<-max(min(0.05*mean(as.numeric(inflows_sim)),s1[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582),0)
85   }
86   y[i,k]<-Etot/12/char1$psim[k]/hn[i,k]*100
87   yabs[i,k]<-char6[i-1,k]
88   if (k==2){

```

```

89   rabs[i,k]<-max(min(yabs[i,k],s1[i,k]-renv[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582,dcapacity[,k]-renv[i,k]),0)
90   r[i,k]<-max(min(y[i,k],s1[i,k]-renv[i,k]-rabs[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582,dcapacity[,k]-renv[i,k]),0)
91   }else if (k==4){
92     r[i,k]<-max(min(y[i,k],s1[i,k]-renv[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582,dcapacity[,k]-renv[i,k]),0)
93     rabs[i,k]<-max(min(yabs[i,k],s1[i,k]-renv[i,k]-r[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582,dcapacity[,k]-renv[i,k]),0)
94   }else{
95     rabs[i,k]<-0
96     r[i,k]<-max(min(y[i,k],s1[i,k]-renv[i,k]-rabs[i,k]-0.0053*(zfun[,k]-char2[k,2])^2.3582,dcapacity[,k]-renv[i,k]),0)
97   }
98   overflow[i,k]<-max(0,s1[i,k]-renv[i,k]-rabs[i,k]-r[i,k]-Smax[,k])
99   rnew[i,k]<-min(overflow[i,k],dcapacity[,k]-r[i,k]-renv[i,k])
100  w[i,k]<-max(0,s1[i,k]-renv[i,k]-rabs[i,k]-r[i,k]-rnew[i,k]-Smax[,k])
101  sifinal[i,k]<-s1[i,k]-renv[i,k]-rabs[i,k]-r[i,k]-rnew[i,k]-w[i,k]
102 }
103 }
104
105 for (k in 1:nrow(char1)){
106   inflows_sim<-as.matrix(inflows[,k])
107   for (i in 2:(length(inflows_sim)-1)){
108     Emon[i,k]<-psi[i,k]*(r[i,k]+rnew[i,k])*(hn[i,k]+hn[i+1,k])/2/100
109     EnvEmon[i,k]<-psi[i,k]*renv[i,k]*(hn[i,k]+hn[i+1,k])/2/100
110     Kmon[i,k]<-char1$cp[k]*min(Emon[i,k],Etot/12)+char1$cs[k]*max(0,Emon[i,k]-Etot/12)-char1$re[k]*max(0,Etot/12-Emc
111   }
112 }
113 Ky50<-matrix(rep(0),nrow=20,ncol=nrow(char1))
114 Ky<-c()
115 Cyav<-c()
116 Cy<-matrix(rep(0),nrow=length(inflows_sim),ncol=nrow(char1))
117 f<-c()
118
119

```



```

120 j<-seq(1,100,by=1)
121 for (k in 1:nrow(char1)){
122   p=p+1
123   for (i in 1:20){
124     temp=Kmon[,k]
125     ky50[i,k]=mean(temp[p:(p+598)])*12
126     p=p+599
127   }
128   WEARNINGS PER YEAR BY ENERGY PRODUCTION
129   ky[k]=mean(ky50[,k])
130   #COST PER YEAR
131   canig<-(13063*((24.973*H^2.6037)/10^6/H)^2+869.32*((24.973*H^2.6037)/10^6/H)+2.4712)*10^6
132   C1dam<-matrix(rep(0),nrow=char3$T[k],ncol=nrow(char1))
133   C2h1m<-matrix(rep(0),nrow=char3$T[k],ncol=nrow(char1))
134   C6pen<-matrix(rep(0),nrow=char3$T[k],ncol=nrow(char1))
135   Cy<-matrix(rep(0),nrow=nrow(inflows),ncol=nrow(char1))
136   for (i in 1:char3$T[k]){
137     if (i<char3$Tdam[k]){
138       C1dam[i,k]<-(Canig+9236*q[,k]^0.72+char3$CHYS[k]+190000*(P[,k]/(Hn[,k]^0.3))^0.54)*char3$fi[k]*(1+char3$fi[k])^char3$Tdam[i,k]
139     }else{
140       C1dam[i,k]<-0
141     }
142   }
143   if (char3$Trep1[k]>i & i>char3$Tthm[k]){
144     C2h1m[i,k]<-0
