

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Βέλτιστη οικονομοτεχνική σχεδίαση  
ΜΥΗΕ στο ποταμό Αγραφιώτη



**ΖΗΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012



# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

*ΠΕΡΙΛΗΨΗ, 6*

*ABSTRACT, 7*

*ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ, 8*

*ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α: Εισαγωγικά σχόλια*

- *A.1: Ο ποταμός Αγραφιώτης, 10*
- *A.2: Διάθρωση της εργασίας, 10*

*ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β: Θεωρητικό μέρος*

- *B.1: Ψηφιακή χαρτογραφία και Σ.Γ.Π.*
  - *B.1.1: Ψηφιακή χαρτογραφία, 12*
  - *B.1.2: Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, 12*
  - *B.1.3: Δομές δεδομένων σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, 13*
  - *B.1.4: Διανυσματική δομή δεδομένων, 13*
  - *B.1.5: Κανονικοποιημένη δομή δεδομένων, 14*
  - *B.1.6: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, 14*
- *B.2: Στοιχεία υδρολογική ανάλυσης*
  - *B.2.1: Εισαγωγικές έννοιες, 15*
  - *B.2.2: Υδρολογική λεκάνη απορροής, 16*
  - *B.2.3: Μέτρηση των απορροών – Υδρομετρία, 18*
  - *B.2.4: Μέθοδος απευθείας μέτρησης παροχής, 19*
  - *B.2.5: Καμπύλη στάθμης – παροχής, 20*
  - *B.2.6: Χρονοσειρές υδρολογικών μεγεθών, 22*
  - *B.2.7: Καμπύλη διάρκειας παροχής (ΚΔΠ), 22*
  - *B.2.8: Χάραξη της ΚΔΠ σε θέσεις χωρίς μετρήσεις, 24*
  - *B.2.9: Εκτίμηση πλημμυρικής παροχής, 26*
- *B.3: Μικρά υδροηλεκτρικά έργα*
  - *B.3.1: Τυπική διάταξη ΜΥΗ, 28*
  - *B.3.2: Βασικές συνιστώσες ΜΥΗ, 28*
  - *B.3.3: Ενεργειακή ανάλυση ΜΥΗ, 29*
- *B.4: Υδροστροβίλος*
  - *B.4.1: Αρχή λειτουργίας, 31*
  - *B.4.2 : Θεωρητικό ύψος υδροστροβίλου, 32*
  - *B.4.3: Διάκριση των υδροστροβίλων, 33*
  - *B.4.4: Υδροστροβίλος Pelton, 34*
  - *B.4.5: Υδροστροβίλος Francis, 35*
  - *B.4.6: Υδροστροβίλος Cross flow, 36*
  - *B.4.7: Υδροστροβίλοι αζονικής ροής, 37*
  - *B.4.8: Επιλογή τύπου υδροστροβίλου, 38*
  - *B.4.9: Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου, 39*
- *B.5: Αγωγός πτώσεως*
  - *B.5.1: Χαλύβδινοι σωλήνες, 40*
  - *B.5.2: Υπολογισμός της διαμέτρου, 40*
  - *B.5.3: Υπολογισμός πάχους αγωγού, 42*

- B.6: Διώρυγα προσαγωγής
  - B.6.1: Κλίση της διώρυγας προσαγωγής, 43
  - B.6.2: Χάραξη της διώρυγας προσαγωγής, 44
- B.7: Οικονομοτεχνική αξιολόγηση ΜΥΗ
  - B.7.1: Οικονομική βιωσιμότητα και χρηματοδοτική ανάλυση, 44
  - B.7.2: Χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης, 45
  - B.7.3: Βασικές έννοιες οικονομικής ανάλυσης, 45
  - B.7.4: Κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης, 46
- B.8: Εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης
  - B.8.1: Βασικά γνωρίσματα εξελικτικού αλγορίθμου, 47
  - B.8.2: Περιγραφή ενός εξελικτικού αλγορίθμου, 48
  - B.8.3: Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε προβλήματα πολλών στόχων, 51
  - B.8.4: Γενετικοί ααλγόριθμοι στο MATLAB, 53

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ: Προετοιμασία δεδομένων εισόδου στον υπολογιστικό κώδικα

- Γ.1: Εισαγωγή, 55
- Γ.2: Διανυσματικά δεδομένα
  - Γ.2.1: Χρησιμότητα διανυσματικών δεδομένων, 55
  - Γ.2.2: Διανυσματικός χάρτης δυτικής Ευρυτανίας, 56
  - Γ.2.3: Εξαγωγή χαρτογραφικών συντεταγμένων, 58
  - Γ.2.4: Χάραξη μηκοτομής Αγραφιώτη, 61
- Γ.3: Υδρολογικά δεδομένα
  - Γ.3.1: Χρησιμότητα υδρολογικών δεδομένων, 64
  - Γ.3.2: Ημερήσια χρονοσειρά της παροχής (Γέφ. Βαρβαριάδας 1979 – 1989), 64
  - Γ.3.3: Χάραξη της καμπύλης διάρκειας παροχής στη θέση μέτρησης, 66
  - Γ.3.4: Αναγωγή της καμπύλης διάρκειας παροχής σε θέσεις χωρίς μετρήσεις, 69
  - Γ.3.5: Θεωρητικό υδροδυναμικό Αγραφιώτη, 70

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ: Ανάλυση της λειτουργίας του υπολογιστικού κώδικα

- Δ.1: Λίστα συμβόλων
  - Δ.1.1: Μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης, 74
  - Δ.1.2: Μεταβλητές του υπολογιστικού μοντέλου, 74
- Δ.2: Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης
  - Δ.2.1: Οι στόχοι του προβλήματος, 78
  - Δ.2.2: Παραμετροποίηση του προβλήματος, 79
  - Δ.2.3: Το λογισμικό αξιολόγησης, 83
  - Δ.2.4: Οι περιορισμοί του προβλήματος, 84
  - Δ.2.5: Επιλογή μεθόδου βελτιστοποίησης, 85
- Δ.3: Υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης και αξιολόγησης ΜΥΗ
  - Δ.3.1: Γενική περιγραφή, 86
  - Δ.3.2: Υπολογισμός βασικών στοιχείων αγωγού πτώσεως, 86
  - Δ.3.3: Υπολογισμός υδραυλικών απωλειών, 90
  - Δ.3.4: Επιλογή τύπου υδροστροβίλων, 96
  - Δ.3.5: Χάραξη καμπύλης βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων, 97
  - Δ.3.6: Υπολογισμός αξιοποιήσιμης παροχής από υδροστροβίλους, 101

- Δ.3.7: Χάραξη καμπύλης βαθμού απόδοσης γεννήτριας, 104
- Δ.3.8: Ενεργειακή ανάλυση ΜΥΗ, 107
- Δ.3.9: Εκτίμηση διαμέτρου και ταχύτητας περιστροφής υδροστροβίλων, 109
- Δ.3.10: Υπολογισμός συνολικού ύψους επένδυσης ΜΥΗ, 114
- Δ.3.11: Οικονομοτεχνική ανάλυση του ΜΥΗ, 119

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ε: Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

- E.1: Εισαγωγή, 122
- E.2: Παραμετρική ανάλυση του υπολογιστικού μοντέλου
  - E.2.1: Σενάριο αναφοράς τυπικής διάταξης ΜΥΗ, 123
  - E.2.2: Αποτελέσματα για λειτουργία ταυτόσημων υδροστροβίλων, 125
  - E.2.3: Αποτελέσματα για τη λειτουργία υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους, 129
  - E.2.4: Συνολικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων, 131
- E.3: Βελτιστοποίηση απλού στόχου
  - E.2.1: Εκτέλεση του ΓΑ βελτιστοποίησης, 133
  - E.2.2: Μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης (IRR), 134
  - E.2.3: Σχολιασμός αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης απλού στόχου, 137
- E.4: Βελτιστοποίηση διπλού στόχου
  - E.3.1: Ο συντελεστής φορτίου (CF), 139
  - E.3.2: Μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης (IRR) της επένδυσης και του συντελεστή φορτίου (CF), 139
  - E.3.3: Σχολιασμός αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης διπλού στόχου, 142
  - E.3.4: Επιλογή βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto, 142
- E.5: Ανάλυση ευαισθησίας
  - E.4.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων μελέτης ευαισθησίας, 145
  - E.4.2: Σχολιασμός αποτελεσμάτων της μελέτης ευαισθησίας, 147

ΕΠΙΛΟΓΟΣ, 148

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ, 149

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης ΜΥΗ έργου στο υδατόρευμα του Αγραφιώτη, το οποίο ρέει στη δυτική Ευρυτανία. Προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο όρος «σχεδίαση» αναφέρεται ότι αναζητήθηκε η βέλτιστη εγκατάσταση του ΜΥΗ όσον αφορά τη χωροταξική διάταξη του έργου στο ποταμό αλλά και το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος. Σημειώνεται ότι κατά τη παρούσα μελέτη ελήφθησαν υπόψη αποκλειστικά οικονομοτεχνικά κριτήρια για τη βελτιστοποίηση.

Βασικό στάδιο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η σύνταξη κατάλληλου υπολογιστικού κώδικα, ο οποίος θα προσομοιώνει τη λειτουργία και θα αξιολογεί την αποδοτικότητα της επένδυσης για διαφορετικά σενάρια σχεδίασης του ΜΥΗ. Η ενεργειακή ανάλυση του ΜΥΗ βασίστηκε στη μέση καμπύλη διάρκειας παροχής που χαράχθηκε από μετρήσεις της επιφανειακής απορροής (σε μονάδες παροχής) για τη δεκαετία 1979-1989. Τα συγκεκριμένα δεδομένα παραχωρήθηκαν από τη Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής της ΔΕΗ για εκπαιδευτικό σκοπό.

Σε πρώτη φάση η διαδικασία της βελτιστοποίησης προαπαιτεί από τον μηχανικό την παραμετροποίηση του προβλήματος που εξετάζεται. Οι πιθανές διατάξεις που μπορεί να έχει ένα ΜΥΗ κατά μήκος του υδατορεύματος είναι θεωρητικά άπειρες. Το γεγονός αυτό καθιστά την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία. Η μοντελοποίηση του προβλήματος και το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίστηκε, περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Στο σημείο αυτό σημειώνεται απλά ότι για την παραμετροποίηση αξιοποιήθηκαν δομές διανυσματικών – γεωγραφικών δεδομένων από ψηφιακό χάρτη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Αγραφιώτη. Με το τρόπο αυτό κατέστη δυνατό να διερευνηθούν εναλλακτικά σενάρια χάραξης της διάταξης του ΜΥΗ κατά μήκος του υδατορεύματος.

Επόμενο σημείο αναφοράς αποτέλεσε η επιλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί για την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης. Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε χρήση της εφαρμογής *Genetic Algorithm Tool* που παρέχεται μέσα από το λογισμικό *MATLAB* της εταιρίας *Mathworks*. Όπως γίνεται κατανοητό από την ονομασία του, το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελεί έναν γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που στηρίζει τη λειτουργία του στη θεωρία της φυσικής εξέλιξης.

Με βάση τα προηγούμενα κατέστη δυνατή η εξεύρεση της βέλτιστης εγκατάστασης του έργου. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε αρχικά με μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης, δηλαδή του οικονομικού δείκτη *IRR*. Στη συνέχεια η διαδικασία της βελτιστοποίησης επαναλήφθηκε θέτοντας ως διπλό στόχο την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του *IRR* και του συντελεστή φορτίου (*CF*) της εγκατάστασης. Από τη τελευταία διερεύνηση προέκυψε ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων του προβλήματος, το γνωστό από τη βιβλιογραφία ως μέτωπο Pareto. Στο τέλος πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη ανάλυση ευαισθησίας για τα σενάρια σχεδίασης που προέκυψαν ως αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση. Αυτή αφορούσε συγκεκριμένα την επίδραση που μπορεί να έχει στην ενεργειακή παραγωγή ή την οικονομική αποδοτικότητα του ΜΥΗ η μεταβολή κάποιων σημαντικών παραμέτρων. Τέτοιες είναι η διαθεσιμότητα της φυσικής απορροής, το αρχικό ύψος επένδυσης και η τιμή πώλησης της ενέργειας. Τα συνολικά συμπεράσματα της μελέτης παρατίθενται στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας.

## ***ABSTRACT***

The subject of this diploma thesis is about the optimal design of a SHP plant in the water stream of Agrafiotis that is located in the region of western Erytania. In order to clarify the word «design», I would like to mention that the target of the study is to find the optimal plant both in terms of planning layout and installed capacity. It is also mentioned that the whole analysis is based on techno-economical criteria.

An important stage during the preparation of this diploma thesis was the writing of a computational code in order to simulate and evaluate the operation of a SHP plant for different scenarios of design. The energy analysis of the SHP plant was based on the mean flow duration curve that was created with measurements of the water flow for the decade 1979 – 1989. The source of these data was the Department of Hydro-Electrical Production of the DEI. The provision of the data had educational purpose.

At the first phase of an optimization project the engineer needs to define the parameters of the examined problem. In theory the possible schematic layouts of a SHP plant in a river are uncountable. For this reason the finding of the optimal solution is a particularly difficult operation. The modeling and the theoretical background of the problem are described analytically in the next chapters of this distribution. At this point it is simply noted that spatial (vector) data, from a digital map of the water basin of Agrafiotis, were used for the modeling. In that way the investigation on different schematic layouts for the plant became possible.

The next important step was the selection of an optimization algorithm in order to find the optimal solution. In this study the *Genetic Algorithm Tool* that is provided through *MATLAB* (which is software of *Mathworks*) was used for the optimization. This tool, as we can understand from its designation, is an evolutionary algorithm for optimization that bases its operation in the theory of natural evolution.

Based on the foregoing it was made possible to find the optimal plant for the project in terms of schematic layout and sizing of the electrical and mechanical equipment. The optimization process had at first a single objective to maximize the investment's internal rate of return which is known as the economic index *IRR*. Then the optimization process was repeated by setting the double objective of maximizing both *IRR* and the capacity factor (*CF*) of the plant. The last operation resulted in a set of optimal solutions, known in the literature as the Pareto front. At last the necessary sensitivity analysis was prepared for the design scenarios that emerged as results from the optimization process. This analysis concerned the impact on the energy production or the economic efficiency of the SHP plant that is caused by the change of some critical parameters. Some these parameters are the availability of the natural flow, the investment cost and the price of the electric energy. The final conclusions from the whole study are noted in the final chapter of this distribution.

## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε μια σειρά ανθρώπων που με βοήθησαν για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου. Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Παπαντώνη Δημήτρη, Καθηγητή του ΕΜΠ για την καθοδήγηση του σε όλες τις φάσεις δημιουργίας της παρούσας διπλωματικής καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Κουβόπουλο Ιωάννη, Πολιτικό Μηχανικό της ΔΕΗ για τη πολύτιμη βοήθεια του με τα υδρολογικά δεδομένα, τα οποία χρειάστηκα για την εκπόνηση της διπλωματικής μου. Την ίδια ανάγκη αισθάνομαι να ευχαριστήσω την κ. Μιμίκου Μαρία, Καθηγήτρια του ΕΜΠ και διευθύντρια του εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών για τον διανυσματικό χάρτη της δυτικής Ευρυτανίας που μου χορηγήθηκε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.



---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α:  
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

---

## ***A1: Ο ΠΟΤΑΜΟΣ ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ***

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη βέλτιστη οικονομοτεχνική σχεδίαση ΜΥΗ έργου στο υδατόρευμα του Αγραφιώτη. Ο Αγραφιώτης (ή Αγραφιώτικος ποταμός) είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παραποτάμους του Αχελώου. Βρίσκεται στη περιοχή της Ευρυτανίας και πηγάζει από τη νότια Πίνδο. Στη διαδρομή του περνάει από τα χωριά Βραγγιανά, Τροβατό καθώς και από το χωριό Άγραφα, στο οποίο οφείλει και την ονομασία του. Λίγο πριν το τέλος της διαδρομής του ο Αγραφιώτης καταλήγει στο χωριό Τριπόταμο και τελικά εκβάλλει στην τεχνητή λίμνη των Κρεμαστών. Το μήκος του ποταμού είναι περίπου 35km μετά την δημιουργία της τεχνητής λίμνης των κρεμαστών. Κατά μήκος της ροής του ποταμού το έδαφος είναι ορεινό με απότομες κλίσεις ιδιαίτερα κοντά στις πηγές του. Στη θέση Βαρβαριάδα κατά μήκος του ποταμού υπάρχει εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός της ΔΕΗ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Αγραφιώτη, η οποία έχει επιφάνεια περίπου 218 τετραγωνικά χιλιόμετρα στη θέση Βαρβαριάδα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 13 έως 14 βαθμούς Κελσίου και το θερμοκρασιακό εύρος να φτάνει μέχρι και 35 βαθμούς με αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες την περίοδο του Δεκεμβρίου, του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης απορροή του ποταμού Αγραφιώτη ανέρχεται στα 1771mm με το ύψος των κατακρημνίσεων να αυξάνεται με το υψόμετρο των σταθμών. Οι μήνες από τον Οκτώβριο έως τον Ιανουάριο παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις ενώ οι χαμηλότερες παρουσιάζονται το καλοκαίρι.

## ***A2: ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ***

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει διακριθεί σε πέντε ξεχωριστά κεφάλαια, τα οποία αριθμούνται με τα γράμματα «Α – Ε» του ελληνικού αλφαβήτου. Το παρών κεφάλαιο Α αποτελεί απλά μία εισαγωγή για τα επόμενα τέσσερα που ακολουθούν και αποτελούν το βασικό μέρος της εργασίας. Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή για το περιεχόμενο τους:

- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β:** Παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία που αφορούν το γενικότερο πλαίσιο στο οποίο κινήθηκε η διπλωματική. Ειδικότερα επισυνάπτονται βιβλιογραφικές αναφορές που αφορούν τη ψηφιακή χαρτογραφία, την υδρολογία, τη σχεδίαση των ΜΥΗ και τους εξελικτικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ:** Παρουσιάζεται η προετοιμασία των απαραίτητων δεδομένων που εισήχθησαν στον υπολογιστικό κώδικα, ο οποίος συντάχθηκε για τη βελτιστοποίηση του ΜΥΗ στον Αγραφιώτη.
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ:** Παρουσιάζεται το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά τη διπλωματική. Παράλληλα περιγράφεται η μοντελοποίηση που έγινε για την αντιμετώπιση του και δίνεται αναλυτική περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα.
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ε:** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καθώς και αυτά της ανάλυσης ευαισθησίας που ακολούθησε. Παράλληλα γίνεται ο σχολιασμός και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β:  
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

## ***B1: ΨΗΦΙΑΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ Σ.Γ.Π.***

### ***B.1.1: Ψηφιακή χαρτογραφία***

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει επιδράσει στις χαρτογραφικές διαδικασίες. Η αλλαγή αυτή ήταν αποτέλεσμα των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών για πληροφορία παντός είδους και κυρίως χαρτών που περιέχουν συγκεκριμένα στοιχεία και πληρούν ορισμένες συνθήκες (ειδικοί χάρτες). Η παραγωγή και χρήση των αναλογικών χαρτών παρουσιάζει γενικά τεράστια προβλήματα στην γρήγορη ενημέρωση, μετατροπή και αποθήκευση τους. Για το λόγο αυτό η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών στη χαρτογραφία δημιούργησε την *Ψηφιακή Χαρτογραφία* γνωστή διεθνώς ως *digital mapping*.

Η πρώτη χρήση της πληροφορικής στην χαρτογραφία περιορίζονταν απλά στην αυτοματοποίηση και την επιτάχυνση των χρονοβόρων διαδικασιών κατά την παραγωγή του κλασικού χάρτη. Σήμερα ωστόσο οι υπολογιστικές δυνατότητες έχουν αλλάξει ριζικά τον τρόπο σκέψης μας. Ένας σύγχρονος χάρτης δεν νοείται μόνο με την κλασική του έννοια (στο χαρτί) αλλά ως ψηφιακός. Επιπλέον δημιουργείται μια βάση γεωγραφικών δεδομένων των οποίων ο χάρτης είναι απλώς ένα μέσο μετάδοσης και παρουσίασης. Μεγάλη ώθηση στη ψηφιακή διαχείριση των γεωγραφικών στοιχείων έδωσε φυσικά η νέα τεχνολογία της απευθείας και ταχείας ψηφιακής συλλογής στοιχείων από διάφορες πηγές όπως: σάρωση κλασικών χαρτών / φωτογραφιών, ψηφιακές εικόνες από τηλεσκοπικούς δορυφόρους και δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (*GPS*).

### ***B.1.2: Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών***

Γενικά, ως πληροφοριακό σύστημα ορίζεται το σύνολο των λειτουργιών που επιτρέπουν στο μελετητή, μετά τη παρατήρηση και τη συλλογή των δεδομένων, να τα αποθηκεύει και να τα αναλύει αξιοποιώντας την προκύπτουσα πληροφορία στη διαδικασία λήψης κάποιας απόφασης. (Calkins και Tomblinson, 1977)

Σύμφωνα με τον προηγούμενο ορισμό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, ή σύστημα GIS όπως καλείται συνήθως, ονομάζεται κάθε πληροφοριακό σύστημα που είναι σχεδιασμένο να δουλεύει με δεδομένα, τα οποία χαρακτηρίζονται από χωρικές ή γεωγραφικές συντεταγμένες. Με πιο απλά λόγια τα συστήματα *GIS* αποτελούν πακέτα λογισμικού (*software*) που παρέχουν ένα σύνολο εργαλείων κατάλληλων για τη διαχείριση και την ανάλυση των γεωγραφικών δεδομένων.

Η βασική καινοτομία των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών έγκειται τελικά στη δυνατότητα σύνδεσης διαφορετικών περιγραφικών πληροφοριών σε ένα χωρικό πλαίσιο προκειμένου να καταλήξει ο χρήστης σε κάποιο συμπέρασμα σχετικά με τη σχέση αυτή. Η επισκόπηση των επιμέρους διαδικασιών σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών για τη μετατροπή των αρχικών δεδομένων σε πληροφορία δίνεται σχηματικά στη συνέχεια:



*Σχήμα B.1-1: Επιμέρους διαδικασίες σε ένα ΣΓΠ*

Τα δεδομένα εισόδου σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών μπορούν να προέρχονται από διάφορες πηγές. Το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιείτε κάθε φορά εξαρτάται από τις ανάγκες του προβλήματος που διερευνάται και τον οικονομικό προϋπολογισμό του έργου. Ενδεικτικά αναφέρονται ως πηγές δεδομένων:

- Αναλογικοί χάρτες αφού ψηφιοποιηθούν με αυτόματο σαρωτή ή ψηφιοποιητή
- Ψηφιακά αρχεία χαρτών
- Αρχεία πινάκων ή κειμένων
- Αεροφωτογραφίες
- Ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες
- Δορυφορικές εικόνες
- Αρχεία από ψηφιακές κάμερες
- Αρχεία CAD

Η διαχείριση και η ανάλυση των δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την πληροφορία εξόδου. Η έξοδος ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών μπορεί να έχει τη μορφή ψηφιακού χάρτη ή εκτυπωμένου αναλογικού χάρτη συνδυασμένου με πίνακες και διαγράμματα που παρουσιάζουν τις περιγραφικές πληροφορίες. Παρόλο που στα συστήματα GIS δίνεται έμφαση στη κατασκευή ψηφιακών χαρτών το λογισμικό τους είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να επιτρέπει την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε οποιαδήποτε μορφή επιθυμεί ο χρήστης.

#### B.1.3: Δομές δεδομένων σε Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφοριών

Τα δύο κύρια μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή των γεωγραφικών δεδομένων και τη σύνδεση θεματικών και γεωμετρικών πληροφοριών (συστήματα GIS) είναι το μοντέλο πεδίων και το μοντέλο αντικειμένων.

- Το μοντέλο πεδίων (field-based approach) θεωρεί τη γήινη επιφάνεια ως ένα χωρικό, συνεχές και ομογενές μέσο. Οι τιμές των χαρακτηριστικών που περιγράφουν το πεδίο θεωρούνται ως συναρτήσεις, οι οποίες παίρνουν μία τιμή σε κάθε θέση του δισδιάστατου χώρου. Η αναπαράσταση ενός πεδίου σε μια γεωγραφική βάση δεδομένων απαιτεί την υποδιαίρεση του πεδίου είτε σε σημεία είτε σε πεπερασμένα στοιχεία – κελιά με μορφή κανάβου. Έτσι οι τιμές των χαρακτηριστικών αποδίδονται σε κάθε σημείο ή κελί.
- Το μοντέλο αντικειμένων (object-based approach) θεωρεί ότι ο γεωγραφικός χώρος αποτελείται από στοιχεία (features) ή αντικείμενα (objects) που έχουν γεωμετρική θέση, σχήμα και διάφορα θεματικά χαρακτηριστικά. Στο μοντέλο αντικειμένων η σύνδεση της γεωμετρικής με τη θεματική πληροφορία γίνεται με τη βοήθεια ενός κωδικού (*identifier*).

Για την υλοποίηση των μοντέλων που περιγράφηκαν έχουν αναπτυχθεί δύο γεωμετρικές δομές η διανυσματική (γνωστή ως *vector*) και η κανονικοποιημένη (γνωστή ως *raster*). Παρότι και οι δύο δομές μπορούν να αναπαριστούν και τα δύο μοντέλα που αναφέρθηκαν η κανονικοποιημένη συνδέεται περισσότερο με το μοντέλο πεδίων και η διανυσματική με το μοντέλο αντικειμένων.

#### B.1.4: Διανυσματική δομή δεδομένων

Στη διανυσματική δομή δεδομένων η βασική λογική μονάδα αντιστοιχεί σε μια γραμμή, η οποία μπορεί να αναπαριστά μια ισοϋψή καμπύλη, ένα ποταμό ή ένα δρόμο. Ένα διανυσματικό σύστημα απεικονίζει επομένως τα δεδομένα ως σύνολα χωρικών αρχετύπων. Στα δισδιάστατα μοντέλα τα χωρικά αρχέτυπα είναι σημεία,

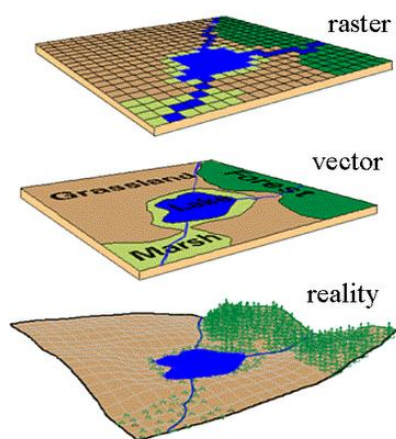
γραμμές και πολύγωνα ενώ στα τρισδιάστατα χρησιμοποιούνται επιπλέον οι επιφάνειες και οι όγκοι.

Οι γραμμές ή τα τόξα είναι σειρές διατεταγμένων σημείων των οποίων καταγράφονται οι συντεταγμένες. Οι επιφάνειες ή τα πολύγωνα αποθηκεύονται επίσης ως διατεταγμένες σειρές σημείων, όμως το αρχικό και το τελικό σημείο ταυτίζονται έτσι ώστε να ορίζεται ένα κλειστό σχήμα. Τα σημεία σε μια διανυσματική δομή δεδομένων παρουσιάζονται αντίστοιχα ως γραμμές μηδενικού μήκους.

#### B.1.5: Κανονικοποιημένη δομή δεδομένων

Η κανονικοποιημένη δομή δεδομένων αντιλαμβάνεται τον χώρο ως μωσαική διαίρεση φατνίων – ψηφίδων, δηλαδή τοποθετεί και αποθηκεύει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας έναν πίνακα φατνίων. Συνήθως αναφερόμαστε σε ένα φατνίο με τον όρο εικονοστοιχείο (pixel = picture element). Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η κατηγορία των κανονικοποιημένων χωρικών δομών δεν περιλαμβάνει μόνο τις δομές που βασίζονται σε ένα ορθογωνικό ή τετραγωνικό πλέγμα. Στην πραγματικότητα αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει κάθε συνεχώς επαναλαμβανόμενο πρότυπο ενός πολυγώνου ή πολυέδρου. Ο όρος που χρησιμοποιείται στη γεωμετρία για το σκοπό αυτό είναι κανονική μωσαϊκή διαίρεση.

Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλέγμα που χρησιμοποιείται στη κανονικοποιημένη δομή τόσο μεγαλύτερος αποθηκευτικός χώρος απαιτείται αλλά και η διακριτική ικανότητα. Τα αντίθετα ισχύουν όταν το χρησιμοποιούμενο πλέγμα είναι αραιό. Ο χρήστης επομένως καλείται να βρει ένα σημείο ισορροπίας μεταξύ της απαιτούμενης λεπτομέρειας και του μεγέθους των δεδομένων.



Σχήμα B.1-2: Δομές δεδομένων στα Σ.Γ.Π.

#### B.1.6: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Βασική λειτουργία των συστημάτων GIS είναι η δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους μιας περιοχής, από διανυσματικά δεδομένα. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (*Digital Elevation Model*) είναι ουσιαστικά μια ψηφιακή αναπαράσταση ψηφιδωτής μορφής (*Raster*), στην οποία κάθε σημείο ( $x,y$ ) του πλέγματος περιέχει ως πληροφορία το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους βρίσκουν χρήση σε ποικίλες εφαρμογές όπως οπτικοποίηση της γεωγραφικής επιφάνειας, ανάλυση ορατότητας, υδρολογικές μελέτες (μελέτη υδρολογικών λεκανών και προσομοίωση πλημμύρων) και μελέτες τεχνικών έργων.

## ***B.2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ***

### ***B.2.1: Εισαγωγικές έννοιες***

Η υδρολογική μελέτη που πραγματοποιείται κατά την σχεδίαση μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης έχει στόχο την εκτίμηση του υδροδυναμικού του προς αξιοποίηση υδατικού πόρου. Προϋπόθεση για την ανάπτυξη υδροδυναμικού είναι η ύπαρξη επιφανειακής απορροής του νερού και κλίσεως του εδάφους προκειμένου να σχηματίζεται η απαραίτητη υψομετρική διαφορά. Όπως είναι γνωστό ένα ΜΥΗ αξιοποιεί μέρος τη δυναμικής ενέργειας του νερού που ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας μέχρι να φτάσει στην κατώτατη ενεργειακή στάθμη.

Γενεσιουργό αιτία των υδρολογικών φαινομένων πάνω στη γη αποτελεί η κατακρήμνιση. Με τον όρο αυτό, καλείται η επάνοδος των συμπυκνωμένων υδρατμών της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια της Γης με τη μορφή χιονιού ή βροχής. Η επάνοδος γίνεται βέβαια σε μικρότερο βαθμό και με απευθείας συμπύκνωση των υδρατμών στην επιφάνεια της. Γενικά, η κατακρήμνιση που φτάνει στη Γη και δεν απορρέει με τη μορφή επιφανειακής ή υπόγειας ροής καλείται υδρολογική απώλεια και οι κυριότερες συνιστώσες της είναι (Eagleson, 1970):

- Εξάτμιση: διαδικασία μετατροπής του νερού άμεσα από τη υγρή στην αέρια κατάσταση
- Διαπνοή: διαδικασία με την οποία το νερό περνά άμεσα από την υγρή στην αέρια κατάσταση μέσω του μεταβολισμού των φυτών
- Κατακράτηση του νερού από τη βλάστηση και το έδαφος
- Εξάχνωση: διαδικασία μετατροπής του νερού άμεσα από τη στερεά στην αέρια κατάσταση

Οι φάσεις που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο συνθέτουν μια αέναη κίνηση του νερού μεταξύ των ωκεανών, των λιμνών, των ποταμών, της ατμόσφαιρας και της Γης η οποία καλείται *υδρολογικός κύκλος*. Κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η ηλιακή ενέργεια. Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση η ισορροπία του νερού πάνω στη γη περιγράφεται από το λεγόμενο *υδατικό ισοζύγιο*:

$$K = P + E + DA$$

Όπου:

- $K$ : η κατακρήμνιση
- $P$ : η συνολική απορροή = επιφανειακή + υπόγεια απορροή
- $E$ : η εξάτμιση / διαπνοή
- $DA$ : η διαφορική αλλαγή στην αποθήκευση του νερού στη γη.

Οι υδρολογικές μεταβλητές που αναφέρονται στο υδατικό ισοζύγιο συνδέονται μεταξύ τους με μια σχέση αιτίου - αποτελέσματος που είναι πολύπλοκη, μη μονοσήμαντη και αμφίδρομη. Η υδρολογική αυτή αιτιότητα είναι κατάσταση άμεσα αντιληπτή και έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας και προσομοίωσης. Η *Προσδιοριστική Υδρολογία* είναι ο κλάδος της υδρολογίας που ασχολείται με την αιτιότητα και εκτιμά τις υδρολογικές μεταβλητές και διαδικασίες με πλήρη βεβαιότητα.

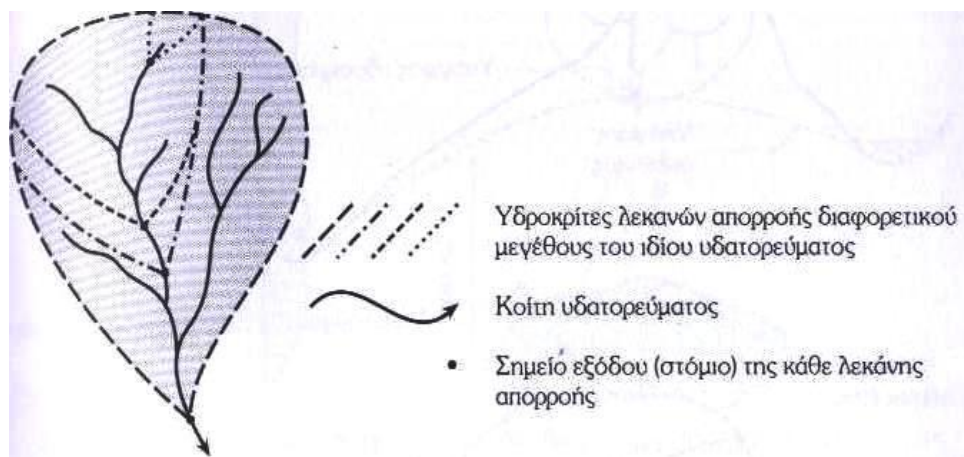
Η αδυναμία ωστόσο της προσδιοριστικής υδρολογίας να καλύψει και την τυχαία συνιστώσα των υδρολογικών μεταβλητών και διαδικασιών έχει σημαντικές συνέπειες στην προσομοίωση και άρα τη πρόγνωση τους. Ο κλάδος της υδρολογίας που αναπτύχθηκε ακριβώς για την ανάλυση των στοχαστικών μεταβλητών είναι η *Στατιστική Υδρολογία* που διακρίνεται στην *Πιθανολογική* και τη *Στοχαστική* (Μιμίκου, 2006).

Η πιθανολογική υδρολογία χρησιμοποιεί πραγματοποιηθείσες μετρήσεις της υδρολογικής μεταβλητής με κατεστραμμένη τη χρονική τους ακολουθία και κατατάσσοντας τις κατά τάξη μεγέθους. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η με κάποιο βαθμό εμπιστοσύνης πρόβλεψη των τιμών της μεταβλητής με χρονική βάση ίση με το βήμα της σειράς που αναλύεται (πχ ετήσιο). Από τους διάφορους κλάδους της υδρολογίας μόνο η στοχαστική υδρολογία χρησιμοποιεί το χρόνο ως τέταρτη διάσταση και οι πληροφορίες εισόδου και εξόδου στα στοχαστικά ομοιώματα είναι χρονικά διατεταγμένες μετρήσεις της υδρολογικής μεταβλητής.

### B.2.2: Υδρολογική λεκάνη απορροής

Η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής είναι το βασικό ζητούμενο της υδρολογικής ανάλυσης όσον αφορά την ενότητα της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Η παροχή του νερού σε ένα υδατόρευμα αποτελεί την πρωτεύουσα πληροφορία καθώς επηρεάζει άμεσα την διαστασιολόγηση του έργου, το συνολικό κόστος εγκατάστασης και κατά συνέπεια την εσωτερική απόδοση της επένδυσης. Οι υπόλοιπες υδρολογικές μεταβλητές (πχ οι βροχοπτώσεις) αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία ως δευτερεύουσα πληροφορία.

Το σύνολο της τοπογραφικής επιφάνειας στην οποία αποστραγγίζονται τα νερά ενός υδατορεύματος και των παραποτάμων του καλείται *λεκάνη απορροής* ή *υδρολογική λεκάνη*. Το μέγεθος της λεκάνης απορροής έχει ιδιαίτερη σημασία αφού επηρεάζει το μέγεθος της συνολικής απορροής στην έξοδό της. Για την εκτίμηση του μεγέθους της λεκάνης απορροής απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο καθορισμός του υδροκρίτη της λεκάνης. Έτσι ονομάζεται το νοητό όριο (γραμμή) που διαχωρίζει δύο ή περισσότερες υδρολογικές λεκάνες. Μετά τον καθορισμό του υδροκρίτη το μέγεθος της λεκάνης μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση τοπογραφικών χαρτών, αεροφωτογραφιών ή άλλων σύγχρονων μέσων. Στο επόμενο σχήμα παριστάνεται γραφικά η μεταβολή του μεγέθους της λεκάνης απορροής όσο το στόμιο αυτής μετακινείται κατά μήκος του ίδιου υδατορεύματος.



Σχήμα B.2-1: Υδρολογικές λεκάνες κατά μήκος υδατορεύματος



Προφανώς σε κάθε διατομή του ίδιου υδατορεύματος αντιστοιχεί μια διαφορετική λεκάνη απορροής, η επιφάνεια της οποίας αυξάνει όσο η εξεταζόμενη θέση μετατοπίζεται προς τα κατάντι. Επίσης, κάθε υδρολογική λεκάνη του ποταμού αποτελείται από περισσότερες υπό-λεκάνες, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί στα ρυάκια και τους παραποτάμους που συμβάλλουν στο εξεταζόμενο ρεύμα ανάντι της διατομής εξόδου. Για το λόγο αυτό η επιφάνεια της λεκάνης απορροής κατά μήκος του υδατικού ρεύματος προς την κατάντι κατεύθυνση είναι συνάρτηση αύξουσα αλλά όχι συνεχής.

Ο Ελλαδικός χώρος λόγω του πολύπλοκου ανάγλυφου του χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό μεγάλου πλήθους υδρολογικών λεκανών, μικρού και μεσαίου μεγέθους. Οι λεκάνες απορροής των ελληνικών ποταμών έχουν ομαδοποιηθεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα με κριτήρια κλιματολογικής και υδρολογικής ομοιογένειας τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα: B.2-2: Υδατικά διαμερίσματα στον Ελλαδικό χώρο

Η επιφανειακή απορροή μιας υδρολογικής λεκάνης που προέρχεται από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, από πηγές κτλ κινείται προς τα χαμηλότερα σημεία αυτής δια μέσου ενός δικτύου φυσικών ρευμάτων, διαφόρων μεγεθών. Τα ρεύματα αυτά στο σύνολο τους αποτελούν το *υδρογραφικό δίκτυο* της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής. Η σημασία του συγκεκριμένου δικτύου είναι ιδιαίτερα μεγάλη αφού η υδρολογική ανταπόκριση της λεκάνης καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από αυτό.

Πίνακας Β.2-1:  
Επιφάνεια υδατικών διαμερισμάτων στον Ελλαδικό χώρο

a/a	Υδατικό Διαμέρισμα	Επιφάνεια (km <sup>2</sup> )
1	Δυτ. Πελοπόννησος	7771
2	Βορ. Πελοπόννησος	6596
3	Αν. Πελοπόννησος	8702
4	Δυτ. Στερεά Ελλάδα	10420
5	Ήπειρος	10275
6	Αττική	3326
7	Αν. Στερεά Ελλάδα	11923
8	Θεσσαλία	13148
9	Δυτ. Μακεδονία	13404
10	Κεν. Μακεδονία	10388
11	Αν. Μακεδονία	7342
12	Θράκη	10894
13	Κρήτη	8330
14	Νήσοι Αιγαίου	9060

### B.2.3: Μέτρηση των απορροών - Υδρομετρία

Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά της απορροής ενός ποταμού που μετρώνται είναι η στάθμη του νερού και η παροχή. Η ακριβής μέτρηση της παροχής σε φυσικούς αποδέκτες αποτελεί το κύριο αντικείμενο μιας εφαρμοσμένης επιστημονικής περιοχής γνωστής με το όνομα *Υδρομετρία*. Για την καταγραφή των δεδομένων που αναφέρονται άμεσα στις παροχές αλλά και τις στάθμες των υδατικών φορέων χρησιμοποιούνται κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις, εξοπλισμένες με σχετικά όργανα που ονομάζονται *Υδρομετρικοί Σταθμοί*. Τα στοιχεία που συλλέγονται σε έναν υδρομετρικό σταθμό είναι αξιόπιστα μόνο εφόσον τηρούνται κάποιοι βασικοί κανόνες που αφορούν:

- Την καταλληλότητα της θέσης του υδρομετρικού σταθμού
- Τον τύπο και την κατάσταση λειτουργίας του μετρητικού οργάνου
- Την αξιοπιστία και τη γνώση του παρατηρητή που είναι υπεύθυνος για τις μετρήσεις

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο κλάδο της υδρομετρίας για την πραγματοποίηση των μετρήσεων των υδρολογικών μεγεθών είναι οι εξής:

- Η μέτρηση της στάθμης σε διακριτό ή συνεχή χρόνο με στάθμη-μετρικές κλίμακες και όργανα αυτόματης καταγραφής της στάθμης.
- Η μέτρηση της ταχύτητας της ροής σε διάφορες θέσεις της διατομής με τη βοήθεια ειδικών συσκευών (πλωτήρων, μολίσκων κτλ) ή απευθείας μέτρηση της παροχής με χρήση χημικών ουσιών, φυσαλίδων συμπιεσμένου αέρα κτλ

Η κλίμακα του χρόνου, στην οποία επιλέγεται να διακριτοποιηθεί η καταγραφή της χρονικής εξέλιξής ενός μεγέθους, εξαρτάται από τη φύση αυτού και το είδος της

ανάλυσης. Παραδείγματος χάρη για την καταγραφή της εξέλιξης ενός πλημμυρικού φαινομένου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ωριαία κλίμακα ή ακόμα και κλίμακα δεκαλέπτου όταν πρόκειται για μικρά υδατορεύματα. Η συγκεκριμένη επιλογή κλίμακας υπαγορεύεται από το γρήγορο ρυθμό εξέλιξης που χαρακτηρίζει τα φαινόμενα αυτού του τύπου. Σε διαφορετική περίπτωση δεν θα ήταν δυνατόν να αποτυπωθούν οι ακραίες τιμές της πλημμυρικής απορροής. Για τις ανάγκες μελέτης μικρής υδροηλεκτρικής εγκατάστασης η χρησιμοποίηση ημερήσιας ή μηνιαίας χρονικής κλίμακας για την χρονική καταγραφή της παροχής θεωρείται ικανοποιητική ως προς την ακρίβεια των μακροπρόθεσμων υπολογισμών που αφορούν την ενεργειακή παραγωγή.

Η απευθείας μέτρηση της παροχής είναι ωστόσο διαδικασία ιδιαίτερα πολύπλοκη και δαπανηρή, ειδικά όταν το χρονικό βήμα που απαιτείται είναι μικρό. Για το λόγο αυτό συνήθη μεθοδολογία αποτελεί η μέτρηση δευτερευόντων υδρολογικών πληροφοριών (όπως η στάθμη του ποταμού) που μπορούν να μετρηθούν πολύ πιο εύκολα και οικονομικά. Ακολούθως, από τις μετρήσεις της δευτερεύουσας πληροφορίας και μέσω κατάλληλης συσχέτισης με τη πρωτεύουσα είναι δυνατόν να προκύψουν έμμεσα οι τιμές της παροχής.

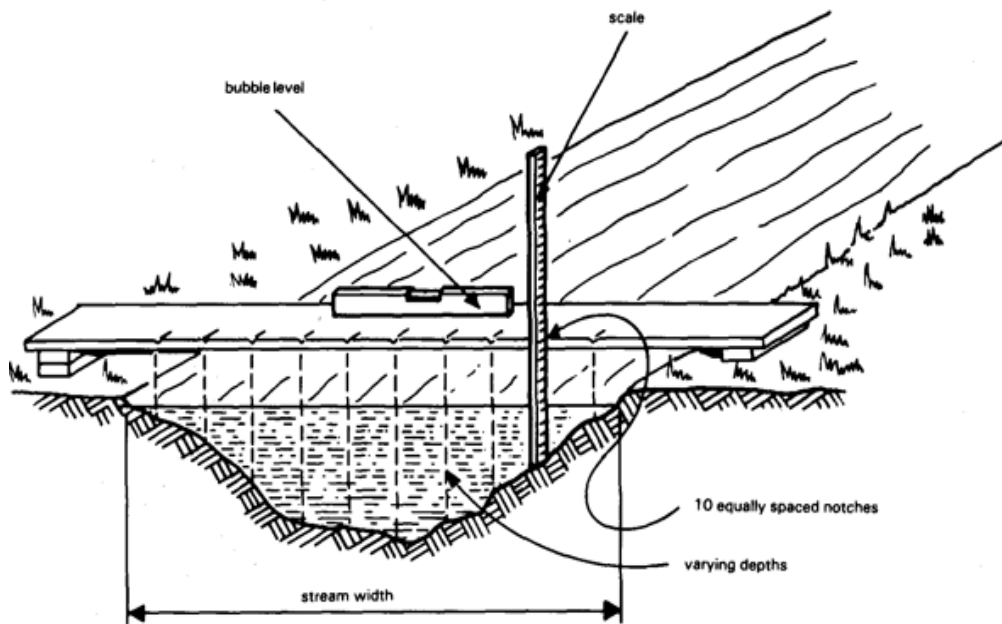
#### B.2.4: Μέθοδος απευθείας μέτρησης παροχής

Απευθείας μέτρηση της παροχής σε ένα υδατόρευμα μπορεί να γίνει με ολοκλήρωση στο πεδίο των ταχυτήτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στη σχέση ορισμού της παροχής και για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη. Το μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται στη δυσκολία εφαρμογής της.

Η μέτρηση του πεδίου των ταχυτήτων γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις με χρήση μετρητικού μυλίσκου. Ο μυλίσκος αποτελεί μετρητικό όργανο μορφής έλικας το οποίο προσανατολίζεται στη διεύθυνση της ροής. Η ταχύτητα περιστροφής του μυλίσκου μετράται από τον αριθμό των παλμών ηλεκτρικού κυκλώματος συνεχούς ρεύματος και χαμηλής τάσης. Η γωνιακή ταχύτητα της προπέλας του μυλίσκου, που βρίσκεται βυθισμένος σε μια θέση της διατομής του ποταμού, μετατρέπεται σε γραμμική με τη βοήθεια της εμπειρικής σχέσης που δίνεται από τον κατασκευαστή του μετρητικού οργάνου καθώς προκύπτει από την εργαστηριακή βαθμονόμηση του. Η απευθείας μέτρηση της παροχής προϋποθέτει τη γνώση της γεωμετρίας της διατομής του υδατορεύματος, στην οποία γίνονται οι μετρήσεις. Η συνολική υγρή διατομή του ποταμού χωρίζεται σε επιμέρους κατακόρυφες διατομές και κάθε κατακόρυφη διατομή διαιρείται συνήθως σε δύο ή τρία τμήματα για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Τα μέσα των τμημάτων αυτών αποτελούν και τις εξεταζόμενες θέσεις κάθε κατακόρυφης διατομής. Με αυτό το τρόπο προσδιορίζεται η γραμμική ταχύτητα του νερού στα τρία εξεταζόμενα σημεία. Στη συνέχεια ο σταθμικός μέσος όρος των ταχυτήτων που μετρήθηκαν δίνει τη μέση ταχύτητα της εξεταζόμενης κατακόρυφης διατομής. Η στάθμιση γίνεται ανάλογα με το λόγο του εμβαδού του κάθε επιμέρους τμήματος προς τη συνολική επιφάνεια της κατακόρυφης διατομής. Ακολούθως, ολοκληρώνοντας την μέση ταχύτητα στην κατακόρυφη υγρή διατομή προκύπτει η παροχή του χωρίου. Εκτελώντας την ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες κατακόρυφες διατομές και αθροίζοντας τις επιμέρους παροχές προκύπτει η συνολική παροχή της υγρής διατομής. Θεωρώντας ότι η συνολική υγρή διατομή είναι χωρισμένη σε  $n$  κατακόρυφες διατομές με ύψη  $h_i$  και πλάτη  $\Delta b_i$  η συνολική παροχή του νερού υπολογίζεται ως το άθροισμα:  $Q = \sum_i^n u_{mi} \cdot h_i \cdot \Delta b_i$ . Αναγκαία προϋπόθεση για την αξιοπιστία των μετρήσεων είναι η στάθμη του νερού να παραμένει σταθερή κατά την πραγματοποίησή αυτών.



Σχήμα Β.2-3: Μετρητικός μολίσκος



Σχήμα Β.2-4: Χωρισμός υγρής διατομής σε τμήματα

#### B.2.5: Καμπύλη στάθμης – παροχής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξαιτίας της δυσκολίας για συνεχή και απευθείας μέτρηση της παροχής του νερού η στάθμη είναι το κύριο στοιχείο που μετράται συνεχώς σε έναν υδρομετρικό σταθμό. Ως στάθμη καλείται το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού πάνω από ένα αυθαίρετο επίπεδο αναφοράς, όπως η επιφάνεια της θάλασσας. Περισσότερο συχνά ως επίπεδο αναφοράς χρησιμοποιείται το οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται λίγο πιο κάτω από το σημείο μηδενικής ροής στο ποτάμι. Η συσχέτιση σημειακών μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα της στάθμης και της παροχής δίνει την καμπύλη στάθμης παροχής  $Q = f(z)$  για τη συγκεκριμένη θέση. Η επέκταση της καμπύλης πέραν της μεγαλύτερης υδρομέτρησης είναι μια δύσκολη και πολύ σημαντική δουλειά, δεδομένου ότι στο σχεδιασμό των έργων χρησιμοποιούνται υψηλές παροχές που βρίσκονται πολύ ψηλότερα από τις δυνατότητες υδρομέτρησης των οργάνων. Συχνά γίνεται η υπόθεση (Linsley, 1975) ότι η καμπύλη στάθμης - παροχής έχει τη μορφή:

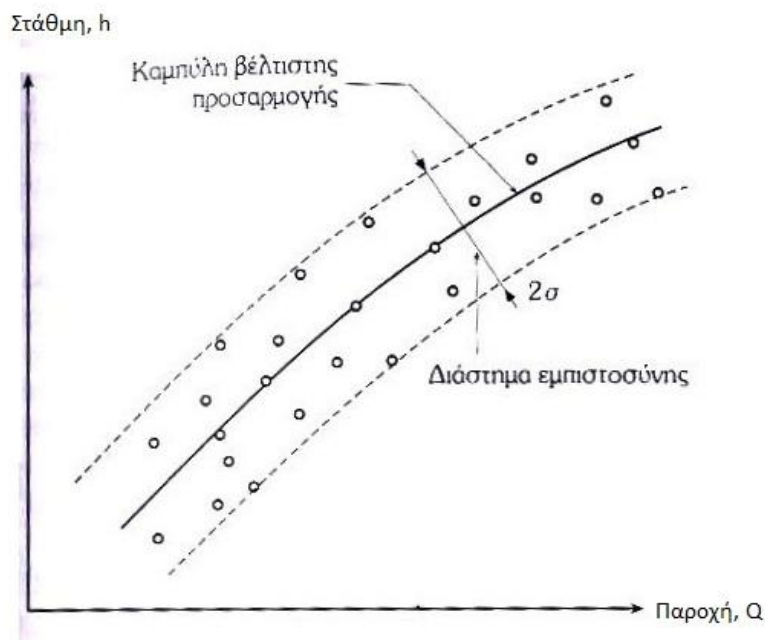
$$Q = k \cdot (z - z_0)^b$$

Όπου  $k, z_0, b$  είναι σταθερές της εξεταζόμενης θέσης. Συγκεκριμένα η τιμή  $z_0$  αποτελεί το απόλυτο υψόμετρο που έχει μηδενική παροχή και η τιμή  $z$  το απόλυτο υψόμετρο της παρατηρούμενης ένδειξης της στάθμης. Ο εκθέτης  $b$  είναι της τάξεως του 1,5 για ομοιόμορφη ορθογωνική διατομή και της τάξεως του 2,5 για τριγωνική. Σε μια σύνθετη φυσική διατομή ο εκθέτης  $b$  ενδέχεται να μεταβάλλεται συναρτήσει της στάθμης καθώς μεταβάλλεται και μορφή της βρεχόμενης διατομής. Σε αυτή τη τελευταία περίπτωση η συσχέτιση περιγράφεται από περισσότερες της μίας συναρτήσεις της μορφής  $Q = f(z)$ .

Οι παράμετροι  $k, z_0$  και  $b$  προσδιορίζονται με βάση τα πειραματικά ζεύγη σημείων  $(Q, z)$  ακολουθώντας μια από τις γνωστές μεθόδους βέλτιστης προσαρμογής όπως τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αν βρεθεί το  $z_0$  και διορθωθούν όλες οι στάθμες  $z$  τότε η εξίσωση  $Q = k \cdot (z - z_0)^b$  γίνεται ευθεία γραμμή σε διπλά λογαριθμικό χαρτί και μπορεί εύκολα να επεκταθεί.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ποσοτική εκτίμηση της διασποράς των πειραματικών τιμών  $(Q, z)$  γύρω από την καμπύλη βέλτιστης προσαρμογής. Συνήθως ως μέτρο εκτίμησης της διασποράς και κατ'επέκταση ως ένδειξη αξιοπιστίας της καμπύλης χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση  $\sigma$  και το οριζόμενο διάστημα εμπιστοσύνης συνολικού εύρους  $2 \cdot \sigma$  που περιβάλλει τα πειραματικά σημεία.

Στα περισσότερα υδατορεύματα η συσχέτιση  $Q = f(z)$  δεν είναι διαχρονική αλλά μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου λόγω μεταβολής στη διατομή ή στη κλίση του υδατορεύματος. Οι αλλαγές αυτές στη κοίτη του ποταμού είναι αποτέλεσμα της διάβρωσης και της απόθεσης φερτών υλικών. Άρα δεν υπάρχει μια διαχρονική συσχέτιση μεταξύ στάθμης και παροχής για τη συγκεκριμένη διατομή του υδατορεύματος. Απαιτείται επομένως συνεχής περιοδική μέτρηση της παροχής ώστε να ελέγχεται η ισχύς της υπάρχουσας καμπύλης ή να πιστοποιείται η μετάβαση σε άλλη καμπύλη. Στη συνέχεια δύναται σχηματικά η ενδεικτική μορφή της εκθετικής καμπύλης στάθμης - παροχής που προκύπτει από τη βέλτιστη προσαρμογή των μετρήσεων.



Σχήμα Β.2-5: Τυπική καμπύλη στάθμης – παροχής

### B.2.6: Χρονοσειρές υδρολογικών μεγεθών

Υδρολογική χρονοσειρά (ή σειρά) είναι οι διατεταγμένες σε αυστηρή χρονική ακολουθία πραγματοποιηθείσες μετρήσεις μιας υδρολογικής μεταβλητής όπως η παροχή. Εάν η καταγραφή των υδρολογικών μεγεθών είναι συνεχής τότε αναφερόμαστε σε συνεχή σειρά. Αντίστοιχα όταν η καταγραφή των τιμών γίνεται σε διακριτές χρονικές στιγμές αναφερόμαστε σε σειρά διακριτή στο χρόνο. Η ποσοτική παράσταση της χρονοσειράς της παροχής σε μια συγκεκριμένη διατομή του υδατορεύματος καλείται υδρογράφημα.

Οι παρατηρήσεις διάρκειας όπως τα ημερήσια ύψη βροχής και οι ημερήσιες παροχές αποτελούν τις αντίστοιχες *Πλήρεις Σειρές* των υδρολογικών μεγεθών. Οι πλήρεις σειρές επιδέχονται ανάλυση είτε στην αρχική τους μορφή είτε με την επιλογή ορισμένων μεγεθών που έχουν σχέση με το εκάστοτε πρόβλημα που εξετάζεται. Στη τελευταία περίπτωση έχουμε τις *Μερικές* και τις *Ετήσιες Σειρές*. Οι μερικές σειρές αποτελούνται από τιμές του υδρολογικού φαινομένου πάνω ή κάτω από μία τιμή που ταιριάζει στο πρόβλημα. Οι ετήσιες σειρές είναι οι σειρές με ετήσιες τιμές ή ετήσιους μέσους όρους ή τιμές που προκύπτουν από την επιλογή των ετήσιων μεγίστων και ελαχίστων. Τέλος αν η τιμή που επιλέγεται για μια μερική σειρά είναι τέτοια ώστε ο αριθμός των παρατηρήσεων της μερικής σειράς να είναι ίσος με τον αριθμό των ετών τότε αυτή καλείται *Μερική Σειρά Ετήσιων Υπερβάσεων* (Τσακίρης, 1995).

Στις μερικές και τις ετήσιες σειρές θεωρείται ότι επαληθεύεται η συνθήκη τυχαιότητας των παρατηρήσεων (Τσακίρης, 1995). Ειδικά όμως στην περίπτωση των μερικών σειρών πρέπει να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία των παρατηρήσεων. Με την προϋπόθεση ότι οι τιμές ενός υδρολογικού μεγέθους είναι τυχαίες και ανεξάρτητες (πχ πλημμυρική παροχή) η κατανομή πιθανότητας εμφάνισής του μπορεί να περιγραφεί από κάποια θεωρητική κατανομή πιθανότητας.

### B.2.7: Καμπύλη διάρκειας παροχής (ΚΔΠ)

Οι μέσες ημερήσιες (ή μηνιαίες) μετρήσεις της παροχής ενός υδατορεύματος δεν αποτελούν τυχαίες και ανεξάρτητες παρατηρήσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή οι παροχές τη μία ημέρα έχουν σημαντικό βαθμό συσχέτισης με την παροχή της προηγούμενης. Ως εκ τούτου δεν υπάρχει κάποια θεωρητική κατανομή στην οποία θα μπορούσε να γίνει προσαρμογή του δείγματος των μετρήσεων παρά διατίθεται μόνο η εμπειρική κατανομή της συμπληρωματικής πιθανότητας εμφάνισης. Την εμπειρική αυτή κατανομή προσεγγίζουμε με τη *Καμπύλη Διάρκειας Παροχής (ΚΔΠ)*.

Η καμπύλη διάρκειας παροχής χρησιμοποιείται συχνά στην υδρολογική ανάλυση για αρδευτικούς σκοπούς και κυρίως στις μελέτες αξιολόγησης μιας θέσης όσον αφορά την υδροηλεκτρική της αξιοποίηση για τον υπολογισμό της ισχύος και της ενέργειας που παράγεται ετησίως. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η χρησιμοποίηση της καμπύλης διάρκειας στα ΜΥΗ χωρίς ταμιευτήρα ή με πολύ μικρό ταμιευτήρα. Στα υδροηλεκτρικά έργα με μεγάλο ταμιευτήρα η χρήση της δεν εξυπηρετεί ιδιαίτερα καθώς χάνεται σε αυτή η πληροφορία της χρονικής ακολουθίας της παροχής στην εξεταζόμενη θέση. Το γεγονός αυτό αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα της χρήσης της καμπύλης διάρκειας έναντι του υδρογραφήματος.

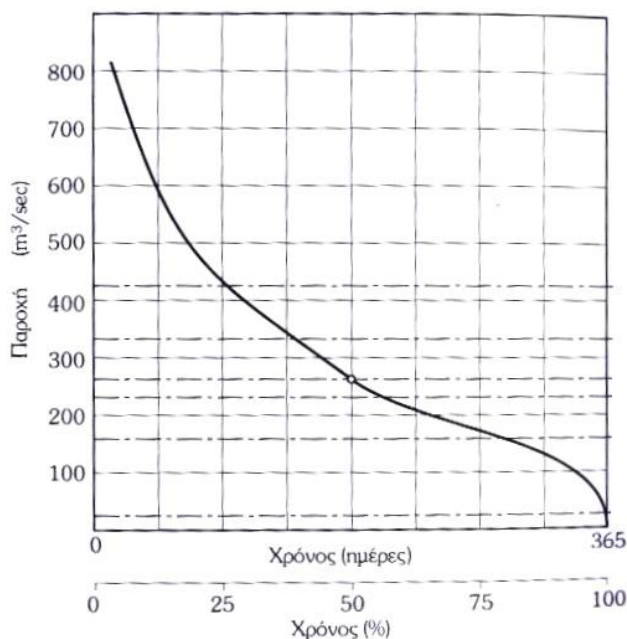
Η καμπύλη διάρκειας παροχής προκύπτει άμεσα από το υδρογράφημα της απορροής (σε μονάδες παροχής) αν οι τιμές της παροχής καταταγούν κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους και υπολογιστούν τα ποσοστά του χρόνου στα οποία παρατηρείται υπέρβαση της τιμής της παροχής. Στην ουσία η καμπύλη διάρκειας παριστάνει τα

ποσοστά του χρόνου (%) κατά τα οποία είναι διαθέσιμες οι διάφορες τιμές της παροχής. Αφού οι μετρήσεις της παροχής καταταγούν κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους οι αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασης δύναται να υπολογιστούν από την ακόλουθη σχέση (Weibull, 1939). Σημειώνεται ότι με  $N$  συμβολίζεται το πλήθος των τιμών της χρονικής σειράς της παροχής και με  $m$  η αρίθμηση του μεγέθους  $x$  της παροχής στη φθίνουσα διάταξη.

$$P(X \geq x) = \frac{m}{N + 1}$$

Το γεγονός ότι η χάραξη της καμπύλης διάρκειας βασίζεται σε μετρήσεις παρελθόντων ετών υποδηλώνει πως γίνεται σιωπηρά αποδεκτό ότι τα υδρολογικά φαινόμενα παρουσιάζουν περιοδικότητα, με την έννοια ότι υπάρχει κυκλική εναλλαγή όχι στα γεγονότα αυτά καθαυτά αλλά στην πιθανότητα να πραγματοποιηθούν. Με τον τρόπο αυτό δεν αποκλείεται η περίπτωση να παρουσιαστούν μέγιστες τιμές ενός μεγέθους σε περιόδους που οι αντίστοιχες πιθανότητες είναι ελάχιστες. Έτσι με την πρόγνωση της παροχής δεν πρόκειται να δοθεί η μελλοντική εξέλιξη του φυσικού μεγέθους αλλά το διάστημα μέσα στο οποίο αυτό αναμένεται να διακυμανθεί με δεδομένη πιθανότητα. Στατιστικά, όσο πιο μεγάλο είναι το δείγμα των μετρήσεων τόσο πιο ασφαλή είναι τα συμπεράσματά που προκύπτουν από τη καμπύλη διάρκειας. Στη πράξη απαιτούνται συνήθως ημερήσιες μετρήσεις της παροχής για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 10 έως 20 ετών κατά τη σχεδίαση μικρού υδροηλεκτρικού και 40 ετών κατά τη σχεδίαση μεγάλου.

Η χρήση των μέσων μηνιαίων τιμών της παροχής, αντί των ημερησίων, για τη χάραξη της καμπύλης διάρκειας μπορεί να εισάγει σχετικά μεγαλύτερο σφάλμα στην ανάλυση. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα όταν η παροχή μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός μήνα και υπάρχει κίνδυνος να μην αποτυπωθούν αυτές οι έντονες διακυμάνσεις στη μηνιαία καμπύλη διάρκειας. Εφαρμόζοντας τη διαδικασία που έχει παρουσιαστεί για την κατασκευή της καμπύλης διάρκειας προκύπτει ένα διάγραμμα της μορφής:



Σχήμα Β.2-6: Καμπύλη διάρκειας παροχής

Χαρακτηριστικά μεγέθη παροχής που προκύπτουν από τη καμπύλη διάρκειας είναι:

- *Κανονική υψηλή παροχή*: παροχή πάνω από την οποία υπάρχουν τιμές για το  $\frac{1}{4}$  του χρόνου
- *Μέση παροχή*: παροχή που προκύπτει με τη διαίρεση του συνολικού όγκου νερού που διέρχεται από τη διατομή διά του χρόνου
- *Διάμεσος παροχή*: παροχή που αντιστοιχεί στο 50% του χρόνου
- *Κανονική χαμηλή παροχή*: παροχή πάνω από την οποία παρουσιάζονται τιμές για τα  $\frac{3}{4}$  του χρόνου
- *Ελάχιστη παροχή*: η ελάχιστη τιμή της παροχής που παρατηρείται

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ποσοστό του έτους μικρότερο του 10% εμφανίζονται κατά βάση πλημμυρικές παροχές. Η λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου σε χαμηλές παροχές, που είναι συνήθως διαθέσιμες σε ποσοστά μεγαλύτερα του 80% του έτους, εξαρτάται κυρίως από τη μορφή της εξεταζόμενης καμπύλης. Εξαρτάται επίσης από τον μηχανολογικό εξοπλισμό που θα επιλεγεί και την υποχρέωση της οικολογικής παροχής

Ακόμα το εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της καμπύλης διάρκειας παροχής και των αξόνων είναι ίσο με τον όγκο νερού που διέρχεται από τη διατομή του υδατορεύματος σε συγκεκριμένο χρόνο. Έτσι, η ποσότητα  $V_i(m^3)$  του νερού του ποταμού που διέρχεται από τη θέση υδροληψίας σε κάθε ποσοστό του έτους δίνεται από τη σχέση:

$$V_{ai}(m^3) = \frac{Q_{ai} + Q_{ai+1}}{2} \cdot \frac{ed_{ai+1}(\%) - ed_{ai}(\%)}{100} \cdot 8760 \cdot 3600$$

Στην προηγούμενη σχέση η παροχή  $Q_a$  δίνεται σε  $m^3/s$  ενώ με  $ed_a$  συμβολίζεται το ποσοστό του έτους που είναι διαθέσιμη η συγκεκριμένη τιμή της παροχής. Έτσι, ο συνολικό όγκος νερού που διέρχεται από μια διατομή ( $a$ ) του ποταμού κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι:

$$V_{a,tot}(m^3) = \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{Q_{ai} + Q_{ai+1}}{2} \cdot \frac{ed_{ai+1} - ed_{ai}}{100} \cdot 8760 \cdot 3600 \right)$$

#### B.2.8: Χάραξη της ΚΔΠ σε θέσεις χωρίς μετρήσεις

Ένα από τα προβλήματα που εμφανίζονται πολύ συχνά στην εκτίμηση της διαθεσιμότητας της παροχής σε μια εξεταζόμενη θέση και άρα στην εκτίμηση του υδροδυναμικού της είναι η έλλειψη μετρήσεων παροχής στη συγκεκριμένη θέση και άρα η έλλειψη της καμπύλης διάρκειας. Αυτό είναι συχνό φαινόμενο, αφού οι θέσεις προς υδροηλεκτρική αξιοποίηση είναι συχνά απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες, είτε βρίσκονται σε δευτερεύοντες κλάδους ποταμών και σε μικρά ποτάμια που δεν υπάρχει δίκτυο μέτρησης της παροχής (Παπαντώνης, 2001). Γεννάται λοιπόν πολλές φορές η ανάγκη για μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας από μια θέση στην οποία υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της παροχής σε κάποια άλλη. Απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει η συγκεκριμένη αναγωγή είναι να βρίσκονται οι δύο θέσεις σε υδρολογικά ομοιογενή περιοχή.



Ο ασφαλέστερος τρόπος για να γίνει η μεταφορά της καμπύλης διάρκειας είναι η μέθοδος της εντοπικής ανάλυσης (Μιμίκου, 2006). Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην ανάπτυξη, μέσα σε μια υδρολογικά ομοιογενή περιοχή, ενός ομοιώματος γεωγραφικής μεταβολής των παραμέτρων της καμπύλης διάρκειας. Ως είσοδος στο ομοίωμα χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα κλιματικά, μορφολογικά κλπ χαρακτηριστικά της περιοχής για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις ή είναι εύκολο να μετρηθούν από χάρτες. Με την εντοπική ανάλυση διασφαλίζεται η μεταφορά της πληροφορίας ακόμα και σε σημαντικά απομακρυσμένες περιοχές, ενώ παράλληλα λαμβάνονται υπόψη και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της κάθε θέσης (κλιματικά, μορφολογικά κτλ) στο βαθμό που επηρεάζουν την καμπύλη διάρκειας.

Ιδιαίτερα για τον ελληνικό χώρο έχει αναπτυχθεί εντοπικό ομοίωμα (Μιμίκου και Kaemaki, 1985) για την υδρολογικά ομοιογενή περιοχή της βορειοδυτικής και δυτικής Ελλάδας που ενδιαφέρει ιδιαίτερα για υδροηλεκτρική αξιοποίηση αλλά και γενικά εκμετάλλευση υδατικών πόρων. Για την αντιπροσωπευτική κάλυψη της περιοχής οι μελετητές αξιοποίησαν για τη ρύθμιση του ομοιώματος στοιχεία από έντεκα υδρομετρικούς σταθμούς σε πέντε ποτάμια της περιοχής. Συγκεκριμένα στον Αλιάκμονα, στον Αχελώο, στον Αραχθό, στον Αώο και στον Καλαμά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μελέτη στον ελληνικό χώρο έγινε πάνω στις μηνιαίες καμπύλες διάρκειας παροχής και το καταλληλότερο ομοίωμα που προτείνεται στη βιβλιογραφία (Μιμίκου, 2006) δίνεται από τη σχέση:

$$Q = a - b \cdot D + c \cdot D^2 - d \cdot D^3$$

Η γεωγραφική μεταβολή των τεσσάρων παραμέτρων  $a, b, c, d$  του προηγούμενου κυβικού ομοιώματος από θέση σε θέση προκύπτει και αυτή από εντοπικό ομοίωμα μέσα από την ανάλυση πολλαπλής συσχέτισης της κάθε παραμέτρου με μορφολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής στις θέσεις των σταθμών μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τρία μορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών δηλαδή: η έκταση  $S(km)$  της λεκάνης απορροής, η υψομετρική πτώση  $DZ(m)$  από το υψηλότερο σημείο της λεκάνης στη θέση μέτρησης και το μήκος  $L(km)$  του κυρίου κλάδου του ποταμού από τον υδροκρίτη μέχρι τον κάθε σταθμό μέτρησης. Χρησιμοποιείται ακόμα και ένα κλιματικό χαρακτηριστικό: η μέση ετήσια κατακρήμνιση  $h(mm)$  πάνω στη λεκάνη απορροής.

Τα εντοπικά ομοιώματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Μιμίκου, 2006) για τις παραμέτρους  $a, b, c, d$  των μηνιαίων καμπυλών διάρκειας για όλη τη βορειοδυτική και δυτική Ελλάδα είναι τα εξής:

$$a = 0,011 \cdot h^{0,526} \cdot S^{0,608} \cdot \Delta Z^{0,007} \cdot L^{0,253}$$

$$b = 0,053 \cdot h^{0,511} \cdot S^{0,684} \cdot \Delta Z^{-0,181} \cdot L^{0,278}$$

$$c = 0,010 \cdot h^{0,708} \cdot S^{0,952} \cdot \Delta Z^{-0,315} \cdot L^{0,073}$$

$$d = 4,215 \cdot 10^{-6} \cdot h^{1,157} \cdot S^{1,637} \cdot \Delta Z^{-0,053} \cdot L^{-0,687}$$

Πηγή: *Mimikou και Kaemaki, 1985*

Μια διαφορετική μέθοδος για την αναγωγή της καμπύλης διάρκειας παροχής προτείνεται από τον οργανισμό *State Water Resources Control Board (SWRCB)*, που εδρεύει στην αμερικανική πολιτεία της Καλιφόρνια. Η δεύτερη αυτή μέθοδος λαμβάνει υπόψη για την αναγωγή της καμπύλης διάρκειας τη μεταβολή της επιφάνειας της λεκάνης απορροής και της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης σε σημεία που βρίσκονται εντός της ίδιας και ομοιογενούς υδρολογικής λεκάνης. Η σχέση αναγωγής για την καμπύλη διάρκειας που προτείνεται παρουσιάζεται στη συνέχεια:

$$Q_i = Q_m \cdot \frac{A_i}{A_m} \cdot \frac{h_i}{h_m}$$

Όπου:

- $Q_i, Q_m$ : η τιμή της επιφανειακής απορροής στη θέση αναγωγής  $\langle i \rangle$  και στη θέση μέτρησης  $\langle m \rangle$  σε  $m^3/s$
- $A_i, A_m$ : η επιφάνεια της λεκάνης απορροής στη θέση αναγωγής  $\langle i \rangle$  και στη θέση μέτρησης  $\langle m \rangle$  σε km
- $h_i, h_m$ : η μέση ετήσια βροχόπτωση στη θέση αναγωγής  $\langle i \rangle$  και στη θέση μέτρησης  $\langle m \rangle$  σε mm αντίστοιχα

#### B.2.9: Εκτίμηση πλημμυρικής παροχής

Η ορθή εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής σε μια εξεταζόμενη θέση υδροληψίας του ΜΥΗ είναι εξαιρετικής σημασίας. Η πλημμυρική παροχή συνδέεται με την διαστασιολόγηση του υπερχειλιστή και τον καθορισμό της μέγιστης προβλεπόμενης στάθμης των υδάτων στη θέση του ΥΗΣ, ώστε να προβλεφθεί η επαρκής προστασία του. Ακόμη ο υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής πρέπει να γίνει και για την εξασφάλιση των υπό κατασκευή έργων κατά τη διάρκεια εκτροπής του ρεύματος. Στην περίπτωση ΜΥΗ μικρού ύψους πτώσεως η πλημμυρική παροχή συνοδεύεται με αύξηση της στάθμης απαγωγής και άρα απώλεια παραγόμενης ενέργειας (Παπαντώνης, 2001).

Για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής εφαρμόζονται δύο ειδών μέθοδοι. Η πρώτη κατηγορία αφορά αυτές που βασίζονται στη στοχαστική αξιολόγηση των ετήσιων μεγίστων της επιφανειακής απορροής επί σειρά ετών και η δεύτερη αυτές που βασίζονται στην έννοια της μέγιστης βροχόπτωσης και οι οποίες εφαρμόζονται όταν δεν υπάρχουν επαρκεί μετρημένα στοιχεία μεγίστων παροχών. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναλυθεί η στοχαστική μέθοδος επέκτασης των μετρήσεων.

*Περίοδος επαναφοράς  $T$* , δοθέντος ενός ετήσιου μεγέθους ενός φαινομένου είναι το μέσο χρονικό διάστημα (σε έτη) μέσα στο οποίο το θεωρούμενο υδρολογικό φαινόμενο θα εμφανιστεί μόνο μία φορά με τιμή ίση ή μεγαλύτερη της δοθείσας. Σύμφωνα με τον ορισμό για την ανάλυση μεγίστων τιμών ενός φαινομένου όπως η παροχή ισχύει:

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)}$$

Κατά συνέπεια η πλημμυρική απορροή με περίοδο επαναφοράς  $T$  έτη είναι αυτή που κατά μέσο όρο, τιμή ίση ή μεγαλύτερή της λαμβάνει χώρα κάθε  $T$  έτη. Η

περίοδος επαναφοράς της πλημμυρικής παροχής λαμβάνεται από πίνακες ανάλογα με τη φύση και τη σημασία του εξεταζόμενου έργου. Συνήθως για μικρά υδροηλεκτρικά η περίοδος επαναφοράς λαμβάνεται ίση με 50 ή 100 έτη.

Αν θεωρηθεί ότι το γεγονός της υπέρβασης  $X \geq x$  είναι ανεξάρτητο για κάθε έτος τότε η πιθανότητα μη υπέρβασης του μεγέθους  $x$  στα  $n$  έτη ζωής του έργου του ΜΥΗ είναι:

$$P(X \leq x)_n = (P(X \leq x))^n = (1 - P(X > x))^n$$

Και λόγω της τελευταίας εξίσωσης η πιθανότητα υπέρβασης (έστω και μία φορά) στα  $n$  έτη ζωής του έργου είναι:

$$P(X \geq x)_n = 1 - P(X \leq x)_n = 1 - (1 - P(X > x))^n$$

Η εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης των μετρήσεων προϋποθέτει διαθέσιμες μετρήσεις της επιφανειακής απορροής για περισσότερα έτη, δηλαδή χρονική σειρά της παροχής. Η σειρά που σχηματίζεται από τις μέγιστες παροχές κάθε έτους χαρακτηρίζεται ως ετήσια. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο λόγος για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη τα μέγιστα των υδρολογικών ετών και όχι των ημερολογιακών είναι ότι έτσι εξασφαλίζεται ότι η πλημμυρική απορροή ενός έτους συσχετίζεται με αυτή του προηγούμενου. Από τις διάφορες μεθόδους επέκτασης των πλημμυρικών παροχών παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου της διανομής Gumbel. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η πλημμυρική απορροή  $X_T$ , με περίοδο επαναφοράς  $T$  έτη δίνεται από τη σχέση:

$$X_T = X + K \cdot S_X$$

Όπου:

- $X_T$ , η μέση τιμή της σειρά των ετήσιων πλημμυρικών παροχών
- $S_X$ , η τυπική απόκλιση της σειρά των ετήσιων πλημμυρικών παροχών
- $K$ , η παράμετρος που ορίζεται από την σχέση:

$$K = \frac{Y_n - Y_L}{S_L} \text{ με } Y_n = -\ln \left( \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right)$$

Σημειώνεται ότι οι τιμές των παραμέτρων  $Y_L$  και  $S_L$ , που αφορούν την κατανομή Gumbel, λαμβάνονται από πίνακες συναρτήσεων του πλήθους  $m$  της σειράς των ετήσιων πλημμυρικών παροχών (Παπαντώνης, 2001).

Για πιο γρήγορους υπολογισμούς έχει αναπτυχθεί μια δεύτερη μεθοδολογία που είναι περισσότερο απλή στην εφαρμογή. Σύμφωνα με αυτή, διαθέτοντας την ετήσια χρονοσειρά μεγίστων, ο προσδιορισμός της πλέον πιθανής τιμής της πλημμυρικής επιφανειακής απορροής  $Q_{fT}$  μπορεί να γίνει από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{fT} = Q_{fm} \cdot (1 + 0,80 \cdot \log T)$$

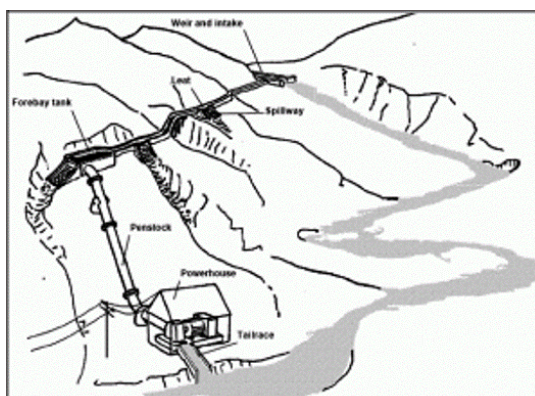
Όπου:

- $Q_{fm}$ , η μέση τιμή της σειρά των ετήσιων πλημμυρικών παροχών
- $T$ , η περίοδος επαναφοράς

## ***B.3: ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ***

### ***B.3.1: Τυπική διάταξη ΜΥΗ***

Στη πράξη συναντώνται δύο βασικές διαμορφώσεις των ΜΥΗ έργων ανάλογα με το μέγεθος της υδραυλικής πτώσης (Παπαντώνης, 2001). Στα ΜΥΗ με σημαντική υδραυλική πτώση ο υδροηλεκτρικός σταθμός διαμορφώνεται σε θέση διακριτή από αυτή των έργων συλλογής και προσαγωγής του νερού. Αντίθετα στα ΜΥΗ με μικρή υδραυλική πτώση (συνήθως μικρότερη από 20m) ο υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να ενσωματωθεί στο φράγμα ή στο έργο υδροληψίας (εφόσον οι συνθήκες είναι ευνοϊκές) και να αποτελέσει ενιαίο συγκρότημα με αυτό. Στη συνέχεια δίνεται μια σχηματική απεικόνιση της τυπικής διάταξης ενός ΜΥΗ τύπου εκτροπής που επιλέγεται για σημαντική τιμή της υδραυλικής πτώσης.



*Σχήμα B.3-1: Αρχή διαμόρφωσης ΜΥΗ εκτροπής*

Στα ΜΥΗ έργα με σημαντική υδραυλική πτώση ο υδροηλεκτρικός σταθμός βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα από το φράγμα – υδροληψία. Έτσι η αξιοποίηση της υψομετρικής διαφοράς μπορεί να γίνει με εκτροπή ολόκληρης ή μέρους της παροχής μέσω του αγωγού προσαγωγής. Σε αρκετές περιπτώσεις ωστόσο για λόγους που έχουν να κάνουν με τη μείωση του συνολικού κόστους του ΜΥΗ, επιλέγεται ο κλειστός αγωγός προσαγωγής να μην ξεκινάει από την υδροληψία του έργου. Σε αυτή τη περίπτωση (σχήμα B.3 – 1) το νερό προσάγεται μέσω ανοικτού αγωγού (διώρυγα ή κανάλι) σε μια δεξαμενή φόρτισης. Από τη δεξαμενή φόρτισης τροφοδοτείται στη συνέχεια ο κλειστός αγωγός πτώσεως μέσω του οποίου το νερό οδηγείται στον υδροστρόβιλο που μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική. Το ενδιαφέρον της συγκεκριμένης διάταξης είναι καθαρά οικονομικό καθώς το κόστος κατασκευής της διώρυγας προσαγωγής είναι πολύ μικρότερο από αυτό του αγωγού πτώσεως.

### ***B.3.2: Βασικές συνιστώσες ΜΥΗ***

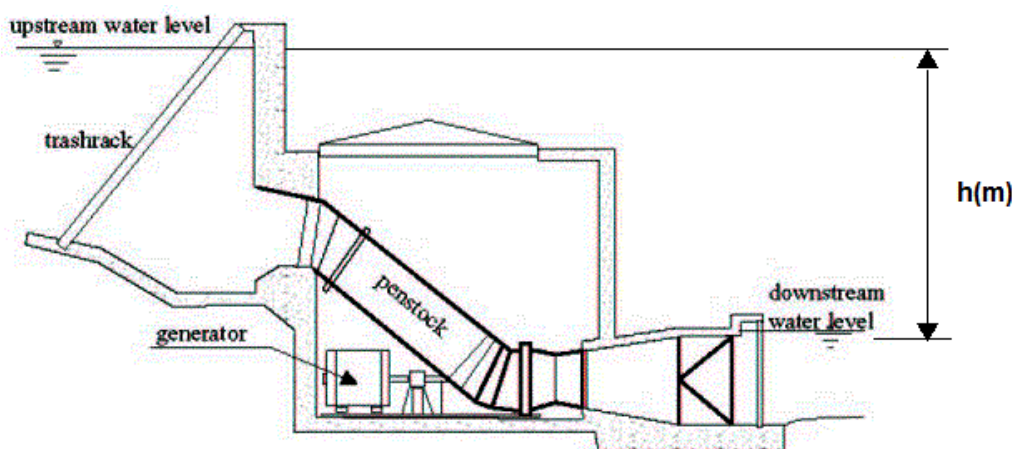
Τα ΜΥΗ αποτελούν πολύπλοκες κατασκευές που περιλαμβάνουν έργα πολιτικού μηχανικού καθώς και ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά (Παπαντώνης, 2001) στις βασικές συνιστώσες των έργων πολιτικού μηχανικού καθώς και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε ένα ΜΥΗ έργο.

Τα έργα πολιτικού μηχανικού σε ένα ΜΥΗ συνήθως περιλαμβάνουν μικρό φράγμα για την εξασφάλιση ομαλών συνθηκών στην υδροληψία ώστε να μην εισέρχονται φερτά υλικά ή αέρας στο σύστημα προσαγωγής. Το φράγμα συνδέεται συνήθως και με άλλες διαμορφώσεις που εξυπηρετούν το έργο ή σχετίζονται με την



Όπου:

- $z_E$  η στάθμη στη δεξαμενή φόρτισης και
- $z_A$  η στάθμη του νερού κατάντι του έργου (διώρυγα απαγωγής).



Σχήμα Β.3-3: Θεωρητική υδραυλική πτώση ΜΥΗ

Λόγω του μεγάλου μεγέθους της δεξαμενής φόρτισης η κινητική ενέργεια του νερού σε αυτή είναι αμελητέα. Έτσι η υδραυλική ισχύς που διατίθεται για μετατροπή σε μηχανική ενέργεια είναι ίση προς:

$$N_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h = \gamma \cdot Q \cdot h$$

Όπου:

- $Q (m^3/s)$  η παροχή όγκου του νερού που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο
- $\rho (kg/m^3)$  η πυκνότητα του νερού
- $g (m/sec^2)$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και
- $\gamma = \rho \cdot g$  σε μονάδες  $N/m^2$  το ειδικό βάρος του νερού.

Η μηχανική ισχύς που ανακτάται όμως τελικά από τον υδροστρόβιλο είναι μικρότερη της  $N_h$  κατά τις υδραυλικές απώλειες στο σύστημα προσαγωγής και στον ίδιο τον υδροστρόβιλο. Οι υδραυλικές απώλειες στο σύστημα προσαγωγής  $\delta h_f$  είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής (ισχύει:  $\delta h_f = k \cdot Q^2$ ) και ως εκ τούτου η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού την οποία ο υδροστρόβιλος καλείται να μετατρέψει σε μηχανική είναι ίση με:

$$H = h - \delta h_f = h - k \cdot Q^2$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα και συμβολίζοντας με  $\eta_{TUR}$  το βαθμό απόδοσης του υδροστρόβιλου η καθαρή μηχανική ισχύς που αποδίδει ο υδροστρόβιλος (λαμβάνοντας υπόψη της απώλειες στο εσωτερικό του) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = \eta_{TUR} \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

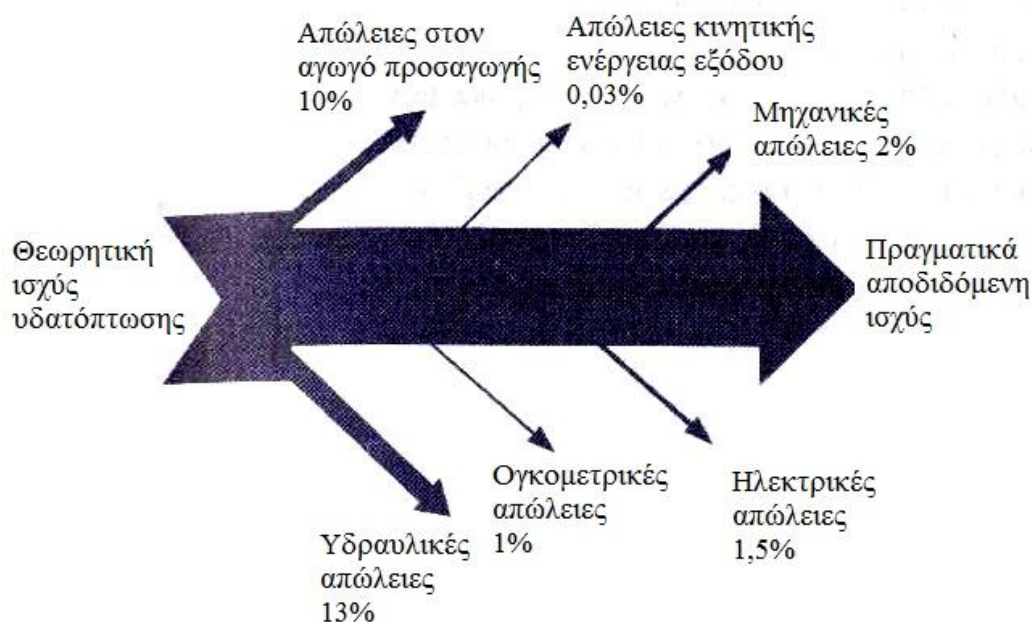
Η κινητήρια ροπή  $M$  που αναπτύσσεται στην στρεφόμενη άτρακτο του υδροστρόβιλου τότε είναι:  $M = N/\omega$  όπου  $\omega (rad/s)$  η γωνιακή ταχύτητα της άτρακτου. Η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τελικά από το ΜΥΗ θα είναι μικρότερη της μηχανικής ισχύος  $N$  που παρουσιάστηκε κατά τις απώλειες της



ηλεκτρικής γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Συμβολίζοντας με  $\eta_{GEN}$  το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας και με  $\eta_{TR}$  αυτόν του μετασχηματιστή η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι ίση με:

$$N_e = N \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{TR}$$

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά η ροή της ενέργειας διαμέσου μιας τυπικής ΜΥΗ εγκατάστασης με τη βοήθεια του διαγράμματος *Shankey*:

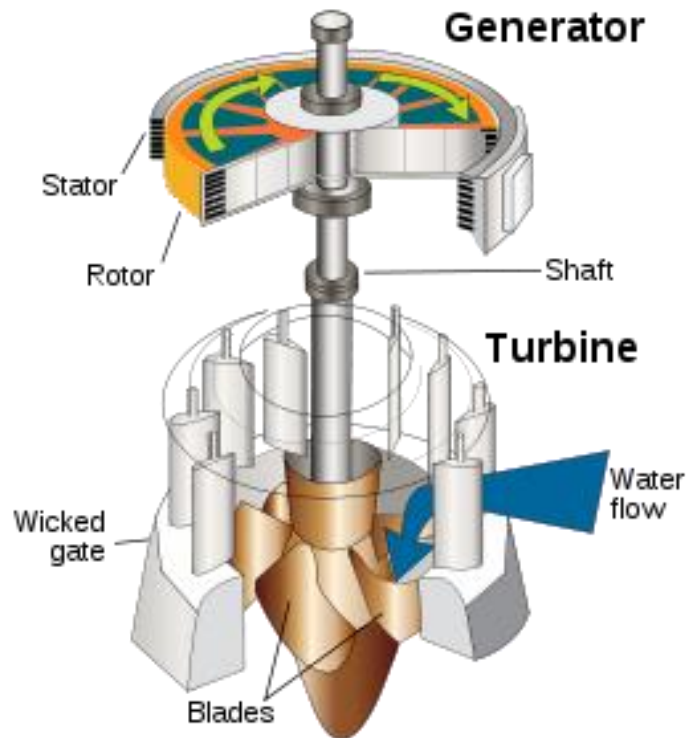


Σχήμα Β.3-4: Τυπικό διάγραμμα *Shankey* ΜΥΗ εγκατάστασης (Καλδέλης και Καββαδίας, 2005)

## **B.4: ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ**

### B.4.1: Αρχή λειτουργίας

Ως υδροστρόβιλος ορίζεται η μηχανή, η οποία μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του υγρού και σταθερής περιστροφικής κίνησης. Η μετατροπή της ενέργειας του διερχόμενου υγρού υπό σταθερή παροχή σε μηχανική ενέργεια λαμβάνει χώρα στο στρεφόμενο μέρος της μηχανής, το οποίο καλείται δρομέας, μέσω της ανάπτυξης της κινητήριας ροπής. Η άτρακτος του δρομέα είναι συζευγμένη με ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της μετατρέπει την μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική. Σημειώνεται, επίσης ότι κάθε υδροστρόβιλος αποτελείται κατασκευαστικά από τρία βασικά μέρη το τμήμα εισόδου της μηχανής, τον δρομέα και το τμήμα εξόδου.



Σχήμα Β.4 -1: Αρχή λειτουργίας υδροστροβίλου

#### B.4.2 : Θεωρητικό ύψος υδροστροβίλου

Στις στροβιλομηχανές ασυμπίεστου ρευστού είναι σύνηθες να εκφράζεται η ολική ενέργεια και πίεση μέσω της αντίστοιχης τιμής σε μέτρα στήλης υγρού από τη σχέση:  $H = P/(\rho \cdot g)$  όπου  $\gamma = \rho \cdot g$  είναι το ειδικό βάρος του ρευστού. Για το λόγο αυτό η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του νερού, εκφρασμένη σε μέτρα στήλης υγρού, που διατίθεται στον υδροστρόβιλο για να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια καλείται *ωφέλιμο ολικό ύψος* και δίνεται από τη σχέση:

$$H_i = H_{oe} - H_{oa}$$

Όπου:

- $H_{oe}$ , το ολικό ύψος στην είσοδο της μηχανής και
- $H_{oa}$ , το ολικό ύψος στην έξοδο της μηχανής αντίστοιχα.

Φυσικά λόγω των απωλειών σε τριβές και στροβιλισμούς στο εσωτερικό της μηχανής μέρος του  $H_i$  δεν μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια αλλά σε θερμότητα που διαφεύγει αναξιοποίητη. Το θεωρητικό υδραυλικό ύψος  $H_u$  του υδροστροβίλου εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του ρευστού που εναλλάσσεται με την μηχανική ροπή στο δρομέα και δίνεται από τη σχέση:

$$H_u = H_{oe} - H_{oa} - \delta h_{fea}$$

Όπου:

- $H_{oe}$ , το ολικό ύψος στην είσοδο της μηχανής
- $H_{oa}$ , το ολικό ύψος στην έξοδο της μηχανής και
- $\delta h_{fea}$ , οι διαφορές απώλειες στο εσωτερικό της μηχανής (υδραυλικές, ογκομετρικές, μηχανικές)



### B.4.3: Διάκριση των υδροστροβίλων

Μια πρώτη διάκριση των υδροστροβίλων μπορεί να γίνει με βάση το *βαθμό αντιδράσεως* της περωτής. Συγκεκριμένα, ο βαθμός αντιδράσεως ενός υδροστροβίλου ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της στατικής πίεσης της ροής από την είσοδο μέχρι την έξοδο του δρομέα του υδροστροβίλου προς τη συνολική μεταβολή της στατικής πίεσης από την είσοδο του δρομέα μέχρι την έξοδο από τη μηχανή:

$$r_{\varepsilon} = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_a}$$

Όπου:

- $P_1, P_2$  η στατική πίεση στις διατομές εισόδου και εξόδου του δρομέα και
- $P_a$  η στατική πίεση στην έξοδο της μηχανής

Με βάση τα παραπάνω όταν η ροή δια μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης ο υδροστροβίλος χαρακτηρίζεται ως υδροστροβίλος αντιδράσεως ή ολικής προσβολής. Αντίθετα όταν ο δρομέας λειτουργεί σε χώρο ομοιόμορφης στατικής πίεσης και ο βαθμός αντιδράσεως είναι μηδενικός ( $r_{\varepsilon} = 0$ ) η μηχανή χαρακτηρίζεται ως υδροστροβίλος δράσεως ή μερικής προσβολής. Μια δεύτερη κατηγοριοποίηση των υδροστροβίλων γίνεται με κριτήριο τη *διαθέσιμη υδραυλική πτώση*, δηλαδή την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του νερού που διατίθεται στη μηχανή. Οι υδροστροβίλοι διακρίνονται έτσι σε μηχανές μεγάλου, μεσαίου και μικρού υδραυλικού ύψους.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων με βάση τα δύο κριτήρια του βαθμού αντίδρασης και του υδραυλικού ύψους.

*Πίνακας B.4-1:  
Διάκριση των υδροστροβίλων*

	<i>Μεγάλο Υδραυλικό Ύψος</i>	<i>Μεσαίο Υδραυλικό Ύψος</i>	<i>Μικρό Υδραυλικό Ύψος</i>
<i>Δράσεως</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pelton</li><li>• Turgo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cross-flow</li><li>• Pelton</li><li>• Turgo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cross-flow</li></ul>
<i>Αντιδράσεως</i>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Francis</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Αξονικής ροής</li><li>• Kaplan</li><li>• Βολβοειδής</li></ul>

Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως κατατάσσονται οι υδροστροβίλοι ακτινικής και μικτής ροής τύπου Francis και οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής όπως ο υδροστροβίλος τύπου Kaplan και άλλες παραλλαγές (πχ σωληνωτός, βολβοειδής κτλ). Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική. Για το λόγο αυτό το τμήμα εισόδου της μηχανής πρέπει να περιβάλλει το δρομέα εξασφαλίζοντας αξονοσυμμετρικές συνθήκες ροής στη διατομή εισόδου.

Οι υδροστροβίλοι δράσεως τώρα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλο υδραυλικό ύψος (μεγαλύτερο των 500 m ΣΥ έως και 1000 m ΣΥ) και μικρή τιμή παροχής του νερού. Σε αυτή τη περίπτωση λόγω της ύπαρξης μεγάλου υδραυλικού ύψους και υψηλής ταχύτητας του νερού η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς επικεντρώνεται σε μια μικρή περιοχή ροής. Για το λόγο αυτό η συγκεντρωμένη ισχύς αξιοποιείται περισσότερο αποδοτικά, αφού κατευθυνθεί μέσω ενός ή περισσοτέρων δεσμών νερού που προσπίπτουν πάνω στο δρομέα, ο οποίος μειώνει σημαντικά την ταχύτητά τους. Χαρακτηριστικοί τύποι των υδροστροβίλων δράσεως είναι ο υδροστροβίλος τύπου Pelton και ο υδροστροβίλος τύπου Turgo. Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή (Παπαντώνης, 2001) της διαμόρφωσης και της λειτουργίας των βασικότερων τύπων υδροστροβίλων.

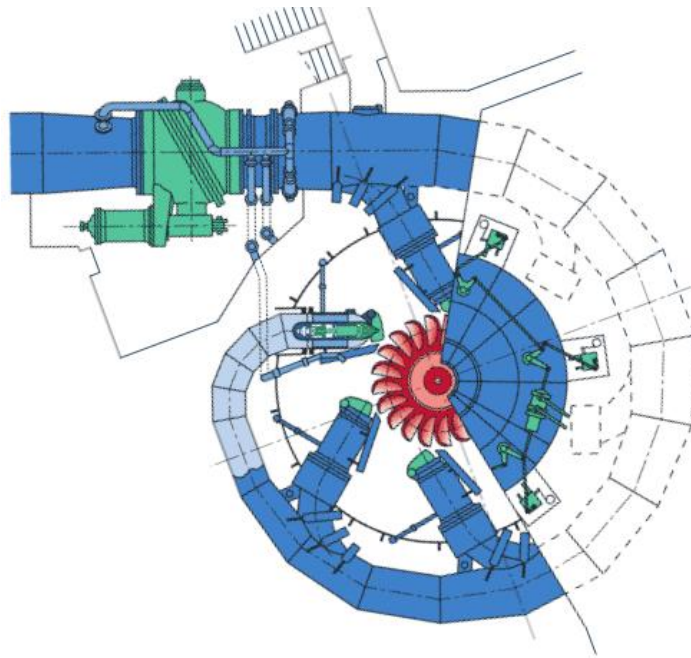
#### B.4.4: Υδροστροβίλος Pelton

Η σχεδίαση ενός υδροστροβίλου τύπου Pelton βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον αριθμό των ακροφυσίων τροφοδοσίας. Σκοπός των ακροφυσίων είναι η μετατροπή της δυνητικής ενέργειας του ρευστού σε κινητική μέσω σχηματισμού κυκλικής δέσμης νερού. Όλα τα ακροφύσια του υδροστροβίλου Pelton βρίσκονται πάνω σε επίπεδο που είναι κάθετο προς τον άξονα του δρομέα. Έτσι κάθε δέσμη προσπίπτει στα σκαφίδια του δρομέα, δίνοντας σε αυτόν ώση, η οποία δημιουργεί τη κινητήρια ροπή στην άτρακτο.

Ο δρομέας της μηχανής είναι τοποθετημένος πάνω από την ελεύθερη στάθμη της δεξαμενής απαγωγής. Έτσι η δέσμη μετά τη πρόσπτωσή της σε αυτόν πέφτει στην ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας απαγωγής λόγω βαρύτητας. Η υψομετρική διαφορά από το σημείο προσβολής της δέσμης μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας απαγωγής αντιπροσωπεύει ενέργεια που δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί από τη μηχανή.

Η διάταξη του άξονα του δρομέα μπορεί να είναι οριζόντια ή κατακόρυφη. Στους υδροστροβίλους Pelton οριζόντιου άξονα υπάρχουν συνήθως ένα ή το πολύ δύο ακροφύσια τροφοδοσίας. Αυτό συμβαίνει γιατί στους υδροστροβίλους πολλαπλών δεσμών είναι προτιμότερη η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε όλα τα ακροφύσια να βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό δεν παρενοχλείται η λειτουργία τους από τα απόνερα των σκαφιδίων, που φέρει κατά την περιφέρειά του ο δρομέας Pelton. Η διαμόρφωση περισσότερων της μίας δεσμών αυξάνει τη πολυπλοκότητα και το κόστος της μηχανής ταυτόχρονα όμως διευρύνεται σημαντικά το εύρος λειτουργίας με υψηλή τιμή του βαθμού απόδοσης. Σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, με τη χρήση ενός υδροστροβίλου Pelton, μπορεί να επιτευχθεί βαθμός απόδοσης έως και 90%.

Η ρύθμιση της παροχής στον υδροστροβίλο Pelton επιτυγχάνεται μέσω βελώνης η οποία μετακινείται κατά τον άξονα του ακροφυσίου μέσω υδραυλικού συνήθως συστήματος. Για την περίπτωση που απαιτείται γρήγορη απόρριψη του φορτίου ενεργοποιείται ο όνυχας εκτροπής της δέσμης του νερού αμέσως μετά τη διατομή εξόδου του ακροφυσίου. Ο όνυχας εκτρέπει την δέσμη του νερού η οποία δεν προσπίπτει πλέον στο δρομέα και στη συνέχεια η παροχή της δέσμης στον αγωγό προσαγωγής ελαττώνεται μέσω κλεισίματος της βελώνης με ρυθμό τέτοιο που αντιστοιχεί σε ανάπτυξη υδραυλικού πλήγματος δεδομένης υπερπίεσης.



Σχήμα B.4-2: Υδροστροβίλος τύπου Pelton

#### B.4.5: Υδροστροβίλος Francis

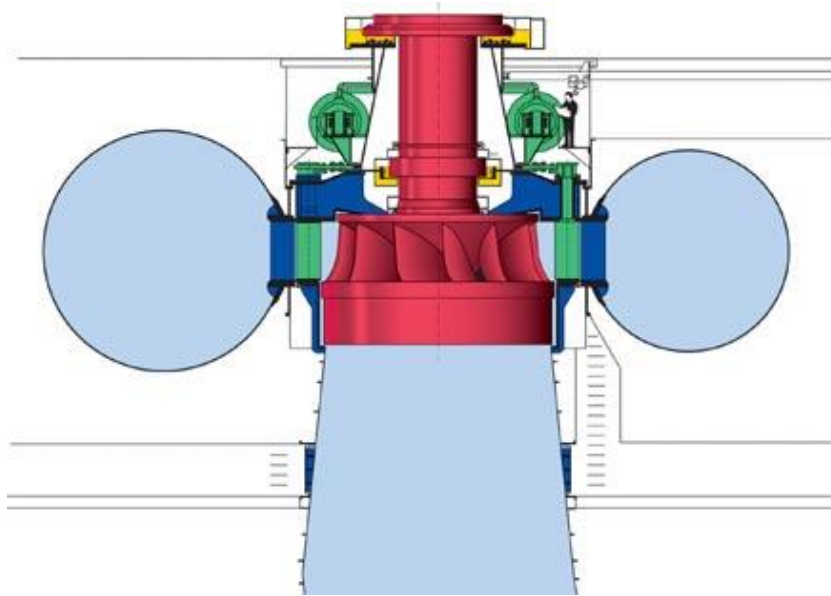
Η λειτουργία του υδροστροβίλου Francis βασίζεται στην αφαίρεση από το δρομέα της συστροφής που έχει η ροή στην είσοδο του. Έτσι το τμήμα εισόδου έχει τη μορφή σπειροειδούς κελύφους προκειμένου να περιβάλλει το δρομέα και να εξασφαλίζει αξονοσυμμετρικές συνθήκες ροής στη διατομή εισόδου της μηχανής.

Η μεταβολή της μηχανικής ισχύος επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής τόσο της διερχόμενης παροχής  $Q$  όσο και της ενέργειας ανά μονάδα μάζας του υγρού που εναλλάσσεται σε μηχανική ενέργεια. Για να είναι δυνατή η ρύθμιση της ισχύος τοποθετείται αξονοσυμμετρική στεφάνη ρυθμιστικών περυγίων (συνήθως ακτινικής ροής) σε θέση ανάντι του δρομέα. Τα ρυθμιστικά περύγια σχεδιάζονται έτσι ώστε στην θέση «κλειστή», όταν δηλαδή το ένα εφάπτεται με το επόμενο κατά μία γενέτειρα, η διατομή διέλευσης του υγρού να μηδενίζεται (σχεδόν) και να επιτυγχάνεται η κράτηση της μονάδας.

Ο περιστρεφόμενος δρομέας αποτελεί το τμήμα της μηχανής που μετατρέπει την ενέργεια του υγρού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή το τμήμα στο οποίο αναπτύσσεται μηχανική κινητήρια ροπή. Τα περύγια του δρομέα των υδροστροβίλων Francis εκτείνονται μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης στην οποία είναι πακτωμένα. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η μηχανική στιβαρότητα της κατασκευής και η αντοχή της στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα περύγια από τη διερχόμενη ροή. Η κωνική διαμόρφωση που προσαρμόζεται στην πλήμνη του δρομέα είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να εμποδίζεται ο σχηματισμός στροβιλισμών κατά τη ροή του νερού.

Τέλος γίνεται μια αναφορά στο τμήμα εξόδου της μηχανής. Η κινητικής ενέργεια στη διατομή εξόδου της μηχανής, η οποία θεωρείται ως απώλεια, είναι της τάξεως των 6-10m/s, και ως εκ τούτου αντιπροσωπεύει σημαντικό ποσό της διαθέσιμης ενέργειας ιδιαίτερα για μικρές υδραυλικές πτώσεις. Για το λόγο αυτό σκοπός του τμήματος εξόδου (αγωγός απαγωγής) είναι η οδήγηση του νερού στη διώρυγα απαγωγής με παράλληλη επιβράδυνση έτσι ώστε η ταχύτητα εξόδου να είναι

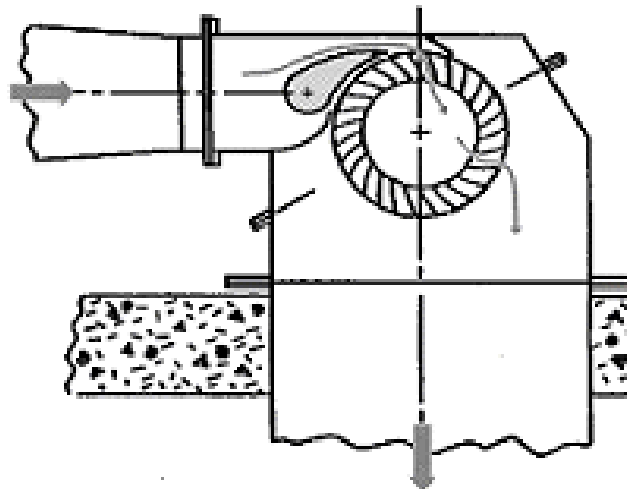
της τάξης των 1 - 2,5 m/s. Στους μικρούς υδροστροβίλους Francis οριζόντιου άξονα ο αγωγός απαγωγής έχει κωνικό σχήμα και καμπυλώνεται κατά 90° μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια της διάφυγας απαγωγής.



Σχήμα B.4-3: Υδροστροβίλος τύπου Francis

#### B.4.6: Υδροστροβίλος Cross flow

Ο υδροστροβίλος Cross-flow (ή Banki) δημιουργήθηκε για τη διαχείριση μεγαλύτερων παροχών νερού και μικρότερου υδραυλικού ύψους, συγκριτικά με τον υδροστροβίλο Pelton. Ο υδροστροβίλος cross-flow χρησιμοποιεί ένα ορθογωνικής διατομής ακροφύσιο μεγαλύτερου μήκους, που οδηγεί το νερό καμπυλωτά σε έναν κυλινδρικού σχήματος δρομέα. Το νερό επιβραδύνεται σε δύο στάδια, συναντώντας τα περύγια του δρομέα δύο φορές, καθώς διέρχεται σε αυτόν οριζόντια. Η σχεδίαση μεγαλύτερου μήκους, όσον αφορά το δρομέα και το ακροφύσιο εισόδου, αυξάνει τη χωρητικότητα για παροχή του υδροστροβίλου, επιτρέποντας έτσι τη διαχείριση μικρότερων τιμών υδραυλικού ύψους. Ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου Cross-flow, κυρίως λόγω της περισσότερο πολύπλοκης διαδρομής της ροής, κυμαίνεται σε τιμές γύρω στο 65%.



Σχήμα B.4-4: Υδροστροβίλος τύπου Cross flow

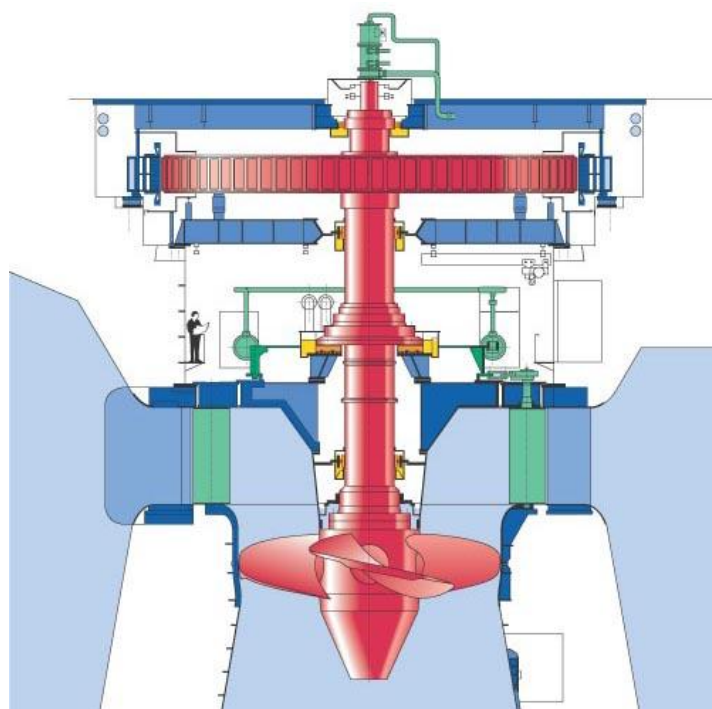
#### B.4.7: Υδροστροβίλοι αξονικής ροής

Οι βασικοί τύποι υδροστροβίλων αξονικής ροής είναι ο τύπος Kaplan και κάποιες παραλλαγές όπως ο βολβοειδής (bulb), ο σωληνωτός (tube) και ο υδροστροβίλος δακτυλίου (Straflo). Για μικρή υδραυλική πτώση ( $H < 20mΣΥ$  περίπου) και μικρή ισχύ αντί της κλασικής διαμόρφωσης αξονικής ροής υδροστροβίλου Kaplan συναντώνται οι τύποι βολβοειδής και σωληνωτός. Ειδικά ο τελευταίος λόγω της κατασκευής του είναι κατάλληλος κυρίως για μικρή ισχύ (μέχρι  $10MW$  περίπου ανάλογα με τον κατασκευαστή).

Στους υδροστροβίλους αυτού του τύπου η ροή στο τμήμα εισόδου γίνεται κατά την αξονική διεύθυνση έτσι ώστε να μειώνεται ο συνολικός όγκος, οι υδραυλικές απώλειες αλλά και το κόστος του έργου. Στην περίπτωση όμως αυτή υπάρχει το πρακτικό πρόβλημα ότι η άτρακτος του δρομέα στην οποία αναπτύσσεται η κινητήρια ροπή βρίσκεται στο εσωτερικό της ροής. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται διαφορετικά στους διάφορους τύπους υδροστροβίλων αξονικής ροής.

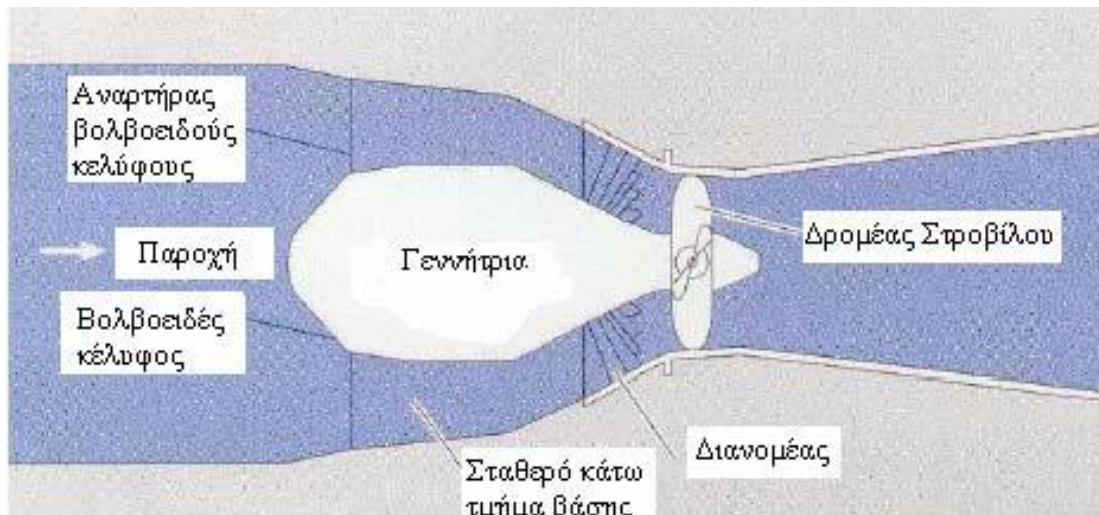
Στους βολβοειδής υδροστροβίλους η γεννήτρια στεγάζεται στο εσωτερικό αξονοσυμμετρικού βολβού, ο οποίος περιρρέεται από τη ροή. Στο κατάντι άκρο του βολβού είναι τοποθετημένος ο δρομέας του υδροστροβίλου ενώ η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων έχει κωνική διάταξη. Αντίστοιχα στην περίπτωση των σωληνωτών υδροστροβίλων η κινητήρια άτρακτος εξέρχεται από το σώμα της μηχανής μέσω καμπύλης που διαμορφώνεται ανάντι ή κατάντι του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό η γεννήτρια βρίσκεται στο εξωτερικό του υδροστροβίλου.

Σχετικά με το τμήμα εισόδου στους σωληνωτούς και τους βολβοειδείς υδροστροβίλους αναφέρεται ότι δεν υπάρχει σπειροειδές κέλυφος και ότι η στεφάνη των οδηγητικών πτερυγίων διατάσσεται είτε κωνικά είτε αξονικά. Ως εκ τούτου τα πτερύγια της δεν αποτελούν πλέον κυλινδρικές επιφάνειες. Τέλος στην περιοχή των μικρών υδροστροβίλων (ισχύος μικρότερης των  $10 MW$ ) συναντώνται και άλλες παραλλαγές των υδροστροβίλων αξονικής ροής.

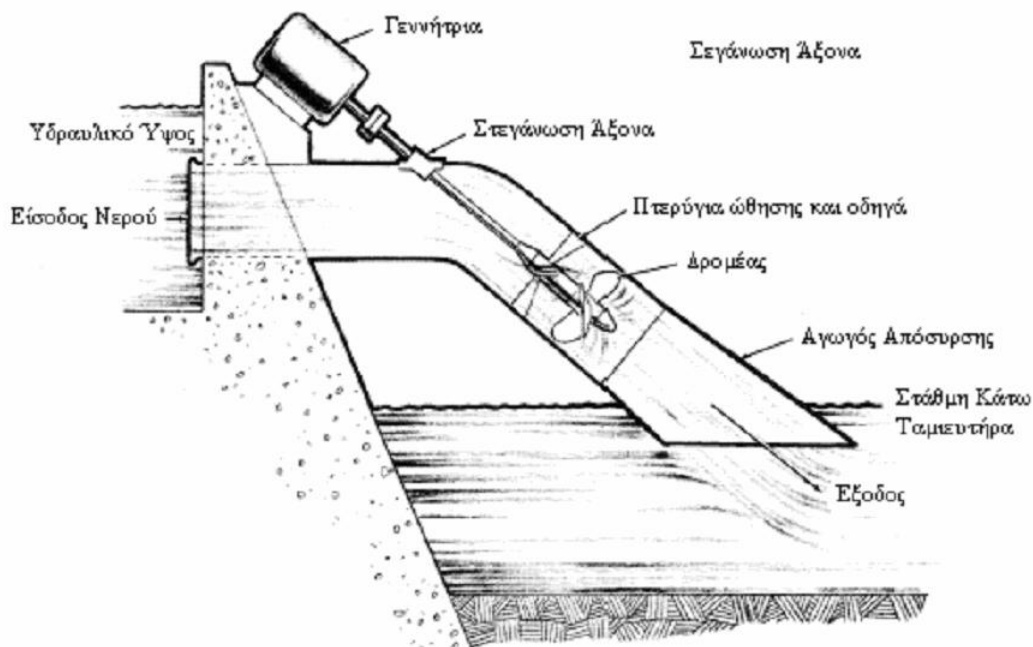


Σχήμα B.4-5: Υδροστροβίλος τύπου Kaplan





Σχήμα Β.4-6: Βολβοειδής υδροστρόβιλος

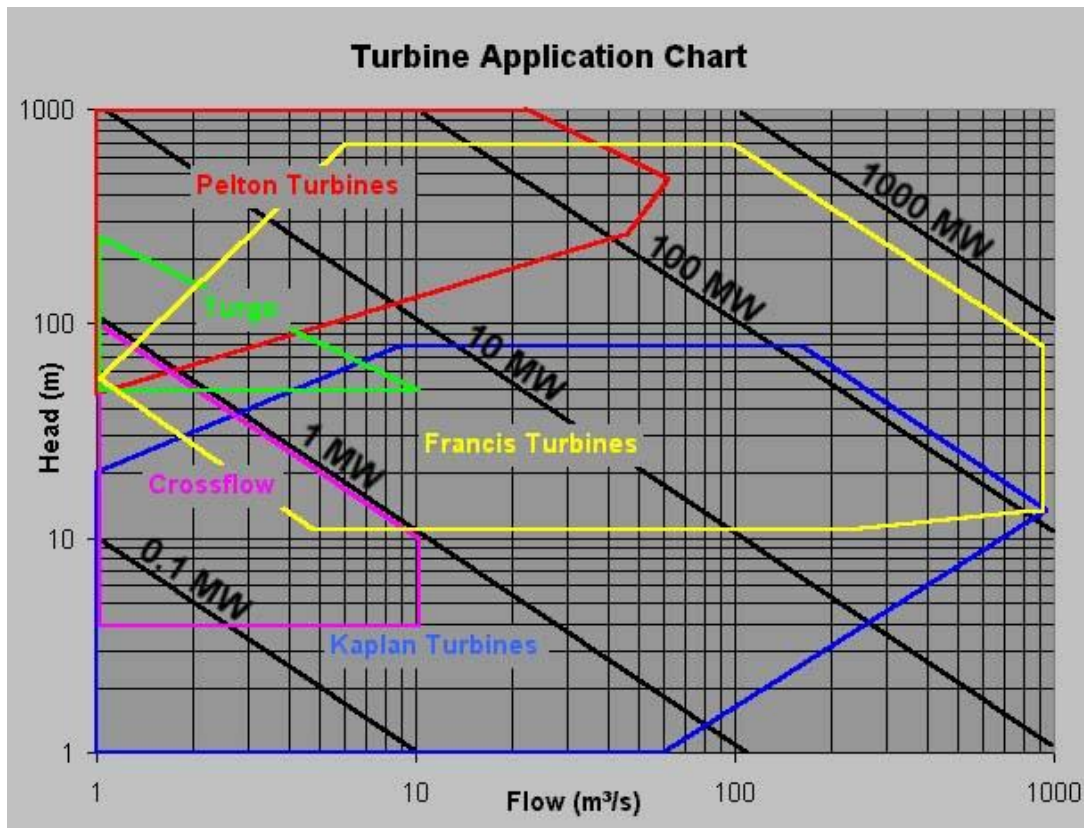


Σχήμα Β.4-7: Σωληνωτός υδροστρόβιλος

#### B.4.8: Επιλογή τύπου υδροστροβίλου

Προκειμένου να επιλεγεί ο πιο αποδοτικός και αξιόπιστος υδροστρόβιλος για δεδομένη τιμή παροχής  $Q$  και υδραυλικής πτώσης  $H$  λαμβάνονται υπόψη οι περιοχές καλής λειτουργίας κάθε τύπου υδροστροβίλου. Η τελική επιλογή για τον υδροστρόβιλο μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης γίνεται από διαγράμματα, τα οποία μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία (Παπαντώνης, 2001).