145   }else if (i<char3$Tthm[k]+1){
146     C2h1m[i,k]<-(14400*(1000*P[,k])^0.56*Hn[,k]^(-0.112))*char3$ihm[k]*(1+char3$ihm[k])^char3$Tthm[k]/((1+char3$ihm[k])^char3$Tthm[k]+1)
147   }else if (j[i+1]*char3$Trep1[k]+j[i]*char3$Tthm[k]>i & i>j[i]*char3$Trep1[k]+j[i]*char3$Tthm[k]){
148     C2h1m[i,k]<-0
149   }else {
150     C2h1m[i,k]<-(14400*(1000*P[,k])^0.56*Hn[,k]^(-0.112))*char3$ihm[k]*(1+char3$ihm[k])^char3$Tthm[k]/((1+char3$ihm[k])^char3$Tthm[k]+1)
151   }
152   if (i>char3$Tpen[k]){
153     C6pen[i,k]<-0
154   }else {
155     C6pen[i,k]<-(char3$Cpen[k]+100*D^2*char3$IL[k]*char3$SE[k])*char3$fi[k]*(1+char3$fi[k])^char3$Tpen[k]/((1+char3$fi[k])^char3$Tpen[k]+1)
156   }
157   Cy[i,k]<-sum(C1dam[i,k],C2h1m[i,k],C6pen[i,k])
158 }
159 }
160 cyav[k]<-mean(Cy[1:50,k])
161
162 f[k]=ky[k]-cyav[k]
163 }
164
165 results=list()
166 results$f=f
167 results$cyav=cyav
168 results$ky=ky
169
170
171 return(results)
172
173 }

```

Εικόνα 35: Ο κώδικας της συνάρτησης *sim\_scenario*

- Η συνάρτηση *opt\_f* (Εικόνα 36)

Παραπάνω μελετήθηκε η συνάρτηση στην οποία στήθηκαν τα σενάρια λειτουργίας του υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα της Πύλης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτά.

Για να πραγματοποιηθεί η ολική βελτιστοποίηση των σεναρίων ώστε να προκύψει ο κατάλληλος σχεδιασμός του έργου υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας απαιτείται και μια άλλη συνάρτηση.

Η συνάρτηση αυτή δίνει τις τιμές εισόδου του συστήματος και τις τιμές παραμέτρων που έχουν επιλεγεί τρέχοντας την *sim\_scenario* και υπολογίζοντας τον αρνητικό μέσο όρο των *f* που προκύπτουν από τα σενάρια αυτής.

```

1 opt_f=function(params,inflows,char1,char2,char3,char5,char6){
2
3   sim_res=sim_scenario(params=params,inflows=inflows,char1=char1,char2=char2,char3=char3,char5=char5,char6=char6)
4
5
6   objf=-(mean(sim_res$f))
7   print(objf)
8
9   return(objf)
10
11 }

```

Εικόνα 36: Ο κώδικας της συνάρτησης *opt\_f*

- Η συνάρτηση eas

Η συνάρτηση που εκτελεί την ολική βελτιστοποίηση των σεναρίων αξιοποιώντας την `sim_scenario` και την `opt_f` είναι η `eas`, που υλοποιεί τον εξελικτικό αλγόριθμο ανόπτησης – απλόκου (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2022). Ο κώδικάς της είναι δημοσιευμένος στην ιστοσελίδα της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (<https://www.itia.ntua.gr/en/softinfo/29/>, <https://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/524/>).

Στο προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας R πλέον υπάρχουν τα δεδομένα εισόδου που έχουν ενσωματωθεί στη βάση δεδομένων καθώς και οι συναρτήσεις `sim_scenario`, `opt_f` και `eas`.

Σε ένα καινούριο script το οποίο ονομάζεται `sim_dam` θα τρέξει η ολική βελτιστοποίηση του συστήματος σύμφωνα με τα παραπάνω.