Σε αρκετές περιπτώσεις η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου δεν είναι μονοσήμαντη και απαιτείται να ληφθούν υπόψη και άλλα κριτήρια όπως το κόστος της μηχανής, το εύρος λειτουργίας, η στιβαρότητα και η ροπή αδράνειας. Στο σημείο αυτό παρατίθεται ενδεικτικά ένα διάγραμμα για την επιλογή του καταλληλότερου τύπου μηχανής με βάση το σημείο ονομαστικής λειτουργίας ( $Q, H$ ):



Σχήμα Β.4-8: Διάγραμμα επιλογής τύπου υδροστροβίλου για δεδομένο  $(Q, H)$

#### B.4.9: Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου

Ο ολικός βαθμός απόδοσης ενός υδροστροβίλου ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ισχύος  $N$  που αποδίδεται στην άτρακτο της μηχανής, προς την θεωρητική ισχύ  $N_i = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$ :

$$\eta = \frac{N}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q} < 1$$

Ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου είναι πάντα μικρότερος της μονάδας λόγω των ενεργειακών απωλειών. Οι ενεργειακές απώλειες περιλαμβάνουν συγκεκριμένα:

- Υδραυλικές απώλειες:  $(\rho \cdot g \cdot Q \cdot \delta h_{fea})$ , στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες τριβής και οι απώλειες κατά μήκος των γραμμών ροής
- Ογκομετρικές απώλειες:  $(\rho \cdot g \cdot \delta Q \cdot H_u)$ , όπου  $\delta Q$  η παροχή που ρέει από τη διατομή εισόδου του δρομέα στην διατομή εξόδου μέσω του ακτινικού διακένου
- Μηχανικές απώλειες: εδράνων ( $N_E$ ) και στρεφόμενου δίσκου ( $N_S$ )
- Διαφεύγουσα κινητική ενέργεια:  $(\rho \cdot g \cdot Q \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g})$

Ο ολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να προκύψει, επίσης, από την επόμενη σχέση ως το γινόμενο μηχανικού, ογκομετρικού και υδραυλικού βαθμού απόδοσης.

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_Q$$

## **B.5: ΑΓΩΓΟΣ ΠΤΩΣΕΩΣ**

### B.5.1: Χαλύβδινοι σωλήνες

Για την κατασκευή του αγωγού πτώσεως σε ένα ΜΥΗ έργο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες διαφόρων τύπων και υλικών ανάλογα με την παροχή και την υδραυλική πτώση της δεδομένης διάταξης (Παπαντώνης, 2001). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων ο αγωγός πτώσεως κατασκευάζεται από χαλυβοσωλήνες καθώς ο συγκεκριμένος τύπος διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως: δυνατότητα συγκόλλησης και διαμόρφωσης των επιμέρους τμημάτων, υψηλή αντοχή και ελαστικότητα, υψηλή διαθεσιμότητα εξαρτημάτων.

Γενικά, διακρίνονται τρεις βασικοί τύποι χαλύβδινων σωλήνων ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής τους: οι εξελάσεως χωρίς ραφή, οι σωλήνες με κατά μήκος ραφή και οι ελικοειδούς ραφής. Στην περίπτωση του αγωγού πτώσεως υδροηλεκτρικών έργων χρησιμοποιούνται συνήθως σωλήνες με κατά μήκος ραφή. Στον επόμενο πίνακα δίνονται οι χάλυβες που είναι κατάλληλοι για τη κατασκευή σωλήνων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή το όριο θραύσεως  $\sigma_B$  ( $kp/mm^2$ ) και το όριο ροής  $\sigma_{0.2}$  ( $kp/mm^2$ ). Σημειώνεται ότι το όριο ροής θεωρείται η μέγιστη επιτρεπόμενη ορθή τάση για τον αγωγό.

Πίνακας B.5-1:

Χάλυβες κατάλληλοι για την κατασκευή σωλήνων

Τύπος	$\sigma_B$ ( $\frac{kp}{mm^2}$ )	$\sigma_{0.2}$ ( $\frac{kp}{mm^2}$ )
<b>St35.8</b>	35-45	23
<b>St45.8</b>	45-55	26
<b>St52</b>	45-58	36
<b>15Mo3</b>	45-58	29
<b>13CrMo44</b>	45-58	30
<b>10CrMo910</b>	45-60	27

Όλοι οι χαλυβοσωλήνες χαρακτηρίζονται από την ονομαστική τους διάμετρο που συμβολίζεται με τα αρχικά  $DN$  (στα γερμανικά με  $NW$ ). Η ονομαστική διάμετρος δίνει την τάξη μεγέθους της εσωτερικής διαμέτρου. Σωλήνες με ίδια ονομαστική διάμετρο έχουν την ίδια εξωτερική διάμετρο ως προς την οποία προσαρμόζονται τα διάφορα εξαρτήματα. Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα προκύπτει από την εξωτερική μειωμένη κατά το διπλάσιο του πάχους του τοιχώματος. Σύμφωνα με την τυποποίηση  $DIN 2448$  (αφορά σωλήνες εξελάσεως) και  $DIN 2458$  (αφορά σωλήνες με κατά μήκος ραφή) για κάθε ονομαστική διάμετρο  $DN$  προβλέπεται μία ελάχιστη τιμή του κανονικού πάχους. Ωστόσο, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή (ονομαστική πίεση, συνθήκες λειτουργίας, δυνατότητα συντήρησης, διάρκεια ζωής κτλ) είναι δυνατή η επιλογή διαφορετικού πάχους τοιχώματος. Ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος οι χαλύβδινοι σωλήνες διακρίνονται σε ελαφρού, μέσου και βαρέως τύπου.

### B.5.2: Υπολογισμός της διαμέτρου

Το κόστος του αγωγού πτώσεως αποτελεί μια σημαντική δαπάνη στον συνολικό προϋπολογισμό του ΜΥΗ έργου. Για το λόγο αυτό η διάμετρος του αγωγού



πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη οικονομοτεχνικά κριτήρια. Ταυτόχρονα όμως η τελική επιλογή της διαμέτρου πρέπει να ικανοποιεί δύο βασικά κριτήρια.

Αρχικά η ταχύτητα της ροής δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μια μέγιστη τιμή, η οποία εξαρτάται από το υλικό του αγωγού, την επένδυσή του, το διακινούμενο υγρό και την περιεκτικότητα του σε στερεά. Ο συγκεκριμένος περιορισμός σχετίζεται με τα προβλήματα διάβρωσης που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια. Επίσης δεν πρέπει να αναπτύσσονται υπερβολικές υπερπιέσεις και υποπίεσεις κατά τα μεταβατικά φαινόμενα (υδραυλικό πλήγμα) και ιδιαίτερα κατά την πλήρη απόρριψη φορτίου.

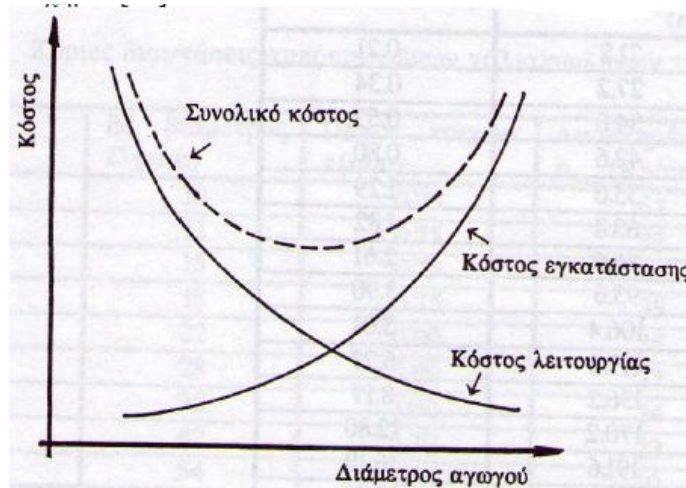
Σχετικά με τα οικονομοτεχνικά κριτήρια που επισημάνθηκαν αξίζει να σημειωθεί η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για την επιλογή της οικονομοτεχνικά βέλτιστης τιμής της διαμέτρου του αγωγού πτώσεως σε ένα υδροηλεκτρικό έργο. Από την θεωρία των σωληνώσεων είναι γνωστό ότι οι γραμμικές υδραυλικές απώλειες είναι αντιστρόφως ανάλογες της διαμέτρου του αγωγού. Επιπλέον, κατά την ενεργειακή ανάλυση των ΜΥΗ γίνεται κατανοητό ότι αύξηση των υδραυλικών απωλειών συνεπάγεται μείωση του διαθέσιμου ύψους πτώσεως  $H(m)$  και άρα μείωση της παραγόμενης ισχύος στον υδροστρόβιλο. Η απώλεια ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε μια οικονομική δαπάνη που είναι ανάλογη του χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης και μπορεί να εκφραστεί λογιστικά ως λειτουργικό κόστος. Για τον υπολογισμό της λειτουργικής δαπάνης θα πρέπει να εκτιμηθεί η τιμή της  $KWh$  και η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Στη συνέχεια, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το κόστος υλικών και εγκατάστασης της σωλήνωσης είναι τόσο μικρότερο όσο μικρότερη είναι η ονομαστική διάμετρος και αντίστροφα. Η συνολική δαπάνη που καταβάλλεται τελικά είναι ίση με το άθροισμα του αρχικού κόστους εγκατάστασης και των λειτουργικών δαπανών σε καθαρή παρούσα αξία. Η βέλτιστη τιμή της διαμέτρου αντιστοιχεί, επομένως, στην ελάχιστη τιμή του συνολικού κόστους του αγωγού πτώσεως.

Η προηγούμενη ανάλυση εφαρμόζεται προκειμένου να επιλεγεί η πλέον συμφέρουσα τιμή της διαμέτρου κατά τη σχεδίαση ενός υδροηλεκτρικού έργου. Στην περίπτωση εγκατάστασης, περισσότερων του ενός, υδροστροβίλων που λειτουργούν παράλληλα θα πρέπει να διερευνάται οικονομοτεχνικά αν συμφέρει η εγκατάσταση ενός κοινού αγωγού πτώσεως με διακλάδωση ή ξεχωριστών αγωγών για κάθε υδροστρόβιλο. Κατά κανόνα σε υδροηλεκτρικά έργα μεσαίας ή μεγάλης υδραυλικής πτώσης προκύπτει περισσότερο συμφέρουσα η επιλογή κοινού αγωγού πτώσεως παρά το σημαντικό κόστος της διακλάδωσης (Παπαντώνης, 2002).

Η καταρχήν επιλογή της βέλτιστης διαμέτρου ωστόσο μπορεί να γίνει από συσχετίσεις που έχουν προκύψει από οικονομοτεχνική ανάλυση και βασίζονται στα κριτήρια που έχουν ήδη αναφερθεί. Λαμβάνοντας υπόψη ένα πρακτικό κανόνα, για περιορισμό των υδραυλικών απωλειών σε ποσοστό 3 έως 5% του ύψους πτώσεως  $h$ , η βέλτιστη διάμετρος του αγωγού δίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση:

$$D(m) = 0,7307 \cdot \frac{N(KW)^{0,43}}{H(m)^{0,63}}$$

Όπου  $N$  η ονομαστική ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού και  $H$  η διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Για τον τελικό καθορισμό της διαμέτρου, επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη εξωτερική διάμετρος από την τιμή που θα προκύψει από τη προηγούμενη σχέση.



Σχήμα Β.5-1: Επιλογή οικονομοτεχνικά βέλτιστης διαμέτρου αγωγού

### Β.5.3: Υπολογισμός πάχους αγωγού

Στη συνέχεια παρατίθεται η μεθοδολογία για τον καθορισμό του απαιτούμενου πάχους  $e$  του αγωγού πτώσεως. Για την περίπτωση των χαλυβοσωλήνων, η οποία εξετάζεται, ο υπολογισμός του πάχους γίνεται έτσι ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη  $\sigma_{επ}$  του υλικού. Στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη η μειωμένη αντοχή κατά τη ραφή συγκόλλησης των σωλήνων (όπου στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται σωλήνες με ραφή, είτε διαμήκη είτε ελικοειδή) μέσω ενός συντελεστού  $k_2$  καθώς και ένας συντελεστής ασφαλείας  $k_1$ . Τέλος η τιμή που προκύπτει προσαυξάνεται ώστε να ληφθεί υπόψη ενδεχόμενη διάβρωση του σωλήνα ανάλογα με την εφαρμογή, τη φύση του διακινούμενου υγρού, τη διάρκεια ζωής και τη δυνατότητα προσπέλασης για επισκευή και συντήρηση. Ακόμα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη ιδιαίτερη καταπόνησή του αγωγού κατά τη φάση της μεταφοράς και της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα το απαιτούμενο πάχος του σωλήνα όταν υπόκειται σε εσωτερική στατική πίεση υπολογίζεται ως εξής:

$$e = e_0 + e_1 + e_2$$

Όπου:

- $e_0$ , το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση λόγω της εσωτερικής υπερπίεσης να μην υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση του υλικού του σωλήνα που δίνεται από τη σχέση:

$$e_0 = \frac{D \cdot P_{max}}{2 \cdot k_2 \cdot \frac{\sigma_{επ}}{k_1}}$$

- $D$ , η τυποποιημένη εξωτερική διάμετρος του αγωγού
- $P_{max}$ , η εσωτερική πίεση προς την εξωτερική
- $k_2$ , συντελεστής που εκφράζει την αντοχή της ραφής
- $k_1$ , συντελεστής ασφαλείας
- $e_1$  η ανοχή για την ανομοιομορφία του πάχους του ελάσματος από το οποίο κατασκευάζεται ο σωλήνας
- $e_2$  η ανοχή για ενδεχόμενη φθορά ή διάβρωση

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη περίπτωση υδροηλεκτρικών έργων μεγάλου ύψους πτώσεως θα πρέπει να εξετάζεται η κατασκευή αγωγού με μη ενιαία διάμετρο και φυσικά μη ενιαίο πάχος, ως πλέον συμφέρουσα οικονομοτεχνική επιλογή (Παπαντώνης, 2001).

## **B.6: ΔΙΩΡΥΓΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ**

### B.6.1: Κλίση της διώρυγας προσαγωγής

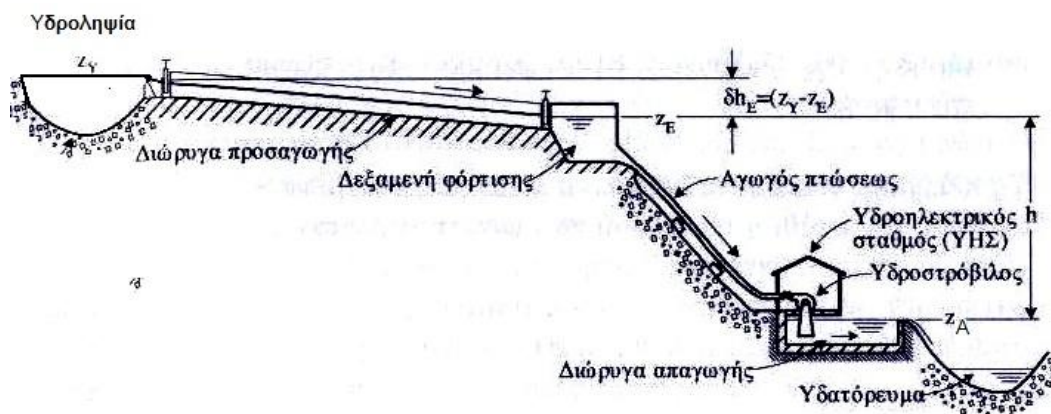
Ο κύριος αγωγός προσαγωγής είναι σε αρκετές περιπτώσεις σκόπιμο να αποτελείται από ανοικτό αγωγό ή διώρυγα προσαγωγής. Η επιλογή της διώρυγας προσαγωγής έναντι κλειστού αγωγού είναι θέμα καθαρά οικονομικό καθώς το κόστος κατασκευής της είναι σημαντικά χαμηλότερο.

Σκοπός της διώρυγας προσαγωγής είναι να μεταφέρει το νερό από την υδροληψία του έργου στη δεξαμενή φόρτισης με ομοιόμορφη ροή. Ως εκ τούτου η κλίση του πυθμένα της διώρυγας είναι ίση με τη κλίση της γραμμής ενέργειας για λειτουργία του ΥΗΣ σε πλήρες φορτίο. Στην επόμενη ανάλυση συμβολίζεται με  $z_Y$  η στάθμη του νερού στην αρχή της διώρυγας και με  $z_E$  η στάθμη του νερού στο άκρο της διώρυγας, δηλαδή στη δεξαμενή φόρτισης. Η υψομετρική διαφορά  $z_Y - z_E$  εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του νερού που δαπανάται στις υδραυλικές απώλειες της ροής στη διώρυγα, η οποία είναι ίση με:

$$\delta Z = z_Y - z_E = I \cdot L$$

Όπου:

- $L$ , το ανεπτυγμένο μήκος της διώρυγας και
- $I$ , η μέση τιμή της κλίσης της



Σχήμα B.6-1: Υδραυλικές απώλειες στη διώρυγα προσαγωγής

Έτσι σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα (Παπαντώνης, 2001) η θεωρητική υδραυλική πτώση  $h$  της διάταξης του ΜΥΗ είναι:

$$h = (z_E - z_A) - \delta h_E = (z_Y - z_A) - I \cdot L - \delta h_E$$

Όπου  $\delta h_E$  είναι οι υδραυλικές απώλειες της ροής στη δεξαμενή φόρτισης οι οποίες οφείλονται κυρίως στην εσχάρα ανάντι του στομίου εισόδου του αγωγού πτώσεως. Από την προηγούμενη σχέση γίνεται εμφανές ότι με δεδομένη τη διαφορά

$z_Y - z_A$  και το ανεπτυγμένο μήκος της διώρυγας, όσο μειώνεται η κλίση της διώρυγας αυξάνεται η υδραυλική πτώση και άρα η παραγόμενη ενέργεια. Για το λόγο αυτό η κλίση της διώρυγας πρέπει να είναι μικρή (ενδεικτική τάξη μεγέθους  $I = 0,001 - 0,002$ ). Από την άλλη σύμφωνα με την εξίσωση κατά Manning η μέση ταχύτητα της ροής σε ελεύθερη επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$c = \frac{1}{n} \cdot R_H \cdot I^{1/2}$$

Όπου  $n$  ο συντελεστής του Manning και  $R_H$  η υδραυλική ακτίνα που προκύπτει από το λόγο της διατομής της διώρυγας  $A$  προς την βρεχόμενη περίμετρο  $P$ . Εκφράζοντας τώρα την παροχή  $Q$  στην εγκάρσια διατομή  $A$  σε σχέση με την υδραυλική ακτίνα  $R_H$  προκύπτει η σχέση:

$$Q = c \cdot A = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

Από τις προηγούμενες σχέσεις γίνεται σαφές ότι όσο μειώνεται η κλίση της διώρυγας προσαγωγής τόσο μειώνεται και η μέση ταχύτητα της ροής με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απαιτούμενη διατομή και το κόστος της διώρυγας. Επομένως ο καθορισμός της κλίσης της διώρυγας προσαγωγής αποτελεί τελικά πρόβλημα καθαρά οικονομοτεχνικό. Ένα άλλο κριτήριο για τον καθορισμό της κλίσης της διώρυγας προκύπτει από το ότι η μέση ταχύτητα της ροής δεν πρέπει να είναι μικρότερη από  $0,3 - 0,5 \text{ m/sec}$  έτσι ώστε να μην κατακάθονται στον πυθμένα της τα αιωρούμενα σωματίδια που διέφυγαν από τον εξαμμωτή της υδροληψίας και τα οποία θα πρέπει να παγιδευτούν στη δεξαμενή φόρτισης.

#### B.6.2: Χάραξη της διώρυγας προσαγωγής

Η χάραξη της διαδρομής της διώρυγας προσαγωγής γίνεται κατ αρχή σε χάρτη μικρής κλίμακας (πχ 1:5000) αφού προηγουμένως έχει καθοριστεί η κλίση της. Η διώρυγας προσαγωγής θεωρείται ότι ακολουθεί ουσιαστικά την ισοϋψή καμπύλη δεδομένου ότι η κλίση της είναι πολύ μικρή. Η τελική διαδρομή της διώρυγας χαράσσεται για μία μελέτη σε τοπογραφικό χάρτη (κλίμακα 1:200) και συνοδεύεται με λεπτομέρειες εγκάρσιων διατομών. Η διώρυγα προσαγωγής έχει σε όλο το μήκος της ομοιόμορφη κλίση και εγκάρσια διατομή.

### **B.7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΥΗ**

#### B.7.1: Οικονομική βιωσιμότητα και χρηματοδοτική ανάλυση

Σε κάθε τεχνικό έργο ο πλέον αυτονόητος έλεγχος από τη σκοπιά του μηχανικού είναι ο τεχνολογικός. Με δεδομένη την τεχνολογική δυνατότητα και αποδοχή ο μηχανικός ελέγχει την οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Το έργο κρίνεται ως οικονομικά βιώσιμο αν η συνολική οικονομική αξία των πάντως είδους ωφελειών που θα προκύψουν από το έργο σε όλο τον κύκλο ζωής του είναι μεγαλύτερη από τις συνολικές δαπάνες για τη κατασκευή, τη λειτουργία και την τελική αποκατάσταση των επιπτώσεων από τυχόν ζημιές του έργου.

Κατά κανόνα η υλοποίηση του έργου προϋποθέτει χρηματικές ροές πριν την εισροή ωφελειών. Η οικονομική βιωσιμότητα επομένως δεν συνεπάγεται και χρηματοδοτική δυνατότητα, δηλαδή εξασφάλιση αποταμιευτικού κεφαλαίου

(μετρητών) για την κάλυψη όλων των εξόδων στη διάρκεια ζωής του έργου. Για το λόγο αυτό η οικονομοτεχνική ανάλυση μετά την ολοκλήρωση των βελτιστοποιήσεων, συμπληρώνεται με την χρηματοδοτική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο χρηματοδότησης του έργου.

Η εγκατάσταση και η εκμετάλλευση ενός ΜΥΗ έργου αποτελεί μια επένδυση, δηλαδή μια δραστηριότητα, κατά την οποία δεσμεύονται οικονομικοί πόροι με προσδοκία κάποιων ωφελειών στο μέλλον. Η οικονομοτεχνική ανάλυση ενός ΜΥΗ έργου έχει επομένως ως αντικείμενο την εξέταση της οικονομικής βιωσιμότητας της συγκεκριμένης επένδυσης. Επιπλέον επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση και την κατάταξη των πιθανών σεναρίων σχεδίασης του ΜΥΗ και άρα τον προσδιορισμό της βέλτιστης διάταξης.

#### B.7.2: Χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης

Για την οικονομική αξιολόγηση ενός τεχνικού έργου είναι απαραίτητο να οριστεί ο χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης. Σε περιπτώσεις σύγκρισης εναλλακτικών δραστηριοτήτων, ο χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης θα πρέπει να είναι ίδιος για όλες τις δραστηριότητες και να αντιστοιχεί, κατ ελάχιστον, στη διάρκεια κύκλου ζωής του έργου ή στη προσδοκώμενη διάρκεια της επιχειρηματικής δραστηριότητας του χρηματοδότη.

Στην περίπτωση των ΜΥΗ η διάρκεια ζωής του έργου είναι της τάξεως των 15-20 ετών καθώς τόση είναι η διάρκεια ζωής του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Ωστόσο η διάρκεια ζωής των έργων πολιτικού μηχανικού είναι τουλάχιστον 50 χρόνια. Για το λόγο αυτό στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου και ανάλογα με τις συνθήκες θα πρέπει να αποφασισθεί είτε η ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είτε ή πλήρης ανακατασκευή του.

#### B.7.3: Βασικές έννοιες οικονομικής ανάλυσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες της οικονομικής ανάλυσης (Παπαντώνης, 2001), οι οποίες είναι απαραίτητο να είναι οικείες, για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας ενός υδροηλεκτρικού έργου.

- *Επιτόκιο δανεισμού*: Το επιτόκιο δανεισμού υπεισέρχεται στη χρηματοδοτική ανάλυση, καθώς εκφράζει την ποσοστιαία προσαύξηση που πρέπει να καταβληθεί στο δανειοδότη (π.χ. την τράπεζα), για το ποσό του δανείου με το οποίο καλύπτεται μέρος της συνολικής επένδυσης. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση και οικονομική πολιτική του κράτους.
- *Προεξοφλητικό επιτόκιο*: Το προεξοφλητικό επιτόκιο λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της σημερινής αξίας ενός χρηματικού ποσού που θα δαπανηθεί ή θα εισπραχθεί στο μέλλον και χρησιμοποιείται στην ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης. Συνήθως λαμβάνεται υψηλότερο από το επιτόκιο δανεισμού, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι οικονομικές αβεβαιότητες και η αβεβαιότητα της παραγωγής κατά τη διάρκεια ζωής και λειτουργίας του έργου.
- *Πληθωρισμός*: Ως πληθωρισμός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο αύξησης (θετικός πληθωρισμός) ή μείωσης (αρνητικός πληθωρισμός) των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών με το πέρασμα του χρόνου, κατά τρόπο ανομοιόμορφο για κάθε ένα από αυτά. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται τόσο από την κατάσταση της εθνικής οικονομίας όσο

και τις διεθνείς εξελίξεις. Γενικά πάντως στις εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας, η εξέλιξη του πληθωρισμού είναι δύσκολο να προβλεφθεί, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής που τις χαρακτηρίζει.

- *Αναγωγή σε παρούσα αξία:* Λόγω των επιτοκίων, η σημερινή (ή παρούσα) αξία  $A_0$  ενός ποσού χρημάτων  $A_n$  το οποίο θα εισπραχθεί (ή θα δαπανηθεί) μετά από  $n$  χρόνια δίνεται από τη σχέση:  $A_0 = A_n / (1 + r)^n$  στην οποία με  $r$  συμβολίζεται το προεξοφλητικό επιτόκιο.

#### B.7.4: Κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται (Παπαντώνης, 2001) οι τεχνικές που εφαρμόζονται προκειμένου να προσδιοριστεί η οικονομική βιωσιμότητα μίας ΜΥΗ εγκατάστασης που γίνεται με τη σκοπιά του ιδιώτη επενδυτή.

- *Κριτήριο καθαρής παρούσας αξίας (NPV)*

Η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης (*Net Present Value*) εκφράζεται από τη διαφορά της παρούσας αξίας του αθροίσματος των εσόδων μείον την παρούσα αξία του αθροίσματος των εξόδων και δαπανών, δηλαδή:

$$NPV = B_0 - C_0 = \sum_{j=0}^n \left[ \frac{B_j}{(1+r)^j} \right] - \sum_{j=0}^n \left[ \frac{C_j}{(1+r)^j} \right]$$

Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας να είναι θετική. Έργα με αρνητική παρούσα αξία πρέπει οπωσδήποτε να απορρίπτονται. Ο δείκτης αυτός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την κατάταξη διαφόρων εναλλακτικών λύσεων κατά σειρά οικονομικής βιωσιμότητας. Το πλέον αποδοτικό είναι αυτό στο οποίο αντιστοιχεί η υψηλότερη τιμή του *NPV*.

- *Κριτήριο λόγου εσόδων προς έξοδα (BCR)*

Ο λόγος εσόδων προς έξοδα (*Benefit to Cost Ratio*) εκφράζει το πηλίκο του αθροίσματος  $B_0$  των εσόδων καθ' όλη τη διαχειριστική περίοδο  $n$  ετών (ανηγμένα σε παρούσα αξία), προς το άθροισμα των εξόδων  $C_0$  (ανηγμένων επίσης σε παρούσα αξία), δηλαδή:

$$BCR = \frac{B_0}{C_0} = \frac{\sum_{j=0}^n \left[ \frac{B_j}{(1+r)^j} \right]}{\sum_{j=0}^n \left[ \frac{C_j}{(1+r)^j} \right]}$$

Στην οποία με  $B_j$  και  $C_j$  συμβολίζονται τα ετήσια έσοδα και έξοδα κατά το έτος  $j$  μετά την έναρξη της επένδυσης και με  $r$  το μέσο επιτόκιο προεξόφλησης. Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει ο λόγος *BCR* να είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Το κριτήριο αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή του, αφού μία επένδυση με υψηλότερη τιμή του *BCR* δεν αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο όφελος, δεδομένου ότι δεν αποδίδει την τάξη των μεγεθών (ως λόγος μεγεθών). Για το λόγο αυτό πρέπει να συνοδεύεται πάντα με την εξέλιξη του αριθμητή του κλάσματος που το εκφράζει.

- *Κριτήριο της περιόδου αποπληρωμής*

Η διάρκεια αποπληρωμής εκφράζει το πλήθος των ετών που απαιτούνται ώστε τα αναμενόμενα καθαρά έσοδα (έσοδα μείον τα λειτουργικά έξοδα) να αποπληρώσουν το ποσό της επένδυσης. Συνήθως υπολογίζεται χωρίς την αναγωγή των διαφόρων ποσών σε παρούσα αξία. Το κριτήριο αυτό δεν επιτρέπει την κατάταξη διαφόρων υδροηλεκτρικών έργων κατά σειρά οικονομικής απόδοσης, καθώς δε λαμβάνει υπόψη την απόδοση της επένδυσης, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής.

- *Κριτήριο της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης (IRR)*

Στο κριτήριο του λόγου εσόδων προς έξοδα (*BCR*) και της καθαρής παρούσας αξίας τα διάφορα μεγέθη ανάγονται στην παρούσα αξία τους ώστε να είναι συγκρίσιμα από οικονομικής πλευράς. Σημαντικό ρόλο στην αναγωγή αυτή παίζει η τιμή του επιτοκίου  $r$ . Όσο η τιμή του επιτοκίου  $r$  αυξάνει τόσο μειώνεται η τιμή των *BCR* και *NPV* και κινδυνεύει η επένδυση να αποδειχθεί ως μη οικονομικά βιώσιμη.

Ως εσωτερική απόδοση μίας επένδυσης ορίζεται η τιμή του επιτοκίου *IRR* (Internal Rate of Return) για την οποία η καθαρή παρούσα αξία γίνεται μηδενική. Δεδομένου ότι η τιμή του επιτοκίου  $r$  με το οποίο γίνονται οι αναγωγές στην παρούσα αξία είναι ένα μέγεθος μακροοικονομικό και ενδέχεται να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, το κριτήριο της εσωτερικής απόδοσης εκφράζει το πόσο κινδυνεύει να ανατραπεί η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου λόγω μεταβολής των επιτοκίων.

Ο υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής απόδοσης *IRR* γίνεται με δοκιμές, δηλαδή υπολογίζεται η καθαρή παρούσα αξία *NPV* για διάφορες τιμές του επιτοκίου  $r$ , οπότε η τιμή της εσωτερικής απόδοσης *IRR* είναι αυτή για την οποία επιτυγχάνεται  $NPV = 0$ .

## ***B.8: ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ*** (Γιαννάκογλου, 2006)

### ***B.8.1: Βασικά γνωρίσματα εξελικτικού αλγορίθμου***

Από τη δεκαετία του 1990 και έκτοτε, η γεωμετρική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και το προσιτό κόστος των μεγάλων και γρήγορων υπολογιστών συνετέλεσαν στην ευρεία αποδοχή και χρήση των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης με έναν από τους βασικότερους εκπροσώπους τους εξελικτικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης (*Evolutionary Algorithms, EA*). Βασικό στοιχείο που οδήγησε στη γρήγορη και ευρεία επικράτησή τους ήταν αφενός το ενδιαφέρον, μη-μαθηματικό υπόβαθρο τους, η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης και, κυρίως, η δυνατότητά τους (ως στοχαστική μέθοδος) να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των *EA* είναι ότι, πρακτικά, σε ένα νέο πρόβλημα η χρήση τους είναι γενικά άμεση χωρίς τις παρεμβάσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης που απαιτούν οι αιτιοκρατικές μέθοδοι, αν και αναμφισβήτητα η γνώση του προβλήματος και η χρήση πληροφορίας από αυτό μέσω ειδικών τελεστών επιταχύνει το ρυθμό σύγκλισης. Παρόλα αυτά, βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων.

Βασικό στοιχείο των *EA* είναι ότι χειρίζονται πληθυσμούς υποψηφίων λύσεων και όχι μία μεμονωμένη λύση σε κάθε επανάληψη, όπως άλλες στοχαστικές μέθοδοι. Οι *EA*, ενώ αρχικά αναπτύχθηκαν για την επίλυση προβλημάτων ενός στόχου, με κατάλληλες μετατροπές μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλών στόχων και μάλιστα υπερτερούν ως προς αυτό το θέμα σε σχέση με άλλες μεθόδους λόγω του γεγονότος ότι χειρίζονται έναν πληθυσμό ατόμων και, με την ολοκλήρωσή τους, αποδίδουν ένα σύνολο λύσεων.

Με τον όρο «εξέλιξη» χαρακτηρίζουμε την αυτόματη διαδικασία της προσαρμογής κάθε συστήματος στο περιβάλλον. Ο όρος «περιβάλλον» περιλαμβάνει το σύνολο των εξωτερικών συνθηκών που επηρεάζουν το σύστημα. Οι *EA* είναι υπολογιστικά μοντέλα τα οποία με χρήση αντίστοιχης με τη φύση διαδικασίας προσαρμογής στο περιβάλλον, επιλύουν προβλήματα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούν στοχαστικούς μηχανισμούς εξέλιξης προερχόμενους από τη φύση και βασίζονται στις αρχές εξέλιξης των ειδών όπως αυτές διατυπώθηκαν αρχικά από το Δαρβίνο, περί το 1960. Οι *EA* προσομοιώνουν μερικώς και με απλουστευμένο τρόπο την εξέλιξη των φυσικών πληθυσμών. Σύμφωνα με τη θεωρία του Δαρβίνου, τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την απόκτηση πόρων όπως στέγη, τροφή και για την προσέλκυση συντρόφου. Τα επιτυχημένα άτομα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγηθούν σε αναπαραγωγή και να διαωμισθούν. Αυτή η φυσική επιλογή, σημαίνει ότι τα γονίδια των επιτυχημένων ατόμων ή των ατόμων που έχουν προσαρμοσθεί καλύτερα στο περιβάλλον επιβιώνουν και με την πάροδο των γενεών τα χαρακτηριστικά τους μεταφέρονται σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων. Ο συνδυασμός καλών χαρακτηριστικών από διαφορετικούς επιτυχημένους γονείς ενδεχόμενα να παράγει απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον τρόπο αυτό οι φυσικοί πληθυσμοί εξελίσσονται και προσαρμόζονται στο εκάστοτε περιβάλλον.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ώστε να χαρακτηριστεί εξελικτικός:

- Να χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων τα οποία εξελίσσονται συγχρόνως, αντί μεμονωμένων ατόμων
- Η εξέλιξη του πληθυσμού από γενιά σε γενιά (δηλαδή από επανάληψη σε επανάληψη αξιολόγησης) να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας (μεγιστοποίησης) ή τιμή κόστους ατόμων (ελαχιστοποίησης), με βάση κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση.
- Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με τη δημιουργία νέων ατόμων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή καταλληλότητάς τους.
- Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών.

#### B.8.2: Περιγραφή ενός εξελικτικού αλγορίθμου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι *EA* χειρίζονται πληθυσμούς λύσεων. Κατά την εξέλιξη που είναι η βασική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης ένας πληθυσμός  $\mu$  υποψηφίων λύσεων (γονείς κατά τη γενετική ορολογία) εξελίσσεται στον πληθυσμό των  $\lambda$  απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις που προκύπτουν από τους  $\mu$  γονείς, έχοντας ενδεχομένως καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους  $\lambda$  απογόνους, με κριτήριο την καταλληλότητά τους, επιλέγονται οι  $\mu$  γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται γενιά με γενιά μέχρι την ικανοποίηση κάποιου

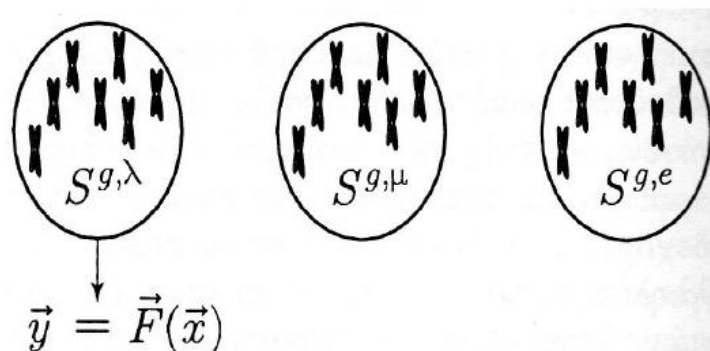


κριτηρίου σύγκλισης. Τέτοια κριτήρια υπάρχουν αρκετά και ένας EA μπορεί να έχει σε ισχύ περισσότερα του ενός από αυτά. Μεταξύ αυτών είναι: (α) το να μην βελτιώνεται περαιτέρω η λύση για έναν αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών, (β) να έχει ομογενοποιηθεί ο πληθυσμός ή και (γ) η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επέτρεπε ο χρήστης.

Η παραπάνω παρουσίαση του τι συμβαίνει σε έναν EA μπορεί να θεμελιωθεί αυστηρότερα. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε γενιά  $g$  ενός EA μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συνυπάρχουν τρία διακριτά σύνολα ατόμων. Η ορολογία προέρχεται από την αντίστοιχη της βιολογίας. Έτσι, υπάρχει το σύνολο των γονέων  $S^{g,m}$  με  $\mu$  μέλη, των απογόνων  $S^{g,\lambda}$  με  $\lambda$  μέλη και των επίλεκτων ή ελίτ ατόμων  $S^{g,e}$ . Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό το γιατί, σε έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην εξέλιξη, υπάρχουν σύνολα γονιών και απογόνων σε κάθε γενιά. Το σύνολο  $S^{g,e}$  αποθηκεύει τα επίλεκτα – καλύτερα άτομα (δηλαδή τις υποψήφιες λύσεις) που έχουν προκύψει από τη διαδικασία εξέλιξης μέχρι τη γενιά. Ο σκοπός ύπαρξης του συνόλου είναι διπλός. Αφενός οποτεδήποτε σταματήσει η εξέλιξη το  $S^{g,e}$  περιέχει την ή τις βέλτιστες λύσεις. Αφετέρου κατά την εξέλιξη, χρησιμοποιείται πληροφορία από το σύνολο  $S^{g,e}$  για την ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών των μελών της νέας γενιάς που θα προκύψει. Αυτή η ενίσχυση αποτελεί τον λεγόμενο «ελιτισμό» των EA.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί τι συμβαίνει σε κάθε γενιά ενός EA σε βήματα. Ουσιαστικά η απλή εισαγωγική περιγραφή ενός EA που προηγήθηκε, θα αποκτήσει μορφή διακριτών βημάτων, εμπλέκοντας επιπλέον και το σύνολο των επίλεκτων ατόμων. Υποθέτουμε ότι διατίθεται ένα πρόβλημα ενός στόχου. Η αντιμετώπιση του με τη μέθοδο των εξελικτικών αλγορίθμων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

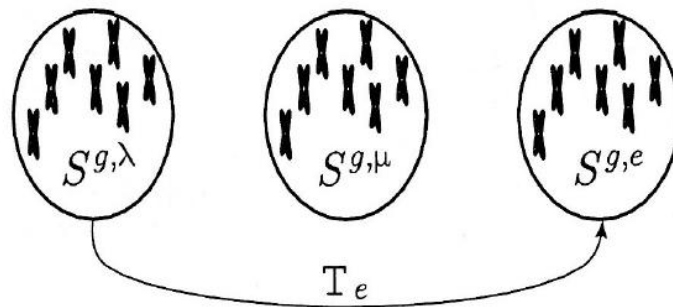
- Αρχικά επιλέγονται βασικές παράμετροι της μεθόδου όπως το μέγεθος των δύο βασικών πληθυσμών  $S^{g,m}$  και  $S^{g,\lambda}$ , δηλαδή οι τιμές των  $\mu$  και  $\lambda$ . Θέτουμε  $g = 0$  συμβολίζοντας έτσι την αρχικοποίηση, τη λεγόμενη δηλαδή και μηδενική γενιά. Επιλέγονται τυχαία τα μέλη του αρχικού πληθυσμού  $S^{0,\lambda}$ .
- Στο δεύτερο βήμα αξιολογούνται τα  $\lambda$  άτομα του συνόλου  $S^{g,\lambda}$ . Εκφρασμένο μαθηματικά, το βήμα αυτό περιγράφεται από τη διαδικασία:  $y(\vec{x}) = \vec{F}(\vec{x})$  για κάθε  $\vec{x} \in S^{g,\lambda}$ . Είναι κατανοητό ότι στο σημείο αυτό καλείται το λογισμικό αξιολόγησης του προβλήματος και ουσιαστικά είναι το τμήμα του αλγορίθμου που φέρει το μεγαλύτερο (πρακτικά, ολόκληρο) το υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα B.8-1: Αξιολόγηση μελών του  $S^{g,\lambda}$

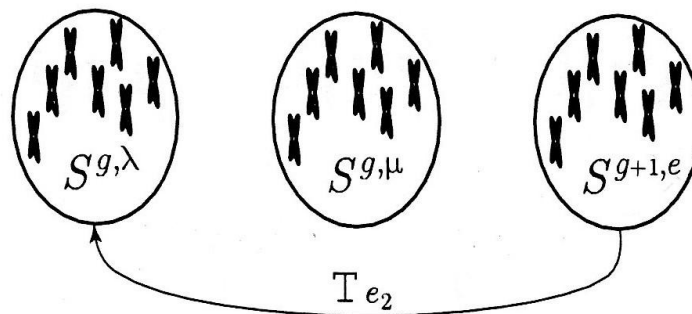
- Ανανεώνεται στη συνέχεια το σύνολο των επίλεκτων  $S^{g,e}$  με όσα μέλη του  $S^{g,\lambda}$  αξίζουν να ενταχθούν σε αυτό έχοντας πάντα ως κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά την παρούσα φάση είναι εξίσου πιθανό να διαγραφούν κάποια μέλη του  $S^{g,e}$  αν προκύψουν άτομα του  $S^{g,\lambda}$  με καλύτερη

τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Εκφρασμένο μαθηματικά:  $S^{g+1,e} = T_e(S^{g,\lambda} \cup S^{g,e})$ . Όπου με  $T_e$  συμβολίζεται ο τελεστής εντοπισμού των επίλεκτων μελών. Αν αναφερόμαστε σε πρόβλημα ενός στόχου, η πιο απλή εκδοχή του τελεστή  $T_e$  είναι να εντοπίζει το (ένα) καλύτερο άτομο από τα δύο σύνολα που επεξεργάζεται ( $S^{g,\lambda}$  και  $S^{g+1,e}$ ). Εδώ, υπάρχει πάντα η περίπτωση κανένας από τους  $\lambda$  να μην υπερτερεί της τρέχουσας βέλτιστης λύσης, δηλαδή του μοναδικού στοιχείου του  $S^{g,e}$ . Τότε, πρακτικά, το  $S^{g,e}$  παραμένει ως έχει και αυτό είναι ένδειξη ότι ο  $EA$  δεν κατάφερε να βελτιώσει τη λύση κατά την τελευταία γενιά. Τονίζεται ότι ο  $EA$  δεν είναι υποχρεωτικό να βελτιώνει τη λύση σε κάθε γενιά. Σε προβλήματα πολλών στόχων (αλλά ακόμη και σε προβλήματα ενός στόχου αν έτσι αποφασισθεί) το σύνολο  $S^{g,e}$  μπορεί να περιέχει περισσότερα του ενός (πλήθος  $e$ ) στοιχεία.



Σχήμα B.8-2: Ανανέωση των μελών του  $S^{g,e}$

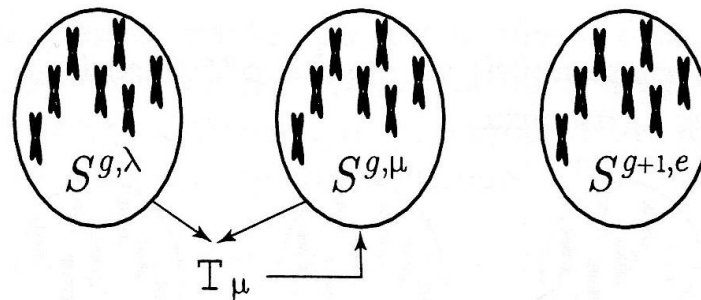
- Στο επόμενο βήμα εφαρμόζεται ο τελεστής επιλεκτικότητας ή ελιτισμού, με τον οποίο (συνήθως τυχαία) επιλεγόμενα άτομα από το σύνολο των επίλεκτων  $S^{g,e}$  που αντικαθιστούν άτομα του  $S^{g,\lambda}$ . Το ποια άτομα θα αντικατασταθούν εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως τα χειρότερα) αν και μέρος αυτών μπορεί να επιλέγεται τυχαία. Εκφρασμένο μαθηματικά:  $S^{g,\lambda} = T_{e2}(S^{g,\lambda} \cup S^{g+1,e})$ . Όπου με  $T_{e2}$  συμβολίζεται ο τελεστής ελιτισμού. Με τον ελιτισμό αποφεύγεται μία νέα γενιά να δώσει βέλτιστη λύση χειρότερη από αυτήν της προηγούμενης γενιάς (θα έχει τουλάχιστον ίδια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης) αν και τα οφέλη είναι αρκετά περισσότερα και πιο σύνθετα από αυτό που μόλις αναφέρθηκε.



Σχήμα B.8-3: Ανανέωση των μελών του  $S^{g,\lambda}$

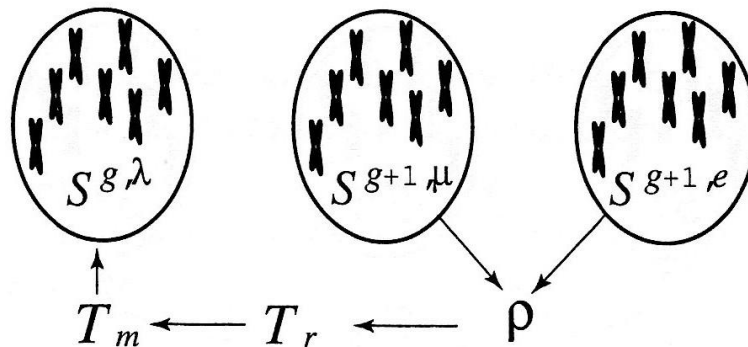
- Ακολούθως εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων  $T_\mu$  με τη βοήθεια του οποίου επιλέγεται το σύνολο των μελών του νέου πληθυσμού γονέων  $S^{g+1,\mu}$ . Για το σχηματισμό του, χρησιμοποιούνται οι τρέχοντες πληθυσμοί γονέων  $S^{g,\mu}$  και απογόνων  $S^{g,\lambda}$ , αν και υπάρχουν ορισμένες κλασσικές διατυπώσεις

όπου οι  $\mu$  γονείς επιλέγονται μόνο από τους πρόσφατους  $\lambda$  απογόνους. Εκφρασμένο μαθηματικά:  $S^{g+1,\mu} = T_{\mu}(S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda})$ . Όπου με  $T_{\mu}$  συμβολίζεται ο τελεστής επιλογής γονέων.



Σχήμα B.8-4: Ανανέωση των μελών του  $S^{g+1,\mu}$

- Ακολουθεί η διαδικασία αναπαραγωγής για τη δημιουργία του συνόλου απογόνων της επόμενης γενεάς  $S^{g+1,\lambda}$ . Για τη δημιουργία καθενός από τα  $\lambda$  άτομα του, επιλέγονται τυχαία  $\rho$  (συνήθως  $\rho = 2$ , αλλά δεν αποκλείεται η περίπτωση  $\rho > 2$ , όπως λ.χ. τρεις γονείς να δημιουργούν τρεις απογόνους, κλπ) γονείς από το σύνολο των γονέων  $S^{g+1,\mu}$ . Σε διάφορες αλγοριθμικές παραλλαγές, επιτρέπεται ενίοτε κάποιο ή κάποια από τα  $\rho$  άτομα να προέρχονται από το σύνολο  $S^{g+1,e}$ , επιλεγόμενα συνήθως με μικρή πιθανότητα, οπότε ο αλγόριθμος εμφανίζει ισχυρότερα χαρακτηριστικά ελιτισμού. Για κάθε σύνολο  $\rho$  γονέων που επιλέχθηκαν, εφαρμόζονται διαδοχικά διάφοροι τελεστές, μεταξύ των οποίων οι πιο γνωστοί είναι ο τελεστής διασταύρωσης ή επανασυνδυασμού ( $T_r$ , crossover ή recombination operator) και ο τελεστής μετάλλαξης ( $T_m$ , mutation operator). Εκφρασμένο μαθηματικά:  $S^{g+1,\lambda} = T_m \cdot T_r \cdot (S^{g+1,\mu} \cup S^{g+1,e})$ .



Σχήμα B.8-5: Ανανέωση των μελών του νέου  $S^{g+1,\lambda}$

- Εφαρμόζεται το κριτήριο σύγκλισης και αν η μέθοδος θεωρείται ότι δεν έχει συγκλίνει αρχίζει μία νέα γενιά, δηλαδή επαναλαμβάνονται τα προηγούμενα βήματα θέτοντας:  $g = g + 1$

### B.8.3: Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε προβλήματα πολλών στόχων

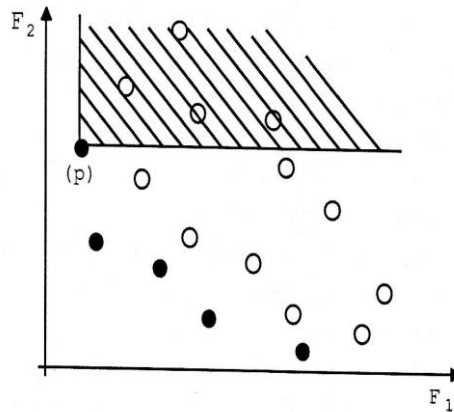
Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης με περισσότερους από ένα στόχους. Στη συνέχεια, θα παραθέσουμε τη βασική αρχή με βάση την οποία μπορεί εύκολα να μετασχηματισθεί υπάρχων ΕΑ που λειτουργεί με ένα στόχο έτσι ώστε να επιλύει: προβλήματα της μορφής:

$$\min(\vec{F}(\vec{x})), \quad \vec{F}: R^N \rightarrow R^M$$

Όπου  $\mu$  είναι το πλήθος των στόχων. Η βασική ιδέα με την οποία προσαρμόζεται ένας ΕΑ ενός στόχου ώστε να επιλύει προβλήματα  $\mu$  στόχων είναι η έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto και η συναφής έννοια του μετώπου Pareto. Η έννοια των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων βοηθά να ξεπερασθεί το πρόβλημα της ιεράρχησης λύσεων στον πολυδιάστατο χώρο. Στο χώρο  $R^M$  υπάρχει εγγενές κενό στην ταξινόμηση των λύσεων, με την έννοια ότι το  $(1,1)^T \in R^2$  είναι όντως μικρότερο του  $(5,5)^T$ , αλλά υπάρχει αδυναμία σύγκρισης του με το  $(0,4)^T$  ή το  $(0,4)^T$ . Η έννοια του μετώπου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων (*Pareto front*) οφείλεται στο Γάλλο – Ιταλό οικονομολόγο και κοινωνιολόγο Vilfredo Pareto που, κατά κάποιον τρόπο, ολοκλήρωσε και έθεσε σε πρακτική εφαρμογή αντίστοιχης σημασίας όρους που είχαν ήδη προταθεί από άλλους επιστήμονες.

Ο μαθηματικός ορισμός της κατά Pareto βέλτιστης λύσης και η συναφής έννοια της κυριαρχίας δίνεται ως εξής: Η λύση  $x \in \Omega$  ( $\Omega \in R^N$ ) κυριαρχεί της λύσης  $y \in \Omega$  και αυτό θα συμβολίζεται με  $x < y$  όταν και μόνο όταν ισχύει ότι  $F(x)_m \leq F(y)_m$  για όλους τους στόχους ( $m = 1, \dots, M$ ) και συγχρόνως υπάρχει ένας τουλάχιστον στόχος από αυτούς (έστω ο  $k$ ) για τον οποίο η τελευταία σχέση ισχύει ως ανισότητα μόνο  $F(x)_k < F(y)_k$ .

Στο επόμενο σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα κυριαρχίας λύσεων σε έναν πληθυσμό εξελικτικού αλγορίθμου για την καλύτερη κατανόηση του προηγούμενου μαθηματικού ορισμού. Θεωρείται πρόβλημα δύο στόχων ( $M = 2$ ) ενώ το διάγραμμα σχεδιάζεται στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων (δηλαδή, το επίπεδο των στόχων). Η λύση που σημειώνεται με  $p$  κυριαρχεί των λύσεων που περικλείονται στη διαγραμματισμένη ορθή γωνία, με κορυφή το σημείο  $p$ . Έτσι έχουμε το επόμενο σχήμα:



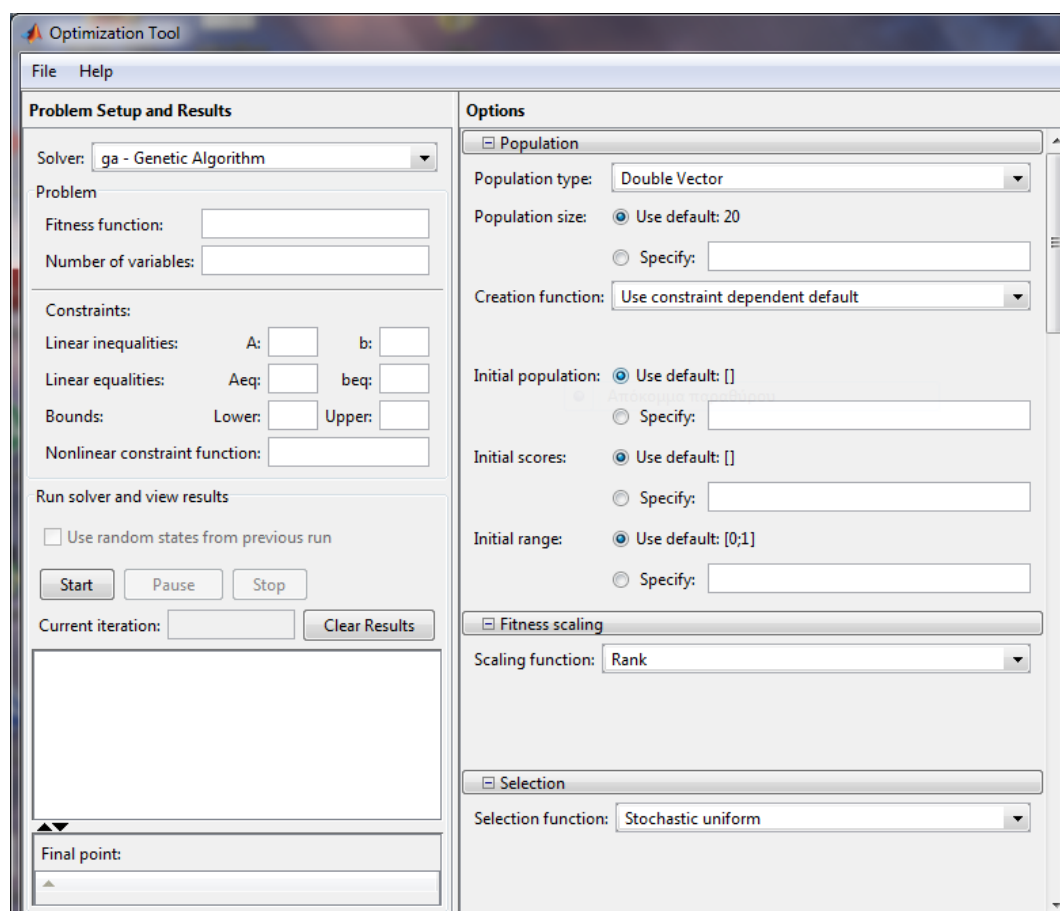
Σχήμα Β.8-6: Μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Παράδειγμα κυριαρχίας λύσεων σε έναν πληθυσμό εξελικτικού αλγορίθμου. Πρόβλημα δύο στόχων.

Δηλαδή σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω το μέτωπο Pareto ή μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων είναι το υποσύνολο των λύσεων εκείνων στις οποίες δεν κυριαρχεί καμία άλλη. Πρέπει να τονίσουμε ότι δύο μέλη του μετώπου Pareto είναι αδύνατο να συγκριθούν μεταξύ τους. Σε ένα πρόβλημα δύο στόχων, γενικά αναμένεται μία λύση να υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο και να υστερεί ως προς τον άλλο, συγκριτικά με την άλλη που συμπεριφέρεται αντιστρόφως. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που

στηρίζονται στην ιδέα του μετώπου Pareto. Οι μέθοδοι αυτές δεν υπολογίζουν τελικά μία λύση αλλά υπολογίζουν ένα σύνολο λύσεων που σχηματίζουν ένα μέτωπο Pareto. Επειδή, σύμφωνα με τον ορισμό που προηγήθηκε, όλες αυτές οι λύσεις δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη ‘γνωστή’ λύση, έτσι, οι λύσεις του μετώπου Pareto ονομάζονται και μη-κυριαρχούμενες λύσεις (non-dominated solutions).

#### B.8.4: Γενετικοί αλγόριθμοι στο MATLAB

Οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων και ακολουθούν για την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης τη γενική λογική που περιγράφηκε προηγουμένως. Ένα χρήσιμο toolbox που παρέχει το MATLAB για τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι το *Genetic Algorithm Toolbox* το γραφικό περιβάλλον του οποίου παρουσιάζεται στη συνέχεια:



Σχήμα B.8-7: Genetic Algorithm Toolbox στο MATLAB

Το συγκεκριμένο εργαλείο απαιτεί από το χρήστη να εισάγει στο περιβάλλον την συνάρτηση που θέλει να βελτιστοποιήσει και τον αριθμό των μεταβλητών της. Η συνάρτηση εισάγεται χρησιμοποιώντας το σύμβολο @ και το όνομα του αρχείου αυτής. Στη συνέχεια γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο πλαίσιο *Options* του παραθύρου που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν τον πληθυσμό των γόνων, το πλήθος των ελίτ λύσεων, την επιλογή των γονέων, τη διασταύρωση, τη μετάλλαξη κ.α.