Ορίζονται σε πρώτη φάση οι τιμές των παραμέτρων που βελτιστοποιούν το `baseline scenario` ως αρχικές τιμές του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Στη συνέχεια θα τρέξει η συνάρτηση `opt_f` η οποία θα δώσει τα αποτελέσματα της `sim_scenario` για τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων και των δεδομένων εισόδου που ορίστηκαν. Έπειτα βρίσκει το μέσο όφελος των σεναρίων (`obj_f`).

Για να βρεθούν οι παράμετροι που δίνουν το βέλτιστο κέρδος υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας για το σύστημα σε ένα πλαίσιο πολλαπλών δυσμενών σεναρίων, μέσω της συνάρτησης `eas`, διαβάζονται οι τρεις μεταβλητές ελέγχου  $H$ ,  $D$ ,  $E_{tot}$  για 10 εναλλακτικά σενάρια διερεύνησης για τις οποίες οριοθετούνται οι ακραίες τιμές μέσα στις οποίες ψάχνεται η βέλτιστη λύση. Διαβάζεται η συνάρτηση `opt_f` ως η συνάρτηση που οι παράμετροι αυτοί θέλουν να βελτιστοποιήσουν ολικά, παράλληλα με τα δεδομένα εισόδου του συστήματος (Εικόνα 37). Με αυτόν τον τρόπο υλοποιείται ο δυσμενής σχεδιασμός.

```
24
25 opt_params=eas(n=3,m=10,xmin=c(60,2,16),
26               xmax=c(120,9,80),xlow=c(60,2,16),xup=c(120,9,80),
27               fn=opt_f,maxeval=100,ftol=1.e-07,ratio=0.99,pmut=0.9,beta=2,maxclimbs=5,inflows=inflows,
28               char1=char1,char2=char2,char3=char3,char5=char5,char6=char6)
29
30
31 opt_params$bestval
32 opt_params$bestpar
33
34 sim_res=sim_scenario(params=as.vector(opt_params$bestpar),inflows=inflows,char1=char1,char2=char2,char3=char3,char5=c
35
```

Εικόνα 37: Εφαρμογή ολικής βελτιστοποίησης στο σύστημα της Πύλης με τη βοήθεια της συνάρτησης `eas`

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μέσω της παρούσας εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα ως προς το αντικείμενο μελέτης του σχεδιασμού των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων:

- Ο σχεδιασμός υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων τυποποιείται μέσω ενός πλαισίου στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, κομβική συνιστώσα του οποίου είναι η διαδικασία αξιολόγησης της επίδοσης του συστήματος, με βάση κριτήρια κόστους (κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση) και οφέλους (από την πώληση ενέργειας ή και άλλες χρήσεις νερού).
- Η πιο σύνθετη συνιστώσα της οικονομοτεχνικής ανάλυσης των υδροηλεκτρικών έργων αφορά στην εκτίμηση του αρχικού κόστους της επένδυσης (κόστη κατασκευής και αγοράς εξοπλισμού). Στην εργασία αυτή, προσαρμόστηκαν εμπειρικές σχέσεις, με βάση οικονομικά στοιχεία από ένα ικανοποιητικό δείγμα μελετών ελληνικών φραγμάτων. Το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε, και οι εν λόγω σχέσεις, παρέχουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της βιωσιμότητας υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων στον ελληνικό χώρο.
- Η διαδικασία που αναπτύχθηκε ελέγχθηκε έχοντας ως παράδειγμα το υπό μελέτη φράγμα της Πύλης, στη Δυτική Θεσσαλία, το οποίο επανασχεδιάστηκε ως τυπικό μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο. Αρχικά υλοποιήθηκε ο συμβατικός σχεδιασμός, όπου γίνονται διάφορες υποθέσεις σχετικά με τη μακροπρόθεσμη λειτουργία του έργου (baseline scenario), και στη συνέχεια εξετάστηκαν εννέα σενάρια δυσμενών μεταβολών των αρχικών υποθέσεων, που αφορούν σε διάφορες πτυχές του έργου (υδροκλιματικές μεταβολές, αλλαγές στην πολιτική διαχείρισης των του ταμιευτήρα και των στροβίλων, ένταξη νέων χρήσεων νερού, διαφοροποίηση βασικών οικονομικών μεγεθών).