---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ:  
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ  
ΚΩΔΙΚΑ

---

## ***Γ1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ***

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα βασικότερα δεδομένα εισόδου στον υπολογιστικό κώδικα που συντάχθηκε προκειμένου να επιτευχθεί οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση του ΜΥΗ στον ποταμό Αγραφιώτη. Όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό κεφάλαιο απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη υδροδυναμικού είναι η ύπαρξη επιφανειακής απορροής και κλίσης του εδάφους προκειμένου να σχηματίζεται η απαραίτητη υψομετρική διαφορά. Ο προσδιορισμός των δύο αυτών παραγόντων αποτέλεσε επομένως την βάση της ανάλυσης που έγινε για τη παρούσα διπλωματική εργασία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στον υπολογιστικό κώδικα και αφορούν αποκλειστικά το υδατόρευμα του Αγραφιώτη μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει διανυσματικά δεδομένα  $(x, y)$  από κατάλληλο ψηφιακό χάρτη (τύπου vector) για την παράσταση του ποταμού Αγραφιώτη και των ισοϋψών καμπυλών της ευρύτερης λεκάνης απορροής αρχικά στο επίπεδο. Στη συνέχεια εισάγοντας στην ανάλυση την πληροφορία του υψομέτρου που δίνουν οι ισοϋψείς καμπύλες επιχειρείται να γίνει απεικόνιση του υδατορεύματος στον τρισδιάστατο χώρο.
- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα υδρολογικά δεδομένα που είναι απαραίτητα κατά την ενεργειακή ανάλυση του έργου. Συγκεκριμένα απαιτείται ημερήσια χρονοσειρά της παροχής σε κάποια θέση μέτρησης βάση της οποίας θα γίνει η χάραξη της καμπύλης διάρκειας.

## ***Γ2: ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ***

### *Γ.2.1: Χρησιμότητα διανυσματικών δεδομένων*

Η βασική ιδέα για την αντιμετώπιση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του ΜΥΗ έγκειται στη χρησιμοποίηση ενός κώδικα βελτιστοποίησης, ο οποίος θα εξετάζει εναλλακτικά σενάρια σχεδίασης του ΜΥΗ και θα οδηγεί έξυπνα στον εντοπισμό της βέλτιστης εγκατάστασης βάση οικονομοτεχνικών κριτηρίων. Τα εναλλακτικά σενάρια που διερευνώνται κατά τη βελτιστοποίηση μπορούν να διαφέρουν ως προς το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος αλλά και ως προς τη χωροταξική διάταξη του ΜΥΗ κατά μήκος του ποταμού Αγραφιώτη. Ανάλογα με την επιλογή της εκάστοτε χωροταξικής διάταξης πρέπει να εκτιμώνται βάση της μοντελοποίησης τα τεχνικά στοιχεία του έργου όπως η θεωρητική υδραυλική πτώση και το μήκος των έργων προσαγωγής. Η μοντελοποίηση του προβλήματος πρόκειται να αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Ωστόσο αυτό που γίνεται σαφές στο σημείο αυτό είναι ότι ο καθορισμός των τεχνικών παραμέτρων του έργου προϋποθέτει την ύπαρξη της γεωγραφικής πληροφορίας τόσο για το εξεταζόμενο ρεύμα του ποταμού όσο και για τις ισοϋψείς καμπύλες κατά μήκος των οποίων χαράσσονται τα έργα προσαγωγής. Σε πραγματικές μελέτες η χάραξη της διαδρομής τη διώρυγας προσαγωγής του νερού γίνεται καταρχήν σε χάρτη κλίμακας 1:5000 κατά μήκος της ισοϋψούς καμπύλης. Η διαθεσιμότητα του αναλογικού χάρτη ωστόσο δεν θα μπορούσε να συμβάλει στην υπολογιστική διερεύνηση του εξεταζόμενου προβλήματος. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η αναζήτηση διανυσματικού χάρτη τύπου vector. Τα διανυσματικά δεδομένα ενός ηλεκτρονικού χάρτη είναι δυνατόν να εισαχθούν άμεσα στον υπολογιστικό κώδικα και να είναι αξιοποιήσιμα από αυτόν.

### Γ.2.2: Διανυσματικός χάρτης δυτικής Ευρυτανίας

Το εργαστήριο *Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδάτινων Πόρων* της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ ασχολείται με την ανάπτυξη Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών για υδατικούς πόρους. Συντέλεσε μάλιστα σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τη χορήγηση του διανυσματικού χάρτη για το υδατικό διαμέρισμα της δυτικής Ευρυτανίας. Ο διανυσματικός χάρτης που παραχωρήθηκε από το εργαστήριο για το υδατικό διαμέρισμα της δυτικής Ευρυτανίας περιελάμβανε τα παρακάτω θεματικά επίπεδα αντικειμένων:

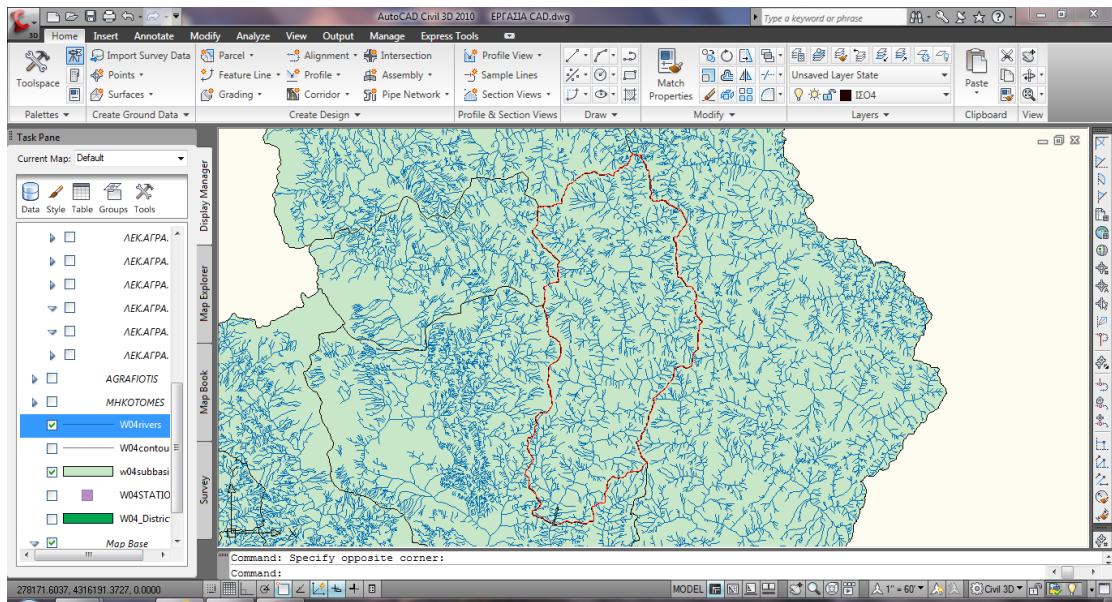
- *Υδρογραφικό δίκτυο*
- *ΙσοΨείς καμπύλες*
- *Λεκάνες απορροής ποταμών*
- *Υδρομετρικοί σταθμοί*
- *Όρια υδατικού διαμερίσματος*

Όλα τα θεματικά επίπεδα που αναφέρθηκαν παραπάνω δόθηκαν αποθηκευμένα σε αρχεία τύπου *shapefile*, τα οποία δημιουργήθηκαν μέσω του λογισμικού *ARCGIS* της εταιρίας *ESRI*. Από τα διανυσματικά δεδομένα που αναφέρθηκαν οι υδρομετρικοί σταθμοί παριστάνονται στο διανυσματικό χάρτη ως σημεία (*points*), το υδρογραφικό δίκτυο και οι ισοΨείς καμπύλες ως γραμμές (*lines*), ενώ οι λεκάνες απορροής και τα όρια του υδατικού διαμερίσματος ως πολύγωνα (*polygons*). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της δυτικής Ευρυτανίας έτσι όπως χορηγήθηκε από το εργαστήριο. Παρουσιάζονται, επίσης τα διανυσματικά δεδομένα του υδρογραφικού δικτύου και των ισοΨών καμπυλών για την υδρολογική λεκάνη του Αγραφιώτη, την οποία αφορά αποκλειστικά η παρούσα ανάλυση.

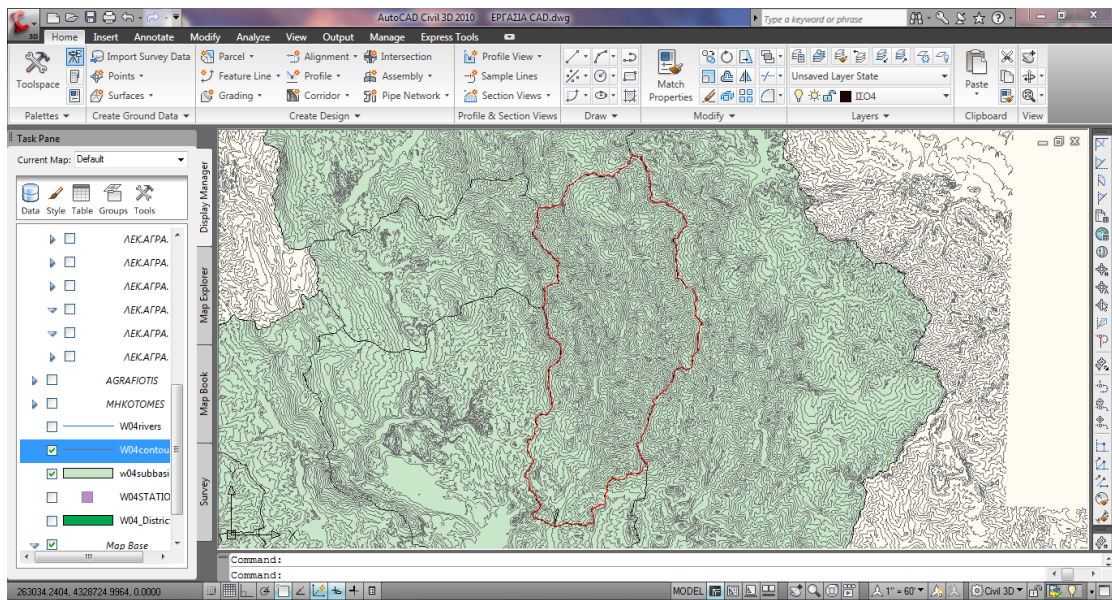


Σχήμα Γ.2-1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους δυτικής Ευρυτανίας





Σχήμα Γ.2-2: Διανυσματικά δεδομένα υδρογραφικού δικτύου



Σχήμα Γ.2-3: Διανυσματικά δεδομένα ισοψών καμπυλών

Οι ψηφιακοί χάρτες που χορηγήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική έχουν γεωδαιτική αναφορά στο ελληνικό σύστημα ΕΓΣΑ 87. Κάνοντας μια σύντομη βιβλιογραφική αναφορά το *Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987* ή εν συντομία *ΕΓΣΑ 87* προδιαγράφει μια εγκάρσια χαρτογραφική προβολή, που καλύπτει έξι μοίρες γεωγραφικού μήκους εκατέρωθεν του 24ου μεσημβρινού (18<sup>0</sup>E - 30<sup>0</sup>E). Με τον τρόπο αυτό όλη η ελληνική επικράτεια, η οποία εκτείνεται περίπου σε 9<sup>0</sup> γεωγραφικού μήκους προβάλλεται σε μία ζώνη. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y) του συγκεκριμένου συστήματος έχουν μονάδες μέτρων. Στην κατεύθυνση Βορρά - Νότου (S-N) η τιμή 0 αντιστοιχεί στον ισημερινό ενώ στην κατεύθυνση Δύσης - Ανατολής (W-E) η τιμή 500000 m αποδίδεται στον κεντρικό μεσημβρινό (24<sup>0</sup>E), ώστε να αποφεύγονται αρνητικές τιμές.

Υπενθυμίζεται ότι τα διανυσματικά αντικείμενα του υδρογραφικού δικτύου και των ισοϋψών καμπυλών είναι αποθηκευμένα σε αρχεία τύπου *shapefile*. Οι γραμμές που συνθέτουν τα συγκεκριμένα αντικείμενα στον διανυσματικό χάρτη αποτελούν επομένως ένα σύνολο χαρτογραφικών συντεταγμένων  $(x, y)$  που αποδίδουν το σχήμα και τη θέση τους στο επίπεδο.

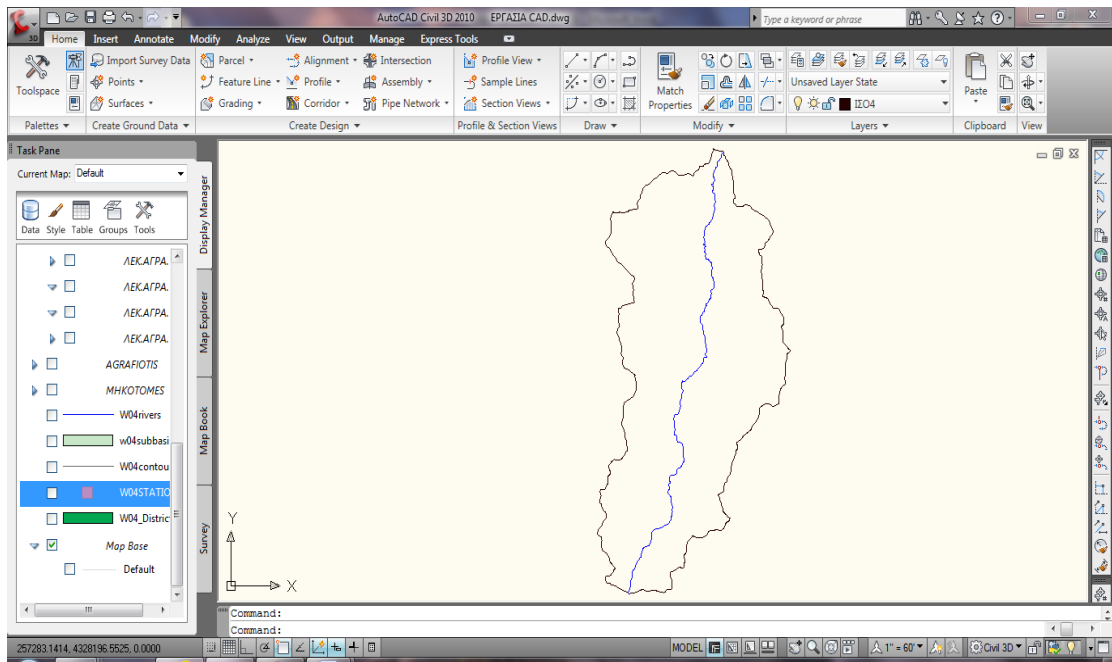
### Γ.2.3: Εξαγωγή χαρτογραφικών συντεταγμένων

Σε πρώτη φάση στόχο της ανάλυσης αποτέλεσε η προετοιμασία κατάλληλων αρχείων του *Excel* (.xls) που θα περιέχουν τις χαρτογραφικές συντεταγμένες  $(x, y)$  του βασικού υδατορεύματος και των ισοϋψών καμπυλών. Εισάγοντας τα συγκεκριμένα αρχεία στο *MATLAB* γίνεται εφικτή η διανυσματική απεικόνιση των αντικειμένων στο επίπεδο, όπως ακριβώς παρουσιάζονται στον ηλεκτρονικό χάρτη. Το υψόμετρο  $z$  για κάθε θέση  $(x, y)$  με το οποίο θα γίνει η παράσταση του υδατορεύματος στον τρισδιάστατο χώρο καθορίζεται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Στο σημείο αυτό γίνεται απλά αναφορά στον τρόπο εξαγωγής των χαρτογραφικών συντεταγμένων  $(x, y)$  από τα αρχεία *shapefiles* που χορηγήθηκαν.

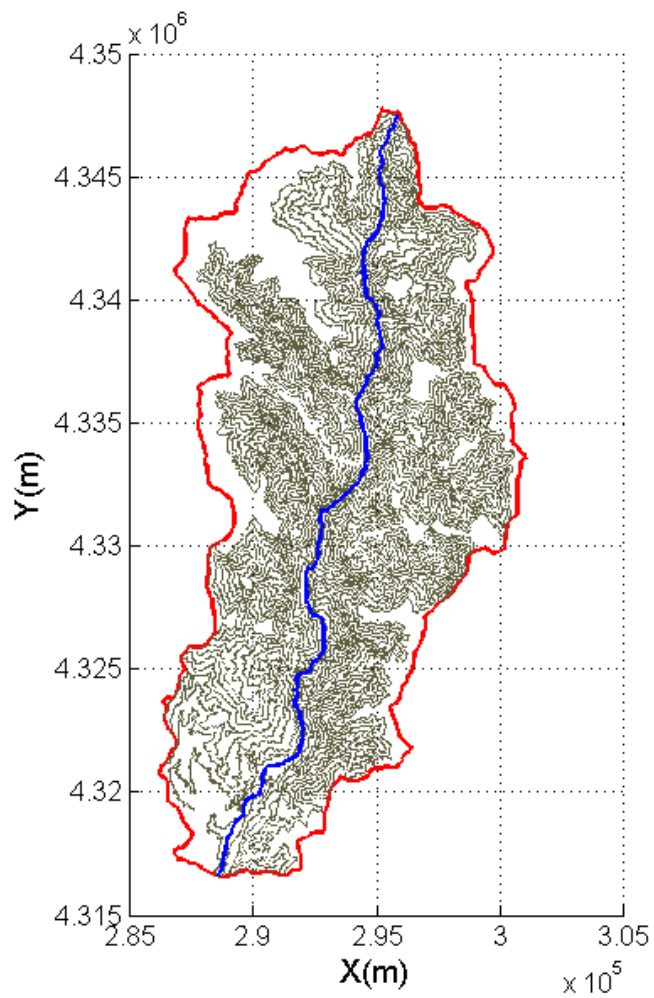
Τα διανυσματικά αρχεία τύπου *shapefile* εισήχθησαν αρχικά στο λογισμικό *Autocad Civil 3D 2010* της εταιρίας *Autodesk*. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί ένα σύγχρονο σχεδιαστικό πρόγραμμα *CAD*, το οποίο παρέχει επιπλέον στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει αρχεία του λογισμικού *ARCGIS* στο ίδιο λειτουργικό περιβάλλον και να εργαστεί με αυτά. Μέσα στο περιβάλλον του *Autocad Civil 3D* τα διανυσματικά αντικείμενα αναφέρονται ως στοιχεία χάρτη (*map features*) και είναι τύπου: σημεία, γραμμές ή πολύγωνα κατά τα γνωστά.

Η εξαγωγή των συντεταγμένων  $(x, y)$  των διανυσματικών αντικειμένων προϋποθέτει αρχικά τη μετατροπή τους σε σχεδιαστικά αντικείμενα τύπου *CAD* και συγκεκριμένα σε γραμμές τύπου *polylines*. Ο λόγος για τη μετατροπή αυτή είναι ότι η λειτουργία της εξαγωγής συντεταγμένων από στοιχεία χάρτη δεν υποστηρίζεται απευθείας από το πρόγραμμα της *Autodesk*. Διατίθεται ωστόσο κατάλληλος κώδικας σε γλώσσα *LISP*, ο οποίος τρέχει πάνω στο *Autocad Civil 3D* και επιτρέπει την εξαγωγή των συντεταγμένων που χαρακτηρίζουν τα σχεδιαστικά αντικείμενα τύπου *polylines*. Η μετατροπή των ισοϋψών καμπυλών σε σχεδιαστικά αντικείμενα είναι άμεσα υλοποιήσιμη με απλές εντολές. Αυτό που απαιτείται για τη συνέχεια είναι η ξεχωριστή αποτύπωση του βασικού ρεύματος του Αγραφιώτη, στο οποίο συμβάλλουν οι επιμέρους κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιείται επίσης μέσα από το λογισμικό *Autocad Civil 3D*. Δημιουργείται έτσι ένα σχεδιαστικό αντικείμενο (*polyline*) με το όνομα «*AGRAFIOTIS*» που χαρακτηρίζει το βασικό υδατόρευμα. Σε επόμενη σελίδα παρουσιάζεται το κυρίως ρεύμα του ποταμού Αγραφιώτη όπως προέκυψε από την προηγούμενη διαδικασία. Η απεικόνιση γίνεται ξεχωριστά από το υπόλοιπο υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης.

Ακολούθως πραγματοποιείται η εξαγωγή των χαρτογραφικών συντεταγμένων  $(x, y)$  για τον ποταμό Αγραφιώτη και τις ισοϋψείς καμπύλες που τέμνουν τον βασικό κλάδο. Δημιουργούνται έτσι κατάλληλα αρχεία του *Excel* (.xls) με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του ποταμού (*data\_AGRA.xls*) και των ισοϋψών καμπυλών (*CONTOUR.xls*). Οι συντεταγμένες αυτές εισάγονται ακολούθως στο *MATLAB* με τη μορφή πινάκων. Για λόγους βιβλιογραφικής πληρότητας παρατίθεται και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των συντεταγμένων των σχεδιαστικών αντικειμένων από το περιβάλλον του *Autocad Civil 3D*.



Σχήμα Γ.2-4: Βασικό υδατόρευμα Αγραφιώτη



Σχήμα Γ.2-5: Διανυσματικά δεδομένα χάρτη σε περιβάλλον MATLAB

---

*Κώδικας LISP:  
Εξαγωγή συντεταγμένων από σχεδιαστικά αντικείμενα  
τύπου polylines από περιβάλλον Autocad Civil 3D*

---

```
(defun c:ptExp (/ doc spc ss file sel pts)
  (vl-load-com)
  (setq doc (vla-get-ActiveDocument
    (vlax-get-Acad-Object))
    spc (if (zerop (vla-get-activespace doc))
      (if (= (vla-get-mspace doc) :vlax-true)
        (vla-get-modelspace doc)
        (vla-get-paperspace doc))
      (vla-get-modelspace doc)))
  (if (and (setq ss (ssget '((0 . "*POLYLINE"))))
    (setq file
      (getfiled "Output File"
        (if *load *load "" "csv;txt" 9)))
    (progn
      (setq *load file file (open file "a"))
      (vlax-for Obj (setq sel (vla-get-ActiveSelectionSet doc))
        (setq pts
          (vlax-list->3D-point
            (vlax-get Obj 'Coordinates)
            (cond ((eq (vla-get-ObjectName Obj) "AcDbPolyline"))) Obj))
          (mapcar
            (function
              (lambda (x)
                (write-line
                  (strcat
                    (rtos (car x) 2 2) (chr 44)
                    (rtos (cadr x) 2 2) (chr 44)
                    (rtos (caddr x) 2 2)) file)
                  (vla-addPoint spc (vlax-3D-point x)))) pts))
            (princ
              (strcat "\n<< Points from "
                (itoa (vla-get-Count sel)) " Polylines written to file >>"))
              (close file)
              (vla-delete sel)))
    (princ))
  (defun vlax-list->3D-point (lst x Obj / oLst)
    (while lst
      (setq oLst
        (cons (list (car lst) (cadr lst)
          (if x (vla-get-Elevation Obj) (caddr lst))) oLst)
        lst ((if x caddr caddr) lst)))
    oLst)
```

---

#### Γ.2.4: Χάραξη μηκοτομής Αγραφιώτη

Από τα χαρακτηριστικά του κυρίου ρεύματος της λεκάνης απορροής ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν το συνολικό μήκος και η κλίση του, αφού αυτά καθορίζουν το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η απορροή στο στόμιο της λεκάνης. Ως μηκοτομή ορίζεται η γραφική απεικόνιση που παριστάνει τη στάθμη  $z$  του ποταμού (από την επιφάνεια της θάλασσας) συναρτήσει του οριζόντιου αναπτύγματος του μήκους στο επίπεδο του χάρτη.

Η κατά μήκος τομή του κυρίου υδατορεύματος είναι κατά κανόνα κοίλη στα χαμηλότερα σημεία και παρουσιάζει αντίστοιχα αύξηση της κλίσης στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης. Για την έκφραση της μηκοτομής με λογαριθμικές ή εκθετικές κλίμακες έχουν γίνει πολλές προσπάθειες (Τσακίρης, 1995). Καμία ωστόσο δεν απέδωσε το σχήμα της εξαιτίας των μεταβολών που παρατηρούνται σε ορισμένα σημεία από τις υψηλότερες προς τις χαμηλότερες περιοχές. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην βαθμιαία αύξηση της παροχής με την απόσταση, στις διαστάσεις των φερτών υλών και στις αλλαγές των χαρακτηριστικών της κοίτης (Chorley, 1979).

Στην προκειμένη περίπτωση για την χάραξη της μηκοτομής του Αγραφιώτη θα αξιοποιηθεί η υψομετρική πληροφορία που παρέχεται από τον διανυσματικό χάρτη. Όπως έχει αναφερθεί οι διανυσματικοί χάρτες δίνουν γενικά την αναπαράσταση του ποταμού σε χώρο δύο διαστάσεων. Για να γίνει αυτό το βασικό υδατόρευμα περιγράφεται από ένα σύνολο γεωγραφικών συντεταγμένων  $(x, y)$  που συνθέτουν τελικά μια γραμμή. Το ίδιο ισχύει και για κάθε ισοϋψή καμπύλη στην οποία αντιστοιχεί ωστόσο και ένα υψόμετρο, το οποίο είναι γνωστό από τις περιγραφικές πληροφορίες του αντικειμένου. Για τον ίδιο λόγο θεωρείται γνωστό το υψόμετρο και σε συγκεκριμένες θέσεις  $(x, y)$  της γραμμής του ποταμού, στις οποίες ο βασικός κλάδος τέμνεται με τις ισοϋψείς. Συνολικά υπάρχουν δεκαέξι ισοϋψείς καμπύλες που τέμνουν τον ποταμό σε ίσο αριθμό σημείων κατά τη φυσική πορεία του.

Για να είναι δυνατή η χάραξη της μηκοτομής του Αγραφιώτη θα πρέπει αρχικά να υπολογιστεί το ανάπτυγμα του μήκους για τα σημεία τομής με τις ισοϋψείς καμπύλες. Απεικονίζοντας το υψόμετρο  $z$  για τα εν λόγω σημεία συναρτήσει του οριζόντιου αναπτύγματος του μήκους προκύπτει η κατά μήκος τομή του ποταμού. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του αναπτύγματος μήκους αρχή της μέτρησης θεωρείται η θέση του μέγιστου υψομέτρου ( $z_{max} = 1600m$ ). Έτσι το ανάπτυγμα του οριζόντιου μήκους για κάθε θέση  $(x, y)$  του ποταμού δίνεται από τις σχέσεις:

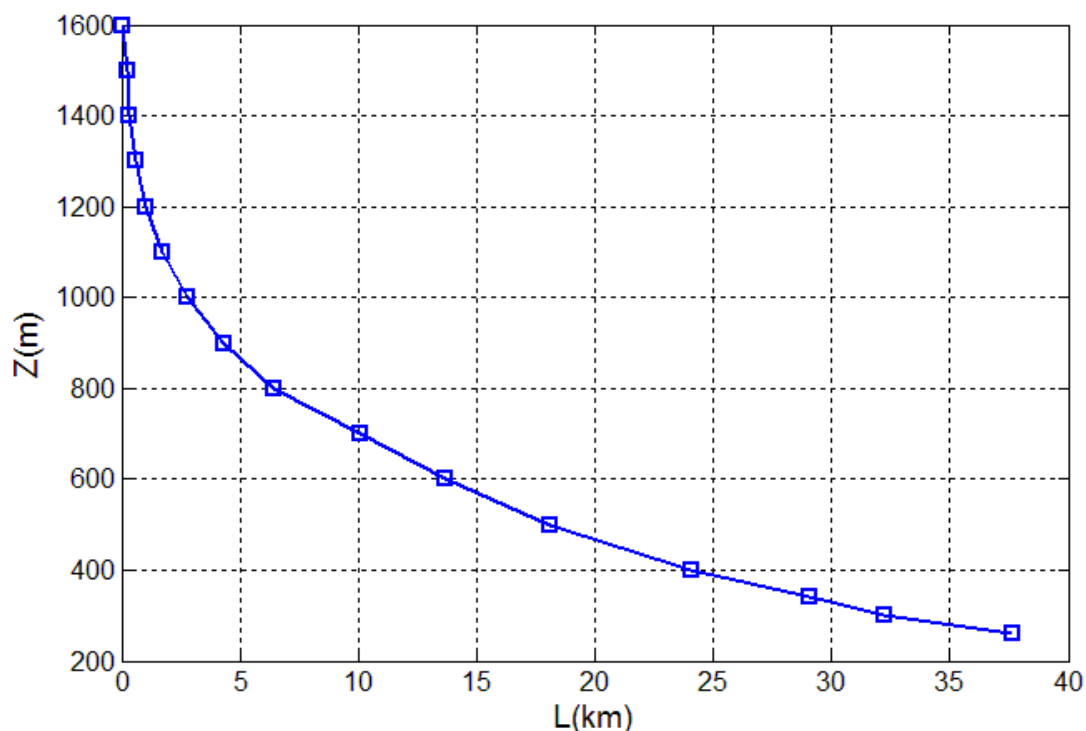
$$L_1 = 0$$

$$L_i = L_{i-1} + \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad \text{για } i > 1$$

Στις προηγούμενες σχέσεις ο δείκτης  $\langle i \rangle$  αντιστοιχεί στην αρίθμηση κάθε σημείου  $(x, y)$  της γραμμής που περιγράφει το υδατόρευμα του Αγραφιώτη. Αντίστοιχα το συνολικό μήκος του ποταμού υπολογίζεται ως το άθροισμα των μηκών όλων των  $i - 1$  διαδοχικών ευθύγραμμων τμημάτων, στα οποία έχει διακριτοποιηθεί η φυσική πορεία του ποταμού. Υπολογίζεται έτσι από το άθροισμα:

$$L^{tot} = L(n) = \sum_{i=2}^n \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

Εκτελώντας την προηγούμενη διαδικασία προκύπτει τελικά η κατά μήκος τομή του ποταμού Αγραφιώτη. Από το επόμενο διάγραμμα είναι εμφανής η αύξηση της κλίσης του ποταμού στα μεγαλύτερα υψόμετρα.



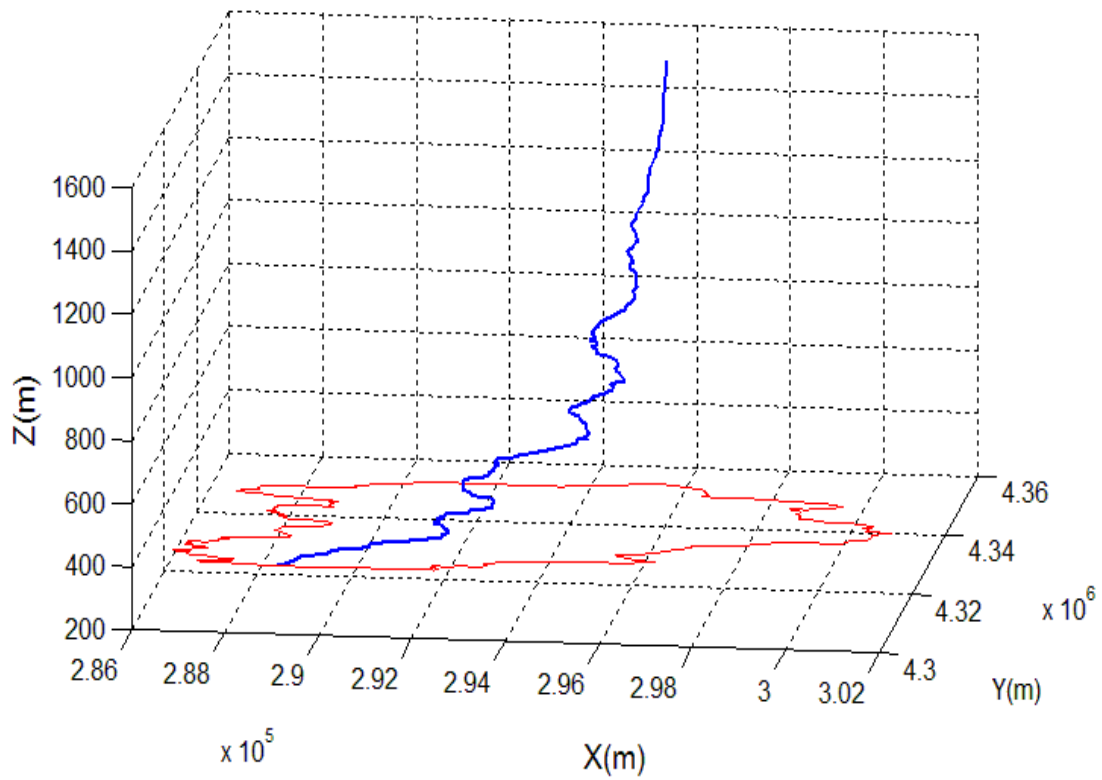
Σχήμα Γ.2-6: Μηκοτομή υδατορεύματος Αγραφιώτη

Για τη χάραξη της μηκοτομής γίνεται η θεώρηση ότι η κλίση  $I = \Delta z / \Delta L$  της κοίτης του ποταμού μεταξύ των σημείων που ο βασικός κλάδος τέμνεται με τις ισοϋψείς καμπύλες είναι σταθερή. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση το υψόμετρο της φυσικής κοίτης μεταβάλλεται γραμμικά με το οριζόντιο ανάπτυγμα του μήκους στο τμήμα μεταξύ δύο θέσεων γνωστού υψομέτρου. Έτσι εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή είναι δυνατόν να υπολογιστεί το υψόμετρο  $z(m)$  για το σύνολο των σημείων  $(x, y)$  της γραμμής που αποδίδει το φυσικό ρεύμα του ποταμού. Δύναται δηλαδή να υπολογιστεί το υψόμετρο ακόμα και αυτών των σημείων της γραμμής του υδατορεύματος που βρίσκονται στα τμήματα μεταξύ των διαθέσιμων ισοϋψών καμπυλών.

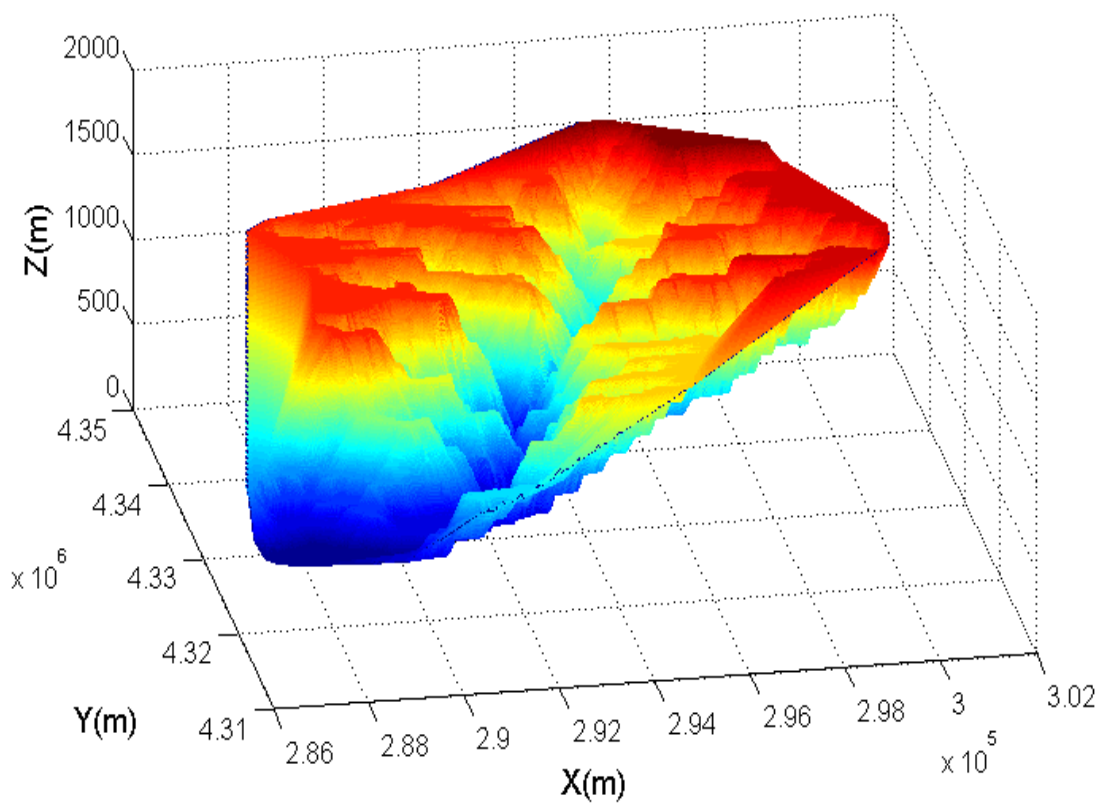
Με τον τρόπο αυτό γίνεται τελικά δυνατή η απεικόνιση του υδατορεύματος σε χώρο τριών διαστάσεων. Ακολούθως συμπληρώνονται τα αρχεία *data\_AGRA.xls* και *CONTOUR.xls* με το υψόμετρο  $z$  κάθε θέσης  $(x, y)$  του εκάστοτε διανυσματικού αντικειμένου. Τα συμπληρωμένα αρχεία *Excel* περιέχουν τελικά τις συντεταγμένες  $(x, y, z)$  που περιγράφουν τα αντικείμενα του ποταμού και των ισοϋψών αντίστοιχα σε χώρο τριών διαστάσεων.

Το λογισμικό *MATLAB* αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στην εκτέλεση υπολογισμών με μεγάλο πλήθος δεδομένων. Έχοντας εισάγει στο πρόγραμμα τις χωρικές συντεταγμένες για όλες τις ισοϋψείς καμπύλες υπάρχει η δυνατότητα παρεμβολής της επιφάνειας που ορίζεται μεταξύ αυτών. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του ανάγλυφου του εδάφους, το οποίο διαρρέει ο ποταμός Αγραφιώτης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διάγραμμα που προέκυψαν από την προηγούμενη ανάλυση.





Σχήμα Γ.2-7: Τρισδιάστατη απεικόνιση Αγραφιότη



Σχήμα Γ.2-7: Τρισδιάστατη απεικόνιση της λεκάνης απορροής του Αγραφιότη

## **Γ3: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

### Γ.3.1: Χρησιμότητα υδρολογικών δεδομένων

Η βασική υδρολογική παράμετρος που απαιτείται για τη μελέτη ενός ΜΥΗ είναι η χρονική διακύμανση της παροχής στη θέση που θα διαμορφωθεί η υδροληψία του έργου. Η χρονοσειρά της επιφανειακής απορροής επηρεάζει άμεσα την επιλογή του πλήθους και του μεγέθους των μονάδων παραγωγής αλλά και το κόστος όλων των συναφών έργων.

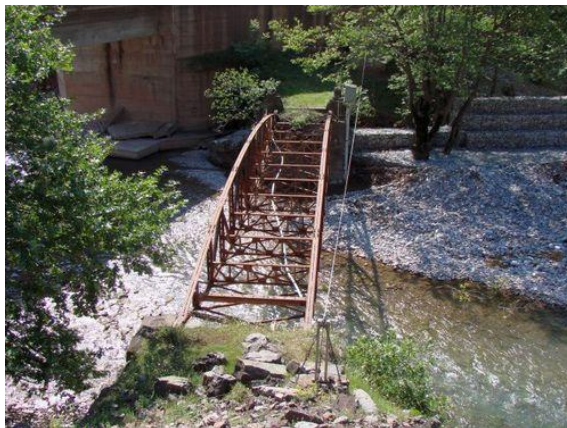
Βασικό εργαλείο για την ενεργειακή ανάλυση ενός ΜΥΗ είναι η καμπύλη διάρκειας παροχής (ΚΔΠ) στη θέση υδροληψίας, η οποία έχει παρουσιαστεί στο θεωρητικό κεφάλαιο. Τονίζεται ότι στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης η θέση υδροληψίας του υπό σχεδίαση ΜΥΗ δεν είναι καθορισμένη εξ αρχής. Ωστόσο, ακόμα και στη περίπτωση που η υδροληψία του έργου μπορούσε να θεωρηθεί γνωστή είναι εξαιρετικά σπάνιο να διατίθενται μετρήσεις της φυσικής παροχής απευθείας στη συγκεκριμένη θέση.

Επομένως κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναζητήθηκε σε πρώτη φάση η χρονοσειρά της φυσικής παροχής σε κάποια θέση μέτρησης κατά μήκος του Αγραφιώτη. Με βάση τη χρονοσειρά των μετρήσεων δύναται να προκύψει η καμπύλη διάρκειας του συγκεκριμένου μεγέθους. Στη συνέχεια καθορίστηκε επίσης μια μεθοδολογία για την αναγωγή της καμπύλης διάρκειας σε κάθε θέση που εξετάζεται ως πιθανή για την υδροληψία του υπό σχεδίαση έργου.

### Γ.3.2: Ημερήσια χρονοσειρά της παροχής (Γέφ. Βαρβαριάδας 1979 – 1989)

Κατά μήκος του κυρίου υδατορεύματος του ποταμού Αγραφιώτη υπάρχει εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός της ΔΕΗ στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας. Στον εν λόγω υδρομετρικό σταθμό γίνονται μετρήσεις της στάθμης και της παροχής για τη συγκεκριμένη διατομή του ποταμού.

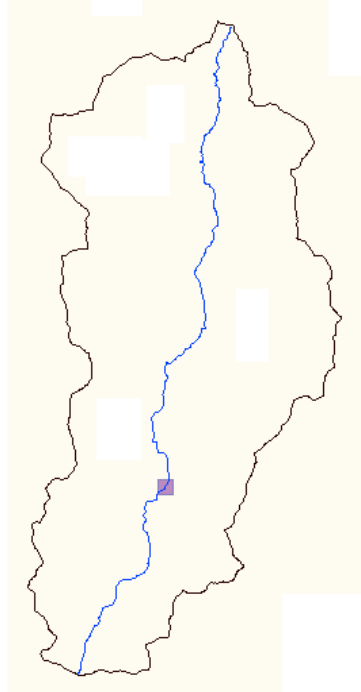
Ύστερα από σχετική αίτηση που κατατέθηκε στη Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής της ΔΕΗ, χορηγήθηκε χρονοσειρά ημερήσιων μετρήσεων της παροχής για τα υδρολογικά έτη 1979-1989. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις έγιναν στον υδρομετρικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση γέφυρα Βαρβαριάδας και πρόκειται να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά για ακαδημαϊκό σκοπό που αφορά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα Γ.3-1: Υδρομετρικός σταθμός στη γέφυρα Βαρβαριάδας



Στα σχήματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αποτυπώνεται με δύο τρόπους η θέση γέφυρα Βαρβαριάδας, στην οποία είναι εγκατεστημένος ο υδρομετρικός σταθμός. Αρχικά χρησιμοποιώντας το χάρτη διανυσματικών δεδομένων της ευρύτερης λεκάνης απορροής και κατά δεύτερο λόγο χρησιμοποιώντας την εφαρμογή *Google Earth*.

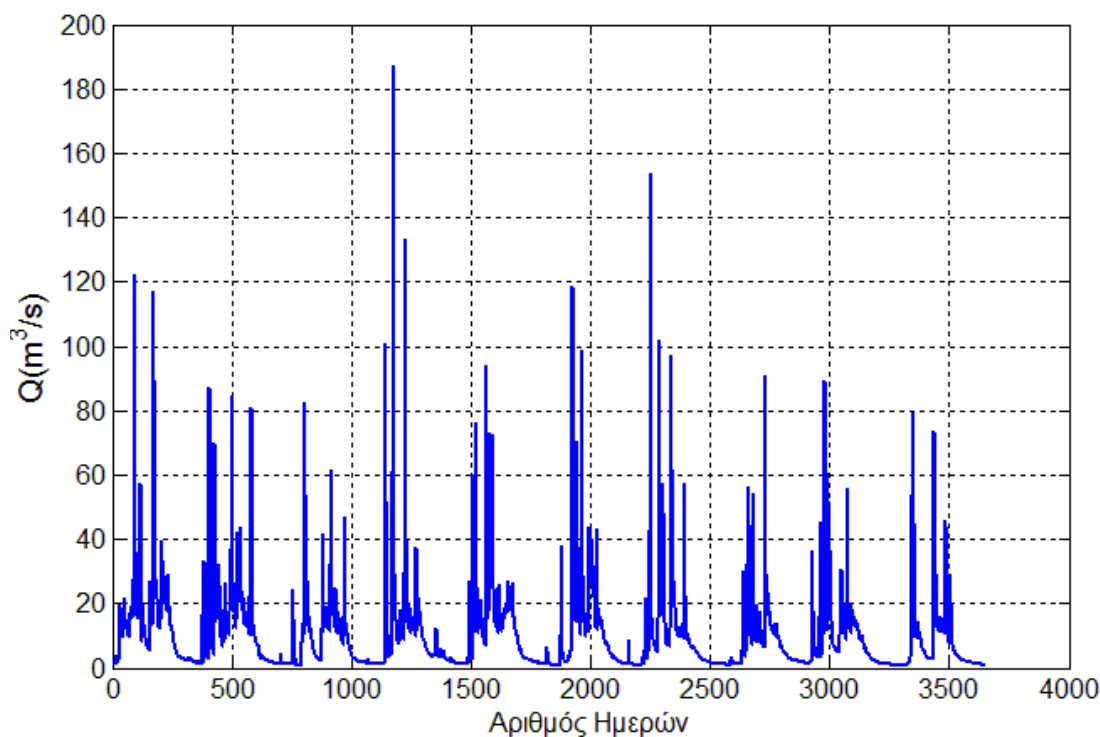


*Σχήμα Γ.3-2: Θέση υδρομετρικού σταθμού στο διανυσματικό χάρτη*



*Σχήμα Γ.3-3: Θέση υδρομετρικού σταθμού στο Google Earth*

Χρησιμοποιώντας την χρονοσειρά της παροχής που χορηγήθηκε από την Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής της ΔΕΗ κατέστη δυνατή η χάραξη του υδρογραφήματος και ακολούθως της καμπύλης διάρκειας για τη διατομή του ποταμού που έγιναν οι μετρήσεις. Υπενθυμίζεται ότι το υδρογράφημα αποτελεί τη ποσοτική απεικόνιση της χρονικής μεταβολής της παροχής στη συγκεκριμένη θέση. Παριστάνοντας έτσι διαγραμματικά τις μετρήσεις της παροχής κατά τη χρονολογική σειρά που ελήφθησαν προκύπτει:

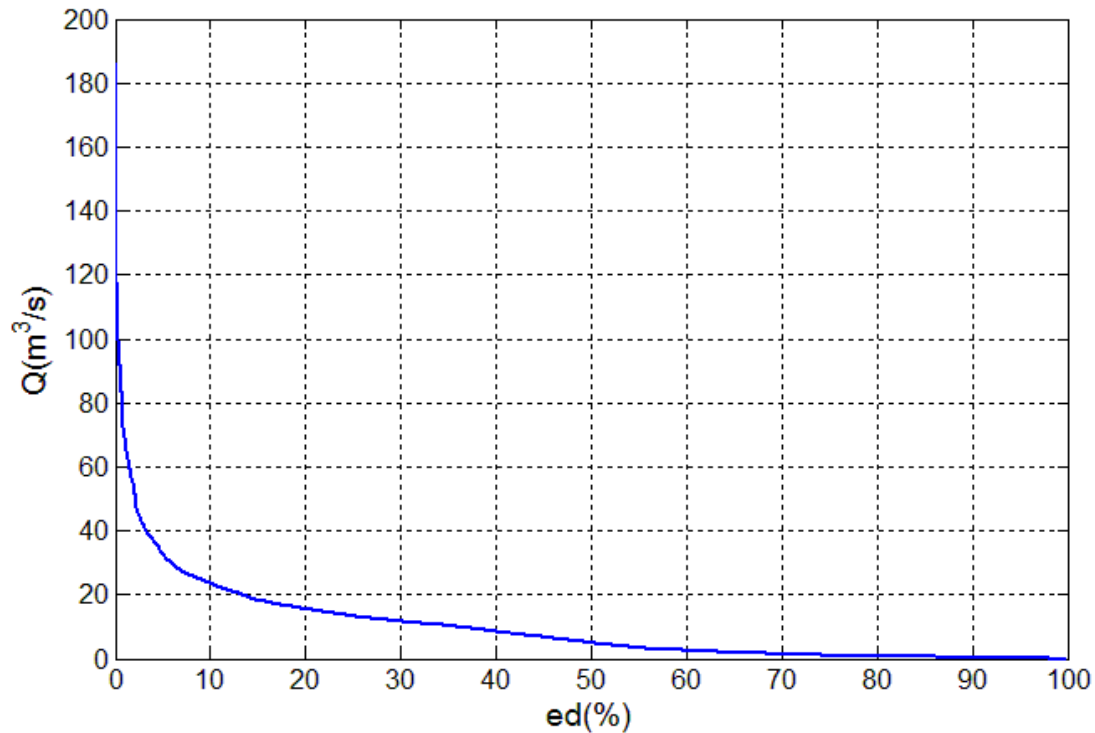


Σχήμα Γ.3-4: Υδρογράφημα 1979-1989, θέση γέφυρα. Βαρβαριάδας (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

### Γ.3.3: Χάραξη της καμπύλης διάρκειας παροχής στη θέση μέτρησης

Επόμενο βήμα της ανάλυσης αποτέλεσε η χάραξη της καμπύλης διάρκειας παροχής για τη θέση υδρομετρήσεων. Διατάσσοντας τις μετρήσεις της παροχής κατά σειρά φθίνοντος μεγέθους και αδιαστατοποιώντας την αντίστοιχη κλίμακα του χρόνου προκύπτει η καμπύλη διάρκειας. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στο θεωρητικό κεφάλαιο η καμπύλη διάρκειας παριστάνει την τιμή της παροχής  $Q(m/s^3)$  συναρτήσει του χρονικού διαστήματος  $ed(\%)$  επί τοις εκατό (του έτους) για το οποίο η φυσική παροχή έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή της καμπύλης.

Με τη χρησιμοποίηση των ημερησίων μετρήσεων της παροχής για τη χάραξη της καμπύλης διάρκειας γίνεται φυσικά η υπόθεση ότι οι μεταβολές του συγκεκριμένου μεγέθους στην κλίμακα του εικοσιτετραώρου δεν είναι άξιες λόγου ως προς την ακρίβεια υπολογισμού της μακροπρόθεσμα παραγόμενης ενέργειας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ημερήσια καμπύλη διάρκειας της παροχής όπως προέκυψε για τη θέση γέφυρα Βαρβαριάδας του ποταμού Αγραφιώτη.

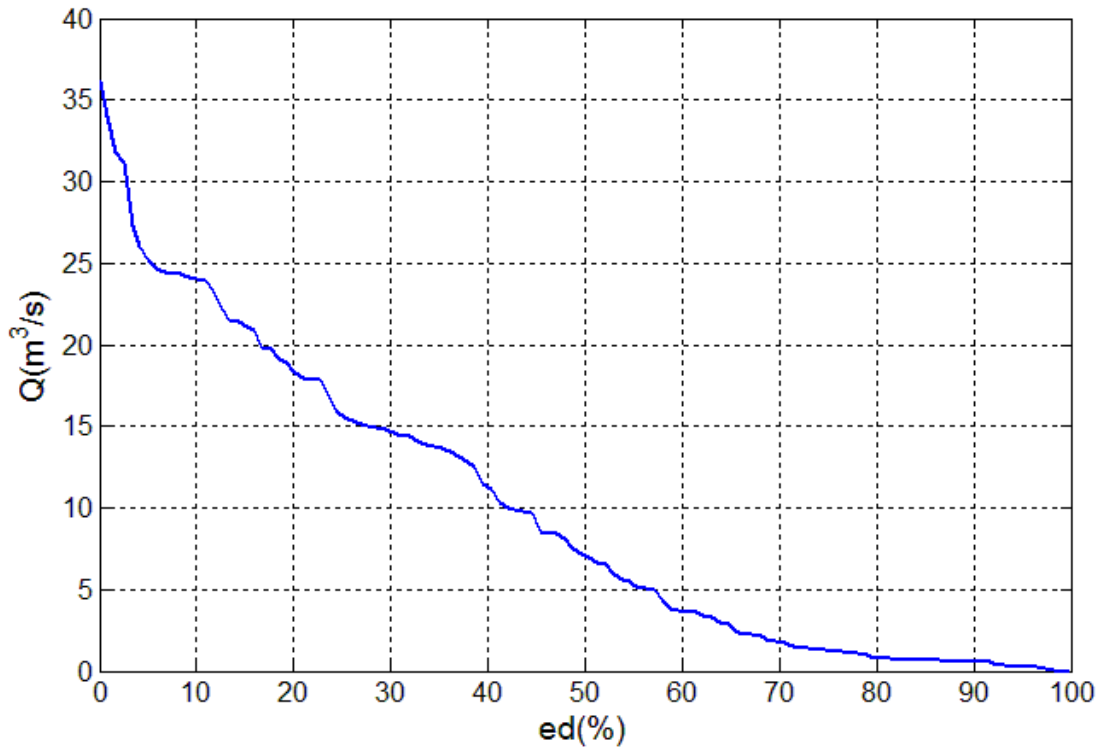


Σχήμα Γ.3-5: Καμπύλη διάρκειας παροχής με ημερήσια δεδομένα 1979-1989 (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

Η ημερήσια καμπύλη διάρκειας της παροχής που παρουσιάστηκε προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη την οικολογική παροχή συντήρησης. Έτσι καλείται η φυσική παροχή που απαιτείται από τον νόμο να υπάρχει στη κοίτη του ποταμού και κατάντι του υδροηλεκτρικού έργου σε κάθε χρονική στιγμή. Με την οικολογική παροχή εξασφαλίζονται οι λοιπές ανταγωνιστικές χρήσεις του νερού καθώς και οι συνθήκες επιβίωσης της χλωρίδας και της πανίδας στο τμήμα μεταξύ υδροληψίας και υδροηλεκτρικού σταθμού. Κατά κανόνα η οικολογική παροχή λαμβάνεται ως το 30% της μέσης παροχής των τριών θερινών μηνών (Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος). Η τιμή που προκύπτει με τον τρόπο αυτό αφαιρείται από την χρονοσειρά της φυσικής παροχής που ελήφθη από την ΔΕΗ. Στη συνέχεια γίνεται η χάραξη της καμπύλης διάρκειας με βάση τις τιμές της διαθέσιμης προς υδροηλεκτρική αξιοποίηση παροχής.

Με ανάλογο τρόπο μπορεί να χαραχθεί η μέση καμπύλη διάρκειας της παροχής λαμβάνοντας υπόψη την μέση παροχή για κάθε μήνα όπως προκύπτει από την ημερήσια χρονοσειρά. Η μέση καμπύλη διάρκειας είναι αυτή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από το υπολογιστικό μοντέλο για την ενεργειακή αποτίμηση του υπό σχεδίαση ΜΥΗ έργου.

Η πληροφορία που χάνεται με τη χρησιμοποίηση της καμπύλης διάρκειας παροχής έναντι του υδρογράφηματος σχετίζεται με τη χρονική διαδοχή της φυσικής παροχής. Η συγκεκριμένη πληροφορία είναι αξιοποιήσιμη μόνο στη περίπτωση μεγάλου υδροηλεκτρικού έργου ή ΜΥΗ που διαθέτει ταμιευτήρα προκειμένου να επιτυγχάνεται ετεροχρονισμός της παροχής. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης η υπολογιστική προσομοίωση αφορά τη σχεδίαση μικρής υδροηλεκτρικής εγκατάστασης η οποία θα λειτουργεί ως μονάδα βάσης. Ως εκ τούτου η χρησιμοποίηση της καμπύλης διάρκειας αποτελεί δικαιολογημένα το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται κατά την ενεργειακή ανάλυση του ΜΥΗ.



Σχήμα Γ.3-6: Μέση καμπύλη διάρκειας παροχής με μηνιαία δεδομένα 1979-1989  
(Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

Υπενθυμίζεται ότι το εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της καμπύλης διάρκειας παροχής και των αξόνων είναι ίσο με τον συνολικό όγκο νερού που διέρχεται από τη διατομή του υδατορεύματος σε δεδομένο χρόνο. Αν για παράδειγμα εφαρμοστεί το 100% των συχνοτήτων στη μονάδα του έτους θα προκύψει ο μέσος ετήσιος διερχόμενος όγκος νερού. Χρησιμοποιώντας την μηνιαία καμπύλη διάρκειας της παροχής υπολογίζεται ακολούθως η μέση ποσότητα του νερού (σε  $m^3$ ) που διέρχεται ετησίως από τη θέση μέτρησης στη γέφυρα Βαρβαριάδας. Σημειώνεται για λόγους σαφήνειας ότι στην επόμενη σχέση η παροχή εισάγεται σε μονάδες  $m^3/s$ .

$$V_{tot}(m^3) = \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{Q_{ai} + Q_{ai+1}}{2} \cdot \frac{ed_{ai+1} - ed_{ai}}{100} \cdot 8760 \cdot 3600 \right)$$

$$V_{tot} = 307,71 \cdot 10^6 m^3$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί μία σημαντική παράμετρος που σε κάθε περίπτωση πρέπει λαμβάνεται υπόψη κατά την σχεδίαση ενός ΜΥΗ. Αυτό είναι ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης  $WF$ . Ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης ενός ΜΥΗ έργου ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου νερού που διέρχεται από τη θέση υδροληψίας προς τον συνολικό όγκο νερού που αξιοποιείται από τους εγκατεστημένους υδροστροβίλους. Για λόγους βέλτιστης αξιοποίησης του υδατικού πόρου και σύμφωνα πάντα με το ισχύον νομοθετικό καθεστώς για την Ελλάδα υπάρχει υποχρέωση εκμετάλλευσης του 75% του διερχόμενου όγκου νερού από τη θέση υδροληψίας. Για δεδομένη θέση υδροληψίας του έργου ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης εξαρτάται επομένως από το πλήθος και το μέγεθος των εγκατεστημένων υδροστροβίλων.

#### Γ.3.4: Αναγωγή της καμπύλης διάρκειας παροχής σε θέσεις χωρίς μετρήσεις

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αναγωγή της καμπύλης διάρκειας παροχής από τη θέση των υδρομετρήσεων στην εκάστοτε θέση του ποταμού που εξετάζεται να γίνει η υδροληψία του έργου. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος. Για το λόγο αυτό απλά υπενθυμίζεται ότι λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής και στο μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης σε σημεία εντός της ίδιας υδρολογικής λεκάνης. Η σχέση που χρησιμοποιείται τελικά για την αναγωγή είναι η εξής:

$$Q_i = Q_m \cdot \frac{A_i}{A_m} \cdot \frac{h_i}{h_m}$$

Όπου:

- $Q_i, Q_m$ : η τιμή της παροχής (σε  $m^3/s$ ) στη θέση αναγωγής ( $i$ ) και στη θέση μέτρησης ( $m$ )
- $A_i, A_m$ : η επιφάνεια της λεκάνης απορροής (σε  $km$ ) στη θέση αναγωγής ( $i$ ) και στη θέση μέτρησης ( $m$ )
- $h_i, h_m$ : το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (σε  $mm$ ) στη θέση αναγωγής ( $i$ ) και στη θέση μέτρησης ( $m$ )

Κατά κανόνα θεωρείται ότι το ετήσιο ύψος βροχής  $h(mm)$  μεταβάλλεται γραμμικά με το υψόμετρο  $z(m)$ . Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για οποιαδήποτε αναγωγή βροχομετρικών παρατηρήσεων σε διαφορετικό υψόμετρο από αυτό που αρχικά ανήκουν. Εδώ ταιριάζει η έννοια της βροχοβαθμίδας. Η μέση αύξηση του ετήσιου βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου ονομάζεται βροχοβαθμίδα (Τσακίρης, 1995). Η γραμμική μεταβολή του μέσου ετήσιου ύψους βροχής με το υψόμετρο περιγράφεται επομένως από μια σχέση της μορφής (Παπαντώνης, 2001):

$$\delta h = \beta \cdot \delta z$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η τιμή της βροχοβαθμίδας  $\beta$  για την Ελλάδα κυμαίνεται μεταξύ 0,5 έως 2  $mm/m$  (Παπαντώνης, 2001). Η βροχοβαθμίδα προκύπτει συνήθως από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων υψών βροχής του κάθε βροχομετρικού σταθμού που είναι εγκατεστημένος στην ευρύτερη περιοχή συναρτήσεως του υψομέτρου στο οποίο βρίσκονται. Ειδικά για τη λεκάνη απορροής του Αγραφιώτη ο συντελεστής  $\beta$  έχει προκύψει από πρόσφατη μελέτη (Αθανασιά, 2010) ότι έχει την τιμή:

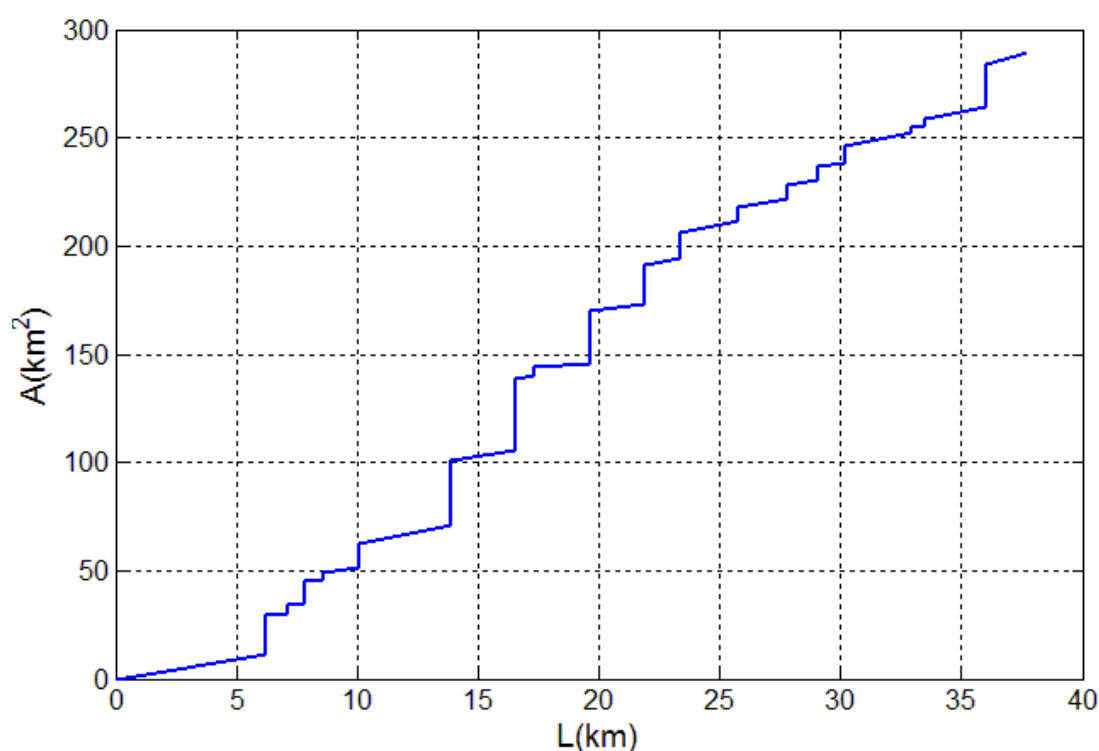
$$\beta = 0,69 \frac{mm}{m}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα καθώς και το γεγονός ότι στο υψόμετρο που βρίσκεται ο υδρομετρικός σταθμός στη γέφυρα Βαρβαριάδας αντιστοιχεί μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης περίπου 1210 $mm$  μπορεί να γίνει αναγωγή του  $h(mm)$  σε οποιαδήποτε θέση κατά μήκος του ποταμού. Στο σημείο αυτό και όσο αφορά την αναγωγή της καμπύλης διάρκειας απομένει ακόμα να διερευνηθεί η μεταβολή του μεγέθους (σε  $m^2$ ) της λεκάνης απορροής κατά μήκος του ποταμού Αγραφιώτη.

Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε διατομή ενός υδατορεύματος αντιστοιχεί μια διαφορετική λεκάνη απορροής, της οποίας η επιφάνεια αυξάνει καθώς το εξεταζόμενο σημείο μετατοπίζεται προς τα κατάντι. Ακόμα η συνολική λεκάνη απορροής αποτελείται από περισσότερες υπό-λεκάνες, κάθε μία από τις οποίες

αντιστοιχεί στα ρυάκια και τους παραποτάμους που συμβάλλουν στο εξεταζόμενο υδατόρευμα. Έτσι λοιπόν η καμπύλη που περιγράφει την μεταβολή στην επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης κατά μήκος του ποταμού και προς τη κατάντι κατεύθυνση είναι μεν αύξουσα αλλά όχι συνεχής.

Στο πλαίσιο της δουλειάς που έγινε για τη παρούσα διπλωματική χαράχθηκαν με το λογισμικό *Autocad Civil 3D* οι λεκάνες απορροής σε συγκεκριμένες διατομές κατά μήκος του ποταμού Αγραφιώτη. Οι θέσεις που επιλέχθηκαν για τη χάραξη είναι αυτές, στις οποίες κάποιος σημαντικός παραπόταμος ενώνεται με το κύριο ρεύμα του ποταμού. Αυτές είναι και οι θέσεις στις οποίες παρατηρείται ασυνέχεια στη καμπύλη μεταβολής της επιφάνειας της υδρολογικής λεκάνης. Η επόμενη καμπύλη παριστάνει γραφικά την αύξηση στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής  $A(km^2)$  σε συνάρτηση με το ανάπτυγμα μήκους του ποταμού Αγραφιώτη  $L(km)$ . Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος μήκους θεωρείται αρχή της μέτρησης το μέγιστο υψόμετρο ( $z = 1600m$ ).



Σχήμα Γ.3-7: Μεταβολή επιφάνειας της λεκάνης απορροής κατά μήκος Αγραφιώτη

### Γ.3.5: Θεωρητικό υδροδυναμικό Αγραφιώτη

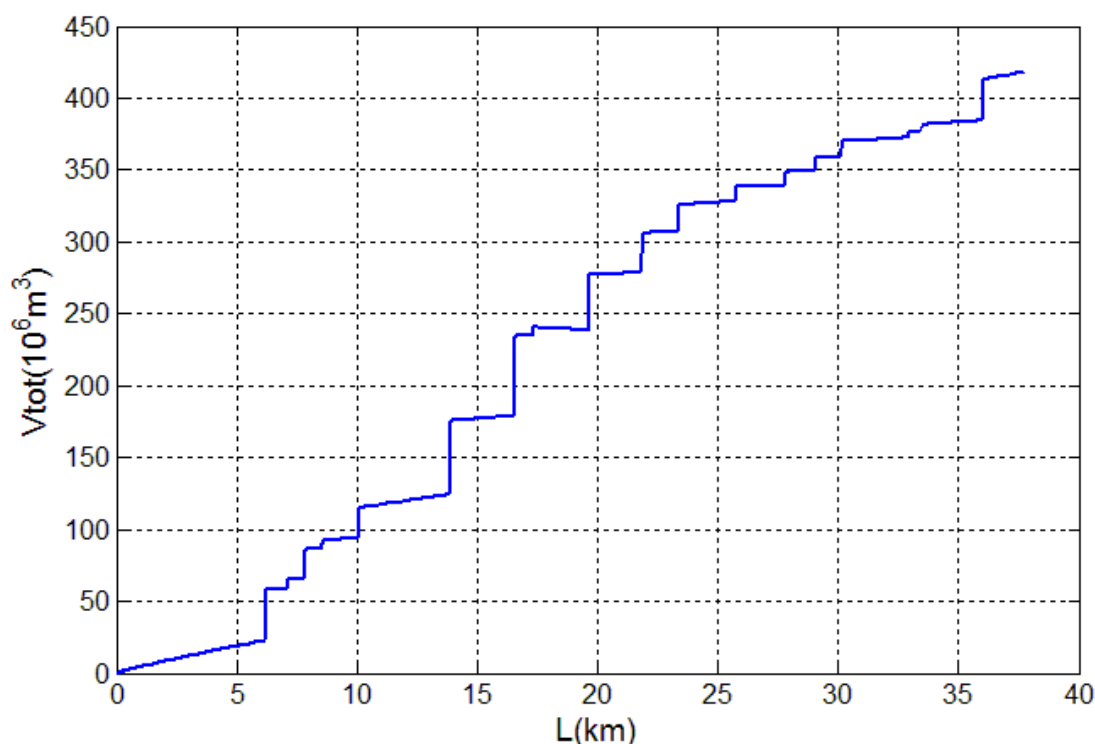
Ο εντοπισμός των προσφορότερων ενεργειακά θέσεων υδροληψίας κατά μήκος του υδατορεύματος γίνεται χαράσσοντας την καμπύλη μεταβολής της ετήσιας υδραυλικής ενέργειας σε συνάρτηση με το ανάπτυγμα μήκους του ποταμού. Βάση των καθαρά ενεργειακών κριτηρίων σκοπός της ανάλυσης θα ήταν να επιλεγεί μία θέση υδροληψίας που συγκεντρώνει βασικά πλεονεκτήματα όπως μεγάλη επιφανειακή απορροή και υψηλή τιμή υδραυλικής πτώσης.

Στις προηγούμενες παραγράφους έχει χαραχθεί ήδη η μηκοτομή του Αγραφιώτη. Έχει επίσης παρουσιαστεί η καμπύλη διάρκειας παροχής στη θέση μέτρησης και η μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία μπορεί να γίνει αναγωγή της συγκεκριμένης καμπύλης σε κάθε άλλη θέση κατά μήκος του ποταμού. Για την



αναγωγή λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του μεγέθους της υδρολογικής λεκάνης  $A(km)$  και της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης  $h(mm)$  όπως έχει καθοριστεί.

Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιφανειακή απορροή δίνεται από τη σχέση:  $V = Q \cdot t$  (όπου  $t$  ο χρόνος σε sec) δύναται να χαραχθεί η καμπύλη μεταβολής του συγκεκριμένου μεγέθους σε συνάρτηση με το ανάπτυγμα μήκους του ποταμού. Εξετάζεται δηλαδή πως μεταβάλλεται η ετήσια επιφανειακή απορροή καθώς η θεωρούμενη κάθε φορά θέση υδροληψίας μετατοπίζεται κατά μήκος του ποταμού Αγραφιώτη.



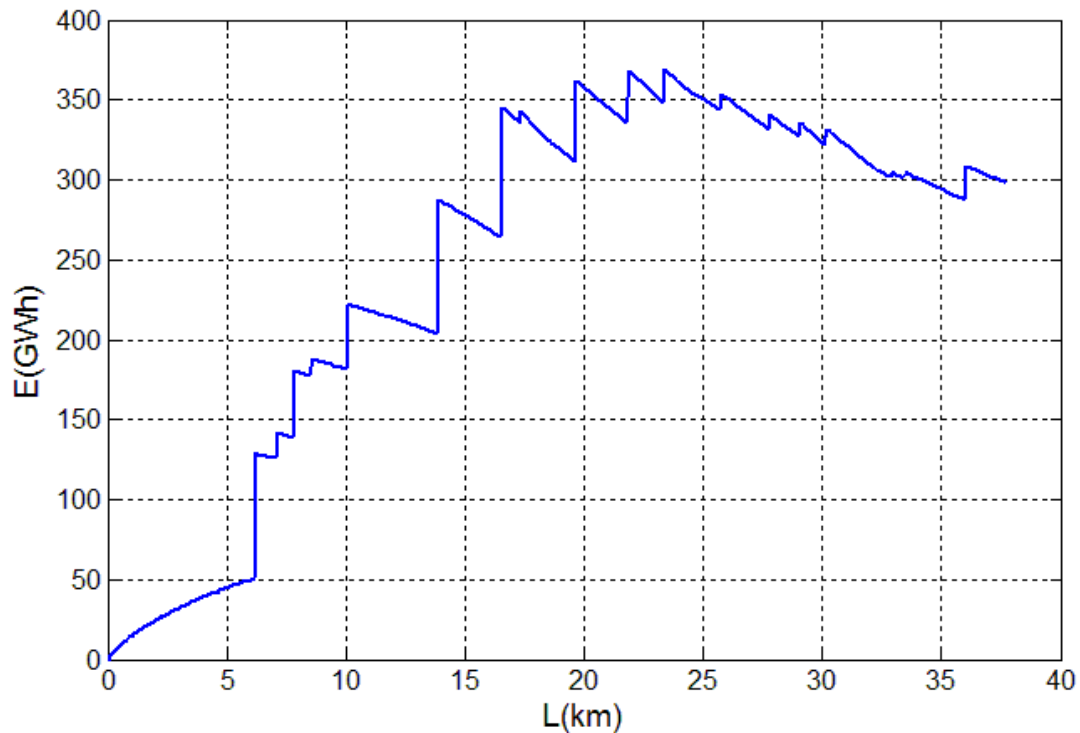
Σχήμα Γ.3-8: Μεταβολή ετήσιας επιφανειακής απορροής κατά μήκος Αγραφιώτη

Από την προηγούμενη καμπύλη μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε γενικές γραμμές η σταδιακή μετατόπιση της θέσης υδροληψίας του ΜΥΗ κατά μήκος του υδατορεύματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ετήσιας επιφανειακής απορροής  $V(m^3)$  που είναι διαθέσιμη προς αξιοποίηση. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι η αύξηση που επέρχεται στο μέγεθος της υδρολογικής λεκάνης  $A(km^2)$  καθώς μετακινούμαστε από τα υψηλότερα στα χαμηλότερα υψόμετρα υπερισχύει της μείωσης που επέρχεται στη μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση  $h(mm)$  κατά την αναγωγή της καμπύλης διάρκειας.

Το θεωρητικό υδροδυναμικό, δηλαδή η υδραυλική ενέργεια που αντιστοιχεί στην απορροή  $V(m^3)$  από τη θέση στάθμης  $z(m)$  μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας, μπορεί να υπολογιστεί αν δεν ληφθούν υπόψη βαθμοί απόδοσης και θεωρηθεί πλήρης ενεργειακή αξιοποίηση του νερού. Σε αυτή τη περίπτωση η υδραυλική ενέργεια  $E(GWh)$  δίνεται από την σχέση που παρουσιάζεται παρακάτω (Παπαντώνης, 2001).

$$E(GWh) = \frac{z \cdot V}{367} \cdot 10^{-6}$$

Προκύπτει έτσι η καμπύλη μεταβολής της ετήσιας υδραυλικής ενέργειας συναρτήσει του αναπτύγματος μήκους  $L(km)$  του ποταμού Αγραφιώτη:



Σχήμα Γ.3-9: Μεταβολή υδραυλική ενέργειας κατά μήκος Αγραφιώτη

Η συμπεριφορά της προηγούμενης καμπύλης φαίνεται ότι επηρεάζεται από τη σχετική μεταβολή των μεγεθών  $z(m)$  και  $V(m^3)$  που συμβάλουν στην ανάπτυξη του θεωρητικού υδροδυναμικού. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διακύμανση των τιμών υδραυλικής ενέργεια κατά μήκος του Αγραφιώτη. Συγκεκριμένα στις θέσεις του υδατορεύματος που κάποιος νέος παραπόταμος ενώνεται με τον βασικό κλάδο η σημαντική αύξηση της απορροής (λόγω μεγάλης αύξησης στην λεκάνη απορροής) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της υδραυλικής ενέργειας. Στα ενδιάμεσα σημεία ωστόσο η επιφάνεια της λεκάνης απορροής αυξάνει μεν λόγω μετακίνησης κατάντι αλλά όχι σημαντικά (δεν συμβάλει κάποιος νέος παραπόταμος) και έτσι η μείωση του υψόμετρου υπερισχύει της αύξησης που παρατηρείται στην μέση ετήσια συνολική απορροή. Ως εκ τούτου η υδραυλική ενέργεια παρουσιάζει τελικά διακύμανση κατά μήκος του ποταμού. Σε κάθε περίπτωση το θεωρητικό υδροδυναμικό φαίνεται ότι λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές στο διάστημα από το 16<sup>ο</sup> έως το 30<sup>ο</sup> km του Αγραφιώτη. Σε θέσεις με ανάπτυγμα μήκους μικρότερο από 6km που αντιστοιχούν στα πολύ υψηλά υψόμετρα, η υδραυλική ενέργεια έχει εξαιρετικά χαμηλές τιμές λόγω της μικρής τιμής που λαμβάνει η επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης απορροής.



---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ:  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

---

## ***4.1: ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ***

### *4.1.1: Μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης*

- $Q_1$ : τιμή ονομαστικής παροχής υδροστροβίλου  $\langle T1 \rangle$  που δίνεται από τον κώδικα βελτιστοποίησης
- $Q_2$ : τιμή ονομαστικής παροχής υδροστροβίλου  $\langle T2 \rangle$  που δίνεται από τον κώδικα βελτιστοποίησης
- $LRIVER$ : τιμή αναπτύγματος μήκους στη καμπύλη του υδατορεύματος (καθορίζει τη θέση του ΥΗΣ) που δίνεται από τον κώδικα βελτιστοποίησης
- $LCON$ : τιμή αναπτύγματος μήκους στην ισοϋψή καμπύλη (καθορίζει τη θέση του της δεξαμενής φόρτισης) που δίνεται από τον κώδικα βελτιστοποίησης

### *4.1.2: Μεταβλητές του υπολογιστικού μοντέλου*

- $head$ : θεωρητική υδραυλική πτώση
- $L_{can}$ : μήκος διώρυγας προσαγωγής
- $L_{pipe}$ : μήκος αγωγού πτώσεως
- $Q_{on,T}$ : ονομαστική παροχή υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
- $Q_{min,T}$ : ελάχιστη παροχή λειτουργίας υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
- $Q_{max,T}$ : μέγιστη παροχή λειτουργίας υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
- $N_{on,T}$ : ονομαστική ισχύς υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
- $H_{on}$ : διαθέσιμη υδραυλική πτώση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας
- $Q_{on}$ : συνολική ονομαστική παροχή υδροστροβίλων
- $N_{on}$ : συνολική ονομαστική ισχύς υδροστροβίλων
- $g$ : επιτάχυνση της βαρύτητας
- $den$ : πυκνότητα του νερού
- $\nu$ : κινηματική συνεκτικότητα του νερού
- $D$ : εξωτερική διάμετρος αγωγού πτώσεως
- $e$ : πάχος του αγωγού πτώσεως
- $\delta h_L$ : γραμμικές απώλειες στον αγωγό πτώσεως
- $\lambda$ : αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών
- $c$ : μέση ταχύτητα της ροής στον αγωγό
- $D_{IN}$ : εσωτερική διάμετρος αγωγού πτώσεως
- $\varepsilon$ : τραχύτητα αγωγού
- $\varepsilon_s$ : σχετική τραχύτητα αγωγού
- $Re$ : αριθμός Reynolds της ροής
- $\delta h_f$ : εντοπισμένες απώλειες στον αγωγό πτώσης
- $\zeta$ : συντελεστής εντοπισμένων απωλειών
- $\delta h$ : συνολικές υδραυλικές απώλειες στον αγωγό πτώσεως

- $H$ : διαθέσιμη υδραυλική πτώση υδροστροβίλων
- $LOSS$ : ποσοστό των υδραυλικών απωλειών (στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης) σε σχέση με τη θεωρητική υδραυλική πτώση
- $Q_S$ : φυσική παροχή που διέρχεται από τη θέση υδροληψίας
- $ed$ : η τιμή του αδιάστατου χρόνου επί τοις %
- $ITUR$ : μεταβλητή που καθορίζει τον τύπο του υδροστροβίλου
- $\eta_{tur}$ : βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου
- $\eta_{max}$ : μέγιστος βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου
- $Q_T$ : εκάστοτε παροχή λειτουργίας υδροστροβίλου ( $T$ )
- $V_{TOT}$ : ετήσια ποσότητα του νερού (σε μονάδες  $m^3$ ) που αξιοποιείται από τους δύο υδροστροβίλους
- $V_{NAT}$ : ετήσια ποσότητα του νερού (σε μονάδες  $m^3$ ) που διέρχεται από τη θέση υδροληψίας
- $WF$ : συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης υδατορεύματος
- $\eta_{gen}$ : βαθμός απόδοσης ηλεκτρικής γεννήτριας
- $\eta_{gen,max}$ : μέγιστος βαθμός απόδοσης ηλεκτρικής γεννήτριας
- $N$ : παραγόμενη μηχανική ισχύς υδροστροβίλου
- $M$ : ανθιστάμενη ροπή στην περιστροφή της ατράκτου κάθε μονάδας
- $\omega$ : γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου
- $N_e$ : ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τη κάθε μονάδα
- $I$ : ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος γραμμής
- $U$ : πολική τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας
- $\cos(\varphi)$ : συντελεστής ισχύος του φορτίου της γεννήτριας
- $N_{FL}$ : η παραγόμενη μηχανική ισχύς από λειτουργία του υδροστροβίλου σε πλήρες φορτίο
- $N_{GEN}$ : ονομαστική ισχύς γεννήτριας (σε  $KVA$ )
- $NTOT_e$ : συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τις εγκατεστημένες μονάδες στον ΥΗΣ
- $D_{TUR}$ : χαρακτηριστική διάμετρος υδροστροβίλου
- $n$ : στροφές υδροστροβίλου σε RPM
- $n_s$ : ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ
- $n_q$ : ειδικός αριθμός στροφών ως προς την παροχή
- $z_j$ : πλήθος δεσμών τροφοδοσίας υδροστροβίλου Pelton
- $Q_j$ : παροχή ανά δέσμη τροφοδοσίας υδροστροβίλου Pelton
- $N_j$ : μηχανική ισχύς που παράγεται ανά δέσμη τροφοδοσίας υδροστροβίλου Pelton
- $n_{s,j}$ : ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ  $N_j$  (μίας δέσμης νερού) υδροστροβίλου Pelton

- $c_e$ : ταχύτητα δέσμης τροφοδοσίας υδροστροβίλου Pelton
- $\varphi$ : συντελεστής απωλειών ακροφυσίου υδροστροβίλου Pelton
- $u$ : περιφερειακή ταχύτητα της ροής που προσπίπτει σε υδροστρόβιλο Pelton
- $U$ : αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας για υδροστρόβιλο Pelton
- $D_{1e}$ : διάμετρος στεφάνης στη διατομή εισόδου για υδροστρόβιλο Francis
- $D_{2e}$ : διάμετρος στεφάνης στη διατομή εξόδου για υδροστρόβιλο Francis
- $U_{2e}$ : αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο για υδροστρόβιλο Francis
- $D_o$ : εξωτερική διάμετρος δρομέα για βολβοειδή υδροστρόβιλο (Axial flow)
- $U_o$ : αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας για βολβοειδή υδροστρόβιλο (Axial flow)
- $SE$ : συντελεστής επικαιροποίησης σχέσεων κόστους
- $CO_{TPE}$ : κόστος υδροστροβίλου Pelton
- $CO_{TFR}$ : κόστος υδροστροβίλου Francis
- $CO_{TCR}$ : κόστος υδροστροβίλου Cross flow
- $CO_{TAX}$ : κόστος υδροστροβίλου Axial flow
- $CO_{GEN,SYN}$ : κόστος σύγχρονης γεννήτριας
- $CO_{GEN,ASYN}$ : κόστος ασύγχρονης γεννήτριας
- $NPOLE$ : αριθμός των πόλων της γεννήτριας
- $CO_{GOV}$ : κόστος ρυθμιστή υδροστροβίλου
- $CO_{TRAN}$ : κόστος μετασχηματιστή
- $NT_{GEN}$ : η συνολική ονομαστική ισχύς των εγκατεστημένων ηλεκτρικών γεννητριών (σε KVA)
- $CO_{SWI}$ : κόστος ηλεκτρικού πίνακα
- $CO_{mech}$ : ολικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- $CO_{SUB}$ : κόστος υποσταθμού
- $CO_{YDR1}$ : κόστος υδροληψίας
- $Q_{PRmax}$ : μέγιστη παροχή προσαγωγής στον αγωγό πτώσεως
- $CO_{YDR2}$ : κόστος εκχειλιστή
- $Q_{flood}$ : πλημμυρική παροχή
- $CO_{DIO}$ : κόστος διώρυγας προσαγωγής
- $L_{can}$ : μήκος διώρυγας προσαγωγής
- $CO_{PIPE}$ : κόστος αγωγού πτώσεως
- $d_{st}$ : πυκνότητα χάλυβα κατασκευής αγωγού πτώσεως (St – 37)
- $L_{PIPE}$ : μήκος αγωγού πτώσεως
- $K_m$ , το ειδικό κόστος υλικού
- $K_{sur}$ , το ειδικό κόστος επιφάνειας

- $K_{weld}$ , το ειδικό κόστος συγκόλλησης
- $CO_{YHS}$ : κόστος του υδροηλεκτρικού σταθμού
- $CO_{civ}$ : ολικό κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού
- $CO_{st}$ : κόστος μελετών, αδειοδοτήσεων και επίβλεψης
- $CO_{mish}$ : το κόστος των επιμέρους διαφόρων δαπανών
- $CO_{tot}$ : συνολικό ύψος της επένδυσης
- $N_{con}$ : διάρκεια κατασκευής ΜΥΗ
- $N$ : διάρκεια λειτουργίας ΜΥΗ
- $LOAN$ : τραπεζικό δάνειο
- $INTRA$ : επιτόκιο δανεισμού
- $NPAY$ : περίοδος αποπληρωμής του δανείου
- $CO_{OPER}$ : λειτουργικά κόστη
- $CO_{INSUR}$ : κόστη ασφαλίσεων
- $RATE$ : μέσος ετήσιος πληθωρισμός
- $EP$ : τιμή πώλησης την παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- $RATE_{EN}$ : ετήσια αναπροσαρμογή της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας
- $r$ : επιτόκιο προεξόφλησης
- $BCR$ : λόγος εσόδων προς έξοδα
- $NPV$ : καθαρή παρούσα αξία
- $IRR$ : εσωτερική απόδοση της επένδυσης

## **4.2: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Η βέλτιστη οικονομοτεχνική σχεδίαση ΜΥΗ έργου, το οποίο θα λειτουργεί ως μονάδα βάσης αποτέλεσε το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ύστερα από την θεωρητική διερεύνηση του προβλήματος της σχεδίασης ενός ΜΥΗ, η οποία έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο θα πρέπει να περιγραφεί το βασικό κομμάτι της δουλειάς που έγινε στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Κάθε σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης απαιτεί συγκεκριμένα προαπαιτούμενα (Γιαννάκογλου, 2006) από το μηχανικό που καλείται να το αντιμετωπίσει. Τα προαπαιτούμενα αυτά συνοπτικά είναι τα εξής:

- *Οι στόχοι του προβλήματος*
- *Η παραμετροποίηση του προβλήματος*
- *Το λογισμικό αξιολόγησης*
- *Οι περιορισμοί του προβλήματος*
- *Η μέθοδος βελτιστοποίησης*

### 4.2.1: Οι στόχοι του προβλήματος

Οι στόχοι ενός προβλήματος βελτιστοποίησης συνδέονται με την εξεύρεση ενός ακρότατου, δηλαδή με τον εντοπισμό μιας μέγιστης ή μιας ελάχιστης τιμής που αντιστοιχεί κατά περίπτωση στη βέλτιστη λύση. Κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης λαμβάνονται φυσικά υπόψη κάποιοι περιορισμοί για το εξεταζόμενο πρόβλημα. Το θέμα των περιορισμών όμως θα εξεταστεί σε επόμενη παράγραφο. Εδώ αναλύονται οι στόχοι του προβλήματος.

Για το πρόβλημα που αφορά τη σχεδίαση του ΜΥΗ ο ρεαλιστικός στόχος για κάθε ιδιώτη επενδυτή είναι η μεγιστοποίηση της οικονομικής αποδοτικότητας της επένδυσης. Διαφορετικά κριτήρια όπως ο λόγος εσόδων προς έξοδα (*BCR*), η καθαρή παρούσα αξία (*NPV*) και η εσωτερική απόδοση της επένδυσης (*IRR*) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εξεύρεση της βέλτιστης εγκατάστασης. Εναλλακτικά ένας μελετητής θα μπορούσε για λόγους περισσότερο διερευνητικούς να θέσει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ή του συντελεστή φορτίου ή του συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης του υδατορεύματος. Τα παραπάνω βέβαια ισχύουν για την περίπτωση που η βελτιστοποίηση αφορά ανάλυση ενός απλού στόχου.

Στην πράξη τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν περισσότερους από έναν στόχους, οι οποίοι μάλιστα πολλές φορές είναι αντικρουόμενοι μεταξύ τους. Στην περίπτωση των ΜΥΗ, η οποία εξετάζεται, η μεγιστοποίηση της οικονομικής αποδοτικότητας της επένδυσης επιτυγχάνεται γενικά εις βάρος του συντελεστή φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος του ΜΥΗ συνοδεύεται, ως ένα οριακό σημείο, από αύξηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης. Αντίστοιχα ο συντελεστής φορτίου, ο οποίος εκφράζει το λόγο της μέσης (ετησίως) παραγόμενης ισχύος προς την ονομαστική ισχύ, μειώνεται όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς.

Η διατήρηση του συντελεστή φορτίου σε υψηλή τιμή ωστόσο κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την επένδυση ειδικά όταν αυτή αφορά κατασκευή ΜΥΗ. Τα ΜΥΗ λειτουργούν κατά κύριο λόγο ως μονάδες βάσης. Για το λόγο αυτό η μέση παραγόμενη ισχύς πρέπει να είναι ποσοτικά κοντά στην εγκατεστημένη εφόσον δεν υπάρχει δυνατότητα ετεροχρονισμού της παροχής και ικανοποίησης αναγκών του δικτύου σε ώρες αιχμής. Αποτέλεσμα της υπέρ-διαστασιολόγησης του

ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι να επιβαρύνεται γενικά το συνολικό κόστος του έργου και να τίθεται σε κίνδυνο η βιωσιμότητα της επένδυσης λόγω της υδρολογικής αβεβαιότητας.

Σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί καθίσταται σαφές ότι η βέλτιστη υδροηλεκτρική εγκατάσταση θα πρέπει να προκύψει ως μια «λύση ισορροπίας» μεταξύ της οικονομικής αποδοτικότητας και του συντελεστή φορτίου του υπό σχεδίαση ΜΥΗ. Ο στόχος της παρούσας ανάλυσης, επομένως, είναι διπλός και περιλαμβάνει:

- Μεγιστοποίηση εσωτερικής της επένδυσης (*IRR*)
- Μεγιστοποίηση του συντελεστή φορτίου (*Capacity Factor*)

Το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης θα μελετηθεί αρχικά ξεχωριστά και στη συνέχεια σε συνδυασμό με τη μεγιστοποίηση του συντελεστή φορτίου. Η έννοια των βέλτιστων λύσεων κατά Pareto θα βοηθήσει προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα της ιεράρχησης των λύσεων στον δυσδιάστατο χώρο. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος που μπορεί να καλύψει και τους δύο στόχους βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα με αμοιβαίες υποχωρήσεις και από τους δύο.

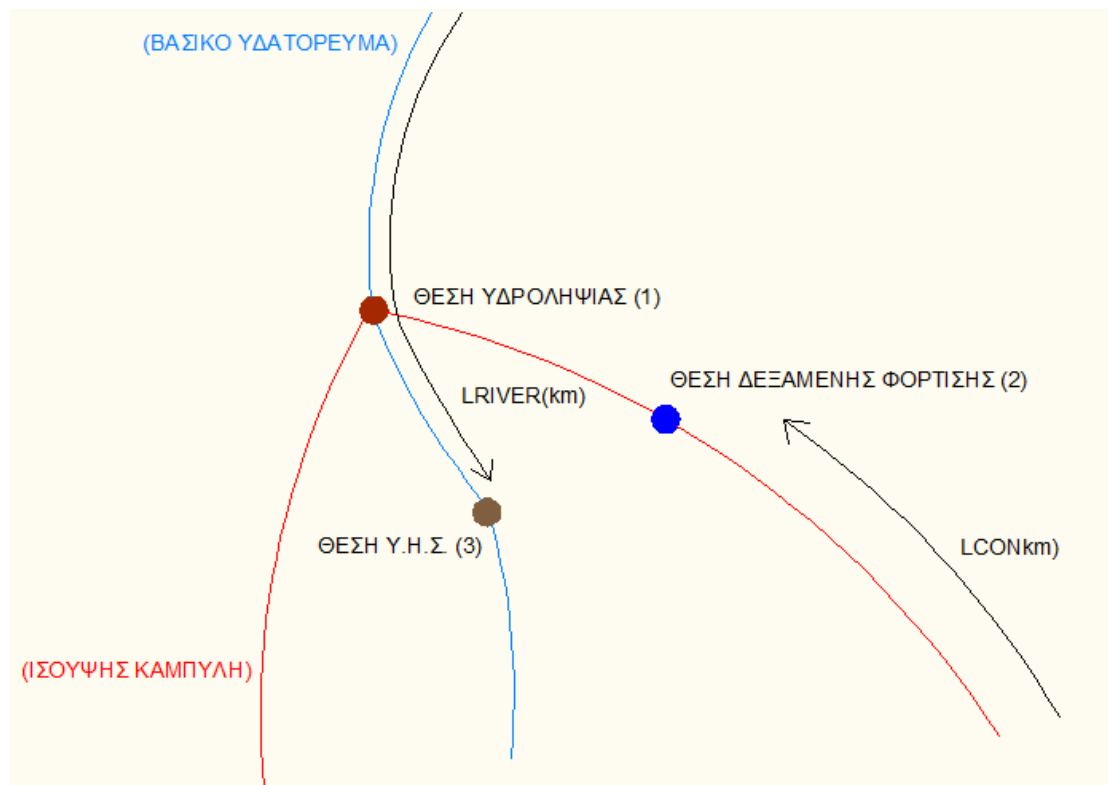
#### 4.2.2: Παραμετροποίηση του προβλήματος

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης προϋποθέτει αρχικά τον καθορισμό των ελεύθερων μεταβλητών. Οι τιμές που δίνονται στις μεταβλητές αυτές από τον κώδικα πρέπει να μοντελοποιούν μία δυνατή λύση του προβλήματος. Μετά το πέρας της διαδικασίας της βελτιστοποίησης θα πρέπει να έχουν αποδοθεί στις ελεύθερες παραμέτρους του προβλήματος οι τιμές εκείνες που εξασφαλίζουν την οικονομοτεχνικά βέλτιστη διάταξη.

Στο συγκεκριμένο σημείο της ανάλυσης είναι πλέον διαθέσιμα όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την υπολογιστική διερεύνηση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης. Εξετάζοντας το θέμα από μια πρακτική σκοπιά γίνεται αποδεκτό ότι η σχεδίαση ενός ΜΥΗ αφορά τόσο τη χωροταξική διάταξη του έργου στο ποταμό όσο και το μέγεθος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που εγκαθίσταται. Στη γενική του μορφή επομένως το πρόβλημα έχει πέντε συνιστώσες, οι οποίες πρέπει να διερευνηθούν ως προς την τελική επιλογή της λύσης. Οι συνιστώσες αυτές αφορούν καθορισμό των παρακάτω στοιχείων:

- Θέση υδροληψίας
- Θέση της δεξαμενής φόρτισης
- Θέση υδροηλεκτρικού σταθμού (για συντομία *ΥΗΣ*)
- Ονομαστική παροχή υδροστροβίλου  $\langle T1 \rangle$
- Ονομαστική παροχή υδροστροβίλου  $\langle T2 \rangle$

Για κάθε επιτρεπτό συνδυασμό των προηγούμενων συνιστωσών προκύπτει από τη μοντελοποίηση του προβλήματος ένα σύνολο από τεχνικά στοιχεία του έργου όπως: η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, το μήκος της διώρυγας προσαγωγής και το μήκος του αγωγού πτώσεως. Τα τεχνικά στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως επηρεάζουν τόσο την ενεργειακή παραγωγή του ΜΥΗ όσο και το συνολικό ύψος της επένδυσης. Ως εκ τούτου ο προσδιορισμός τους κρίνεται αναγκαίος προκειμένου να ελεγχθεί ο βαθμός επίτευξης των στόχων που έχουν τεθεί. Στη συνέχεια δίνεται εποπτικά η τυπική διάταξη του ΜΥΗ κατά μήκος ενός ποταμού. Το σχήμα είναι ενδεικτικό και έχει σχεδιαστεί για τις ανάγκες ανάλυσης του προβλήματος.



Σχήμα Δ.2-1: Χωροταξική διάταξη ΜΥΗ

Σε πρώτη φάση η θέση υδροληψίας του έργου μπορεί θεωρηθεί δεδομένη για λόγους ανάλυσης. Σε αυτή τη περίπτωση οι υπόλοιπες τέσσερις συνιστώσες του προβλήματος υπόκεινται προς βελτιστοποίηση. Τα τεχνικά στοιχεία του ΜΥΗ (υδραυλική πτώση, μήκος έργων προσαγωγής) δύναται να υπολογιστούν από απλές γεωμετρικές σχέσεις χρησιμοποιώντας τις χωρικές συντεταγμένες  $(x, y, z)$  των τριών χαρακτηριστικών θέσεων (υδροληψία, δεξαμενή φόρτισης, ΥΗΣ) που καθορίζουν τη χωροταξική διάταξη. Σε αυτή τη φάση αξιοποιούνται οι διακριτές καμπύλες που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα και αφορούν τον ποταμό Αγραφιώτη και τις ισοϋψείς που τον τέμνουν.

Η χάραξη της διαδρομής της διώρυγας προσαγωγής, όπως είναι γνωστό από το θεωρητικό μέρος, γίνεται κατά μήκος της ισοϋψούς καμπύλης που περνάει από τη θέση υδροληψίας. Για τον λόγο αυτό η θέση της δεξαμενής φόρτισης βρίσκεται και αυτή πάνω στη συγκεκριμένη ισούψη. Η θέση του υδροηλεκτρικού σταθμού αντίστοιχα βρίσκεται κατά μήκος του ποταμού Αγραφιώτη κατάντι όμως της θέσης υδροληψίας.

Με βάση τα προηγούμενα η θέση (3) που αφορά τον υδροηλεκτρικό σταθμό καθορίζεται από το ανάπτυγμα μήκους  $LRIVER(km)$  του ποταμού. Το ανάπτυγμα μήκους του ποταμού έχει σημείο έναρξης της μέτρησης το πρώτο σημείο της καμπύλης που περιγράφει το υδατόρευμα και έχει μέγιστο υψόμετρο. Κατά την ίδια λογική η θέση (2) που αφορά τη δεξαμενή φόρτισης καθορίζεται από το ανάπτυγμα μήκους  $LCON(km)$  με αρχή μέτρησης το ακραίο σημείο της ισοϋψούς καμπύλης που βρίσκεται στην ανατολική διεύθυνση. Η επιλογή της ανατολικής πλευράς της καμπύλης για τον ορισμό του μήκους  $LCON$  γίνεται χωρίς βλάβη της γενικότητας. Τα αναπτύγματα μήκους  $LRIVER$  και  $LCON$  αποτελούν τις δύο πρώτες μεταβλητές του προβλήματος. Αυτά τα δύο μήκη καθορίζουν ουσιαστικά τη χωροταξική διάταξη του έργου για τη δεδομένη θέση υδροληψίας που εξετάζεται.



Η εισαγωγή των δύο μεγεθών μήκους διευκολύνει σημαντικά την ανάλυση. Σε κάθε επανάληψη που εκτελεί το πρόγραμμα η τιμή του αναπτύγματος *LRIVER* αντιστοιχίζεται μονοσήμαντα σε ένα σημείο με συντεταγμένες  $(x_3, y_3, z_3)$  που καθορίζει τη θέση του ΥΗΣ. Για να γίνει αυτό λαμβάνεται υπόψη ότι μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων  $A(x_i, y_i, z_i)$  και  $B(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$  της διακριτής καμπύλης που περιγράφει το υδατόρευμα μπορεί να παρεμβληθεί ενδιάμεσο σημείο  $M(x_m, y_m, z_m)$ , το οποίο αντιστοιχεί στο ανάπτυγμα *LRIVER* που δίνεται από τον κώδικα βελτιστοποίησης. Από την αναλυτική γεωμετρία προκύπτει ότι:

$$x_m = x_i + t \cdot (x_{i+1} - x_i)$$

$$y_m = y_i + t \cdot (y_{i+1} - y_i)$$

$$z_m = z_i + t \cdot (z_{i+1} - z_i)$$

Οι προηγούμενες εξισώσεις περιγράφουν ουσιαστικά τον φορέα του διανύσματος  $\overline{AB}$  στον χώρο τριών διαστάσεων. Η παράμετρος  $t$  που δίνει της συντεταγμένες του σημείου  $M$  υπολογίζεται τότε με δοκιμές από την ισότητα:

$$L_{main}(i) + |\overline{AM}| = LRIVER$$

Όπου:

- $L_{main}(i)$  το ανάπτυγμα μήκους της καμπύλης του υδατορεύματος μέχρι το σημείο  $A(x_i, y_i, z_i)$
- $LRIVER$  το ανάπτυγμα μήκους του υδατορεύματος που δίνεται από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης και αντιστοιχεί στο ενδιάμεσο σημείο  $M(x_m, y_m, z_m)$

Με την ίδια λογική κάθε τιμή του αναπτύγματος *LCON* αντιστοιχίζεται μονοσήμαντα με ένα σημείο  $(x_2, y_2, z_2)$  που χαρακτηρίζει θέση της δεξαμενής φόρτισης. Το σημείο αυτό θα βρίσκεται στην δυτική ή ανατολική πλευρά της ισουΰσους καμπύλης ανάλογα με το αν το ανάπτυγμα μήκους *LCON* έχει τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο της υδροληψίας.

Διαθέτοντας πλέον τις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις  $(x, y, z)$  που αφορούν τη χωροταξική διάταξη του έργου είναι δυνατόν να υπολογιστούν να βασικά τεχνικά στοιχεία με απλές γεωμετρικές σχέσεις ως εξής:

- Θεωρητική Υδραυλική Πτώση:

$$head = z_2 - z_3$$

- Μήκος Αγωγού Πτώσεως:

$$L_{pipe} = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}$$

- Μήκος Διώρυγας Προσαγωγής:

$$L_{canal} = |L_{iso}^{intake} - LCON|$$

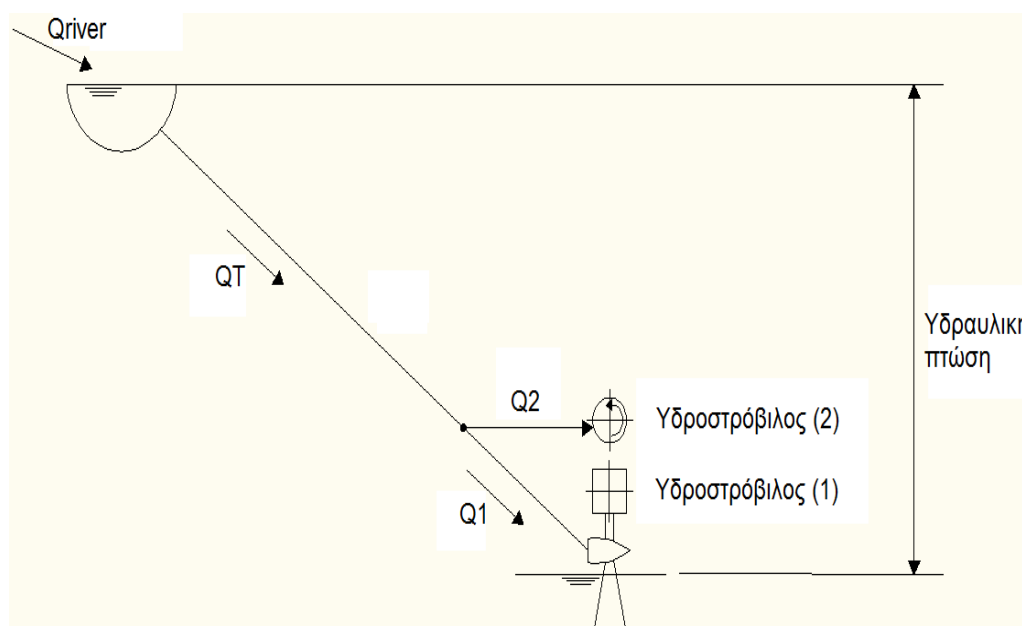
Όπου:

- $LCON$  το ανάπτυγμα μήκους της ισοϋψούς καμπύλης μέχρι την εξεταζόμενη θέση τοποθέτησης της δεξαμενής φόρτισης
- $L_{iso}^{intake}$  το ανάπτυγμα μήκους της ισοϋψούς καμπύλης μέχρι το σημείο που τέμνει τον ποταμό και γίνεται η υδροληψία

Για τους υπολογισμούς που περιγράφηκαν αλλά και την ανάλυση που ακολουθεί στο υπόλοιπο μέρος του κεφαλαίου έγιναν φυσικά κάποιες παραδοχές. Η πρώτη αφορά τον αγωγό πτώσεως, ο οποίος θεωρήθηκε ότι έχει σταθερή κλίση (ευθύγραμμος) προκειμένου να γίνει μία ικανοποιητική εκτίμηση του μήκους του από τη σχέση της απόστασης. Όπως θα φανεί στη συνέχεια ο αγωγός πτώσεως θεωρήθηκε ακόμα ότι έχει ενιαία διάμετρο και πάχος σε όλο το μήκος του.

Στη περίπτωση που η διώρυγα προσαγωγής κατασκευάζεται με κλίση  $I$ , η θεωρητική υδραυλική πτώση που υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση θα πρέπει να ελαττωθεί κατά τον όρο  $I \cdot L_{canal}$  όπου  $L_{canal}$  το μήκος της διώρυγας σε μέτρα. Η κλίση  $I$  λαμβάνεται υπόψη και κατά τον υπολογισμό του  $L_{pipe}$  αφού το υψόμετρο  $z_2$  μειώνεται και αυτό. Γενικά η κλίση της διώρυγας πρέπει να είναι μικρή ώστε να μην μειώνεται σημαντικά η υδραυλική πτώση. Ενδεικτική περιοχή της κλίσεως είναι της τάξεως  $I = 0,001$  έως  $0,002$ . Για τη συγκεκριμένη μελέτη θεωρήθηκε ως τυπική τιμή η κλίση για τη διώρυγα  $I = 0,001$ .

Με βάση τα προηγούμενα οι παράμετροι  $LRIVER$  και  $LCON$  για δεδομένη θέση υδροληψίας καθορίζουν πλήρως τη χωροταξική διάταξη του ΜΥΗ στον Αγραφιώτη και άρα τα βασικά τεχνικά στοιχεία του έργου. Ακολούθως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μέγεθος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η εγκατεστημένη ισχύς στον υδροηλεκτρικό σταθμό καθορίζεται από την ονομαστική παροχή των υδροστροβίλων. Θεωρώντας, στο γενικό σενάριο, ότι το ΜΥΗ μπορεί χρησιμοποιεί μέχρι δύο υδροστροβίλους εισάγονται ως μεταβλητές στο πρόβλημα οι ονομαστικές παροχές των μηχανών. Σημειώνεται επίσης ότι εξετάζεται η γενική περίπτωση κατά την οποία οι υδροστροβίλοι μπορεί να διαφέρουν στο μέγεθος αλλά και τον τύπο της μηχανής έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση της φυσικής απορροής.



Σχήμα Δ.2-2: Διάταξη Εγκατάστασης ΜΥΗ

Με βάση την περιγραφή που έχει γίνει είναι σαφές ότι για δεδομένη θέση υδροληψίας η βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής διάταξης αφορά τελικά τέσσερις ελεύθερες μεταβλητές: τα αναπτύγματα μήκους  $LCON(km)$ ,  $LRIVER(km)$  και τις ονομαστικές παροχές  $Q_1(m^3/s)$ ,  $Q_2(m^3/s)$  των δύο υδροστροβίλων. Το σύνολο των μεταβλητών αυτών είναι συνεχείς και έχουν κάποια άνω και κάτω όρια που οριοθετούν το χώρο ανίχνευσης της λύσης. Το πρόβλημα που μένει να διερευνηθεί αφορά την επιλογή τελικά της θέσης υδροληψίας η οποία προηγουμένως θεωρήθηκε γνωστή αλλά στην πραγματικότητα αποτελεί και αυτή παράμετρο του προβλήματος.

Η θέση υδροληψίας αποτελεί στη πραγματικότητα μία συνεχή μεταβλητή. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι θα μπορούσε θεωρητικά να επιλεγεί ελεύθερα σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του ποταμού. Στην πράξη όμως η παρούσα ανάλυση έχει βασιστεί στα διανυσματικά δεδομένα που εξήχθησαν από έναν διανυσματικό χάρτη της ευρύτερης λεκάνης απορροής. Οι ισοϋψείς καμπύλες που τέμνουν τον Αγραφιώτη αποτέλεσαν βασικό εργαλείο για την μοντελοποίηση του προβλήματος. Το πλήθος των ισοϋψών καμπυλών που διατίθεται από τον διανυσματικό χάρτη είναι ωστόσο πεπερασμένο. Για το λόγο αυτό στη πράξη δύναται να εξετασθούν κάποιες διακριτές τιμές της τελευταίας παραμέτρου που αφορά την θέση υδροληψίας. Οι τιμές αυτές ορίζονται από τα σημεία τομής του συνόλου των ισοϋψών καμπυλών με τον βασικό κλάδο του ποταμού. Οι ισοϋψείς καμπύλες έχουν χαραχθεί γενικά ανά 100m υψομέτρου. Μέγιστη τιμή του υψομέτρου είναι τα 1600m (πηγές Αγραφιώτη) και ελάχιστη τα 300m (εκβολή στη λίμνη Κρεμαστών). Η ισοϋψής καμπύλη στα 340m είναι επίσης διαθέσιμη από τον διανυσματικό χάρτη.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, κατά τη διερεύνηση του προβλήματος της βελτιστοποίησης δύναται να εξεταστεί παραμετρικά η μεταβλητή που αφορά την επιλογή της εκάστοτε θέσης υδροληψίας. Πιο συγκεκριμένα επιλέγοντας κάθε φορά μια δεδομένη θέση υδροληψίας (που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ισοϋψή) γίνεται βελτιστοποίηση των υπολοίπων τεσσάρων μεταβλητών. Για κάθε θέση υδροληψίας δύναται επομένως να χαραχθεί ένα ξεχωριστό μέτωπο «pareto» βέλτιστων λύσεων.

#### 4.2.3: Το λογισμικό αξιολόγησης

Ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης αναζητά την καλύτερη λύση (με βάση τον στόχο ή τους στόχους που έχουν τεθεί) από ένα θεωρητικά άπειρο πλήθος υποψηφίων λύσεων. Κάθε λύση προκύπτει από έναν διαφορετικό συνδυασμό των μεταβλητών που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Το λογισμικό αξιολόγησης συνιστά ουσιαστικά το υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο θα αξιολογεί και θα βαθμολογεί ως προς το βαθμό επίτευξης των στόχων κάθε υποψήφια λύση.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε αποτελεί έναν υπολογιστικό κώδικα, ο οποίος προσομοιώνει τη λειτουργία του ΜΥΗ για το χρονικό ορίζοντα που προβλέπεται και αξιολογεί την οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Παράλληλα υπολογίζει μια σειρά από μεγέθη, τα οποία σχετίζονται με τη λειτουργία του έργου (πχ συντελεστής φορτίου, συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης) και αφορούν το σχεδιαστή. Ο συγκεκριμένος κώδικας παρουσιάζεται θεωρητικά σε επόμενη ενότητα στην οποία αναλύεται και το σύνολο των λειτουργιών που εκτελεί.

Η σύνταξη του υπολογιστικού μοντέλου που περιγράφηκε προηγουμένως, έγινε στο εμπορικό πακέτο *MATLAB*. Το *MATLAB* αποτελεί ένα σύγχρονο λογισμικό για την υλοποίηση αλγορίθμων και την εκτέλεση υπολογισμών. Στα πλεονεκτήματα του *MATLAB* εντάσσονται:

- βελτιστοποιημένοι κώδικες για την διεξαγωγή υπολογισμών με πίνακες
- διάθεση πλούσιας βιβλιοθήκης με έτοιμες συναρτήσεις, οι οποίες είναι αποθηκευμένες στο πρόγραμμα
- αυτόματος εντοπισμός και διόρθωση λαθών
- φιλικό περιβάλλον επικοινωνίας με το χρήστη (*interface*)

#### 4.2.4: Οι περιορισμοί του προβλήματος

Το υπολογιστικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση – αξιολόγηση της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης αναμένεται ότι θα εντοπίσουν τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος. Η όλη διαδικασία ωστόσο διέπεται από συγκεκριμένους περιορισμούς.

Μια πρώτη κατηγορία αφορά τους περιορισμούς ανισότητας που σχετίζονται με το χώρο διερεύνησης κάθε ελεύθερης μεταβλητής. Οι μεταβλητές *LRIVER* και *LCON* για παράδειγμα δεδομένου ότι αποτελούν αναπτύγματα μήκους συγκεκριμένων καμπυλών δύναται να διερευνώνται σε ένα εύρος από μια ελάχιστη μέχρι μια μέγιστη τιμή. Το ίδιο και οι ονομαστικές παροχές των υδροστροβίλων που πρέπει να είναι στα όρια που επιβάλλει η τυποποίηση τους για τα μικρά υδροηλεκτρικά. Έτσι σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί ο χώρος των υποψήφιων λύσεων καθορίζεται από τους εξής περιορισμούς ανισότητας:

$$0 \leq LCON(km) \leq L_{iso}^{tot}(km)$$

$$L_{main}^{intake}(km) \leq LRIVER(km) \leq L_{main}^{tot}(km)$$

$$0,25(m^3/s) \leq Q_1(m^3/s) \leq 10m^3/s$$

$$0 \leq Q_2(m^3/s) \leq 10m^3/s$$

Όπου:

- $L_{iso}^{tot}(km)$ , το συνολικό μήκος της ισούψους καμπύλης που εξετάζεται
- $L_{main}^{intake}(km)$ , το ανάπτυγμα μήκους του ποταμού Αγραφιώτη μέχρι τη θέση που γίνεται η υδροληψία
- $L_{main}^{tot}(km)$ , το συνολικό μήκος του ποταμού Αγραφιώτη

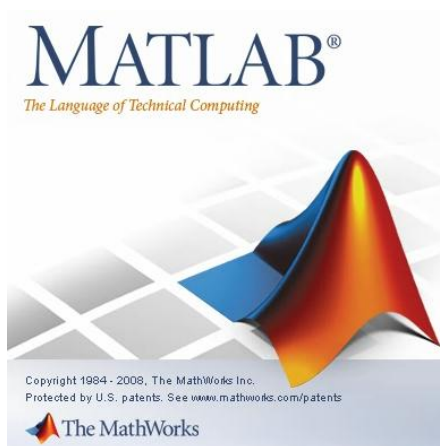
Μια δεύτερη κατηγορία περιορισμών περιλαμβάνει μεγέθη τα οποία προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο και σχετίζονται με τη φύση του προβλήματος. Για παράδειγμα οικονομοτεχνικά κριτήρια επιβάλλουν τον περιορισμό των υδραυλικών απωλειών στον αγωγό πτώσης σε ποσοστό μικρότερο ή ίσο του 5%. Σενάρια σχεδίασης στα οποία οι υδραυλικές απώλειες είναι υψηλότερες από το συγκεκριμένο ποσοστό δεν λαμβάνονται υπόψη. Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται η διαθεσιμότητα κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου για τα μεγέθη ονομαστικής παροχής και διαθέσιμης υδραυλικής που εξετάζονται καθώς και η διαθεσιμότητα αγωγού πτώσεως με τυποποιημένη διάμετρο. Οι προηγούμενοι περιορισμοί εισάγονται στο υπολογιστικό μοντέλο με τη μέθοδο της εξωτερικής ποινής. Αυτό σημαίνει ότι όταν δεν ικανοποιείται κάποιος από τους προηγούμενους περιορισμούς του προβλήματος το πρόγραμμα τιμωρεί τις αντικειμενικές συναρτήσεις (στόχοι) προκειμένου να μη συμπεριληφθούν στο μέτωπο βέλτιστων λύσεων κατά «pareto».

Τέλος σημαντικό νομικό περιορισμό για τη σχεδίαση ενός ΜΥΗ αποτελεί η διατήρηση του συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης σε επίπεδο μεγαλύτερο του 75% όπως προβλέπεται από την ελληνική νομοθεσία. Σημειώνεται ότι για λόγους πληρότητας την ανάλυση δεν ελήφθη περιορισμός για το συγκεκριμένο μέγεθος εξαρχής. Οι βέλτιστες λύσεις που θα προκύψουν από την όλη διαδικασία θα ελεγχθούν τελικά ως προς τον βαθμό που ικανοποιούν τον περιορισμό του συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης. Αυτό θα γίνει κατά τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης.

#### 4.2.5: Επιλογή μεθόδου βελτιστοποίησης

Το λογισμικό βελτιστοποίησης αποτελεί το εργαλείο - αλγόριθμο με το οποίο γίνεται η σάρωση του χώρου των δυνατών λύσεων προκειμένου να εντοπιστούν οι βέλτιστες λύσεις του προβλήματος.

Στη πράξη έχουν αναπτυχθεί μία μεγάλη ποικιλία προγραμμάτων βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζουν τα προβλήματα με διάφορους τρόπους μαθηματικής ανάλυσης. Στο υπάρχον πρόβλημα που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση (απλού και διπλού στόχου) ο κώδικας γενετικών αλγορίθμων (*Genetic Algorithms*) που εμπεριέχεται στο εργαλείο «*Optimization Tool*» του λογισμικού *MATLAB*. Δίνοντας στο συγκεκριμένο εργαλείο κάποιες αρχικές ρυθμίσεις (χώρος διερεύνησης, μέγεθος πληθυσμού κ.α.) δύναται να εξασφαλίζει τη δυναμική διαδοχή των πληθυσμών με τη δημιουργία νέων ατόμων και την εξαφάνιση άλλων βάση της τιμής καταλληλότητας τους. Έτσι διερευνά τον χώρο υποψήφιων λύσεων και εντοπίζει τελικά τη βέλτιστη.



Σχήμα 4.2-3: Λογότυπο Λογισμικού MATLAB

## **4.3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΥΗ**

### 4.3.1: Γενική περιγραφή

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται αναλυτική παρουσίαση του υπολογιστικού κώδικα *(EVALFUN)* σε *MATLAB*, ο οποίος συντάχθηκε προκειμένου να γίνει προσομοίωση της λειτουργίας και οικονομοτεχνική αξιολόγηση του προς σχεδίαση ΜΥΗ στον ποταμό Αγραφιώτη. Ο συγκεκριμένος κώδικας καλείται από το βασικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης ως συνάρτηση. Ως εκ τούτου διαθέτει ένα σύνολο δεδομένων (σταθερών) που είναι κοινά με το βασικό πρόγραμμα.

Ως είσοδος στο υπολογιστικό μοντέλο *(EVALFUN)* δίνεται κάθε φορά το διάνυσμα  $x = (Q_{on,1}, Q_{on,2}, LRIVER, LCON)$ . Οι μεταβλητές  $Q_{on,1}, Q_{on,2}$  παριστάνουν την ονομαστική παροχή (σε  $m^3/s$ ) των δύο υδροστροβίλων του έργου. Οι μεταβλητές *LRIVER* και *LCON* παριστάνουν τα αναπτόγματα μήκους (σε km), τα οποία έχουν αναλυθεί στη παραμετροποίηση του προβλήματος. Σε πρώτη φάση υπολογίζονται, βάση της χωρικής διάταξης που προκύπτει, τα τεχνικά στοιχεία του έργου όπως η θεωρητική υδραυλική πτώση και το μήκος των έργων προσαγωγής. Στο υπόλοιπο μέρος του κώδικα πραγματοποιείται ουσιαστικά η προσομοίωση της λειτουργίας και η επενδυτική αξιολόγηση του ΜΥΗ. Οι βασικές λειτουργίες του υπολογιστικού μοντέλου που αναλύονται στη συνέχεια περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Υπολογισμός βασικών στοιχείων αγωγού πτώσεως
2. Υπολογισμός υδραυλικών απωλειών
3. Επιλογή του τύπου των υδροστροβίλων
4. Χάραξη της καμπύλης βαθμού απόδοσης κάθε υδροστροβίλου
5. Υπολογισμός αξιοποιήσιμης παροχής από τους υδροστροβίλους
6. Χάραξη της καμπύλης βαθμού απόδοσης κάθε ηλεκτρογεννήτριας
7. Ενεργειακή ανάλυση του ΜΥΗ
8. Εκτίμηση διαμέτρου και στροφών (RPM) κάθε υδροστροβίλου
9. Υπολογισμός συνολικού ύψους επένδυσης ΜΥΗ
10. Οικονομοτεχνική ανάλυση του ΜΥΗ

Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό μοντέλο που περιγράφεται στη συνέχεια είναι δυνατόν να προκύψουν τα διάφορα μεγέθη – στόχοι του προβλήματος ως προς τα οποία γίνεται η βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης.

### 4.3.2: Υπολογισμός βασικών στοιχείων αγωγού πτώσεως

Η συγκεκριμένη λειτουργία πραγματοποιείται μέσα στο κώδικα *(EVALFUN)*. Αρχικός στόχος είναι ο προσδιορισμός της διαμέτρου και του πάχους του αγωγού πτώσεως βάση της ονομαστικής ισχύος  $N_{on}$  του υδροηλεκτρικού σταθμού και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H_{on}$ .

Κατά τα αναφερόμενα στο θεωρητικό μέρος η βέλτιστη διάμετρος του αγωγού πτώσεως ΜΥΗ έργου δίνεται από τη συσχέτιση:

$$D(m) = 0,7307 \cdot \frac{N_{on}(KW)^{0,43}}{H_{on}(m)^{0,63}}$$

Όπου:

- Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H_{on}$  προκύπτει ως εκτίμηση από το ύψος πτώσεως  $head$ , θεωρώντας περιορισμό των ονομαστικών υδραυλικών απωλειών σε ποσοστό 5%. Ισχύει δηλαδή:

$$H_{on} = 0,95 \cdot head$$

- Συμβολίζοντας με  $den = 999,7 \frac{kg}{m^3}$  τη πυκνότητα του νερού σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και με  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  την επιτάχυνση της βαρύτητας, η ονομαστική ισχύς του ΥΗΣ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{on}(KW) = \frac{0,9 \cdot den \cdot g \cdot H_{on}(m) \cdot Q_{on}(\frac{m^3}{s})}{1000}$$

Σημειώνεται ότι στον αρχικό υπολογισμό της ονομαστικής ισχύος που γίνεται λαμβάνεται υπόψη ένας μέσος συνολικός βαθμός απόδοσης  $\eta = 0,9$  για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Η βέλτιστη τιμή της διαμέτρου που θα προκύψει από την προηγούμενη συσχέτιση πρέπει στη συνέχεια να τυποποιηθεί προς τα πάνω σε κάποια από τις τυποποιημένες εξωτερικές διαμέτρους που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα για τους χαλύβδινους σωλήνες. Για κάθε διάμετρο υπάρχει ένα ελάχιστο πάχος του αγωγού πτώσεως, η τιμή του οποίου αποτελεί κατώτερο όριο για το συγκεκριμένο μέγεθος. Το πρόγραμμα πρέπει επομένως να ελέγχει αν το πάχος που προκύπτει υπολογιστικά είναι μεγαλύτερο από τον συγκεκριμένο περιορισμό. Σε αντίθετη περίπτωση πρέπει να ορίζεται ως πάχος το ελάχιστο πάχος που επιβάλει η τυποποίηση. Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας με τις τυποποιημένες εξωτερικές διαμέτρους χαλύβδινων σωλήνων με ραφή και τα αντίστοιχα ελάχιστα πάχη:

Πίνακας Δ.3-1:

Τυποποιημένες εξωτερικές διαμέτροι και ελάχιστα πάχη χαλύβδινων σωλήνων

<b>a/a</b>	<b>De(mm)</b>	<b>EMIN(mm)</b>
1	60,3	2,9
2	76,1	2,9
3	88,9	3,2
4	114,3	3,6
5	139,7	3,6
6	168,3	3,6
7	193,71	4
8	219,1	4
9	244,5	4
10	273	4
11	323,9	4
12	355,6	4,5
13	406,4	4,5
14	457	5
15	508	5
16	559	6,35
17	609,6	6,35

18	660,4	6,35
19	711,2	6,35
20	762	6,35
21	812,8	7,14
22	863,6	7,14
23	914,4	7,14
24	965,2	7,14
25	1016	7,14
26	1066,8	7,14
27	1117,6	7,14
28	1168,4	7,14
29	1219,2	7,92
30	1320,8	7,92
31	1422,4	8,74
32	1524	8,74
33	1625,6	10,31
34	1727,2	10,31
35	1828,8	11,13
36	1920	11,91
37	2020	12,7

Αφού καθοριστεί τελικά η εξωτερική διάμετρος  $D(mm)$  του αγωγού πτώσεως υπολογίζεται στη συνέχεια το μέγιστο ύψος που θα αναγκαστεί να αντιμετωπίσει ο αγωγός. Στη παρούσα ανάλυση πρέπει να ληφθούν υπόψη, για λόγους ασφάλειας των υπολογισμών, τα μεταβατικά φαινόμενα (υδραυλικό πλήγμα). Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός του μέγιστου ύψους  $H_{max}(m)$  που φορτίζει το τμήμα της σωλήνωσης γίνεται λαμβάνοντας μια ποσοστιαία προσαύξηση στο θεωρητικό ύψος πτώσεως ανάλογα με την τιμή του. Έτσι λαμβάνεται:

- $H_{max} = 1,6 \cdot head$  για  $head < 40m$
- $H_{max} = 1,4 \cdot head$  για  $40m < head < 100m$
- $H_{max} = 1,25 \cdot head$  για  $head > 100m$

Σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί στο θεωρητικό κεφάλαιο, για τον καθορισμό των βασικών στοιχείων του αγωγού πτώσεως, το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος  $e_0$  της σωλήνωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_0 = \frac{D \cdot P_{max}}{2 \cdot k_2 \cdot \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{k_1}}$$

Στην οποία λαμβάνονται:

- $D$ , η τυποποιημένη εξωτερική διάμετρος του αγωγού που υπολογίστηκε
- $P_{max} = H_{max}/H_0$ , το μέγιστο ύψος που καλείται να αντιμετωπίσει ο αγωγός προς την ατμοσφαιρική πίεση σε mΣΥ, η οποία λαμβάνεται:  $H_0 = 10mΣΥ$
- $k_2$ , συντελεστής που εκφράζει την αντοχή της ραφής. Λαμβάνεται  $k_2 = 0,9$
- $k_1$ , συντελεστής ασφαλείας. Λαμβάνεται  $k_1 = 1,7$



- $\sigma_{\varepsilon\pi}$ , η επιτρεπόμενη μηχανική αντοχή του αγωγού. Στο δεδομένο πρόβλημα για χάλυβα St37-2 λαμβάνεται από πίνακες:  $\sigma_{\varepsilon\pi} = 2350 \text{kp/mm}^2$

Η ανοχή ανομοιομορφίας του πάχους του ελάσματος λαμβάνεται ίση με μηδέν. Θεωρείται δηλαδή ότι ο αγωγός πτώσεως έχει ενιαίο πάχος σε όλο το μήκος του και ότι ισχύει:  $e_1 = 0$ . Η ανοχή για ενδεχόμενη φθορά ή διάβρωση αντίστοιχα λαμβάνει την τιμή  $e_2 = 1 \text{mm}$ . Το πάχος του αγωγού προκύπτει τελικά από το άθροισμα:

$$e = e_0 + e_1 + e_2$$

Υπενθυμίζεται ότι το πάχος της σωλήνωσης που προέκυψε από την προηγούμενη διαδικασία πρέπει στο σημείο αυτό να ελεγχθεί σε σχέση με την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή που προδιαγράφεται ανάλογα με την εκάστοτε τυποποιημένη εξωτερική διάμετρο. Έτσι στη περίπτωση που προκύπτει από τους υπολογισμούς  $e < e_{min}$  λαμβάνεται από το πρόγραμμα  $e = e_{min}$ . Ακολουθώντας η τιμή του πάχους τυποποιείται προς τα πάνω σε κάποιο από τα τυποποιημένα πάχη σωληνώσεων που δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας Δ.3-2:  
Τυποποιημένα πάχη χαλύβδινων σωλήνων

a/a	EST(mm)
1	2,9
2	3,2
3	3,6
4	4
5	4,5
6	5
7	5,56
8	6,35
9	7,14
10	7,92
11	8,74
12	9,52
13	10,31
14	11,13
15	11,91
16	12,7
17	15,87
18	19,05
19	22,225
20	25,4
21	28,575

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί μια διευκρίνιση σχετικά με την τυποποίηση των στοιχείων (διάμετρος και πάχος) του αγωγού πτώσεως. Ο κώδικας βελτιστοποίησης εξετάζει πληθώρα εναλλακτικών εγκαταστάσεων κατά την υπολογιστική διερεύνηση του προβλήματος. Ορισμένες από αυτές διαθέτουν υψηλή θεωρητική υδραυλική πτώση και ονομαστική παροχή. Για το λόγο αυτό η εξωτερική διάμετρος και το πάχος του αγωγού σε κάποιες επαναλήψεις δύναται να προκύψουν

εκτός της διαθέσιμης τυποποίησης των τιμών. Το υπολογιστικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη κατάλληλο περιορισμό έτσι ώστε μόνο οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που αντιστοιχούν σε τυποποιημένες τιμές για την εξωτερική διάμετρο και το πάχος του αγωγού πτώσεως να λαμβάνονται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση.

#### 4.3.3: Υπολογισμός υδραυλικών απωλειών

Αφού έχει καθοριστεί η εξωτερική διάμετρος  $D(mm)$  και το πάχος  $e(mm)$  του αγωγού πτώσεως θα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός των υδραυλικών απωλειών στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης, όταν δηλαδή ο αγωγός πτώσης διαρρέεται από παροχή  $Q_{on}$  ίση με την συνολική ονομαστική παροχή των δύο υδροστροβίλων:  $Q_{on} = Q_{on,1} + Q_{on,2}$ . Η επιλογή αυτή στο συγκεκριμένο σημείο της ανάλυσης συνδέεται με έναν εκ των περιορισμών του προβλήματος. Οι υδραυλικές απώλειες στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης πρέπει να περιορίζονται σε χαμηλό ποσοστό του υδραυλικού ύψους και συγκεκριμένα σε ποσοστό μικρότερο από 5%.

Στη συνέχεια δίνεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τον υπολογισμό των υδραυλικών απωλειών και του διαθέσιμου υδραυλικού ύψους  $H_{on}$  για λειτουργία των δύο υδροστροβίλων με την ονομαστική παροχή τους. Η ίδια διαδικασία βεβαίως ακολουθείται προκειμένου να υπολογιστούν οι υδραυλικές απώλειες και σε κάθε άλλο σημείο λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων κατά την ενεργειακή ανάλυση του ΜΥΗ.

Οι υδραυλικές απώλειες σε μια ΜΥΗ εγκατάσταση διακρίνονται σε γραμμικές και σε εντοπισμένες. Οι μεν γραμμικές χαρακτηρίζονται έτσι γιατί είναι ανάλογες του μήκους του αγωγού πτώσεως και κατανέμονται ισότροπα σε αυτό. Οι δε εντοπισμένες απώλειες προκαλούνται από διάφορες διαμορφώσεις - εξαρτήματα του αγωγού πτώσεως. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού των υδραυλικών απωλειών. Αρχικά παρατίθεται η ανάλυση για τις γραμμικές και ακολούθως για τις εντοπισμένες απώλειες.

Οι γραμμικές απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση *Darcy – Weisbach*. Η συγκεκριμένη σχέση αναφέρεται σε σωλήνα ευθύ, κυκλικής διατομής, ο οποίος πληρούται από το διακινούμενο υγρό και οι υδραυλικές απώλειες αναπτύσσονται κατά το μήκος του. Η σχέση αυτή δίνεται παρακάτω:

$$\delta h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_{IN}^2}$$

Όπου:

- $\delta h_L$ , η πτώση πίεσης εκφρασμένη σε μέτρα στήλης διακινούμενου υγρού (γραμμικές υδραυλικές απώλειες)
- $\lambda$ , ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών
- $D_{IN} = D - 2 \cdot e$ , η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα
- $c$ , η μέση ταχύτητα της ροής στο σωλήνα και
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \frac{m}{s^2}$ )

Η τιμή του αδιάστατου συντελεστή  $\lambda$  των γραμμικών απωλειών εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds και από τη σχετική τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα. Ο αριθμός Reynolds της ροής χαρακτηρίζει το δυναμικό χαρακτήρα της και ορίζεται ως:

$$Re = \frac{c \cdot D_H}{\nu}$$

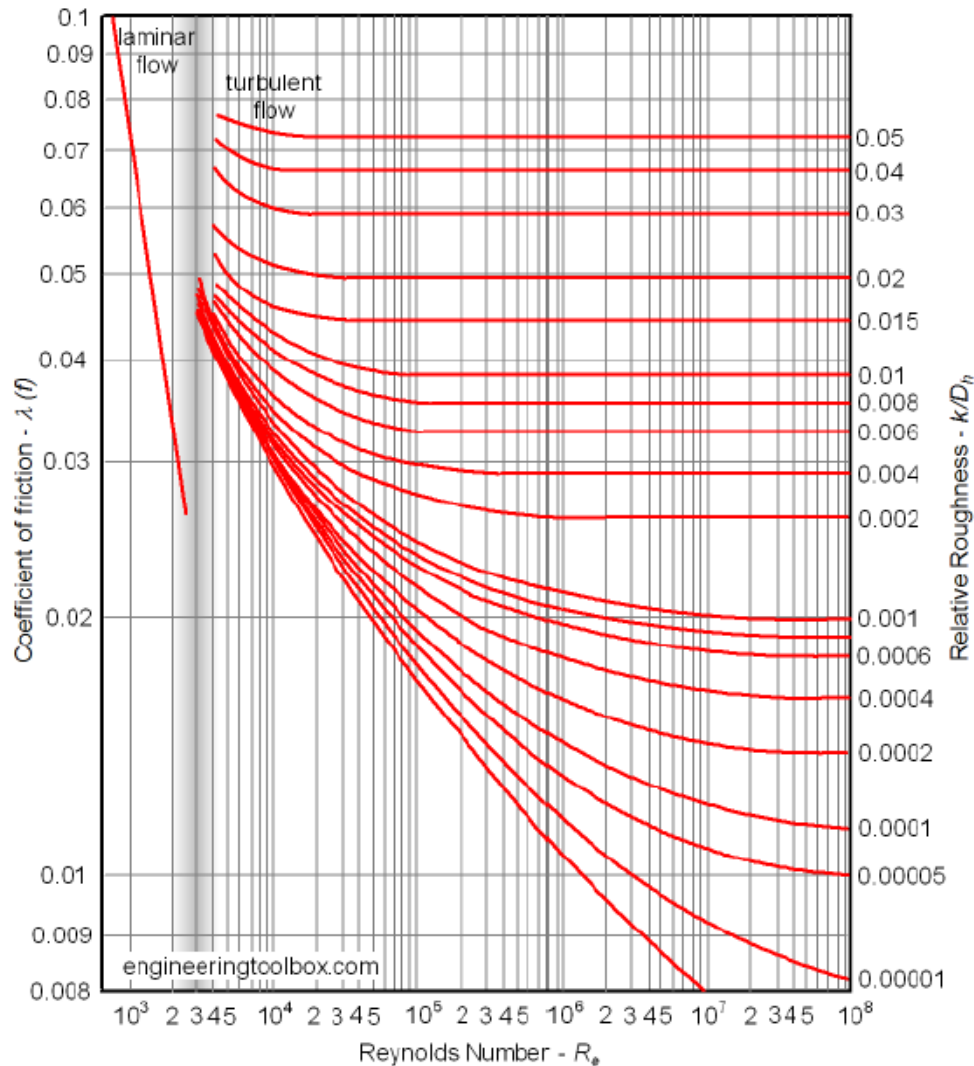
Όπου:

- $c$ , η μέση ταχύτητα της ροής στο σωλήνα
- $\nu$ , η κινηματική συνεκτικότητα του νερού:  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $D_H$ , η υδραυλική διάμετρος του αγωγού. Συμβολίζοντας με  $A$  τη διατομή του αγωγού και με  $U$  τη βρεχόμενη περίμετρο τότε η υδραυλική διάμετρος δίνεται από τη σχέση:  $d_H = 4 \cdot A/U$ . Στην περίπτωση αγωγού κυκλικής διατομής (όπως συμβαίνει στην παρούσα ανάλυση) προκύπτει με υπολογισμούς ότι ισχύει:  $D_H = D_{IN}$

Βασικό ζητούμενο επομένως για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών είναι ο προσδιορισμός του αδιάστατου συντελεστή  $\lambda$ . Η τιμή του  $\lambda$  συναρτίζεται του αριθμού Reynolds της ροής και με παράμετρο τη σχετική τραχύτητα  $\varepsilon_S$  του αγωγού δίνεται από το διάγραμμα Moody, το οποίο παρουσιάζεται σε επόμενη σελίδα. Η σχετική τραχύτητα των διαβρεχόμενων επιφανειών του αγωγού ορίζεται ως ο λόγος της μέσης τραχύτητας  $\varepsilon$  των τοιχωμάτων προς την εσωτερική διάμετρο  $D_{IN}$ , ισχύει δηλαδή:

$$\varepsilon_S = \frac{\varepsilon}{D_{IN}}$$

Ως τυπική τιμή για τη μέση τραχύτητα  $\varepsilon$  του χαλύβδινου αγωγού πτώσεως μπορεί να ληφθεί για τους υπολογισμούς η εξής:  $\varepsilon = 0,2 \text{ mm}$ . Σημειώνεται για λόγους σαφήνειας ότι η συγκεκριμένη τιμή τραχύτητας αντιστοιχεί σε συγκολλητό (με ραφή) χαλύβδινο αγωγό ο οποίος έχει υποστεί ελαφρά φθορά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα Moody που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή γραμμικών απωλειών σε πρακτικές εφαρμογές.



Σχήμα Δ.3-1: Διάγραμμα Moody

Το διάγραμμα Moody ωστόσο είναι εποπτικό και όχι ιδιαίτερα εύχρηστο για υπολογιστικές εφαρμογές. Έτσι ο προσδιορισμός του συντελεστή γραμμικών απωλειών μπορεί να γίνει από το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας διάφορες συσχετίσεις που έχουν προκύψει από την επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων. Περισσότερο συγκεκριμένα για στρωτή περιοχή της ροής, δηλαδή για  $Re < 2300$ , η τιμή του συντελεστή  $\lambda$  είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας των τοιχωμάτων και ισχύει ο νόμος των Hagen – Poiseuille σύμφωνα με τον οποίο:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Αντίστοιχα για τυρβώδη περιοχή της ροής, δηλαδή για  $Re > 4000$ , η τιμή του  $\lambda$  μπορεί να υπολογιστεί σε πρώτη εκτίμηση με την προσεγγιστική σχέση του Moody που έχει ακρίβεια της τάξεως του 5%. Το αποτέλεσμα που θα προκύπτει από τη σχέση Moody μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως αρχική τιμή για την εφαρμογή της πεπλεγμένης σχέσης των Colebrook – White, η οποία χαρακτηρίζεται ως περισσότερο ακριβής ως προς τα αποτελέσματα της. Οι σχέσεις Moody και Colebrook - White παρουσιάζονται παρακάτω:

- Σχέση Moody:

$$\lambda = 4 \cdot 0,001375 \cdot \left(1 + \left(20000 \cdot \varepsilon_s + \frac{10^6}{Re}\right)^{0,333}\right)$$

- Σχέση Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71} \right)$$

Είναι εμφανές ότι η σχέση Colebrook – White είναι πεπλεγμένη. Για το λόγο αυτό η επίλυση της απαιτεί εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας. Λαμβάνοντας ως αρχική τιμή για τον συντελεστή γραμμικών απωλειών τη τιμή που προέκυψε από τη σχέση του Moody εφαρμόζεται η αριθμητική μέθοδος διαδοχικών αντικαταστάσεων μέχρι σύγκλισης του  $\lambda$ . Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη:  $|\lambda_{i+1} - \lambda_i| < 0,00001$ . Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή γραμμικών απωλειών για τις εξεταζόμενες συνθήκες ροής.

Ο υπολογισμός των γραμμικών απωλειών στη σωλήνωση γίνεται τελικά με αριθμητική αντικατάσταση στη σχέση Darcy – Weisbach, η οποία έχει ήδη αναφερθεί. Η μέση ταχύτητα της ροής στον αγωγό πτώσης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D_{IN}^2}{4}}$$

Όπου:

- $Q$ , η διακινούμενη παροχή στον αγωγό πτώσης
- $A$ , η διατομή του αγωγού

Το υπόλοιπο μέρος της μεθοδολογίας που παρατίθεται αφορά τον υπολογισμό των εντοπισμένων απωλειών. Στη γενικότερη των περιπτώσεων εμφανίζονται εντοπισμένες απώλειες στις εξής διαμορφώσεις του αγωγού πτώσεως:

- διακλαδώσεις
- καμπυλώσεις του αγωγού
- στόμια εισόδου
- βάνες
- όταν συμβαίνει συστολή ή διεύρυνση της ροής

Η γενική σχέση που δίνει τις εντοπισμένες απώλειες ( $mSY$ ) σε κάθε περίπτωση είναι:

$$\delta h_f = \zeta \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g}$$

Όπου:

- $\zeta$ , ο συντελεστής απωλειών της εντοπισμένης αντίστασης
- $c$ , η μέση ταχύτητα της ροής στον αγωγό
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \frac{m}{s^2}$ )

Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης έχει θεωρηθεί ότι ο αγωγός πτώσεως είναι σταθερής κλίσης και ενιαίας διαμέτρου. Για το λόγο αυτό, δεν ενδιαφέρουν

εντοπισμένες απώλειες που αφορούν καμπύλωση του αγωγού και συστολή ή διεύρυνση της ροής. Οι υπόλοιπες διαμορφώσεις που αναφέρθηκαν ωστόσο υπάρχουν και οι αντίστοιχες υδραυλικές απώλειες που προκαλούν λαμβάνονται υπόψη κατά τους υπολογισμούς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή  $\zeta$  για το στόμιο εισόδου της δεξαμενής φόρτισης, τη βάνα ανάντι του υδροστροβίλου (θέση πλήρως ανοικτή) και τη διακλάδωση του αγωγού όταν λειτουργούν δύο υδροστροβίλοι παράλληλα (Παπαντώνης, 2001).

Γενικά, για στόμιο αναρρόφησης που προεκτείνεται στη δεξαμενή φόρτισης η τιμή του συντελεστή αντίστασης  $\zeta$  λαμβάνεται ως εξής:  $\zeta = 2,5 - 3$  για οξείες ακμές και  $\zeta = 0,6 - 1$  για στρογγυλεμένες ακμές. Αντίστοιχα, για την περίπτωση που το στόμιο αναρρόφησης δεν προεξέχει από το τοίχωμα της δεξαμενής ο συντελεστής  $\zeta$  λαμβάνεται:  $\zeta = 0,5$  για οξείες ακμές και  $\zeta = 0,25$  για στρογγυλεμένες ακμές. Για την περίπτωση τέλος στομίου με ακτίνα καμπυλότητας  $R > 0,2 \cdot d$  η τιμή του συντελεστού λαμβάνεται  $\zeta = 0,03$ . Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής θεωρείται ως ενδεικτική τιμή για το συντελεστή εντοπισμένων απωλειών στο στόμιο αναρρόφησης η ακόλουθη:  $\zeta_1 = 0,5$ .

Όσον αφορά τη βάνα που τοποθετείται (σε λειτουργία πλήρως ανοικτή) ανάντι του υδροστροβίλου δίνεται ο ακόλουθος πίνακας. Ο πίνακας παρουσιάζει τον συντελεστή εντοπισμένων απωλειών  $\zeta$  για τους συνηθέστερους τύπους βανών. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των υδραυλικών απωλειών βάνας από τον υπολογιστικό κώδικα ελήφθη ενδεικτικά:  $\zeta_0 = 0,15$ .

Πίνακας Δ.3-3:  
Συντελεστής απωλειών βάνας  $\zeta_0$  (θέση πλήρως ανοικτή)

<b>Τύπος Βάνας</b>	<b><math>\zeta_0</math></b>
Πεταλούδα (για πεταλούδα πάχους 0,1D)	0,20
Σφαιρική πλήρους ανοίγματος	0,02
Δισκοβαλβίδα	3,40
Γωνιακή δισκοβαλβίδα	1,80
Συρτής (Πλήρους ανοίγματος)	0,15

Σειρά έχει ακολούθως ο υπολογισμός των απωλειών στη διακλάδωση της ροής για την περίπτωση λειτουργίας δύο υδροστροβίλων. Στα συστήματα διανομής των υδροστροβίλων χρησιμοποιούνται αποκλειστικά αγωγοί κυκλικής διατομής. Για το λόγο αυτό, επισυνάπτεται στη συνέχεια πίνακας με τις τιμές του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών  $\zeta$  για διάφορες περιπτώσεις διακλαδώσεων κυκλικής διατομής. Στις επόμενες περιπτώσεις με  $Q$  συμβολίζεται η παροχή στο κύριο κλάδο και με  $Q_Z$  η παροχή στη διακλάδωση. Ομοίως, με  $\zeta$  συμβολίζεται η τιμή του συντελεστή απωλειών στον κατευθείαν κλάδο (στην οποία αναφέρεται και η μέση ταχύτητα  $c$  του αγωγού και αφορά τους υπολογισμούς) και με  $\zeta_Z$  η αντίστοιχη τιμή του κατά τη διακλάδωση. Θεωρώντας ενδεικτικά γωνία  $60^\circ$  μεταξύ των κλάδων της διακλάδωσης, λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς από τον κώδικα ο συντελεστής  $\zeta$  για τους διάφορους λόγους παροχών  $Q_Z/Q$  που αναφέρονται στην τρίτη περίπτωση που παρατίθεται στον επόμενο πίνακα.

Διαμόρφωση	Q <sub>2</sub> /Q	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	ζ	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
	ζ	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
	ζ	-1,04	-0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
	ζ	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	ζ	0,98	0,79	0,64	0,57	0,60	0,75
	ζ	0,05	-0,05	-0,02	0,07	0,20	0,34
	ζ	-0,92	-0,30	0,13	0,40	0,57	0,66
	ζ	0,04	0,24	0,30	0,25	0,10	-0,19
	ζ	0,90	0,68	0,50	0,38	0,35	0,48
	ζ	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
	ζ	-0,90	-0,73	0,00	0,22	0,37	0,38
	ζ	0,05	0,18	0,19	0,06	-0,18	-0,54

Σχήμα Δ.3-2: Συντελεστής απωλειών σε διακλάδωση κυκλικής διατομής

Αξιοποιώντας το προηγούμενο υπόβαθρο είναι άμεσα εκτελέσιμος ο υπολογισμός των συνολικών υδραυλικών απωλειών (γραμμικές και εντοπισμένες) για κάθε παροχή που διαρρέει τον αγωγό πτώσεως. Έτσι δύναται να καθοριστεί η διαθέσιμη υδραυλική πτώση των υδροστροβίλων σε κάθε σενάριο λειτουργίας από τη σχέση:

$$H = head - \delta h = head - \delta h_L - \delta h_f$$

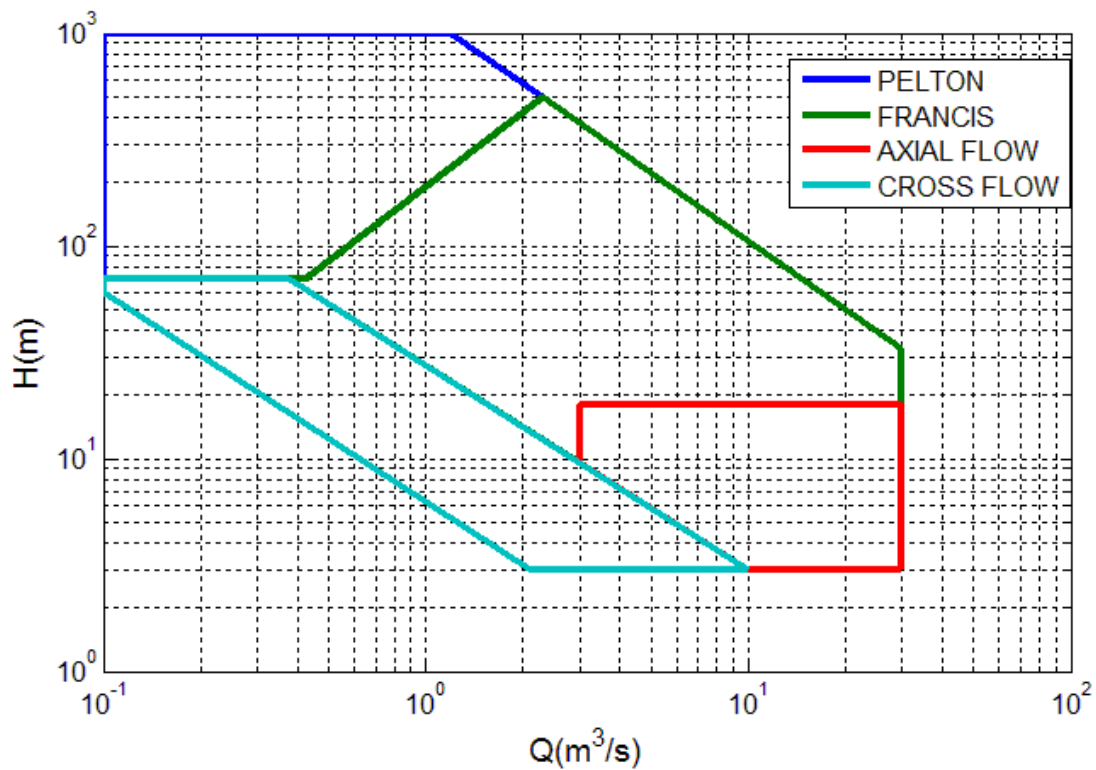
Ο υπολογισμός των συνολικών υδραυλικών απωλειών γίνεται καλώντας τη συνάρτηση (HYDLOSS) για κάθε παροχή προσαγωγής στον αγωγό πτώσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο συγκεκριμένος υπολογισμός αφορά αρχικά τη λειτουργία των δύο μηχανών σε ονομαστική παροχή. Σε αυτή τη περίπτωση υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{on}$  στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης και γίνεται έλεγχος εάν είναι μικρότερες από το 5% της θεωρητικής υδραυλικής πτώσης *head*. Ο περιορισμός αυτός σχετίζεται κατά βάση με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Έτσι το πρόγραμμα συνεχίζει τους υπολογισμούς που αφορούν τις επόμενες λειτουργίες μόνο στις περιπτώσεις που ικανοποιείται η ανισότητα:



$$LOSS = \frac{\delta h_{on}}{head} \leq 5\%$$

#### 4.3.4: Επιλογή τύπου υδροστροβίλων

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου για κάθε εξεταζόμενο σενάριο εγκατάστασης του ΜΥΗ γίνεται αυτόματα από τον υπολογιστικό κώδικα μέσω της συνάρτησης  $\langle TURTYPE \rangle$ . Η συγκεκριμένη συνάρτηση δέχεται ως είσοδο την διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H_{on}(m)$  και την ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}(m^3/s)$  κάθε υδροστροβίλου. Ακολουθώς επιστρέφει την μεταβλητή  $ITUR$ , η οποία χαρακτηρίζει τον τύπο του υδροστροβίλου που είναι κατάλληλος για τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου  $(Q_{on,T}, H_{on})$ . Για να είναι δυνατή η επιλογή του τύπου της μηχανής εισάγεται στον υπολογιστικό κώδικα το λογαριθμικό διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδροστροβίλων που παρουσιάζεται στη συνέχεια:



Σχήμα 4.3-3: Διάγραμμα επιλογής τύπου υδροστροβίλου

Το προηγούμενο διάγραμμα συνοψίζει ένα μεγάλο πλήθος τυποποιημένων υδροστροβίλων με εύρος ονομαστικής ισχύος από 50 έως 10.000KW. Το μπλε όριο καθορίζει την περιοχή καταλληλότητας του υδροστροβίλου Pelton, το πράσινο του υδροστροβίλου Francis, το κόκκινο του υδροστροβίλου αξονικής ροής (Axial Flow) και το γαλάζιο του υδροστροβίλου Cross Flow. Κάθε τύπος μηχανής αντιστοιχίζεται μονοσήμαντα με μια τιμή της μεταβλητής  $ITUR$ . Περισσότερο συγκεκριμένα η τιμή:

- $ITUR = 1$ , υποδηλώνει επιλογή υδροστροβίλου Pelton
- $ITUR = 2$ , υποδηλώνει επιλογή υδροστροβίλου Francis
- $ITUR = 3$ , υποδηλώνει επιλογή υδροστροβίλου Cross Flow
- $ITUR = 4$ , υποδηλώνει επιλογή υδροστροβίλου Axial Flow



- $ITUR = 0$ , υποδηλώνει ότι το εξεταζόμενο ονομαστικό σημείο λειτουργίας  $(Q_{on,T}, H_{on})$  βρίσκεται εκτός διαγράμματος και άρα δεν υπάρχει κατάλληλος τυποποιημένος υδροστροβίλος για την εφαρμογή.

Το σημείο  $(Q_{on,T}, H_{on})$  που δίνεται ως είσοδος στη συνάρτηση  $\langle TURTYPE \rangle$  πρέπει να ελέγχθη σε σχέση με τα αντίστοιχα όρια κάθε περιοχής του διαγράμματος προκειμένου να επιλεγεί τελικά ο τύπος της μηχανής. Οι υπόλοιπες λειτουργίες του προγράμματος πραγματοποιούνται εφόσον πρώτα ελεγχθεί η διαθεσιμότητα τυποποιημένων υδροστροβίλων για το υπό εξέταση σενάριο της εγκατάστασης. Θα πρέπει επομένως η ονομαστική παροχή κάθε υδροστροβίλου και η διαθέσιμη υδραυλική πτώση να αντιστοιχούν σε σημείο εντός του προηγούμενου διαγράμματος. Εξετάζεται δηλαδή πρώτα αν ισχύει:  $ITUR1 > 0$  και  $ITUR2 > 0$  και ακολούθως (εφόσον ικανοποιηθεί ο περιορισμός) εκτελούνται οι υπόλοιπες λειτουργίες του κώδικα. Το συγκεκριμένο σημείο έχει αναλυθεί και στους περιορισμούς του προβλήματος.

#### 4.3.5: Χάραξη καμπύλης βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων

Σε αυτό το σημείο της ενότητας παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης κάθε υδροστροβίλου στις διάφορες παροχές λειτουργίας του. Για να είναι εφικτός ο συγκεκριμένος υπολογισμός γίνεται αρχικά χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης του βαθμού απόδοσης για κάθε μηχανή. Σημειώνεται ότι η χάραξη της καμπύλης του βαθμού απόδοσης γίνεται καλώντας τη συνάρτηση  $\langle TECURVE \rangle$ . Στην ανάλυση που ακολουθεί ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου  $\eta_{tur,i}$  θα αναφέρεται εν συντομία ως  $\eta_i$  για λόγους απλότητας.

Σε πρώτη φάση εισάγεται στον υπολογιστικό κώδικα η αδιάστατη καμπύλη που περιγράφει το βαθμό απόδοσης ως προς την μέγιστη τιμή του  $(\eta_i/\eta_{max})$  συναρτήσει του φορτίου του υδροστροβίλου  $(Q_{T,i}/Q_{on,T})$ . Υπάρχουν συνολικά τέσσερις αδιάστατες καμπύλες του βαθμού απόδοσης που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα και περιγράφουν τη σχέση  $\eta_i/\eta_{max} = f(Q_{T,i}/Q_{on,T})$ . Κάθε μία από αυτές αφορά έναν συγκεκριμένο τύπο υδροστροβίλου. Σημειώνεται ότι στη προηγούμενη σχέση με  $Q_{on,T}$  συμβολίζεται η ονομαστική παροχή κάθε υδροστροβίλου και με  $\eta_{max}$  ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που επιτυγχάνεται σε αυτή. Αντίστοιχα με  $Q_{T,i}$  συμβολίζεται η εκάστοτε παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου σε ποσοστό  $\langle i \rangle$  του χρόνου και με  $\eta_i$  ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης που επιτυγχάνεται σε αυτή.

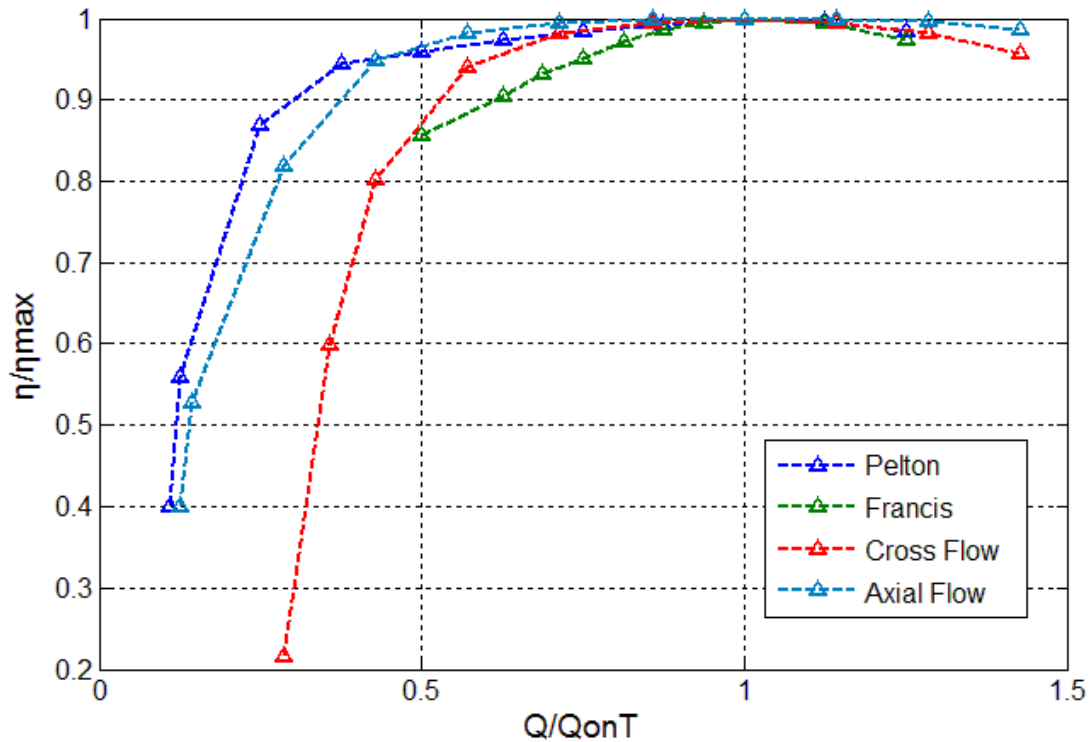
Στη συνέχεια της ανάλυσης παρουσιάζονται διαγραμματικά οι αδιάστατες καμπύλες του βαθμού απόδοσης που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα για κάθε τύπο υδροστροβίλου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη χάραξη των καμπυλών παρουσιάζονται επίσης συγκεντρωτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας Δ.3-4:  
 Δεδομένα χάραξης αδιάστατων καμπυλών βαθμού  
 απόδοσης για τύπους *Pelton* και *Axial Flow*

PELTON TURBINE		AXIAL FLOW TURBINE	
$Q_{T,i}/Q_{on,T}$	$\eta_i/\eta_{max}$	$Q_{T,i}/Q_{on,T}$	$\eta_i/\eta_{max}$
0,1087	0,4	0,1242	0,4
0,125	0,56	0,1425	0,5278
0,25	0,869	0,2857	0,819
0,375	0,944	0,4286	0,9497
0,5	0,96	0,5714	0,9817
0,625	0,974	0,7143	0,9946
0,75	0,984	0,8571	0,9989
0,875	0,9919	1	1
1	1	1,143	0,9989
1,125	0,9968	1,2857	0,9978
1,25	0,984	1,4286	0,9871

Πίνακας Δ.3-5:  
 Δεδομένα χάραξης αδιάστατων καμπυλών βαθμού  
 για τύπους *Francis* και *Cross Flow*

FRANCIS TURBINE		CROSS FLOW TURBINE	
$Q_{T,i}/Q_{on,T}$	$\eta_i/\eta_{max}$	$Q_{T,i}/Q_{on,T}$	$\eta_i/\eta_{max}$
0,5	0,8565	0,285	0,2156
0,625	0,9048	0,357	0,5988
0,6875	0,9309	0,4286	0,8024
0,75	0,95	0,5714	0,9401
0,8125	0,9713	0,7143	0,982
0,875	0,9867	0,8571	0,994
0,9375	0,9949	1	1
1	1	1,143	0,994
1,125	0,9949	1,286	0,982
1,25	0,9743	1,428	0,9581



Σχήμα Δ.3-4: Αδιάστατες καμπύλες μεταβολής του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου για διάφορους τύπους υδροστροβίλων

Διαθέτοντας την ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}$  και τον μέγιστο βαθμό απόδοσης  $\eta_{max}$  για κάθε υδροστρόβιλο καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του ολικού βαθμού απόδοσης της μηχανής για κάθε παροχή λειτουργίας. Συγκεκριμένα από την καμπύλη  $\eta_i/\eta_{max} = f(Q_{T,i}/Q_{on,T})$  που εισήχθη στον κώδικα είναι δυνατόν να προκύψει η χαρακτηριστική  $\eta_i = f(Q_{T,i})$ , η οποία απαιτείται προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός του ολικού βαθμού απόδοσης. Δεδομένου ότι η  $Q_{on,T}$  του υδροστροβίλου είναι καθορισμένη το ενδιαφέρον εστιάζεται στον προσδιορισμό του μέγιστου βαθμού απόδοσης  $\eta_{max}$ .

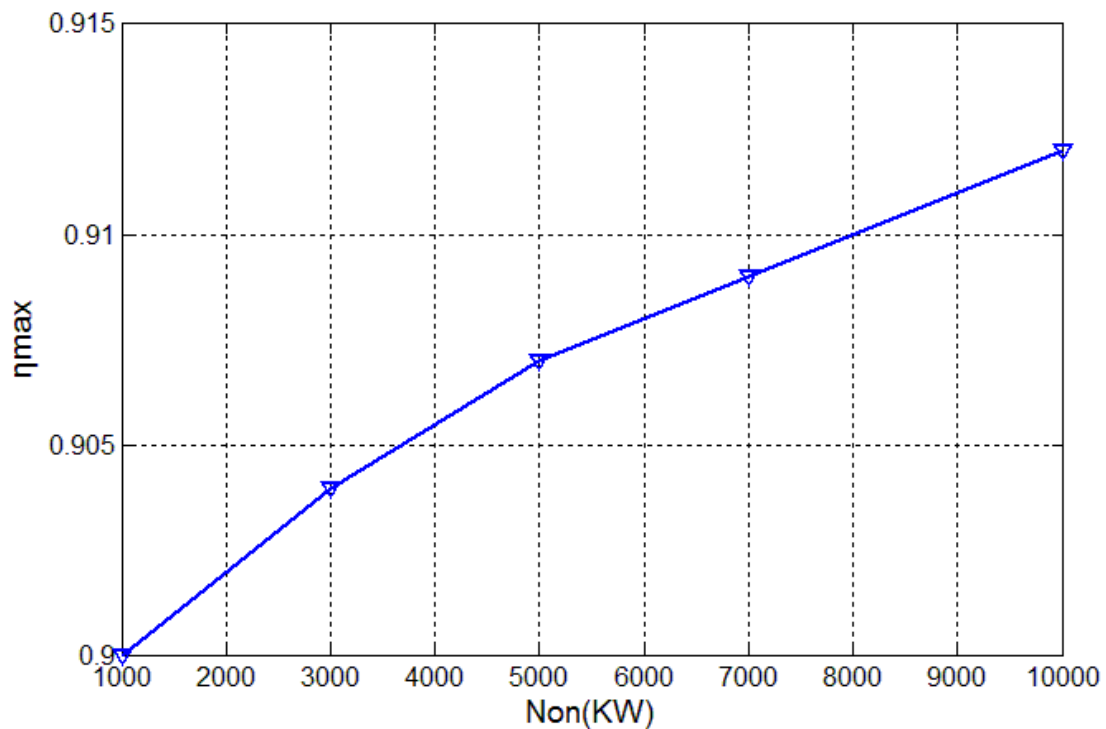
Κατά κανόνα στους υδροστροβίλους δράσεως η κλίμακα του υδροστροβίλου έχει μικρή επίδραση στον μέγιστο βαθμό απόδοσης της μηχανής. Συγκεκριμένα στον υδροστρόβιλο Cross Flow ο ολικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 84% και στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί η μέγιστη τιμή του σταθερή και ίση με  $\eta_{max} = 83,5\%$ . Σε αυτόν τον τύπο υδροστροβίλου η ονομαστική τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης είναι σε γενικές γραμμές χαμηλή. Η καμπύλη του βαθμού απόδοσης που προκύπτει ωστόσο είναι σχετικά επίπεδη κάτι που του δίνει τη δυνατότητα καλής λειτουργίας σε μερικά φορτία. Κατά την ίδια λογική ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου Pelton μπορεί να θεωρηθεί και αυτός σταθερός και ίσος:  $\eta_{max} = 88\%$  που είναι μια τυπική τιμή. Όσον αφορά τον μέγιστο ολικό βαθμό απόδοσης των τύπων Francis και Axial Flow, που είναι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως, έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα μια τυπική καμπύλη μεταβολής του μέγιστου βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ονομαστικής μηχανικής ισχύος που παράγει η μηχανή:  $\eta_{max} = f(N_{on,T}(KW))$ .

Πίνακας Δ.3-6:  
Μέγιστος βαθμός απόδοσης  
για τύπους Pelton και Cross Flow

Τύπος Υδροστροβίλου	$\eta_{max}$
Pelton	0,88
Cross Flow	0,835

Πίνακας Δ.3-7:  
Δεδομένα χάραξης καμπύλης μέγιστου βαθμού απόδοσης  
συναρτήσεως της ονομαστικής ισχύος για τύπους Francis και Axial Flow

Francis – Axial Flow	
$N_{ον,Γ}(KW)$	$\eta_{max}$
1000	0,9
3000	0,904
5000	0,907
7000	0,909
10000	0,912



Σχήμα Δ.3-5: Καμπύλη μεταβολής μέγιστου βαθμού απόδοσης συναρτήσεως της ονομαστικής ισχύος για τύπους Francis – Axial Flow

Ειδικά για την περίπτωση των υδροστροβίλων αντιδράσεως, τύπου Francis και Axial Flow, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης  $\eta_{max}$  υπολογίζεται από την προηγούμενη καμπύλη εφαρμόζοντας την αριθμητική μέθοδο διαδοχικών αντικαταστάσεων ως εξής: Ως αρχική τιμή για τη διαδικασία λαμβάνεται η τιμή  $\eta_{max}^{(0)} = 0,9$  και υπολογίζεται ακολούθως η ονομαστική μηχανική ισχύς (σε KW) του υδροστροβίλου

από τη σχέση:  $POWER_{on,T}^{(0)} = \eta_{max}^{(0)} \cdot den \cdot g \cdot Q_{on,T} \cdot H_{on,T} / 1000$ . Η τιμή της ονομαστικής ισχύος που προέκυψε παρεμβάλλεται στην καμπύλη μέγιστου βαθμού απόδοσης και έτσι προσδιορίζεται η νέα τιμή του μέγιστου βαθμού απόδοσης  $\eta_{max}^{(1)}$ . Στη συνέχεια υπολογίζεται εκ νέου η ονομαστική μηχανική ισχύς  $POWER_{on,T}^{(1)}$  για την επόμενη επανάληψη κ.ο.κ. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι σύγκλισης του  $\eta_{max}$  σε κάποια τιμή. Υπενθυμίζεται ότι για την περίπτωση των υδροστροβίλων Pelton και Cross Flow ο μέγιστος βαθμός απόδοσης θεωρείται ότι έχει πρακτικά σταθερή τιμή (άρα είναι καθορισμένος εξ αρχής) και έτσι δεν απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για τον προσδιορισμό του.

Στη συνέχεια διαθέτοντας πλέον τις τιμές της ονομαστικής παροχής (γνωστή εξ αρχής) και του μέγιστου βαθμού απόδοσης (προέκυψε από προηγούμενη ανάλυση) γίνεται η χάραξη της καμπύλης του βαθμού απόδοσης  $\eta_i = f(Q_{T,i})$ . Από την καμπύλη ολικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ο βαθμός απόδοσης σε κάθε παροχή λειτουργίας  $Q_{T,i}$  εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων αυτής. Ο προσδιορισμός του ολικού βαθμού απόδοσης από την καμπύλη  $\eta_i = f(Q_{T,i})$  γίνεται καλώντας την συνάρτηση  $\langle TUREFFIC \rangle$  από διάφορα σημεία του κώδικα στα οποία απαιτείται να γίνει ο υπολογισμός.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι από την καμπύλη του βαθμού απόδοσης που προκύπτει καθορίζεται και το εύρος λειτουργίας του εκάστοτε υδροστροβίλου ( $T$ ) το οποίο είναι της μορφής διαστήματος  $[Q_{min,T}, Q_{max,T}]$ . Τα λειτουργικά όρια της μηχανής είναι απαραίτητα για την ανάλυση της επόμενης παράγραφο η οποία αφορά τη σύνταξη του προγράμματος λειτουργίας των υδροστροβίλων. Αφορά δηλαδή τον καθορισμό της αξιοποιήσιμης παροχής από τους υδροστροβίλους σε κάθε ποσοστό ( $i$ ) του χρόνου.

#### 4.3.6: Υπολογισμός αξιοποιήσιμης παροχής από υδροστροβίλους

Το εύρος λειτουργίας των υδροστροβίλων της ΜΥΗ εγκατάστασης εισάγεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί κάθε υδροστροβίλος ( $T$ ) μπορεί να λειτουργεί όταν η φυσική απορροή που προσάγεται είναι μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής  $Q_{min,T}$  και μιας μέγιστης  $Q_{max,T}$ .

Ο υπολογισμός της αξιοποιήσιμης παροχής για κάθε υδροστροβίλο γίνεται καλώντας τη συνάρτηση  $\langle WATERVOL \rangle$ . Οι οριακές τιμές  $Q_{min,T}$ ,  $Q_{max,T}$  καθορίζονται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του βαθμού απόδοσης των υδροστροβίλων. Η ελάχιστη παροχή λειτουργίας  $Q_{min,T}$  και η μέγιστη  $Q_{max,T}$  έχουν αμφότερες αδιαστατοποιηθεί ως προς την ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}$  του υδροστροβίλου. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ανηγμένα όρια λειτουργίας για κάθε τύπο υδροστροβίλου όπως καθορίζονται από τις αδιάστατες καμπύλες του βαθμού απόδοσης που εισήχθησαν στον υπολογιστικό κώδικα για κάθε τύπο μηχανής.

Πίνακας 4.3-8: Όρια λειτουργίας υδροστροβίλων

<i>ITUR</i>	<i>ΤΥΠΟΣ</i>	$Q_{min,T}/Q_{on,T}$	$Q_{max,T}/Q_{on,T}$
1	Pelton	0,1087	1,25
2	Francis	0,5	1,25
3	Cross Flow	0,285	1,428
4	Axial Flow	0,1242	1,4286

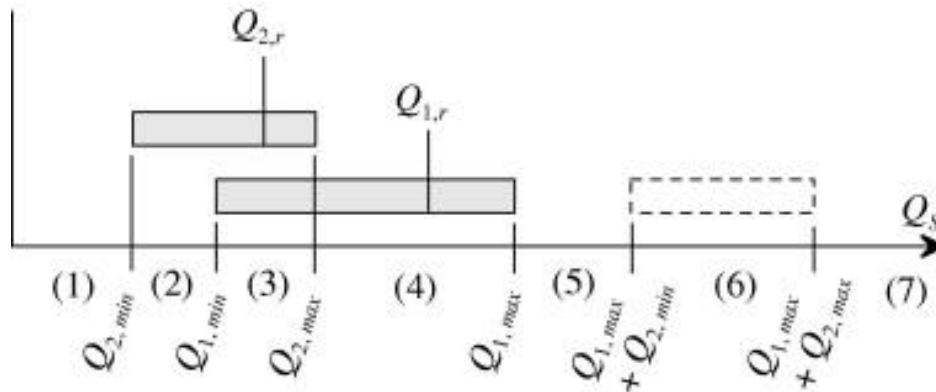
Γνωρίζοντας επομένως την μεταβλητή  $ITUR$  και την ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}$  για κάθε υδροστροβίλου είναι δυνατόν να καθοριστεί το εύρος λειτουργίας  $[Q_{min,T}, Q_{max,T}]$  της μηχανής βάσει του προηγούμενου πίνακα. Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη διάρκειας της παροχής για την θέση υδροληψίας που εξετάζεται θα υπολογιστεί η αξιοποιήσιμη παροχή από τους υδροστροβίλους για κάθε ποσοστό  $\langle i \rangle$  του χρόνου. Στο απλούστερο σενάριο, στο οποίο στον υδροηλεκτρικό σταθμό έχει εγκατασταθεί ένας μόνο υδροστρόβιλος (ισχύει δηλαδή  $Q_{on,1} > 0$  και  $Q_{on,2} = 0$ ) το πρόγραμμα λειτουργίας καθορίζεται ως εξής:

- Για διαθέσιμη φυσική παροχή μικρότερη από την ελάχιστη:  $Q_S < Q_{min,T}$ , ο υδροστρόβιλος είναι κλειστός. Αυτό συμβαίνει λόγω της ασταθούς λειτουργίας της μηχανής σε παροχές μικρότερες από την ελάχιστη. Ως εκ τούτου η αξιοποιήσιμη από τη μηχανή παροχή είναι μηδενική.
- Για διαθέσιμη φυσική παροχή μεγαλύτερη από την μέγιστη:  $Q_S > Q_{max,T}$ , ο υδροστρόβιλος λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή παροχή  $Q_{T,max}$ . Η διαφορά  $(Q_S - Q_{max,T})$  δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και υπερχειλίζει. Σε αυτή την περίπτωση η αξιοποιήσιμη από τη μηχανή παροχή είναι ίση με  $Q_{max,T}$ .
- Σε κάθε άλλη περίπτωση για φυσική παροχή στο διάστημα:  $Q_{min,T} \leq Q_S \leq Q_{max,T}$  ο υδροστρόβιλος λειτουργεί κανονικά αξιοποιώντας το σύνολο της διαθέσιμης  $Q_S$ .

Ως δεύτερο σενάριο εξετάζεται η εγκατάσταση δύο υδροστροβίλων που λειτουργούν εν παραλλήλω. Στη γενική περίπτωση οι δύο υδροστρόβιλοι μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου και μεγέθους. Το πρόγραμμα λειτουργίας των μηχανών σε αυτή τη περίπτωση γίνεται περισσότερο σύνθετο. Όταν η διαθέσιμη φυσική απορροή  $Q_S$  είναι μικρότερη από την ελάχιστη παροχή του μικρότερου υδροστροβίλου και οι δύο μηχανές βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Αντίστοιχα όταν η διαθέσιμη φυσική απορροή  $Q_S$  είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη συνολική παροχή των δύο υδροστροβίλων και οι δύο μηχανές λειτουργούν στις μέγιστες παροχές τους. Σε κάθε ενδιάμεση τιμή της φυσικής παροχής μπορούν να λειτουργούν ο ένας ή και οι δύο υδροστρόβιλοι ανάλογα με τη περίπτωση. Σημειώνεται ότι για τον υπολογιστικό κώδικα έχει επιλεγεί συνειδητά ο χαρακτηρισμός  $\langle 1 \rangle$  για τον μεγαλύτερο σε μέγεθος υδροστρόβιλο και  $\langle 2 \rangle$  για τον μικρότερο, ισχύει δηλαδή σε κάθε περίπτωση  $Q_{on,1} \geq Q_{on,2}$ . Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά το πρόγραμμα λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων για τις διάφορες περιοχές της παροχής. Θεωρώντας ότι ισχύει:  $Q_{min,2} < Q_{min,1}$  έχουμε:

- $Q_S < Q_{min,2}$ : Και οι δύο υδροστρόβιλοι βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Η αξιοποιήσιμη παροχή είναι μηδενική και ως εκ τούτου δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας.
- $Q_{min,2} < Q_S < Q_{min,1}$ : Μόνο ένας υδροστρόβιλος βρίσκεται σε λειτουργία. Συγκεκριμένα ο μικρότερος υδροστρόβιλος  $\langle 2 \rangle$ .
- $Q_{min,1} < Q_S < Q_{max,2}$ : Μόνο ένας υδροστρόβιλος βρίσκεται σε λειτουργία. Επιλέγεται αυτός με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.
- $Q_{max,2} < Q_S < Q_{max,1}$ : Μόνο ένας υδροστρόβιλος βρίσκεται σε λειτουργία. Συγκεκριμένα ο μεγαλύτερος υδροστρόβιλος  $\langle 1 \rangle$ .
- $Q_{max,1} < Q_S < Q_{max,1} + Q_{min,2}$ : Και οι δύο υδροστρόβιλοι βρίσκονται σε λειτουργία. Επιδιώκεται σε αυτή τη περίπτωση βέλτιστη διανομή της διαθέσιμης παροχής  $Q_S$ . Η βέλτιστη διανομή της παροχής επιτυγχάνεται καλώντας τη συνάρτηση  $\langle OPTIMEXP \rangle$ .

- $Q_{max,1} + Q_{min,2} < Q_S < Q_{max,1} + Q_{max,2}$ : Και οι δύο υδροστρόβιλοι βρίσκονται σε λειτουργία. Επιδίδεται και πάλι βέλτιστη διανομή της διαθέσιμης παροχής.
- $Q_S > Q_{max,1} + Q_{max,2}$ : Και οι δύο υδροστρόβιλοι λειτουργούν. Σε αυτή τη περίπτωση ο καθένας λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή παροχή του.



Σχήμα Δ.3-6: Πρόγραμμα λειτουργίας υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους και τύπου

Στην περίπτωση που ο υδροστρόβιλος (1) λάβει από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης τιμή ονομαστικής παροχής αρκετά μεγαλύτερη της αντίστοιχης τιμής του υδροστροβίλου (2) η προηγούμενη ανάλυση τροποποιείται ελαφρώς. Αυτό συμβαίνει γιατί με βάση τα όρια λειτουργίας στη περίπτωση αυτή δεν υφίσταται η περιοχή 3 στην οποία μπορούν να λειτουργήσουν και οι δύο υδροστρόβιλοι καθώς προκύπτει από τους υπολογισμούς  $Q_{max,2} < Q_{min,1}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα καθίσταται δυνατό να δημιουργηθούν δύο πίνακες  $Q_{TUR1}$ ,  $Q_{TUR2}$  σε κάθε προσομοίωση της λειτουργίας του ΜΥΗ. Καθένας από τους πίνακες αυτούς αντιστοιχεί σε διαφορετικό υδροστρόβιλο και περιέχει τις τιμές της αξιοποιήσιμης παροχής σε  $m^3/s$  για κάθε ποσοστό  $ed_i(\%)$  του χρόνου όπως έχει αδιαστατοποιηθεί για τη καμπύλη διάρκειας παροχής. Η συνολική παροχή που αξιοποιείται για ενεργειακή παραγωγή και από τις δύο μηχανές προκύπτει ως το άθροισμα των δύο πινάκων:  $Q_{TUR} = Q_{TUR1} + Q_{TUR2}$ . Είναι λογικό ότι στην περίπτωση λειτουργίας ενός μόνο υδροστροβίλου τίθεται:  $Q_{TUR2} = 0$  και επομένως ισχύει:  $Q_{TUR} = Q_{TUR1}$ .

Στη συνέχεια απαιτείται να υπολογιστεί η συνολική ποσότητα του νερού (σε  $m^3$ ) που αξιοποιείται από τους υδροστροβίλους καθώς και η συνολική που διέρχεται από την υδροληψία του έργου. Ακολούθως πρόκειται να γίνει ο προσδιορισμός του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης χρησιμοποιώντας τα προηγούμενα στοιχεία. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης υπολογίζεται ως λόγος της ετησίως αξιοποιήσιμης (από τους υδροστροβίλους) ποσότητας του νερού προς την αντίστοιχη ποσότητα που ετησίως διέρχεται από τη θέση υδροληψίας του ΜΥΗ. Όσο ο συγκεκριμένος συντελεστής προσεγγίζει την μονάδα τόσο καλύτερη είναι η ενεργειακή αξιοποίηση του ρεύματος του ποταμού.