- Η υπολογιστική υλοποίηση του προβλήματος σε γλώσσα προγραμματισμού R διευκόλυνε δραστικά την ανάλυση του προβλήματος και μείωσε δραστικά τον υπολογιστικό φόρτο καθώς και τις ανάγκες διαχείρισης πού μεγάλου όγκου δεδομένων (λόγω και της χρήσης συνθετικών χρονοσειρών).
- Οι δύο αναλύσεις ανθεκτικότητας του υδροηλεκτρικού έργου Πύλης, με το συμβατικό σενάριο βάσης και υπόλοιπα εννέα δυσμενή σενάρια, παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά. Ειδικότερα, η πρώτη ανάλυση εκτιμά ελαφρώς μεγαλύτερα κέρδη έναντι της πλειονότητας των υπόλοιπων σεναρίων. Η δεύτερη ανάλυση, διαχειρίζεται αρκετά πιο αποτελεσματικά τα σενάρια στα οποία ο υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας θα κληθεί να εξυπηρετήσει και άλλες χρήσεις νερού σε σχέση με την αρχικό του σκοπό, που ήταν αποκλειστικά η παραγωγή ενέργειας.
- Ενώ ο συμβατικός σχεδιασμός φαίνεται πιο αποδοτικός, εφόσον τον δούμε μεμονωμένα, αποδεικνύεται λιγότερο ανθεκτικός έναντι μακροπρόθεσμων μεταβολών των βασικών του υποθέσεων, το οποίο επηρεάζει την οικονομική βιωσιμότητα του υδροηλεκτρικού έργου. Συνεπώς, ο σχεδιασμός υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας, επειδή είναι δυσμενέστερος, οδηγεί σε πιο ανθεκτικό σύστημα έναντι μελλοντικών μεταβολών.

- Μια ευρύτερη διερεύνηση, που προτείνεται ως εξέλιξη της παρούσας έρευνας, είναι η σύγκριση όχι μόνο εναλλακτικών σχεδιασμών του ίδιου έργου, αλλά και εναλλακτικών χωροθετήσεων ή/και τεχνικών έργων στην ίδια περιοχή, υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Ευστρατιάδης, Α., Τσουκαλάς, Ι., Μαμάσης, Ν., Κουτσογιάννης, Δ. & Σακκή, Γ.Κ. “Γενικές Διατάξεις Υδροενεργειακών Έργων”. Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ακαδημαϊκό Έτος 2020-2021.
- Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ. & Μαμάσης, Ν. “Γενική Διάταξη Υ/Η Έργων”. Υδροηλεκτρικά Έργα, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ακαδημαϊκό Έτος 2014-2015.
- Ευστρατιάδης, Α., Παπανικολάου, Π. & Μίχας, Σ. “Εισαγωγικά Στοιχεία Φραγμάτων & Συνοδών Έργων”. Υδραυλικές Κατασκευές & Φράγματα, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ακαδημαϊκό Έτος 2020-2021.
- Ευστρατιάδης, Α. & Παπανικολάου, Π. “Ταμιευτήρες”. Υδραυλικές Κατασκευές & Φράγματα, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ακαδημαϊκό Έτος 2020-2021.
- Ηλίου, Ε. (2019) “Οικονομοτεχνική Μελέτη κατασκευής Μικρού Υδροηλεκτρικού Δικτύου στην περιοχή του Αχελώου”. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΠΜΣ Διαχείριση Ενέργειας & Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Πειραιάς.
- Καραδήμου, Σ. & Ασίμης, Γ. (2019) “Τεχνικοοικονομική Μελέτη Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου στο Γοργούρι Τρικάλων”. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Κουτσογιάννης, Δ. (1996) Μελέτη λειτουργίας ταμιευτήρων. Γενική διάταξη έργων εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, 420. doc\_id=214
- Μελίστα, Ε. (2015) “Χωμάτινα Φράγματα της Ελλάδας”. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
- Μουτσινάς, Ι. (2013) “Υδρολογική Διερεύνηση του φράγματος Πύλης Τρικάλων”. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Υδραυλικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Μπαϊρακτάρης, Ι.Μ. (2020) “Το ζήτημα της κλίμακας στην υδροηλεκτρική ενέργεια: Πολλά μικρά έργα ή ένα μεγάλο”. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδάτινων Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπαντώνης, Δ. (2001) Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα., Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων.