Αναφέρεται ότι σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης για τα μικρά υδροηλεκτρικά δεν μπορεί να είναι μικρότερος από 75%. Η ποσότητα του νερού  $V_{TUR,i}(m^3)$  που αξιοποιείται από τους εγκατεστημένους

υδροτροβίλους σε κάθε ποσοστιαίο χρονικό διάστημα:  $[ed_{i-1}, ed_i]$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{TUR,i} = \frac{Q_{TUR,i} + Q_{TUR,i-1}}{2} \cdot \frac{ed_i - ed_{i-1}}{100} \cdot 8760 \cdot 3600$$

Όπου:

- $ed_i$ , το ποσοστό χρόνου (%) από την καμπύλη διάρκειας παροχής
- $Q_{TUR,i}$  ( $\frac{m^3}{s}$ ), η συνολική αξιοποιήσιμη παροχή στους υδροτροβίλους σε κάθε ποσοστό χρόνου

Η συνολική ποσότητα (σε  $m^3$ ) του νερού που αξιοποιείται από τους υδροτροβίλους υπολογίζεται για το σύνολο του χρόνου ( $ed = 100\%$ ) από το άθροισμα:  $V_{TOT} = \sum V_{TUR,i}$  που αφορά τα επιμέρους ποσοστιαία χρονικά διαστήματα του έτους. Με την ίδια λογική μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος του νερού  $V_{NAT}$  της φυσικής παροχής που διέρχεται από τη θέση υδροληψίας χρησιμοποιώντας τη καμπύλη διάρκειας. Ο συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης προκύπτει τελικά από τη σχέση:

$$WF = \frac{V_{TOT}}{V_{NAT}} = \frac{\sum V_{TUR,i}}{\sum V_{RIVER,i}}$$

#### 4.3.7: Χάραξη καμπύλης βαθμού απόδοσης γεννήτριας

Η χάραξη της καμπύλης μεταβολής του βαθμού απόδοσης της ηλεκτρικής γεννήτριας γίνεται καλώντας τη συνάρτηση  $\langle GECURVE \rangle$ . Η λογική που ακολουθείται για τη χάραξη είναι ανάλογη με την περίπτωση της καμπύλης μεταβολής του βαθμού απόδοσης των υδροτροβίλων.

Στη πλειοψηφία των περιπτώσεων σε ΜΥΗ με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 600 – 1000KW προτιμώνται οι σύγχρονες γεννήτριες για την μετατροπή της μηχανικής ισχύος των υδροτροβίλων σε ηλεκτρική. Ο βαθμός απόδοσης  $\eta_{gen}$  της σύγχρονης γεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη μηχανική ισχύ που προσδίδεται στην άτρακτο της μηχανής και η οποία είναι ίση με  $N = M \cdot \omega$  όπου με  $M$  συμβολίζεται η ανθιστάμενη ροπή και με  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Δεδομένου ότι στο τριφασικό δίκτυο η ηλεκτρική ισχύς προκύπτει ίση με  $N_e = \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos(\varphi)$  θα ισχύει για το βαθμό απόδοσης:

$$\eta_{gen} = \frac{N_e}{N} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{M \cdot \omega}$$

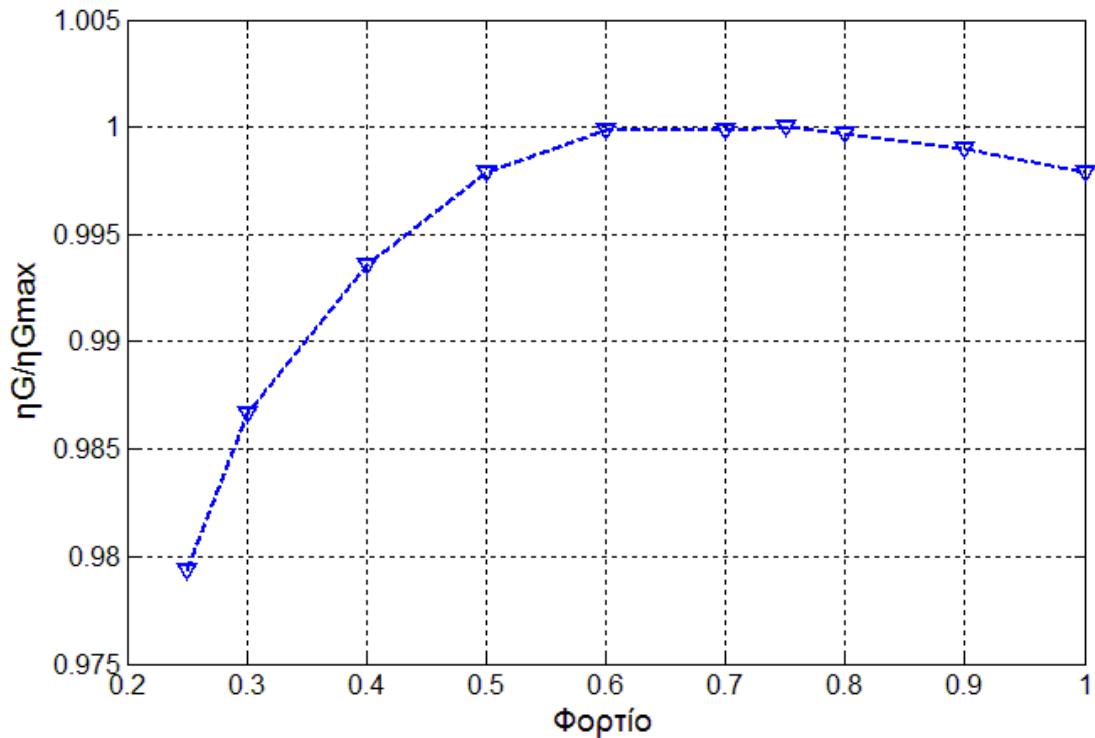
Σημειώνεται για λόγους σαφήνειας ότι στη προηγούμενη σχέση με  $\cos(\varphi)$  συμβολίζεται ο συντελεστής ισχύος του φορτίου της γεννήτριας δηλαδή η γωνία μεταξύ του διανύσματος της τάσεως  $U$  και της εντάσεως του ρεύματος  $I$ .

Αρχικά εισάγεται στον υπολογιστικό κώδικα η καμπύλη που περιγράφεται από τη σχέση:  $\eta_{gen}/\eta_{gen,max} = f(L(\%))$  και παριστάνει τον αδιάστατο βαθμό απόδοσης της σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει του φορτίου της. Η συγκεκριμένη καμπύλη καθώς και τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη χάραξη αυτής παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Πίνακας Δ.3-9:  
 Δεδομένα χάραξης αδιάστατης καμπύλης  
 του βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας

Φορτίο	$\frac{\eta_{gen,i}}{\eta_{gen,max}}$
0,25	0,97932
0,3	0,98667
0,4	0,99354
0,5	0,99896
0,7	0,99989
0,75	1
0,8	0,99969
0,9	0,99896
1	0,99793



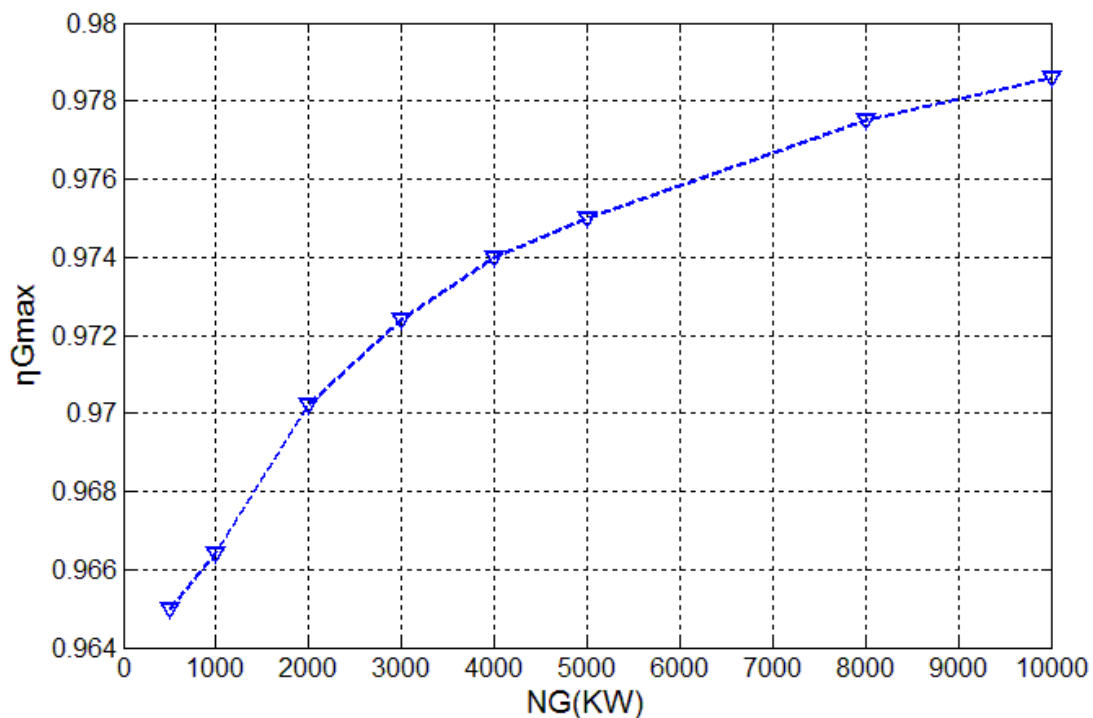
Σχήμα Δ.3-7: Αδιάστατη καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει του φορτίου

Γνωρίζοντας την μέγιστη τιμή  $\eta_{gen,max}$  που λαμβάνει ο βαθμός απόδοσης της σύγχρονης γεννήτριας θα ήταν δυνατόν να χαραχθεί η καμπύλη μεταβολής του συγκεκριμένου συντελεστή συναρτήσει του φορτίου της. Για να προσδιοριστεί ο  $\eta_{gen,max}$  εισάγεται επίσης στον κώδικα μια δεύτερη καμπύλη (Παπαντώνης, 2001) που παριστάνει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της ονομαστικής της ισχύος  $N_G$  (KVA).

Η ονομαστική ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας είναι το γινόμενο της ονομαστικής τάσης γραμμής ουδετέρου (φασική τάση) επί το ονομαστικό ρεύμα. Αυτή είναι και η ισχύς που αναγράφεται στην πινακίδα της γεννήτριας και μετράται σε KVA και όχι σε KW στα οποία μετράται η πραγματική ισχύς. Ο ολικός βαθμός απόδοσης των σύγχρονων γεννητριών αυξάνεται με το μέγεθος αυτών όπως θα φανεί από τον επόμενο πίνακα:

*Πίνακας Δ.3-10:  
Δεδομένα χάραξης καμπύλης μεταβολής  
μέγιστου βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας*

$N_G(KW)$	$\eta_{gen,max}$
500	0,965
1000	0,9664
2000	0,90702
3000	0,9724
4000	0,974
5000	0,975
8000	0,9775
10000	0,9786



*Σχήμα Δ.3-8: Καμπύλη μεταβολής μέγιστου βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος*

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη χάραξη της καμπύλης μεταβολής του βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας έχει ως εξής: Αρχικά η ονομαστική ισχύς  $N_{GEN}(KVA)$  της σύγχρονης γεννήτριας  $\langle G \rangle$  που είναι συζευγμένη με τον υδροστροβίλο  $\langle T \rangle$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{GEN} = \frac{N_{FL}}{\cos \varphi} = \frac{den \cdot g \cdot Q_{max,T} \cdot H_{(Q=Q_{max,T})} \cdot \eta_{tur(Q=Q_{max,T})}}{1000} \cdot \frac{1}{\cos \varphi}$$

Όπου:

- $Q_{max,T}(m^3/s)$ , η μέγιστη δυνατή παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
- $H(m)$ , η διαθέσιμη υδραυλική πτώση για τη μέγιστη δυνατή παροχή λειτουργίας  $Q = Q_{max,T}$  του υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
- $\eta_{tur}$ , ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$  για τη μέγιστη δυνατή παροχή λειτουργίας  $Q = Q_{max,T}$
- $\cos \varphi$ , ο συντελεστής ισχύος του φορτίου ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 85%
- $N_{FL}(KW)$ , η μηχανική ισχύς που παράγεται από τον υδροστροβίλο  $\langle T \rangle$  στη μέγιστη παροχή λειτουργίας  $Q = Q_{max,T}$

Ακολούθως ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της σύγχρονης γεννήτριας υπολογίζεται κάνοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων της καμπύλης  $\eta_{gen,max} = f(N_G(KVA))$ , τα οποία εσωκλείουν την τιμή της ονομαστικής ισχύος  $N_{GEN}(KVA)$  που υπολογίστηκε προηγουμένως. Πολλαπλασιάζοντας τώρα την τιμή του αδιάστατου βαθμού απόδοσης  $\eta_{gen}/\eta_{gen,max}$  (για κάθε σημείο της καμπύλης) με τον μέγιστο  $\eta_{gen,max}$  που προσδιορίστηκε θα προκύψει η καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου της σύγχρονης γεννήτριας.

Ο προσδιορισμός του βαθμού απόδοσης για συγκεκριμένη τιμή του φορτίου της γεννήτριας γίνεται καλώντας τη συνάρτηση  $\langle GENEFFIC \rangle$ . Ο κώδικας εκτελεί τότε γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων της καμπύλης μεταβολής που προέκυψε από την προηγούμενη ανάλυση.

Η προηγούμενη ανάλυση αφορούσε την εγκατάσταση στο ΜΥΗ σύγχρονης γεννήτριας. Στην πράξη ωστόσο σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες έχουν μικρή διαφορά στον βαθμό απόδοσης με τις πρώτες να υπερτερούν ελαφρώς. Έτσι όταν η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας προκύπτει μικρότερη από 1000KW και προτιμάται εγκατάσταση ασύγχρονης γεννήτριας ο βαθμός απόδοσης που προκύπτει από την προηγούμενη διαδικασία θα μειώνεται κατά 1%.

#### 4.3.8: Ενεργειακή ανάλυση ΜΥΗ:

Η ενεργειακή ανάλυση του ΜΥΗ γίνεται καλώντας την συνάρτηση  $\langle ENERG \rangle$  από τον κώδικα που συντάχθηκε για τη προσομοίωση και την αξιολόγηση του ΜΥΗ. Στο πλαίσιο αυτής υπολογίζονται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των υδροστροβίλων σε κάθε ποσοστό  $ed_i(\%)$  του χρόνου. Υπολογίζεται ακόμα και η συνολικά παραγόμενη ενέργεια για το χρονικό διάστημα ενός έτους. Ακολούθως είναι δυνατόν να καθοριστεί ο συντελεστής ισχύος  $CF$  της εγκατάστασης (*Capacity Factor*) ως το πηλίκο της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που θα παράγονταν αν οι υδροστροβίλοι λειτουργούσαν στο 100% του χρόνου με την ονομαστική τους ισχύ. Ο προσδιορισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $N_{e,i}(KW)$  από τη μονάδα για κάθε παροχή λειτουργίας  $Q_{T,i}$  του υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$  γίνεται από τη σχέση:

$$N_{e,i} = \frac{\eta_{tur(Q=Q_{T,i})} \cdot \eta_{gen(Q=Q_{T,i})} \cdot den \cdot g \cdot Q_{T,i} \cdot H_i}{1000}$$

Όπου:

- $den = 999,7 \frac{kg}{m^3}$ , η πυκνότητα του νερού σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας
- $\eta_{tur}$ , ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου
- $\eta_{gen}$ , ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας
- $Q_{T,i} (\frac{m^3}{s})$ , η παροχή λειτουργίας (αξιοποιήσιμη παροχή) του υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$  σε κάθε ποσοστό  $\langle i \rangle$  του χρόνου.
- $H_i (m)$ , η διαθέσιμη υδραυλική πτώση της εγκατάστασης σε κάθε ποσοστό  $\langle i \rangle$  του χρόνου

Η αξιοποιήσιμη παροχή λειτουργίας  $Q_{T,i}$  σε κάθε υδροστροβίλο έχει καθοριστεί υπολογιστικά για κάθε τιμή του αδιάστατου χρόνου  $ed_i$  από προηγούμενη παράγραφο που αναλύθηκε και αφορούσε το πρόγραμμα λειτουργίας των μηχανών. Πρόκειται για τα στοιχεία των πινάκων  $Q_{TUR1}$  και  $Q_{TUR2}$  που καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας τις τιμές της διαθέσιμης φυσικής παροχής και τα αντίστοιχα όρια λειτουργίας της μηχανής. Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H_{T,i}$  υπολογίζεται με τη σειρά της για κάθε ποσοστό του χρόνου αφαιρώντας τις συνολικές υδραυλικές απώλειες  $dh_i$  από το θεωρητικό υδραυλικό ύψος  $head$ . Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες (γραμμικές και εντοπισμένες) έχει αναλυθεί θεωρητικά στην πρώτη λειτουργία του προγράμματος που εξετάστηκε. Ο υπολογισμός των βαθμών απόδοσης  $\eta_{tur,i}$ ,  $\eta_{gen,i}$  γίνεται με τη σειρά του καλώντας τις συναρτήσεις  $\langle TUREFFIC \rangle$  και  $\langle GENEFFIC \rangle$  και εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων της καμπύλης του βαθμού απόδοσης υδροστροβίλου και γεννήτριας ανάλογα με την περίπτωση. Υπολογίζοντας την συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ  $NTOT_{e,i}$  (και από τους δύο υδροστροβίλους) σε κάθε ποσοστό  $ed_i$  του έτους είναι δυνατόν να χαραχθεί η καμπύλη ισχύος που παριστάνει να μεγέθη  $(ed_i, NTOT_{e,i})$ .

Η συνολική ενεργειακή παραγωγή του υδροηλεκτρικού σταθμού για το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται η καμπύλη διάρκειας παροχής (ένα ημερολογιακό έτος) θα προκύψει ολοκληρώνοντας την καμπύλη διάρκειας ισχύος στο σύνολο του χρόνου. Με άλλα λόγια η συνολικά παραγόμενη ενέργεια ισούται αριθμητικά με το εμβαδόν της επιφάνειας που σχηματίζει η καμπύλη ισχύος με τους άξονες. Εφαρμόζοντας αριθμητική ολοκλήρωση επομένως έχουμε:

$$E_{tot}(KWh) = \sum_{i=1} \frac{NTOT_{e,i} + NTOT_{e,i+1}}{2} \cdot \frac{ed_{i+1} - ed_i}{2} \cdot 8760$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής φορτίου  $CF$  της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Με βάση τον ορισμό που έχει ήδη παρατεθεί ο συντελεστής φορτίου υπολογίζεται από την σχέση που παρατίθεται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι στην επόμενη σχέση  $E_{tot}$  είναι η συνολικά παραγόμενη ενέργεια σε  $MWh$  και  $N_{on}$  η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς σε  $MW$ .

$$CF = \frac{E_{tot}}{N_{on} \cdot 8760}$$

#### 4.3.9: Εκτίμηση διαμέτρου και ταχύτητας περιστροφής υδροστροβίλων

Η εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα (διάσταση ενδεικτική της μηχανής) του υδροστροβίλου καθώς και της ταχύτητας περιστροφής γίνεται καλώντας την συνάρτηση *(TURNSIZE)*. Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως είσοδο την ονομαστική ισχύ  $N_{on,T}$  της μηχανής, τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H_{on}$  στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης καθώς και τη μεταβλητή *ITUR* που καθορίζει τον τύπο του υδροστροβίλου. Μετά τους υπολογισμούς η συνάρτηση επιστρέφει την διάμετρο του δρομέα και τις ονομαστικές στροφές λειτουργίας της μηχανής.

Οι ενδεικτικές διαστάσεις που προκύπτουν από την μεθοδολογία που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια εξαρτώνται έντονα από την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών και είναι αποτέλεσμα συσχετίσεων μεταξύ καλά σχεδιασμένων και οικονομοτεχνικά αποδεκτών υδροστροβίλων. Σημειώνεται ότι όλες οι συσχετίσεις που πρόκειται να αναλυθούν είναι αποτέλεσμα της ισχύος των νόμων ομοιότητας. Στη συνέχεια γίνεται ξεχωριστή αναφορά για την μεθοδολογία που εφαρμόζεται για κάθε τύπο υδροστροβίλου.

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση καθορισμού της διαμέτρου  $D_{TUR}$  και της ταχύτητας περιστροφής  $n$  για τους υδροστροβίλους τύπου **Pelton**. Για τον υδροστροβίλο του συγκεκριμένου τύπου με ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}$  και διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H_{on}$  ο καθορισμός του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  ως προς την ισχύ εξαρτάται από το πλήθος  $z_j$  των δεσμών τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα η παροχή ανά δέσμη (ακροφύσιο) είναι ίση με  $Q_j = Q/z_j$ . Αντίστοιχα η ισχύς που παράγεται ανά δέσμη θα είναι  $N_j = N/z_j$ , δεδομένου ότι τα δύο ακροφύσια λειτουργούν το ένα ανεξάρτητα από το άλλο. Έτσι ο ειδικός αριθμός στροφών που είναι χαρακτηριστικός της μορφής του δρομέα στον υδροστροβίλο *Pelton* θα είναι αυτός που διαμορφώνεται με την ισχύ ανά ακροφύσιο και εκφράζεται ως εξής:

$$n_{s,j} = n \cdot \frac{N_j^{1/2}}{H_{on}^{5/4}} = n \cdot \frac{(N/z_j)^{1/2}}{H_{on}^{5/4}} = \frac{n_s}{z_j^{1/2}}$$

Μια αρχική εκτίμηση του ειδικού αριθμού στροφών  $n_{s,j}$  όπως ορίστηκε προηγουμένως (για την ισχύ μίας δέσμης νερού) μπορεί να γίνει από την επόμενη συσχέτιση (Παπαντώνης, 2004). Σημειώνεται ότι το  $H_{on}$  εισάγεται στον τύπο σε mΣΥ και το  $n_{s,j}$  προκύπτει αντίστοιχα σε RPM.

$$n_{s,j} = 84,49 \cdot H_{on}^{-0,243}$$

Όσο αυξάνεται το πλήθος  $z_j$  των δεσμών τροφοδοσίας (μέγιστη τιμή  $z_{j,max} = 6$  λόγω του προβλήματος χώρου στη διάταξη των ακροφυσίων και της απαίτησης να μην επηρεάζει το ένα τη λειτουργία του άλλου) αυξάνεται και η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών:  $n_s = n_{s,j} \cdot \sqrt{z_j}$ . Στο πλαίσιο των υπολογισμών του κώδικα επιλέγεται συγκεκριμένο πλήθος δεσμών:  $z_j = 2$ . Αφού υπολογιστεί η αρχική τιμή του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής  $n$  (RPM) του υδροστροβίλου από τη σχέση:

$$n = n_s(RPM) \cdot \frac{H_{on}(m)^{5/4}}{N_{on,T}(KW)^{1/2}}$$

Η ταχύτητα περιστροφής που θα προκύψει από την προηγούμενη συσχέτιση δεν θα είναι σύγχρονη. Θα πρέπει λοιπόν αφού γίνει ο υπολογισμός να επιλεγεί η πλησιέστερη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Ακολούθως με βάση τη νέα τιμή που προέκυψε θα υπολογιστεί η διάμετρος του δρομέα  $D_{TUR}$  χρησιμοποιώντας τα συμπεράσματα από την μελέτη των *F. De Siervo* και *A. Lugaresi* (Water Power and Dam Construction, 1978).

Η δέσμη κυκλικής διατομής που πέφτει στο σκαφίδιο ενός υδροστροβίλου Pelton έχει ταχύτητα  $c_e = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ , όπου  $\varphi$  ο συντελεστής απωλειών του ακροφυσίου με τυπική τιμή της τάξεως  $\varphi \approx 0,97$ . Αποδεικνύεται ότι στο κανονικό σημείο λειτουργίας της μηχανής η περιφερειακή ταχύτητα  $u = u_1 = u_2$  είναι ίση περίπου με το μισό της ταχύτητας δέσμης  $c_e$  του νερού (Παπαντώνης, 2004). Ισχύει δηλαδή η σχέση:

$$u = 0,49 \cdot \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Η αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας του υδροστροβίλου ορίζεται ως το μέγεθος  $U = u / \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ . Με βάση τις προηγούμενες αναφορές λοιπόν, η αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας  $U$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας δίνεται τελικά από τη σχέση:

$$U = \frac{u}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_{on}}} = \frac{0,49 \cdot \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{on}}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_{on}}} = 0,49 \cdot \varphi \approx 0,475$$

Διευκρινίζεται ότι η τελευταία τιμή της  $U$  προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\varphi \approx 0,97$ . Στη συνέχεια λαμβάνοντας συνδυάζοντας τη σχέση ορισμού της περιφερειακής ταχύτητας:  $u = \pi \cdot D_{TUR} \cdot n / 60$  όσο και αυτή που δόθηκε για την αδιάστατη παράμετρο  $U$  προηγουμένως προκύπτει τελικά η διάμετρος του δρομέα του υδροστροβίλου Pelton:

$$D_{TUR} = \frac{60 \cdot U \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{on}}}{\pi \cdot n}$$

Στη συνέχεια παρατίθεται η μεθοδολογία υπολογισμού των  $D_{1e}$  (διάμετρος στεφάνης στη διατομή εισόδου) και  $n(RPM)$  για την περίπτωση των υδροστροβίλων **Francis**. Οι κύριες διαστάσεις που καθορίζουν τη γεωμετρία του υδροστροβίλου αδιαστατοποιούνται θεωρώντας ως διάσταση αναφοράς τη διάμετρο στεφάνης στη διατομή εξόδου  $D_{2e}$ . Και σε αυτή τη περίπτωση αρχικά εκτιμάται ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ  $n_s$  του συγκεκριμένου τύπου υδροστροβίλου χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση:

$$n_s = 2200 \cdot H_{on}^{-0,625}$$

Οι ονομαστικές στροφές  $n$  της μηχανής υπολογίζονται από τη σχέση ορισμού του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  όπως έγινε και στην προηγούμενη περίπτωση για τον υδροστροβίλο Pelton. Στη συνέχεια απαιτείται να επιλεγεί από το πρόγραμμα η

πλησιέστερη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής για την τιμή  $n$  που προέκυψε από τον υπολογισμό και να επαναληφθεί εκ νέου ο υπολογισμός του  $n_s$  για τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής που επιλέχτηκε.

Σύμφωνα με την μελέτη των *F. De Siervo* και *F. De Leva* (*Water Power and Dam Construction*, 1976) ο προσδιορισμός της διαμέτρου  $D_{2e}$  της στεφάνης του δρομέα στην έξοδο από την τιμή της αδιάστατης παραμέτρου  $U_{2e}$  της περιφερειακής ταχύτητας γίνεται διαδοχικά χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$U_{2e} = 0,31 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot n_s$$

$$D_{2e} = \frac{60 \cdot U_{2e} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{on}}}{\pi \cdot n}$$

Με βάση τα παραπάνω η διάμετρος της στεφάνης του υδροστροβίλου στην είσοδο ( $D_{1e}$ ) υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$D_{TUR} = D_{1e} = \frac{D_{2e}}{0,96 + 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot n_s}$$

Η μεθοδολογία για τον καθορισμό της διαμέτρου  $D_o$  (εξωτερική διάμετρος δρομέα) στη περίπτωση υδροστροβίλων τύπου **Axial Flow** (αξονικής ροής) αφορά την περίπτωση μηχανών βολβοειδούς τύπου και στηρίζεται στην μελέτη των *F. Schweiger* και *J. Gregori* (*Water Power and Dam Construction*, 1988). Η συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιεί ως βασική παράμετρο ομοιότητας τον ειδικό αριθμό στροφών  $n_q$  ως προς την παροχή. Στον υπολογισμό του  $n_q$  (*RPM*) η παροχή λαμβάνεται σε  $m^3/s$ , η διαθέσιμη υδραυλική πτώση σε *mΣΥ* και η ταχύτητα περιστροφής σε *RPM*. Ο αρχικός υπολογισμός του ειδικού αριθμού στροφών γίνεται σύμφωνα με τα αναγραφόμενα στο εγχειρίδιο της *ESHA* (*How to develop a Small Hydro Power Plant*, 2004) για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου, χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση:

$$n_q = 333 \cdot n_{qE}$$

Όπου:

$$n_{qE} = 1,528 \cdot (H_{on})^{-0,2837}$$

Ο υπολογισμός της ταχύτητας περιστροφής  $n$  (*RPM*) γίνεται ακολούθως από τη σχέση ορισμού του  $n_q$  ως εξής:

$$n = n_q (RPM) \cdot \frac{H_{on} (m)^{3/4}}{Q_{on,T} \left( \frac{m^3}{s} \right)^{1/2}}$$

Όπως είναι γνωστό οι στροφές  $n$  που προέκυψαν από τον προηγούμενο υπολογισμό δεν είναι σύγχρονες. Για το λόγο αυτό πρέπει να επιλεγεί και πάλι η πλησιέστερη σύγχρονη τιμή της ταχύτητας περιστροφής από το πρόγραμμα και στη συνέχεια να υπολογιστεί εκ νέου το  $n_q$  από τη σχέση ορισμού του κατά τα γνωστά. Η

αδιάστατη παράμετρος της περιφερειακής ταχύτητας  $U_0$  και η εξωτερική διάμετρος  $D_0$  του δρομέα υπολογίζονται τελικά διαδοχικά από τις σχέσεις:

$$U_0 = 1 + 0,0038 \cdot n_q$$

$$D_{TUR} = D_0 = \frac{60 \cdot U_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{on}}}{\pi \cdot n}$$

Στη τελευταία περίπτωση της παρούσας ανάλυσης εξετάζεται ο τρόπος υπολογισμού της διαμέτρου  $D_{TUR}$  και της ταχύτητας περιστροφής  $n$  για την περίπτωση υδροστροβίλου τύπου **Cross Flow**. Για την περίπτωση αυτή γίνεται χρήση των επόμενων προσεγγιστικών σχέσεων για να προκύψουν οι αρχικές εκτιμήσεις για τα δύο μεγέθη (Παπαντώνης, 2001):

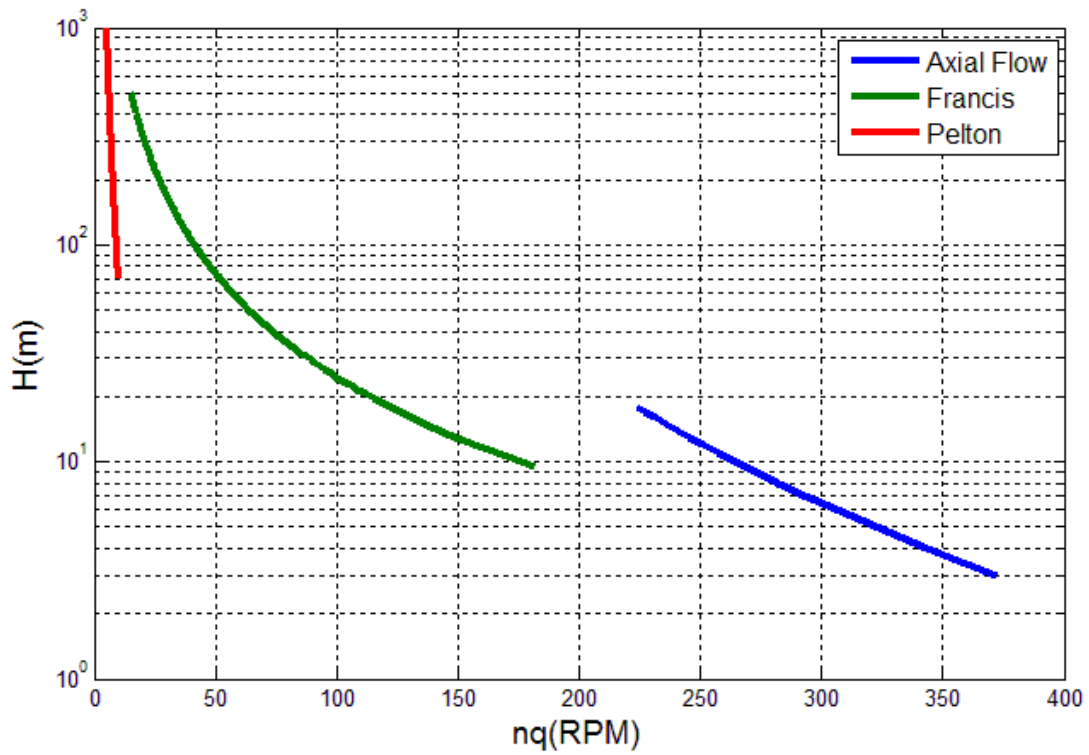
$$D_{TUR}(m) = 0,329 \cdot \left( \frac{N_{on,T}(KW)}{H_{on}(m)} \right)^{0,275}$$

$$n(RPM) = 38,451 \cdot \left( \frac{H_{on}(m)^{0,5}}{D(m)} \right)^{1,032}$$

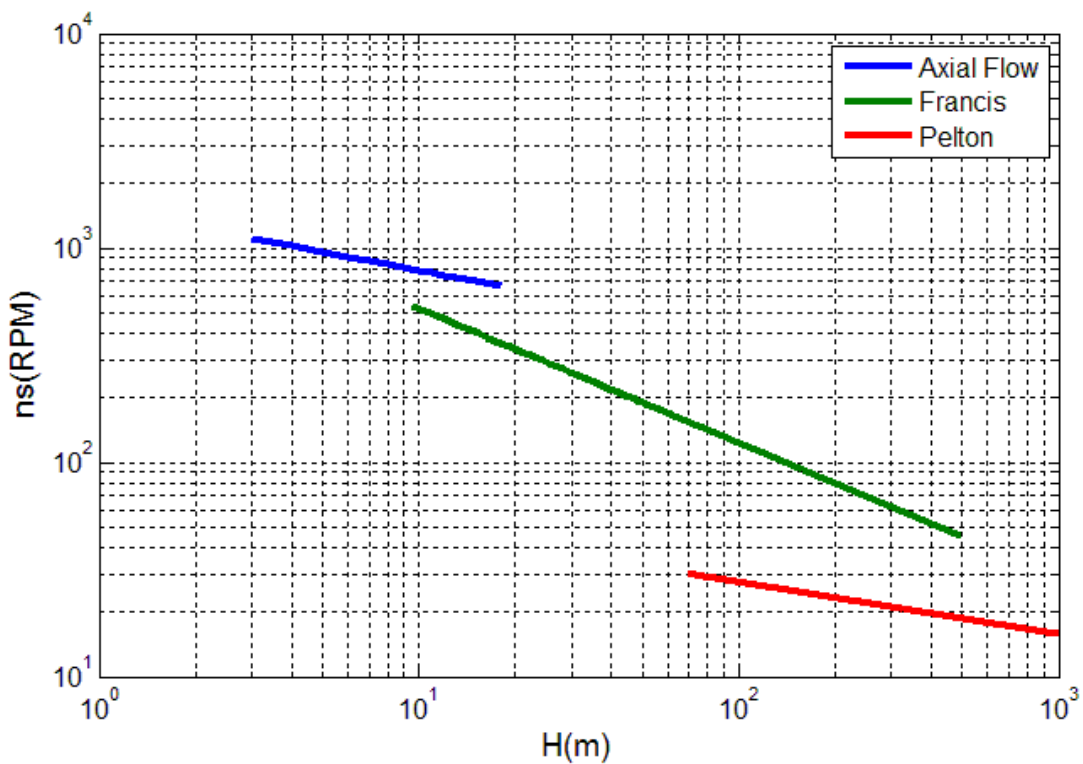
Οι τιμές που υπολογίζονται για τα δύο μεγέθη δεν θα είναι οι τελικές. Για τη ταχύτητα περιστροφής  $n$  που προέκυψε επιλέγεται η πλησιέστερη σύγχρονη τιμή και επαναλαμβάνονται ο υπολογισμός της διαμέτρου που αντιστοιχεί στη σύγχρονη ταχύτητα. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με τον δεύτερο υπολογισμό είναι αυτά που επιστρέφονται τελικά από τη συνάρτηση και αφορούν τη διάμετρο και τις ονομαστικές στροφές του υδροστροβίλου τύπου Cross Flow.

Για τους υπολογισμούς που έγιναν στις περιπτώσεις των υδροστροβίλων Pelton, Francis και Axial Flow χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές σχέσεις για να εκτιμηθεί ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ  $n_s$  ή ως προς την παροχή  $n_q$  ανάλογα με την περίπτωση. Θεωρώντας έναν ολικό βαθμό απόδοσης  $\eta = 0,9$  τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση:  $n_s \approx 2,97 \cdot n_q$ . Αξιοποιώντας λοιπόν την τελευταία σχέση χαράχθηκαν τα επόμενα διάγραμμα που παρουσιάζουν τη συσχέτιση του ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  και  $n_s$  σε σχέση με την υδραυλική πτώση για τρεις τύπους υδροστροβίλων (συγκεκριμένα Pelton, Francis και Axial flow). Η χάραξη των διαγραμμάτων βασίστηκε τις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση.





Σχήμα 4.3.9: Συσχέτιση ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  (ως προς την παροχή) και διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης



Σχήμα 4.3.10: Συσχέτιση ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  (ως προς την ισχύ) και διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης

#### 4.3.10: Υπολογισμός συνολικού ύψους επένδυσης ΜΥΗ

Ο υπολογισμός κάθε συνιστώσας του αρχικού κόστους επένδυσης ενός ΜΥΗ γίνεται προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας σχέσεις που έχουν παρθεί από τη βιβλιογραφία. Οι τιμές του κόστους που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό είναι ενδεικτικές καθώς ο ακριβής προσδιορισμός του ύψους επένδυσης ενός ΜΥΗ προϋποθέτει λεπτομερή σχεδίαση των παραμέτρων του έργου. Οι σχέσεις που αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία των ΜΥΗ είναι αποτέλεσμα συσχετίσεων μεταξύ των οικονομικών στοιχείων και των τεχνικών παραμέτρων μικρών υδροηλεκτρικών έργων που έχουν πραγματικά κατασκευαστεί. Ως εκ τούτου οι τιμές του κόστους που προκύπτουν από αυτές συνδέονται άμεσα με τη χρονική περίοδο και το αντίστοιχο επίπεδο τιμών της αγοράς στο οποίο αναφέρονται τα οικονομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν.

Σε περίπτωση παλαιότητας των διαθέσιμων σχέσεων για τον προσδιορισμό του κόστους μία λύση που θα μπορούσε να προταθεί είναι να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πληθωρισμού και να γίνει αναγωγή του κόστους στο σημερινό επίπεδο των τιμών. Οι συσχετίσεις που πρόκειται να παρουσιαστούν στη συνέχεια αφορούν τα επιμέρους τμήματα, από τα οποία αποτελείται το συνολικό ύψος της επένδυσης:

- 1) το κόστος έργων πολιτικού μηχανικού
- 2) το κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- 3) το κόστος υποσταθμού
- 4) το κόστος αγωγού πτώσεως
- 5) το κόστος μελετών, αδειοδότησης και επίβλεψης
- 6) και διάφορα απρόβλεπτα κόστη

Οι συσχετίσεις που αφορούν τα κόστη των έργων πολιτικού μηχανικού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία παραχωρήθηκαν από τον επιβλέποντα καθηγητή Κ. Παπαντώνη. Οι συγκεκριμένες σχέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν (Ιούλιος 2000) για τη σύνταξη κώδικα για την αξιολόγηση ΜΥΗ και καλύπτουν ένα πλήθος συνιστωσών του συνολικού έργου. Ωστόσο εξαιτίας της παλαιότητας των συγκεκριμένων συσχετίσεων κρίθηκε απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πληθωρισμού για τα έτη που μεσολάβησαν μέχρι σήμερα έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Θεωρείται επομένως μία μέση τιμή του πληθωρισμού  $r_m = 4\%$  προκειμένου να γίνει αναγωγή του κόστους που προκύπτει στο σημερινό επίπεδο τιμών. Ο συντελεστής αναγωγής του κόστους στο σημερινό επίπεδο τιμών υπολογίζεται ακολούθως:

$$SE = (1 + r_m)^N = 1,6$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού:

- **Κόστος Υδροστροβίλου:**

Τύπου Pelton

$$CO_{TPE} = 0,66 \cdot H_{on}^{-0,25638} \cdot N_{on,T}^{0,53908} \cdot 10^6 \cdot 1,794 \cdot SE$$

Τύπου Francis

$$CO_{TFR} = 0,66 \cdot H_{on}^{-0,25638} \cdot N_{on,T}^{0,53908} \cdot 10^6 \cdot 1,3 \cdot SE$$

Τύπου Cross Flow

$$CO_{TCR} = 0,66 \cdot H_{on}^{-0,25638} \cdot N_{on,T}^{0,53908} \cdot 10^6 \cdot 1,538 \cdot SE$$

Τύπου Axial Flow

$$CO_{TAX} = 0,66 \cdot H_{on}^{-0,25638} \cdot N_{on,T}^{0,53908} \cdot 10^6 \cdot 1,297 \cdot SE$$

Όπου:

1.  $H_{on}(m)$ , η διαθέσιμη υδραυλική πτώση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας
2.  $N_{on,T}(MW)$ , η ονομαστική ισχύς κάθε υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$  και
3.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

• **Κόστος Γεννήτριας:**

Σύγχρονη Γεννήτρια

$$CO_{GEN,SYN} = 0,7 \cdot \left( \frac{N_{GEN}}{NPOLE} \right)^{0,31336} \cdot 870,996 \cdot N_{GEN} \cdot SE$$

Ασύγχρονη Γεννήτρια

$$(N_{GEN} < 1500KW)$$

$$CO_{GEN,ASYN} = 0,85 \cdot CO_{GEN,SYN}$$

Όπου:

1.  $N_{GEN}(KVA)$ , η ονομαστική ισχύς κάθε γεννήτριας
2.  $NPOLE$ , ο αριθμός των πόλων κάθε γεννήτριας
3.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

• **Κόστος Ρυθμιστή Υδροστροβίλου:**

$$CO_{GOV} = 0,4 \cdot 89,1214 \cdot N_{on,T}^{0,301} \cdot 10^3 \cdot SE$$

Όπου:

1.  $N_{on,T}(MW)$ , η ονομαστική ισχύς κάθε υδροστροβίλου  $\langle T \rangle$
2.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

• **Κόστος Μετασχηματιστή:**

$$CO_{TRAN} = 0,6 \cdot \left( \frac{NT_{GEN}}{1000} \right)^{-0,4178} \cdot 55,3236 \cdot NT_{GEN} \cdot SE$$

Όπου:

1.  $NT_{GEN}(KVA)$ , η συνολική ονομαστική ισχύς των εγκατεστημένων ηλεκτρικών γεννητριών
2.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

- **Κόστος Ηλεκτρικού Πίνακα:**

$$CO_{SWI} = 5000 \cdot \left( \frac{NT_{GEN}}{1000} \right) \cdot SE$$

Όπου:

1.  $NT_{GEN}$  (KVA), η συνολική ονομαστική ισχύς των γεννητριών
2.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

Το συνολικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CO_{mech} = \sum_{T=1}^2 [CO_{TUR} + CO_{GEN} + CO_{GOV}]_T + CO_{TRAN} + CO_{SWI}$$

Το κόστος του υποσταθμού αντίστοιχα λαμβάνεται ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ από τον επόμενο πίνακα:

Πίνακας Δ.3-11:  
Κόστος υποσταθμού

Εγκατεστημένη ισχύς: $N_{on}$ (MW)	Κόστος υποσταθμού: $CO_{sub}$ (Euros)
0-2	250000
2-5	600000
>5	1000000

Ακολούθως παρουσιάζονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται από τον υπολογιστικό κώδικα για τον προσδιορισμό των συνιστωσών του κόστους που αφορούν τα έργα πολιτικού μηχανικού.

- **Κόστος Υδροληψίας:**

$$CO_{YDR1} = 16,57 \cdot 10^6 \cdot Q_{PRmax}^{0.5} / 340 \cdot SE$$

Όπου:

1.  $Q_{PRmax} \left( \frac{m^3}{s} \right) = Q_{max,1} \left( \frac{m^3}{s} \right) + Q_{max,2} \left( \frac{m^3}{s} \right)$ , η μέγιστη δυνατή παροχή προσαγωγής στον αγωγό πτώσεως
2.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

- **Κόστος Εκχειλιστή:**

$$CO_{YDR2} = 2.4 \cdot 10^6 \cdot Q_{flood}^{0.5} / 340 \cdot SE$$

Όπου:

1.  $Q_{flood}(\frac{m^3}{s})$ , εκτιμώμενη τιμή της πλημμυρικής παροχής στο δεδομένο υδατόρευμα για περίοδο επαναφορά 50 έτη
2.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

• **Κόστος Διώρυγας Προσαγωγής:**

$$CO_{DIOR} = 1,15 \cdot (50000 + 43720 \cdot Q_{PRmax}^{0,3749}) \cdot L_{can} \cdot SE$$

Όπου:

1.  $L_{can}(m)$  το μήκος της διώρυγας προσαγωγής
2.  $Q_{PRmax}(\frac{m^3}{s}) = Q_{max,1}(\frac{m^3}{s}) + Q_{max,2}(\frac{m^3}{s})$ , η μέγιστη δυνατή παροχή προσαγωγής στον αγωγό πτώσεως

• **Κόστος Δεξαμενής Φόρτισης:**

$$CO_{DEXF} = 12,6 \cdot 10^6 \cdot Q_{PRmax}^{0,45} \cdot SE$$

Όπου:

1.  $Q_{PRmax}(\frac{m^3}{s})$ , η μέγιστη δυνατή παροχή προσαγωγής στους δύο υδροστροβίλους
2.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

• **Κόστος Αγωγού Πτώσεως:**

Το κόστος του αγωγού πτώσεως υπολογίζεται αναλύοντας τις συνιστώσες του κόστους και συγκεκριμένα:

➤ Κόστος Υλικού:

$$K_1 = K_m \cdot d_{st} \cdot (V_{out} - V_{in}) = K_m \cdot d_{st} \cdot \frac{(\pi \cdot D^2 - \pi \cdot D_{IN}^2)}{4} \cdot L_{PIPE}$$

➤ Κόστος Επιφανείας:

$$K_2 = K_{sur} \cdot \pi \cdot D \cdot L_{PIPE}$$

➤ Κόστος Συγκόλλησης:

$$K_3 = K_{weld} \cdot D \cdot \frac{L_{PIPE}}{6}$$

➤ Κόστος Μεταφοράς και Εκσκαφών:

$$K_4 = 100 \cdot D^2 \cdot L_{PIPE}$$

Όπου:

1.  $d_{st} = 7800 kg/m^3$ , η πυκνότητα του χάλυβα St – 37
2.  $D(m)$ , η εξωτερική διάμετρος του αγωγού πτώσεως
3.  $D_{IN}(m)$ , η εσωτερική διάμετρος του αγωγού πτώσεως
4.  $L_{PIPE}(m)$ , το μήκος του αγωγού πτώσεως

5.  $K_m = 1,6 \text{ eur/kg}$ , το ειδικό κόστος υλικού
6.  $K_{sur} = 30 \text{ eur/m}^2$ , το ειδικό κόστος επιφάνειας
7.  $K_{weld} = 1050 \text{ eur/m/ραφη}$ , το ειδικό κόστος συγκόλλησης

Το κόστος του αγωγού πτώσεως υπολογίζεται τελικά από το άθροισμα των τεσσάρων συνιστωσών που αναλύθηκαν:

$$CO_{PIPE} = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$$

- **Κόστος Κτιρίου ΥΗΣ:**

$$CO_{YHS} = 1,27 \cdot 10^6 \cdot (N_{tur} + 0,5) \cdot DTUR^{2.3} \cdot N_{on}^{0.5} \cdot SE$$

Όπου:

1.  $N_{tur}$ , ο αριθμός των υδροστροβίλων
2.  $DTUR = \max(DTUR_1, DTUR_2)$ , η μέγιστη τιμή της διαμέτρου μεταξύ των δύο υδροστροβίλων
3.  $N_{on}(KW)$ , η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς
4.  $SE$ , ο συντελεστής αναγωγής

Το συνολικό κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού υπολογίζεται τελικά από το άθροισμα:

$$CO_{civ} = CO_{YDR1} + CO_{YDR2} + CO_{DIOR} + CO_{DEXF} + CO_{PIPE}$$

Το συνολικό ύψος της επένδυσης προσαυξάνεται ακόμα περισσότερο καθώς συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση:

- το κόστος μελετών, αδειοδοτήσεων και επίβλεψης που αντιστοιχεί στο 5% του κόστους κατασκευής του ΜΥΗ και
- το κόστος των επιμέρους δαπανών που προκύπτουν από ενέργειες όπως η αγορά γης και η διάνοιξη δρόμων και ανέρχονται σε ποσοστό 2% του κόστους της εγκατάστασης

$$CO_{st} = \frac{5}{100} \cdot (CO_{mech} + CO_{civ} + CO_{sub})$$

$$CO_{mish} = \frac{2}{100} \cdot (CO_{mech} + CO_{civ} + CO_{sub})$$

Έτσι, με βάση τα προηγούμενα το συνολικό κόστος επένδυσης προκύπτει τελικά:

$$CO_{tot} = CO_{mech} + CO_{civ} + CO_{sub} + CO_{st} + CO_{mish}$$

Η επόμενη τυπική καμπύλη δίνει μια εικόνα της μεταβολής που επέρχεται στο κόστος ανά εγκατεστημένο KW όταν μεταβάλλεται το μέγεθος των υδροστροβίλων σύμφωνα πάντα με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν. Η μπλέ καμπύλη αναφέρεται στην εγκατάσταση ενός μοναδικού υδροστροβίλου και η πράσινη στην εγκατάσταση δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων. Η σχεδίαση των καμπυλών έχει γίνει με παράμετρο την ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}(m^3/s)$  του ενός υδροστροβίλου

#### 4.3.11: Οικονομοτεχνική ανάλυση του ΜΥΗ

Η οικονομοτεχνική ανάλυση ενός ΜΥΗ έχει ως βασικό αντικείμενο τον έλεγχο της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης του έργου. Η απόφαση για την προώθηση (ή την μη προώθηση) μιας επένδυσης είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διερεύνηση της χρηματοοικονομικής αποδοτικότητας του εξεταζόμενου σχεδίου επένδυσης.

Η αξιολόγηση της επένδυσης για κάθε σενάριο σχεδίασης που εξετάζεται γίνεται καλώντας τη συνάρτηση (*COSTANAL*). Στο πλαίσιο αυτής εκτελείται από τον κώδικα μια προκαταρκτική ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας του ΜΥΗ. Με τη χρησιμοποίηση διάφορων οικονομοτεχνικών δεικτών (*IRR, NPV, BCR*) δύναται να εξεταστεί εάν η επένδυση είναι προσοδοφόρα για τον ιδιώτη επενδυτή. Οι συγκεκριμένοι δείκτες, οι οποίοι έχουν αναλυθεί στο θεωρητικό μέρος, επιτρέπουν ακόμα την συγκριτική οικονομική αξιολόγηση μεταξύ των εναλλακτικών επενδυτικών σχεδίων που εξυπηρετούν τον ίδιο στόχο (μεγιστοποίηση καθαρών ωφελειών) αλλά διαφέρουν ως προς τη ροή των μετρητών. Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της οικονομικής ανάλυσης και οι παραδοχές που έγιναν σχετικά με αυτά.

Η διάρκεια κατασκευής των ΜΥΗ είναι συνήθως της τάξεως των 2 ετών. Η ίδια επιλογή έγινε στο πλαίσιο διενέργειας της παρούσας οικονομική ανάλυσης που ελήφθη  $N_{con} = 2$ . Επίσης, η διάρκεια λειτουργίας του έργου ελήφθη ίση με  $N = 20$  χρόνια, εφόσον τόση είναι συνήθως η διάρκεια ζωής του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Θεωρήθηκε ακόμα ότι η συμμετοχή ιδίων ιδιωτικών κεφαλαίων στην επένδυση είναι της τάξεως του 30%, ενώ το υπόλοιπο κόστος (70%) καλύπτεται από τραπεζικό δανεισμό. Το επιτόκιο δανεισμού σε αυτή τη περίπτωση θεωρήθηκε ίσο με 8%. Το τοκοχρεολύσιο λαμβάνεται ως σταθερό και υπολογίζεται από την σχέση:

$$LOAN = 70\% \cdot C_{tot}$$
$$X = \frac{LOAN \cdot INTRA \cdot (INTRA + 1)^{NPAY}}{(1 + INTRA)^{NPAY} - 1}$$

Όπου:

- $C_{tot}$ , το συνολικό ύψος της επένδυσης
- $INTRA = 8\%$ , το επιτόκιο δανεισμού
- $NPAY$  η περίοδος αποπληρωμής του δανείου. Θεωρήθηκε ίση με 15 έτη.

Οι ετήσιες δαπάνες του ΜΥΗ συνίστανται στα διάφορα λειτουργικά έξοδα (συντήρησης και λειτουργίας) και στα έξοδα των ασφαλίσεων του εξοπλισμού. Τα λειτουργικά έξοδα της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύουν ποσοστό 1,5% του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και 0,5% των έργων πολιτικού μηχανικού (Παπαντώνης, 2001). Τα έξοδα ασφαλίσεως αντίστοιχα εκτιμήθηκαν ως ποσοστό 0,65% του κόστους ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και 0,35% των έργων πολιτικού μηχανικού (Παπαντώνης, 2001). Θεωρήθηκαν δηλαδή ότι:

$$C_{OPER} = 1,5\% \cdot C_{mech} + 0,5\% \cdot C_{civ}$$

$$C_{INSUR} = 0,65\% \cdot C_{mech} + 0,35\% \cdot C_{civ}$$

Σημειώνεται ακόμα ότι κατά την χρηματοοικονομική ανάλυση ελήφθη υπόψη φορολογία 20% στα ετήσια κέρδη του σταθμού. Ο μέσος ετήσιος πληθωρισμός λαμβάνεται  $RATE = 4\%$  στον υπολογισμό των ετήσιων εξόδων. Η σημερινή τιμή πώλησης την παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται ίση με  $EP = 87,5 \text{ euros}/MWh$ . Τέλος θεωρείται ετήσια αναπροσαρμογή της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ίση με  $RATE_{EN} = 3\%$ .

Κατά την οικονομοτεχνική ανάλυση υπολογίζεται αρχικά η αναμενόμενη χρηματική ροή σε ονομαστικές τιμές λαμβάνοντας υπόψη τον πληθωρισμό και την ετήσια αναπροσαρμογή στη τιμή πώλησης της ενέργειας. Στη συνέχεια θεωρώντας το κατάλληλο επιτόκιο προεξόφλησης γίνεται η αναγωγή των ποσών σε παρούσα αξία και υπολογίζονται ο λόγος εσόδων προς έξοδα ( $BCR$ ) και η καθαρή παρούσα αξία ( $NPV$ ) χρησιμοποιώντας τις επόμενες σχέσεις. Η τιμή του επιτοκίου προεξόφλησης για την ανάλυση που έγινε ελήφθη:  $r = 8\%$

$$BCR = \frac{B_0}{C_0} = \frac{\sum_{j=0}^{YEARS} \left[ \frac{B_j}{(1+r)^j} \right]}{\sum_{j=0}^{YEARS} \left[ \frac{C_j}{(1+r)^j} \right]}$$

$$NPV = B_0 - C_0 = \sum_{j=0}^{YEARS} \left[ \frac{B_j}{(1+r)^j} \right] - \sum_{j=0}^{YEARS} \left[ \frac{C_j}{(1+r)^j} \right]$$

Η εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης ( $IRR$ ) υπολογίζεται αριθμητικά με δοκιμές αναζητώντας το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο μηδενίζεται η καθαρή παρούσα αξία. Περισσότερα θεωρητικά στοιχεία για τους δείκτες οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης αναφέρονται στο θεωρητικό κεφάλαιο. Σημειώνεται επίσης ότι το *MATLAB* παρέχει έτοιμες συναρτήσεις για τον υπολογισμό των μεγεθών  $IRR$  και  $NPV$  εισάγοντας ως είσοδο την χρηματική ροή των μετρητών και για τη δεύτερη μόνο περίπτωση που αφορά τη καθαρή παρούσα αξία το επιτόκιο προεξόφλησης ως προς το οποίο γίνεται η αναγωγή.



---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ε:  
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ  
ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

---

## ***E.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ***

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η συγκεντρωτική παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική διερεύνηση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης ΜΥΗ έργου στον Αγραφιώτη. Η επιδίωξη να μελετηθεί μεθοδολογικά το εξεταζόμενο πρόβλημα υποδεικνύει την ανάγκη διάκρισης του παρόντος κεφαλαίου σε τέσσερις επιμέρους ενότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Παραμετρική ανάλυση και σχολιασμό της λειτουργίας του υπολογιστικού μοντέλου που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και αφορά τη προσομοίωση και την αξιολόγηση της ΜΥΗ εγκατάστασης.
- Βελτιστοποίηση απλού στόχου της ΜΥΗ της εγκατάστασης (με χρήση γενετικών αλγορίθμων) έχοντας ως μοναδικό στόχο την μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης (κριτήριο μέγιστου *IRR*). Με τη βελτιστοποίηση απλού στόχου θα προκύψει το βασικό σενάριο σχεδίασης.
- Βελτιστοποίηση διπλού στόχου της ΜΥΗ εγκατάστασης θέτοντας διπλό στόχο την μεγιστοποίηση του οικονομικού δείκτη *IRR* και του συντελεστή φορτίου *CF* της εγκατάστασης. Από τον συμβιβασμό μεταξύ των δύο προηγούμενων στόχων θα προκύψει το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης.
- Μελέτη ευαισθησίας και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης.

Σκοπός του μελετητή είναι στο τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου να παρουσιαστεί το πιο προσοδοφόρο σενάριο εγκατάστασης ΜΥΗ στο κύριο ρεύμα του ποταμού, όπως προέκυψε από την ανάλυση που έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Προκειμένου να αποσαφηνισθεί ο όρος βέλτιστη σχεδίαση αναφέρεται συγκεκριμένα ότι η παρούσα μελέτη αφορά τον προσδιορισμό της τελικής χωροταξικής διάταξης του ΜΥΗ καθώς και την επιλογή του πλήθους - μεγέθους των υδροστροβίλων που πρέπει να εγκατασταθούν, ώστε να επιτυγχάνονται στο μέγιστο βαθμό οι στόχοι που έχουν τεθεί. Στο σημείο αυτό κρίνεται χρήσιμο να παρουσιαστεί μια σύνοψη της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τα όσα έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια κατά τη παρούσα μελέτη εξετάστηκε ένα πεπερασμένο πλήθος πιθανών θέσεων υδροληψίας του έργου, χρησιμοποιώντας την χωρική πληροφορία που δίνεται από τον διανυσματικό χάρτη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Αγραφιώτη. Έτσι:

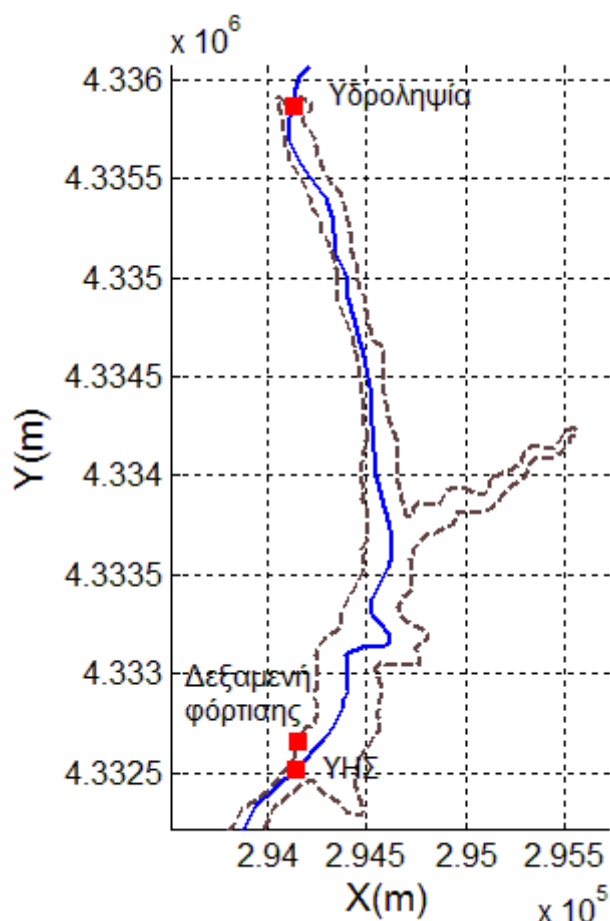
- Στον κώδικα βελτιστοποίησης εισάγεται κάθε φορά μία ισοϋψής καμπύλη που καθορίζει την εξεταζόμενη θέση υδροληψίας του έργου.
- Η βελτιστοποίηση με δεδομένη την εκάστοτε ισοϋψή (άρα και τη θέση υδροληψίας) αφορά έτσι τέσσερις μεταβλητές σχεδίασης όπως έχει περιγραφεί στην παραμετροποίηση του προβλήματος.
- Η προηγούμενη διαδικασία ωστόσο επαναλαμβάνεται για το σύνολο των διαθέσιμων ισοϋψών καμπυλών εξετάζοντας μία προς μία τις πιθανές θέσεις υδροληψίας που καθορίζουν.
- Η ισοϋψής καμπύλη στην οποία αντιστοιχεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος βάση της ανάλυσης απλού στόχου (μεγιστοποίηση *IRR*) διερευνάται στη συνέχεια ως προς τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου.
- Μέσα από την αξιολόγηση των βέλτιστων αποτελεσμάτων κατά Pareto που εξασφαλίζουν μεγιστοποίηση του *IRR* και του *CF* αναμένεται να προκύψει το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης του ΜΥΗ στον Αγραφιώτη.