- Στρούζας, Π. (2017) “Συγκριτική Μελέτη Ηλεκτρομηχανολογικού Εξοπλισμού. Τεχνικά Χαρακτηριστικά & Αναλύσεις Κόστους μεταξύ Τοπικών Φραγμάτων στη Δυτική Ελλάδα”. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.

### Ξένη Βιβλιογραφία

- Aggidis, G.A., Luchinskaya, E., Rothschild, R. & Howard, D.C. (2010) The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. *Renewable Energy* **35** (12), 2632-2638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.008>
- Efstratiadis, A. & Koutsoyiannis, D. (2002) An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimization of water resource systems, *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1423–1428, International Water Association.
- Efstratiadis, A., Mamasis, N. & Koutsoyiannis, D. “*Hydroelectric Reservoirs: technology and operation*”. Water Resources Science & Technology, Department of Water Resources & Environmental Engineering, NTUA, Academic Year 2018-2019.
- Efstratiadis, A., Mamasis, N. & Koutsoyiannis, D. “*Penstocks & Turbines*, Water Resources Science & Technology”. Department of Water Resources & Environmental Engineering, NTUA, Academic Year 2020-2021.
- Efstratiadis, A. & Sakki, G.-K. (2022) Revisiting the management of water energy systems under the umbrella of resilience optimization. *MDPI Environmental Sciences Proceedings 2022* **4**, 1-8. x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>
- Efstratiadis, A. & Sakki, G.-K. (2022) Revisiting the management of water–energy systems under the umbrella of resilience optimization, *Environmental Sciences Proceedings*, **21** (1), 72, doi:10.3390/environsciproc2022021072
- Efstratiadis, A., Tsoukalas, I. & Koutsoyiannis, D. (2021) Generalized storage-reliability-yield framework for hydroelectric reservoirs. *Hydrological Sciences Journal* **66** (4), 580-599. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1886299>
- Filho, G.L.T., dos Santos, I.F.S. & Barros, R.M. (2017) Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **77**, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.134>
- Kaldellis, J.K. (2008) Critical evaluation of the hydropower applications in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12** (1), 218-234. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.003>
- Laghari, J.A., Mokhlis, H., Bakar, A.H.A. & Mohammad, H. (2013) A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipment and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **20**, 279-293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.002>

- Makropoulos, C., Nikolopoulos, D., Palmen, L., Kools, S., Segrave, A., Vries, D., Koop, S., van Alphen, H.J., Vonk, E., van Thienen, P., Rozos, E. & Medema, G. (2018) A resilience assessment method for urban water systems. *Urban Water Journal* **15** (4), 316-328. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1457166>
- Mishra, S., Singal, S.K. & Khatod, D.K. (2012) Costing of a Small Hydropower Projects. *International Journal of Engineering and Technology* **4** (3), 239-242. DOI: 10.7763/IJET.2012.V4.357
- Mishra, S., Singal, S.K. & Khatod, D.K. (2011) Optimal installation of small hydropower plant. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **15** (8), 3862-3869. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.008>
- Nikolopoulos, D., van Alphen, H.J., Vries, D., Palmen, L., Koop, S., van Thienen, P., Medema, G. and Makropoulos, C. (2019) Tackling the “new normal”: A resilience assessment method applied to real-world urban water systems, *Water*, **11** (2), 330, doi:10.3390/w11020330
- Nikolopoulos, D., Kossieris, P., Tsoukalas, I. & Makropoulos, C. (2022) Stress-testing framework for urban water systems: A source to tap approach for stochastic resilience assessment, *Water*, **14** (2), 154, doi:10.3390/w14020154
- Ogayar, B. & Vidal, P.G. (2009) Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant. *Renewable Energy* **34** (1), 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.039>
- Petheram, C. & McMahon, T.A. (2019) Dams, dam costs and damnable cost overruns. *Journal of Hydrology X* **3**, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100026>
- Singal, S.K., Saini, R.P. & Raghuvanshi, S.C. (2010) Analysis for cost estimation of low head run-of river small hydropower schemes. *Energy for Sustainable Development* **14** (2), 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.001>