## ***E.2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ***

### ***E.2.1: Σενάριο αναφοράς τυπικής διάταξης ΜΥΗ***

Προκειμένου να έχουμε μια γενική εικόνα της επίδρασης που έχει η ονομαστική παροχή των υδροστροβίλων στις ενεργειακές επιδόσεις και τις οικονομικές παραμέτρους του ΜΥΗ απαιτείται να γίνει παραμετρική ανάλυση του υπολογιστικού μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την βαθμολόγηση των πιθανών λύσεων του προβλήματος. Για το σκοπό αυτό εκλέγεται ως ενδεικτική μία διάταξη αναφοράς του ΜΥΗ στον Αγραφιότη.

Με δεδομένη την εν λόγω χωροταξική διάταξη υπολογίστηκαν τα τεχνικά στοιχεία του έργου που αφορούν τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση και το μήκος των έργων προσαγωγής του νερού. Έτσι κατέστη δυνατό να μελετηθεί παραμετρικά το υπολογιστικό μοντέλο για τις διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη αναφοράς του ΜΥΗ για την οποία πραγματοποιήθηκε η παρακάτω ανάλυση.



*Σχήμα E.2-1: Σενάριο αναφοράς τυπικής διάταξης ΜΥΗ στον Αγραφιότη*

Τονίζεται ιδιαίτερα ότι η χάραξη της προηγούμενης διάταξης είναι ενδεικτική και δεν προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα η χάραξη των έργων προσαγωγής του νερού έγινε κατά μήκος της ισοϋψούς καμπύλης των 600m. Οι χαρακτηριστικές θέσεις της διάταξης που αναφέρονται για την υδροληψία, τη δεξαμενή φόρτισης και τον υδροηλεκτρικό σταθμό (ΥΗΣ) παρουσιάζονται στο

προηγούμενο σχήμα. Στη συνέχεια παρατίθενται πίνακας με τις χαρτογραφικές συντεταγμένες ( $X, Y$ ) των συγκεκριμένων θέσεων, κατά το γεωδαιτικό σύστημα  $EGSA87$ , καθώς και το αντίστοιχο υψόμετρο  $Z$  στο οποίο βρίσκονται.

Πίνακας E.2-1:

*Χωρικές συντεταγμένες συνιστωσών της διάταξης αναφοράς*

	<b>ΥΔΡΟΛΗΨΙΑ</b>	<b>ΔΕΞ. ΦΟΡΤΙΣΗΣ</b>	<b>ΥΗΣ</b>
<b>X(m)</b>	294136,2	294152,96	294137,74
<b>Y(m)</b>	4335864,07	4332659,11	4332522,19
<b>Z(m)</b>	600	599,99	514,92

Με βάση τα παραπάνω μπορούν να εκτιμηθούν για το συγκεκριμένο σενάριο σχεδίασης τα παρακάτω τεχνικά στοιχεία του έργου:

Πίνακας E.2-2:

*Τεχνικά στοιχεία εγκατάστασης αναφοράς*

<b>Θεωρητική υδραυλική πτώση</b>	85,06	<i>m</i>
<b>Μήκος διώρυγας προσαγωγής</b>	3,65	<i>km</i>
<b>Μήκος αγωγού πτώσεως</b>	161,91	<i>m</i>

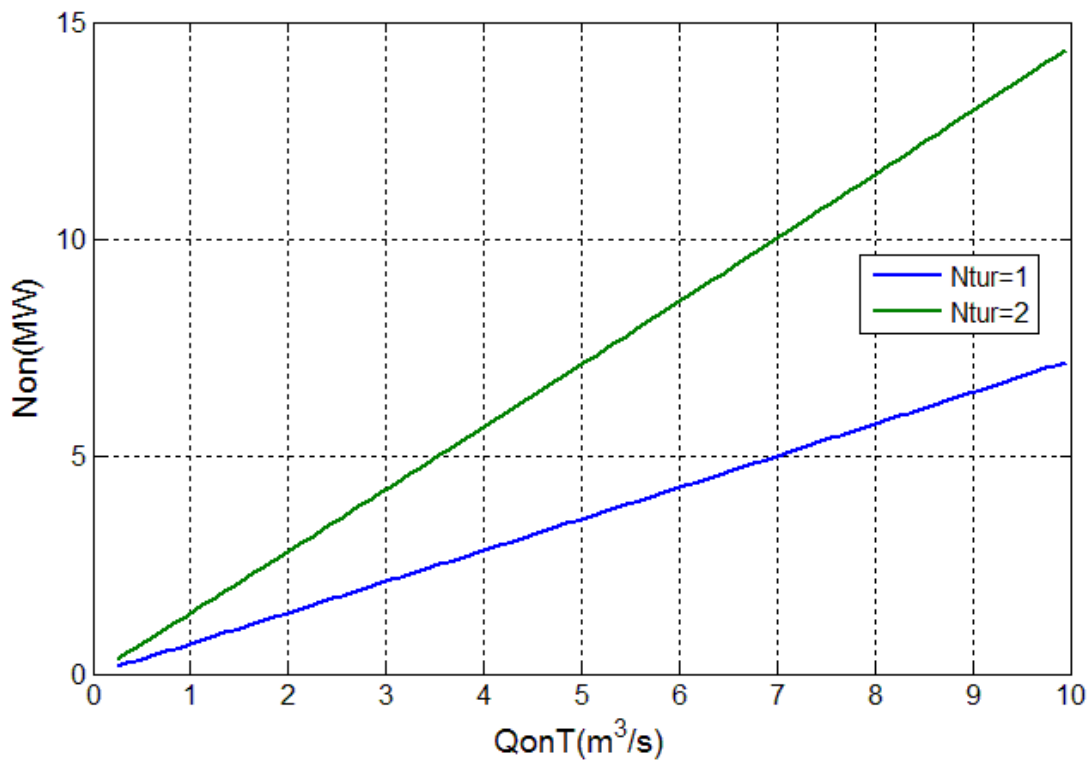
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες της μελέτης. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η θεώρηση ότι το ΜΥΗ διαθέτει έναν ή δύο ταυτόσημους υδροστροβίλους με ίση ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}$ . Για το λόγο αυτό τα οι καμπύλες μεταβολής των διαφόρων μεγεθών χαράσσονται με παράμετρο την ονομαστική παροχή  $Q_{on,T}$  κάθε μηχανής. Ο δείκτης  $N_{tur}$  που χρησιμοποιείται καθορίζει ουσιαστικά το πλήθος των ταυτόσημων υδροστροβίλων.

Κατά τη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται το γενικότερο σενάριο κατά το οποίο στο ΜΥΗ δύναται να εγκατασταθούν δύο υδροστροβίλοι διαφορετικού μεγέθους και τύπου. Η συγκεκριμένη επιλογή στοχεύει στην καλύτερη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού της υποψήφιας θέσης υδροληψίας. Η λογική είναι ότι σε αυτή τη περίπτωση ένας μεγαλύτερος υδροστροβίλος παραλαμβάνει τα υψηλά φορτία και ένας μικρότερος τα χαμηλά επιτυγχάνοντας τελικά καλύτερη αξιοποίηση της φυσικής απορροής.

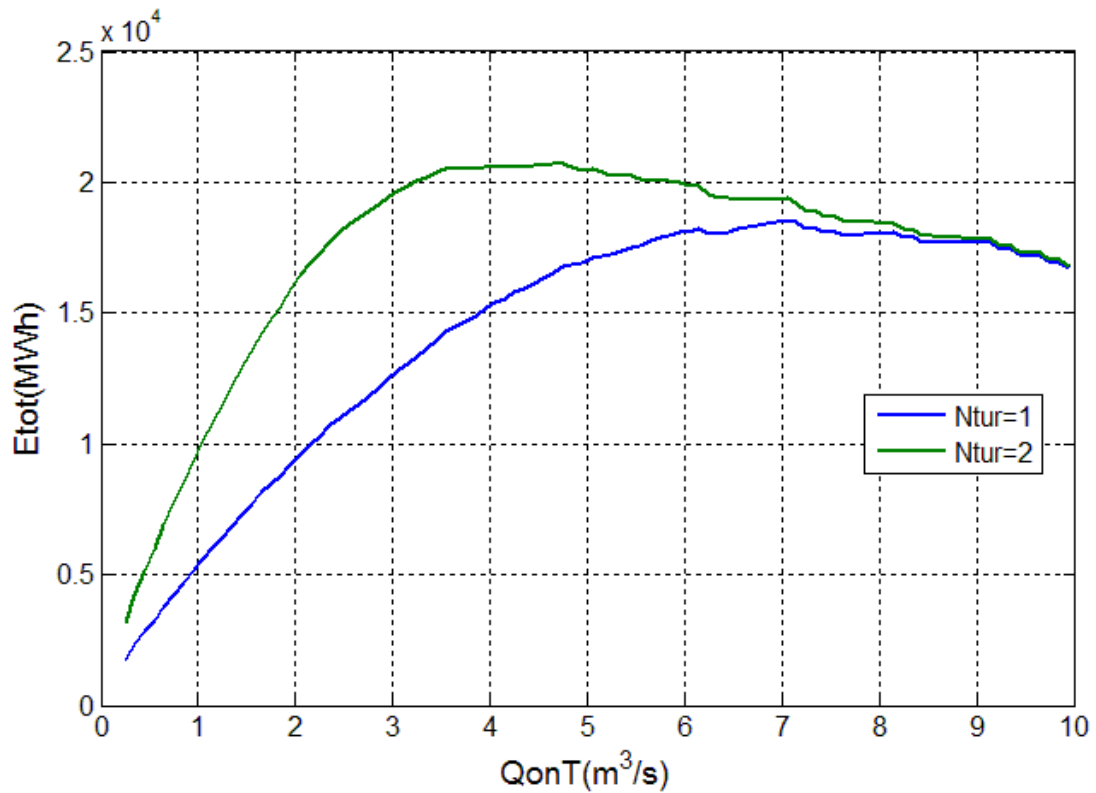
Στη δεύτερη αυτή περίπτωση η χάραξη των καμπυλών γίνεται με παράμετρο την συνολική ονομαστική παροχή  $Q_{on} = Q_{on,1} + Q_{on,2}$  των εγκατεστημένων υδροστροβίλων. Κάθε καμπύλη χαρακτηρίζεται ακόμα από τον λόγο μεγέθους των υδροστροβίλων. Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από το πηλίκο της ονομαστικής παροχής του μικρότερου υδροστροβίλου προς την ονομαστική παροχή του μεγαλύτερου και συμβολίζεται με:  $SR = Q_{on,2}/Q_{on,1}$  (*Size Ratio*). Οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν τα διάφορα μεγέθη για λειτουργία ενός ή δύο ταυτόσημων μηχανών. Τα δύο τελευταία σενάρια παρότι εξετάζονται στην πρώτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων συμπεριλαμβάνονται και στη δεύτερη για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης.

Στο τελευταίο κομμάτι της ενότητας γίνεται ο σχολιασμός και η εξαγωγή συμπερασμάτων από την παραμετρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα αυτής παρατίθενται συγκεντρωτικά στη συνέχεια.

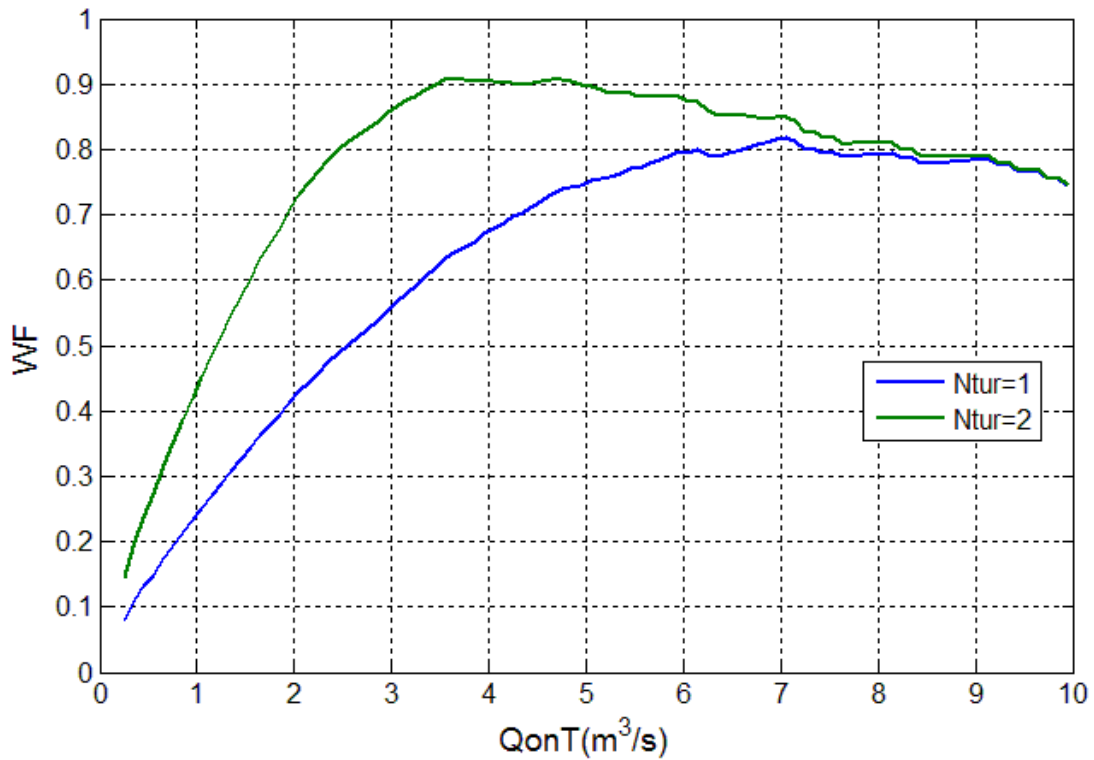
*E.2.2: Αποτελέσματα για λειτουργία ταυτόσημων υδροστροβίλων*



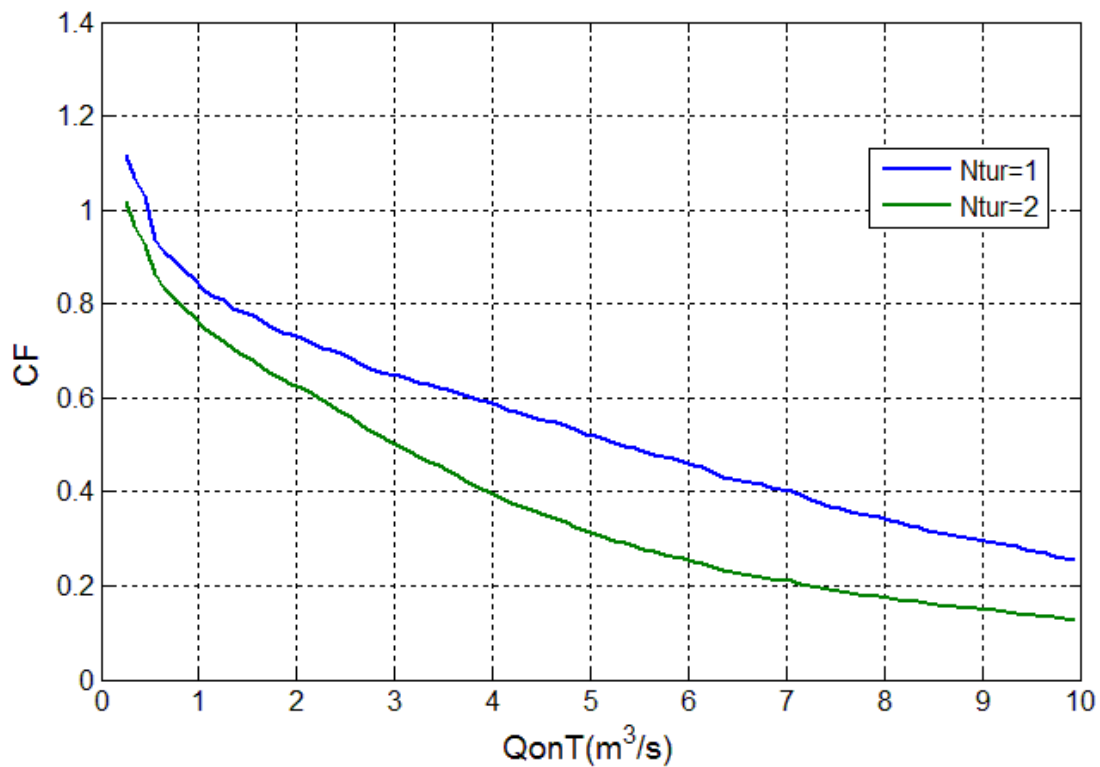
*Σχήμα E.2-2: Ονομαστική ισχύς για εγκατάσταση ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων*



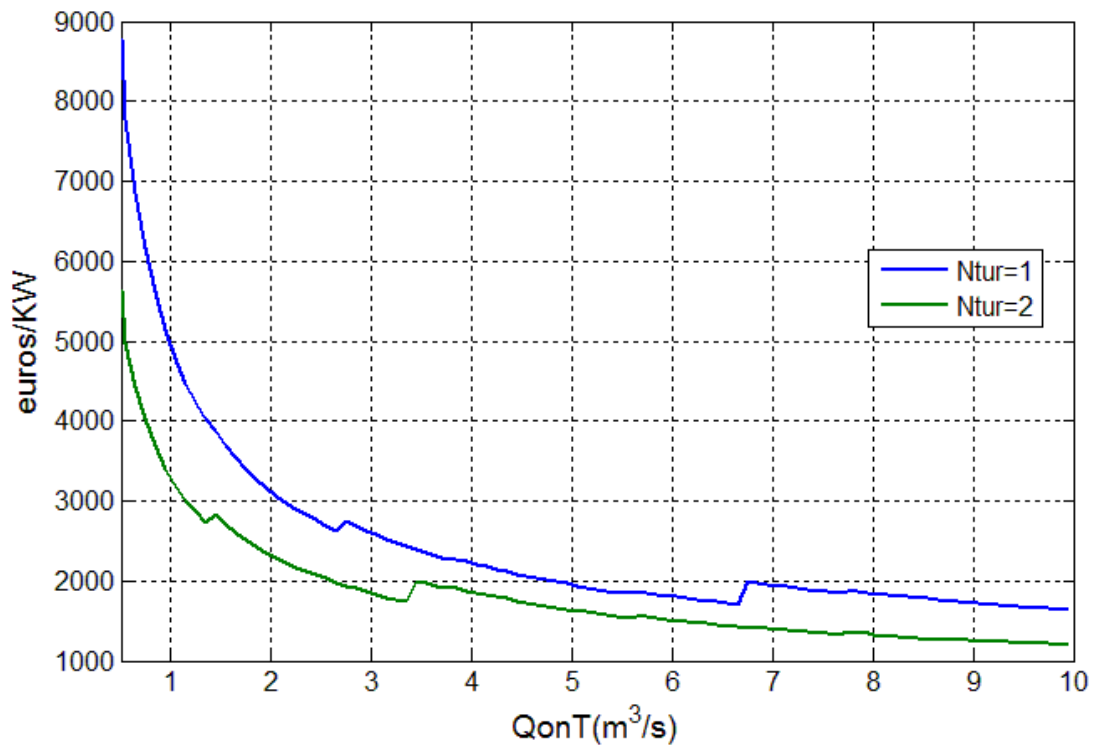
*Σχήμα E.2-3: Ετησίως παραγόμενη ενέργεια για λειτουργία ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)*



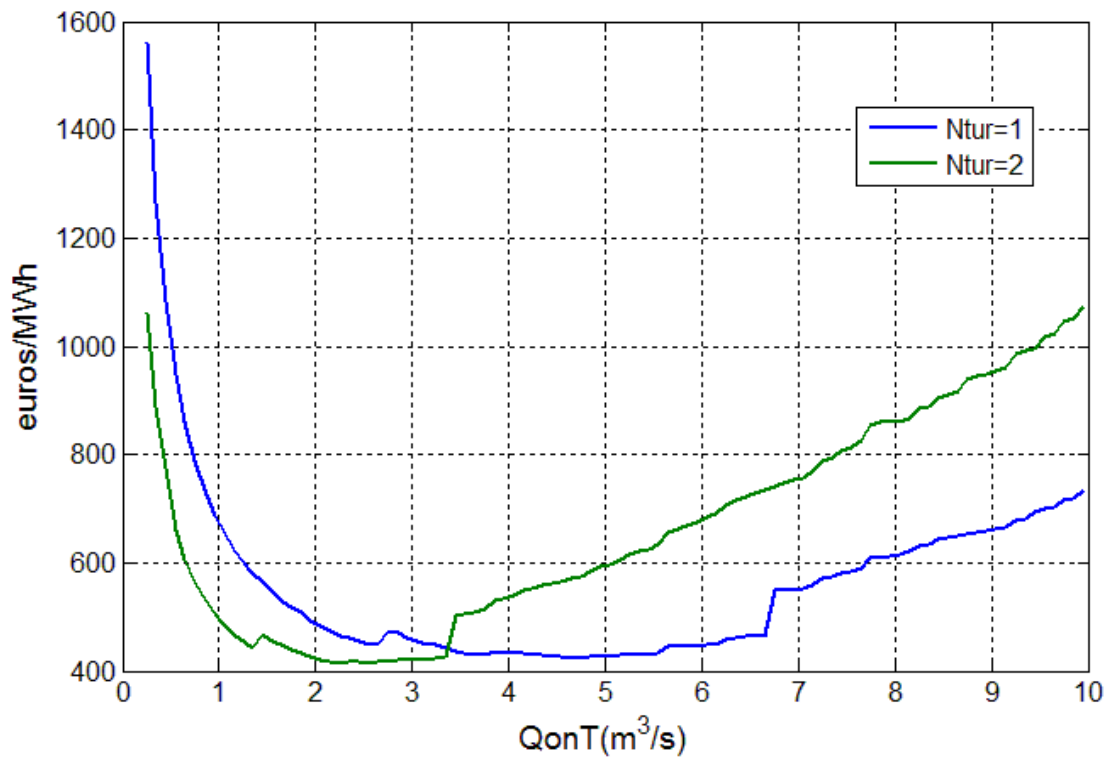
Σχήμα E.2-4: Συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης της φυσικής απορροής για λειτουργία ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



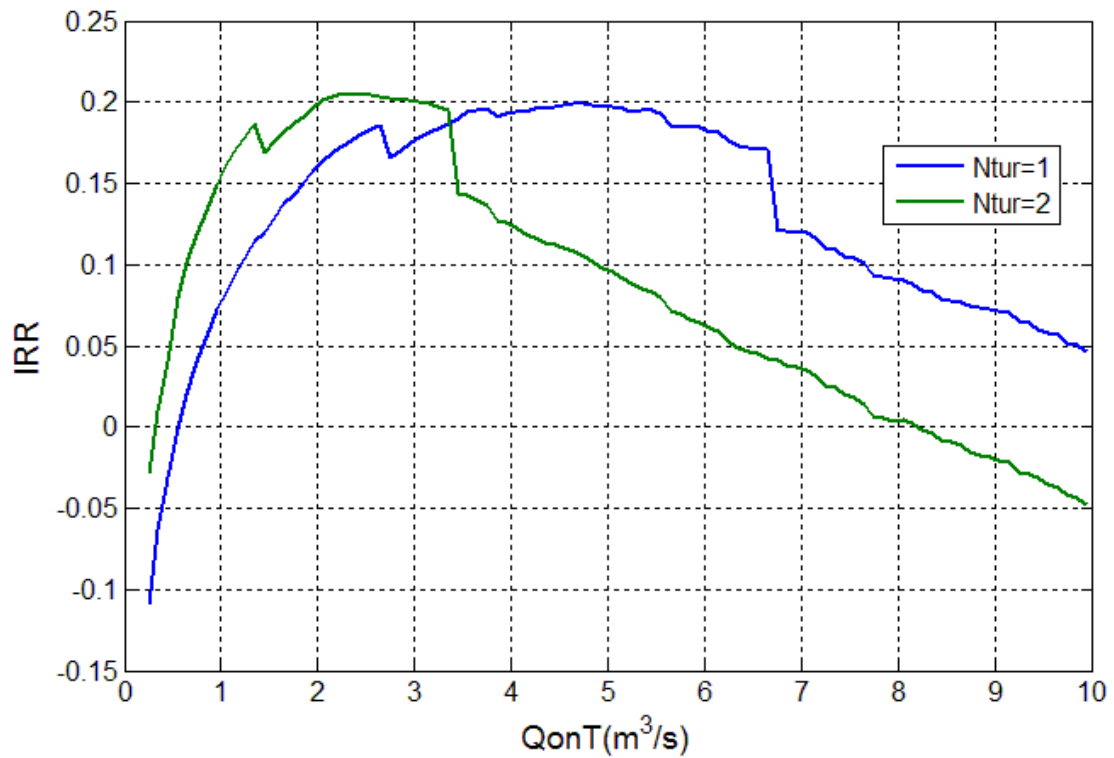
Σχήμα E.2-5: Συντελεστής φορτίου για την λειτουργία ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



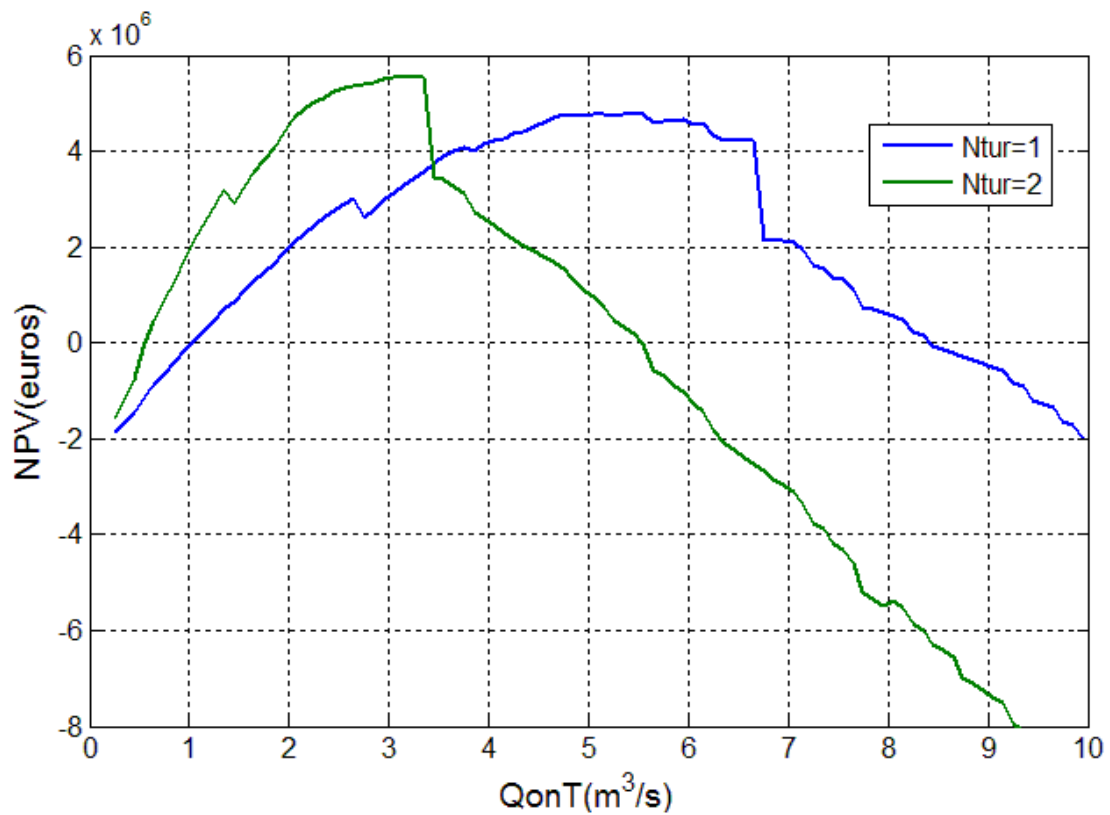
Σχήμα E.2-6: Κόστος ανά εγκατεστημένο KW για την λειτουργία ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων



Σχήμα E.2-7: Κόστος επένδυσης ανά παραγόμενη MWh για την λειτουργία ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



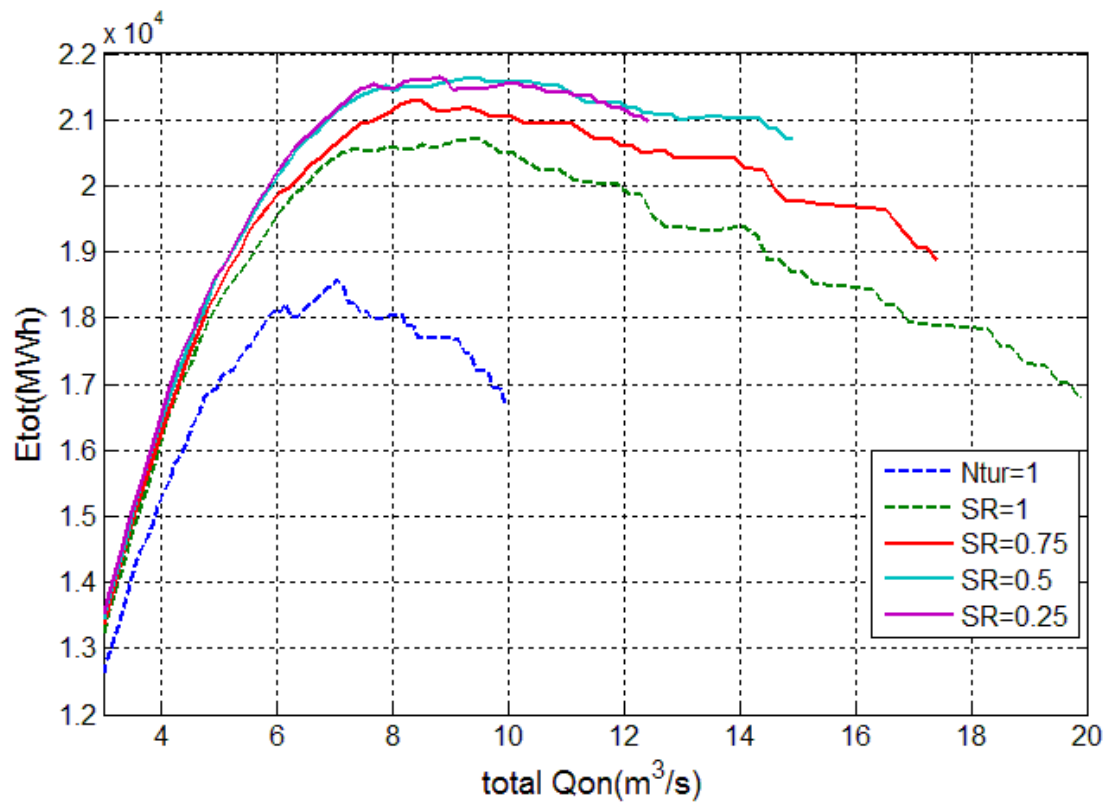
Σχήμα E.2-8: Εσωτερική απόδοση της επένδυσης για εγκατάσταση ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



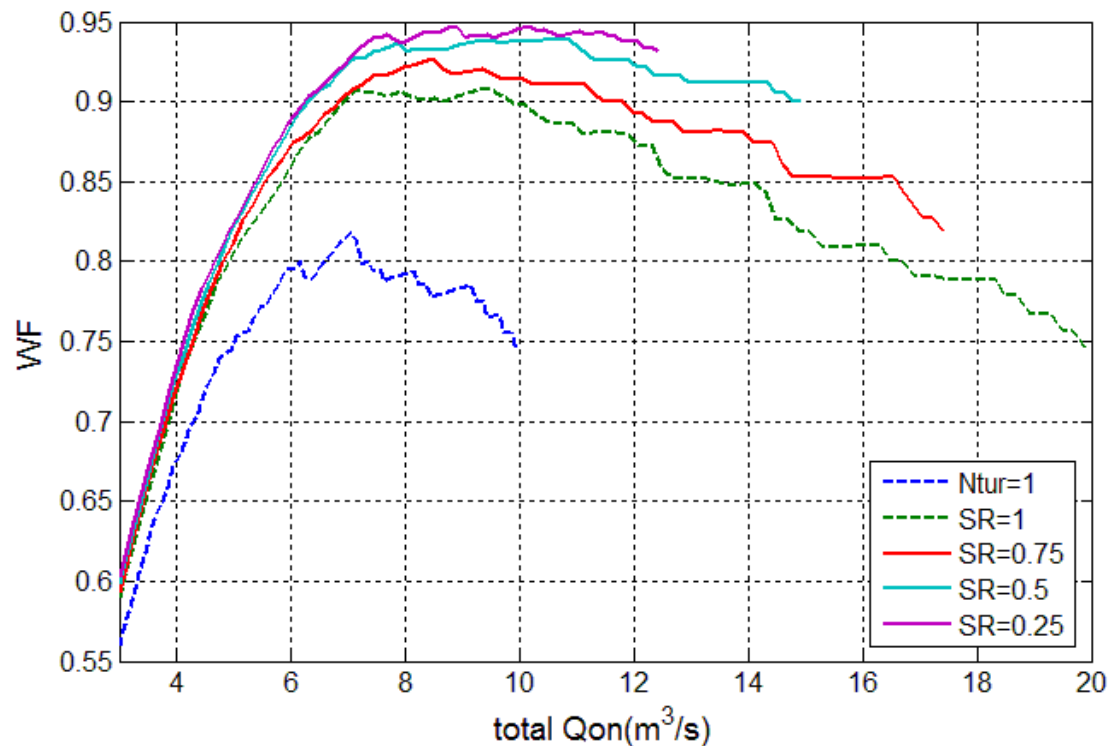
Σχήμα E.2-9: Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης για εγκατάσταση ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



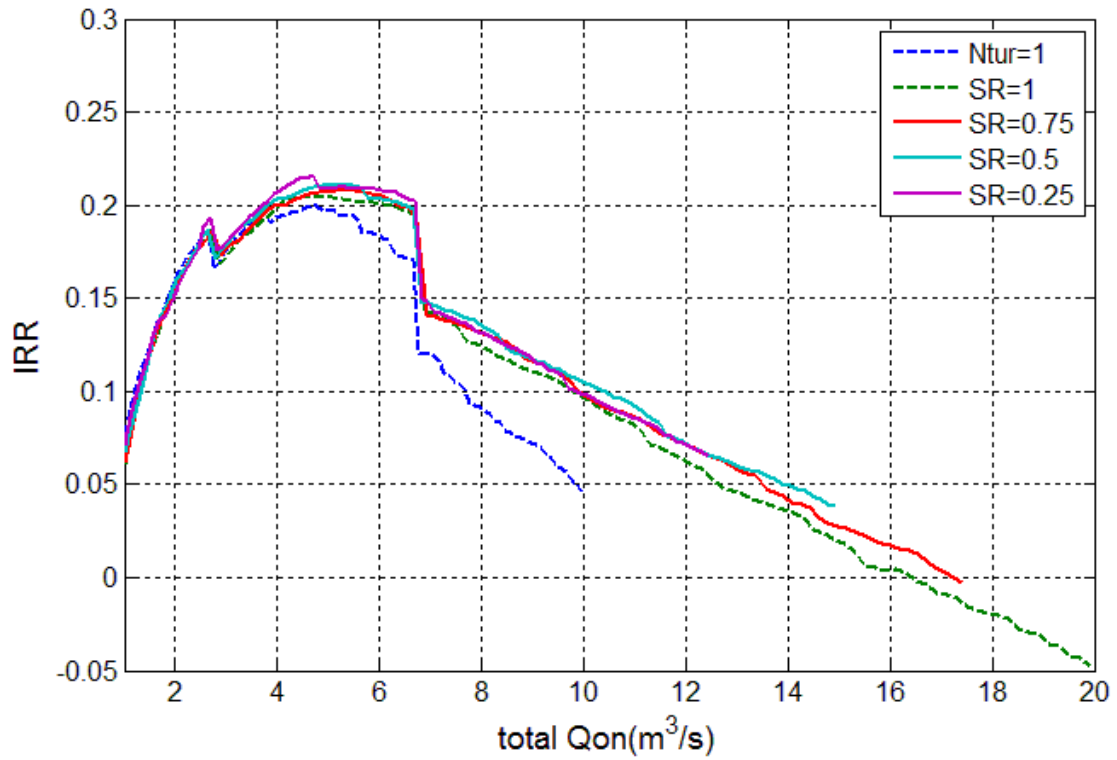
Ε.2.3: Αποτελέσματα για τη λειτουργία υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους



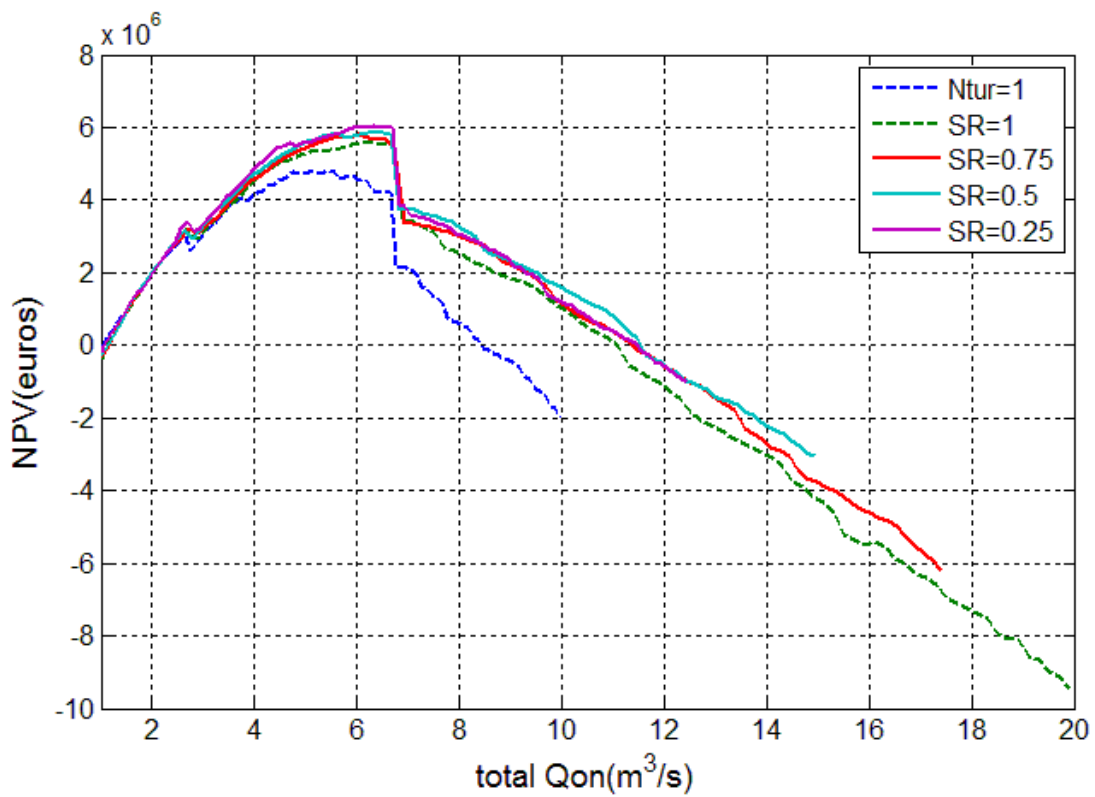
Σχήμα Ε.2-10: Ετησίως παραγόμενη ενέργεια από υδροστροβίλους διαφορετικού μεγέθους (Πηγή υδρολογικών στοιχείων: ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



Σχήμα Ε.2-11: Συντελεστής ενεργειακή αξιοποίησης υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους (Πηγή υδρολογικών στοιχείων: ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



Σχήμα E.2-12: Εσωτερική απόδοση της επένδυσης για εγκατάσταση υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους (Πηγή υδρολογικών στοιχείων: ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



Σχήμα E.2-13: Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης για εγκατάσταση υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους (Πηγή υδρολογικών στοιχείων: ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

#### E.2.4: Συνολικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας ενός ή δύο υδροστροβίλων (σχήμα E.2 – 10 ) η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια αρχικά αυξάνεται με το μέγεθος των υδροστροβίλων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μεγαλύτερες μηχανές μπορούν να εκμεταλλεύονται καλύτερα την απορροή σε περιόδους που αυτή διαθέτει υψηλή τιμή. Επίσης, όλες οι καμπύλες φαίνεται ότι παρουσιάζουν μέγιστο σε κάποια τιμή της συνολικής ονομαστικής παροχής πέρα από την οποία η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια αρχίζει σταδιακά να μειώνεται. Από το σχήμα E.2 – 2 μάλιστα παρατηρούμε ότι σε σχετικά μεγάλες παροχές η ενέργεια που παράγεται από έναν ή δύο ταυτόσημους υδροστροβίλους είναι ουσιαστικά η ίδια. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτή τη περίπτωση η τιμή της φυσικής απορροής δεν επαρκεί ώστε να λειτουργεί και ο δεύτερος υδροστροβίλος επί αρκετό χρονικό διάστημα.

Τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ετήσια ενεργειακή παραγωγή παρουσιάζει η εγκατάσταση δύο υδροστροβίλων με λόγο ονομαστικών παροχών  $SR = 0,25$  έως  $0,5$  καθώς έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση της φυσικής απορροής. Αντίθετα στη περίπτωση εγκατάστασης ενός μοναδικού υδροστροβίλου παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές στη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος της μηχανής. Οι διαπιστώσεις αυτές δικαιολογούνται λόγω του περιορισμένου εύρους λειτουργίας της συγκεκριμένης εγκατάστασης που διαθέτει έναν μοναδικό υδροστροβίλο.

Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται για τις καμπύλες που αναφέρονται στον συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης του ΜΥΗ (σχήμα E.2 – 11), ο οποίος όπως έχει αναφερθεί εκφράζεται ως το ποσοστό της φυσικής απορροής που αξιοποιείται από τους υδροστροβίλους σε σχέση με την συνολική. Η μέγιστη τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή είναι περίπου 95% και επιτυγχάνεται στη περίπτωση εγκατάστασης δύο υδροστροβίλων με λόγο ονομαστικών παροχών  $SR = 0,25$ . Η εγκατάσταση ενός μοναδικού υδροστροβίλου παρουσιάζει γενικά χαμηλότερη τιμή του συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης λόγω του περιορισμένου εύρους λειτουργίας της. Στη γενική περίπτωση εγκατάστασης δύο υδροστροβίλων διαφορετικού μεγέθους ο συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης βελτιώνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι παρουσιάζει όλο και υψηλότερες τιμές όσο ο λόγος των ονομαστικών παροχών των υδροστροβίλων παίρνει χαμηλότερες τιμές.

Ο συντελεστής φορτίου  $CF$  παρουσιάστηκε για τη περίπτωση εγκατάστασης ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων στο σχήμα E.2 – 5. Όπως είναι λογικό ο συντελεστής φορτίου μειώνεται καθώς αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς στον υδροηλεκτρικό σταθμό. Οι τιμές του συντελεστή φορτίου σε πολύ μικρές ονομαστικές παροχές δύναται να είναι μεγαλύτερες της μονάδας. Αυτό συμβαίνει όταν οι υδροστροβίλοι είναι τόσο μικροί που λειτουργούν συνεχώς κοντά στη μέγιστη δυνατή παροχή τους. Ο σχολιασμός που έγινε μέχρι στιγμής αφορούσε αποκλειστικά τα ενεργειακά μεγέθη της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση για τα διάφορα οικονομικά μεγέθη που υπολογίστηκαν.

Όπως είναι λογικό το κόστος ανά εγκατεστημένο  $KW$  σε γενικές γραμμές μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος των υδροστροβίλων. Μοναδική εξαίρεση σε αυτή τη συμπεριφορά αποτελούν δύο σημεία για κάθε καμπύλη του σχήματος E.2 – 6. Σε αυτά τα σημεία παρατηρείται απότομη αύξηση του ειδικού κόστους. Το γεγονός αυτό εξηγείται αν αναλογιστούμε την βηματική αύξηση της συνάρτησης κόστους όταν η εγκατεστημένη ισχύς γίνει οριακά μεγαλύτερη από  $2MW$  και  $5MW$  αντίστοιχα λόγω του κόστους κατασκευής υποσταθμού υψηλότερης τάσης.

Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας και τα οικονομοτεχνικά μεγέθη της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης και της καθαρής παρούσας αξίας θα μπορούσαν όλα να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο επιλογής του βέλτιστου μεγέθους των υδροστροβίλων. Από το σχήμα *E.2 – 7* φαίνεται ότι το κόστος ανά *MWh* παραγόμενης ενέργειας, καθώς αυξάνεται η ονομαστική παροχή των υδροστροβίλων, αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται. Το ελάχιστο σημείο στο οποίο φτάνει η καμπύλη αντιστοιχεί στη βέλτιστη επιλογή του μεγέθους των υδροστροβίλων. Με την ίδια λογική μελετώνται τα σχήματα *E.2 – 8* και *E.2 – 9* για την εγκατάσταση ενός ή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων. Είναι φανερό ότι τα οικονομοτεχνικά μεγέθη *IRR* και *NPV* παρουσιάζουν ένα μέγιστο για κάθε περίπτωση, το οποίο όμως δεν συμπίπτει στα δύο κριτήρια. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί σχετικά με την αξιολόγηση των επενδύσεων, ότι όταν υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ των εναλλακτικών δραστηριοτήτων τα κριτήρια αξιολόγησης είναι πιθανόν να μην συγκλίνουν στο ίδιο αποτέλεσμα (Παναγιωτακόπουλος, 2005), όπως συμβαίνει στη προκειμένη περίπτωση. Τέλος από τα σχήματα *E.2 – 12* και *E.2 – 13* παρατηρείται ότι η εγκατάσταση δύο υδροστροβίλων (ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους) παρουσιάζει από τη σκοπιά της επενδυτικής αποδοτικότητας αισθητά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την εγκατάσταση μίας μόνο μηχανής. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται τόσο από το κριτήριο της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης όσο και από αυτό της καθαρής παρούσας αξίας.

## ***E.2: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΛΟΥ ΣΤΟΧΟΥ***

### *E.2.1: Εκτέλεση του ΓΑ βελτιστοποίησης*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το λογισμικό που επιλέχθηκε για την βελτιστοποίηση απλού στόχου των μεταβλητών του προβλήματος είναι η εργαλειοθήκη *optimtool('ga')* του MATLAB. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που παρέχει το συγκεκριμένο λογισμικό (*Genetic Algorithm*). Σημειώνεται ότι όσον αφορά τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη *optimtool('gamultiobj')* που παρέχεται επίσης από το MATLAB (*Multi Objective Genetic Algorithm*).

Σχετικά με τη λειτουργία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης θα πρέπει να γίνει μία πολύ σημαντική παρατήρηση που θα αποτρέψει τον αναγνώστη από παρανοήσεις. Ο κώδικας βελτιστοποίησης που καλείται από τη βιβλιοθήκη του MATLAB είναι προγραμματισμένος έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί κάθε στόχο του προβλήματος. Στη παρούσα ανάλυση ωστόσο επιδιώκεται η μεγιστοποίηση των ενεργειακών και οικονομικών μεγεθών που τίθενται ως στόχοι. Το πρόβλημα αυτό μπορεί πολύ εύκολα να αντιμετωπιστεί συντάσσοντας το υπολογιστικό μοντέλο με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε να επιστρέφει κάθε λύση του προβλήματος με αρνητικό πρόσημο στον ΓΑ αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Έτσι, κάνοντας αυτό το μικρό τρικ θα επιτευχθεί τελικά μεγιστοποίηση του στόχου μας. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης ο υπολογιστικός κώδικας μπορεί να επιστρέφει στις βέλτιστες τιμές των στόχων που προέκυψαν το πραγματικό τους πρόσημο.

Στη συνέχεια προτού καθοριστεί το πλήθος και το είδος των στόχων που εξετάζονται κάθε φορά θα πρέπει να γίνει η ρύθμιση των παραμέτρων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Για τον λόγο αυτό ορίζονται μέσω του MATLAB οι επόμενες παράμετροι:

- *PopulationType = doubleVector*: παράμετρος που καθορίζει το είδος της κωδικοποίησης (εδώ επιλέγεται πραγματική)
- *PopulationSize = 100*: παράμετρος που καθορίζει το πλήθος των ατόμων (απογόνων) του πληθυσμού σε κάθε γενιά
- *CreationFcn = @gacreationlinearfeasible*: παράμετρος που καθορίζει τη συνάρτηση που καλείται για τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού του ΓΑ
- *EliteCount = 10*: παράμετρος που καθορίζει το πλήθος των καλύτερων ατόμων της τρέχουσας γενιάς που αντιγράφονται απευθείας στο πληθυσμό της επόμενης (ελίτ γόνου).
- *SelectionFcn = @selectionstochunif*: παράμετρος που καθορίζει τη συνάρτηση για την επιλογή των γονέων της επόμενης γενιάς. Επιλέγεται η μέθοδος της γραμμικής κατάταξης (*linear ranking*).
- *CrossoverFraction = 0,8*: παράμετρος που καθορίζει το ποσοστό των γόνων της επόμενης γενιάς που θα προκύψουν από διασταύρωση (μη συμπεριλαμβανομένων των ελίτ λύσεων)
- *CrossoverFcn = @crossoverScattered*: παράμετρος που καθορίζει τη συνάρτηση που καλείται για τη λειτουργία της διασταύρωσης.
- *MutationFcn = @mutationadaptfeasible*: παράμετρος που καθορίζει τη συνάρτηση που καλείται για τη λειτουργία της μετάλλαξης.

Το θέμα του χώρου αναζήτησης των υποψήφιων λύσεων καθώς και των υπολοίπων περιορισμών του προβλήματος έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο

κεφάλαιο που περιγράφεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα το ανάπτυγμα μήκους *LCON* που καθορίζει τη θέση τοποθέτησης της δεξαμενής φόρτισης στην ισοϋψή λαμβάνεται στο εύρος που ορίζεται από την ελάχιστη τιμή (0km) μέχρι την μέγιστη (συνολικό μήκος ισοϋψούς) που μπορεί να πάρει για τη συγκεκριμένη καμπύλη. Αντίστοιχα το *LRIVER* που καθορίζει τη θέση του υδροηλεκτρικού σταθμού έχει ως κάτω όριο το ανάπτυγμα μήκους του Αγραφιώτη στη θέση υδροληψίας που εξετάζεται και ως πάνω όριο το συνολικό μήκος του ποταμού. Αυτό συμβαίνει λόγω της προφανούς ανάγκης κατασκευής του ΥΗΣ σε χαμηλότερο υψόμετρο από τη θέση υδροληψίας ώστε να σχηματίζεται η απαραίτητη υδραυλική πτώση.

Συνοπτικά υπενθυμίζεται ότι κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης ελήφθησαν υπόψη περιορισμοί που αφορούν την διαθεσιμότητα τυποποιημένων υδροστροβίλων και τυποποιημένης διαμέτρου του αγωγού πτώσεως για την εκάστοτε εξεταζόμενη διάταξη. Ακόμα απαιτήθηκε ο περιορισμός των υδραυλικών απωλειών σε ποσοστό 5% της θεωρητικής υδραυλικής πτώσης, όπως υπαγορεύεται από οικονομοτεχνικά κριτήρια. Όλοι οι προηγούμενοι περιορισμοί ελήφθησαν υπόψη με τη μέθοδο απόδοσης εξωτερικής ποινής στους στόχους της βελτιστοποίησης όταν δεν ικανοποιείτο κάποιος από αυτούς.

#### E.2.2: Μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης (IRR)

Στην ενότητα αυτή θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης, όπως αυτή εκφράζεται από τον οικονομικό δείκτη *IRR*. Μέσα από το σχολιασμό που θα ακολουθήσει επιχειρείται να γίνει μια κριτική - ερμηνεία των αποτελεσμάτων και να διαπιστωθεί η τάση που παρουσιάζει η βέλτιστη λύση.

Ο υπολογιστικός κώδικας που έχει πλέον συνταχθεί είναι σε θέση να βελτιστοποιεί την ΜΥΗ εγκατάσταση όσο αφορά τη χάραξη των έργων προσαγωγής του νερού (πορεία, μήκος) αλλά και το μέγεθος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Προϋπόθεση για τα προηγούμενα είναι η επιλογή της θέσης υδροληψίας και η εισαγωγή της αντίστοιχης ισοϋψούς καμπύλης στο πρόγραμμα. Έτσι προκειμένου να βρεθεί το πιο προσοδοφόρο σενάριο για την θέση υδροληψίας εισάγονται διαδοχικά και εξετάζονται όλες οι διαθέσιμες ισοϋψείς καμπύλες που διατίθενται από το διανυσματικό χάρτη και τέμνουν τον ποταμό Αγραφιώτη. Με τον τρόπο αυτό για κάθε θέση υδροληψίας προκύπτει από τον κώδικα μια διαφορετική «βέλτιστη εγκατάσταση», της οποίας τα έργα προσαγωγής έχουν χαραχθεί κατά μήκος της αντίστοιχης ισοϋψούς.

*Πίνακας E.2-1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης του ΜΥΗ στις εξεταζόμενες θέσεις υδροληψίας με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του IRR*

<b>Εξεταζόμενη θέση υδροληψίας</b>	<b>Ανάπτυγμα μήκους L(km)</b>	<b>Υψόμετρο z(m)</b>	<b>Εσωτερική απόδοση IRR</b>
1	29,18	340	15%
2	24,20	400	21%
3	18,22	500	22%
4	13,79	600	24%
5	10,21	700	23%
6	6,55	800	15%

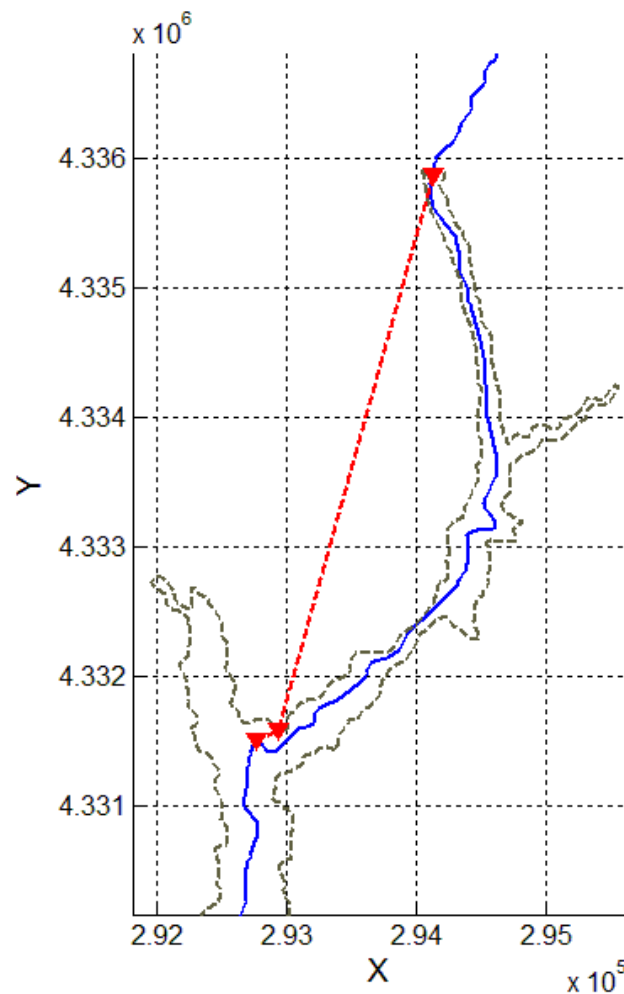
Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον προηγούμενο πίνακα προκύπτει ότι οι εξεταζόμενες θέσεις υδροληψίας που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα βάση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης βρίσκονται σε υψόμετρα μεταξύ των 400 και των 700m. Προέκυψε ακόμα ότι για τις θέσεις υδροληψίας που βρίσκονται σε υψόμετρο  $z$  μεγαλύτερο των 800m η πολύ χαμηλή τιμή του θεωρητικού υδροδυναμικού και η ιδιαίτερη μορφολογική διαμόρφωση του εδάφους (γρήγορος σχηματισμός χαραδρών) οδηγούν γενικά σε μη αποδεκτά οικονομικά αποτελέσματα. Αντίστοιχα στις θέσεις που βρίσκονται σε υψόμετρο μικρότερο των 340m παρά την υψηλή τιμή του θεωρητικού υδροδυναμικού η απουσία κλίσης του εδάφους δεν συνίσταται για τη σχεδίαση ΜΥΗ με τη διαμόρφωση (τύπου εκτροπής) που εξετάζεται στη παρούσα εργασία. Στη συνέχεια θα διερευνηθεί το σενάριο σχεδίασης ΜΥΗ επιλέγοντας ως θέση υδροληψίας αυτή που βρίσκεται στα 600m. Η χάραξη των έργων προσαγωγής του νερού κατά μήκος της αντίστοιχης ισοϋψούς αναμένεται να δώσει την βέλτιστη εγκατάσταση ΜΥΗ με κριτήριο πάντα την μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης.

Σχετικά με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης απλού στόχου έχει επιλεγεί η ακόλουθη δομή. Αρχικά παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία της βέλτιστης εγκατάστασης που προέκυψε από τον υπολογιστικό κώδικα. Στη συνέχεια παρατίθεται κατάλληλο σχήμα με την αποτύπωση της χωροταξικής διάταξης του έργου στο διανυσματικό χάρτη. Συγκεκριμένα αποτυπώνονται σε αυτό οι τρεις χαρακτηριστικές θέσεις του έργου που αφορούν την υδροληψία, την δεξαμενή φόρτισης και τον υδροηλεκτρικό σταθμό που τοποθετείται ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Στο τέλος γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη βέλτιστη διάταξη που προέκυψε χαράσσοντας τη διώρυγα προσαγωγής κατά μήκος της ισοϋψούς των 600m:

*Πίνακας E.2-2:  
Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ΜΥΗ εγκατάστασης  
θέτοντας στόχο τη μεγιστοποίηση του IRR*

<b>ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ: ΙΣΟΥΨΗΣ 600m</b>	
Στόχος: Μεγιστοποίηση IRR	
<b>ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	
Εγκατεστημένη ισχύς (MW):	4,94
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (MWh):	25189
Ονομαστική παροχή ( $m^3/2$ ):	4,91
Πλήθος υδροστροβίλων:	2
Λόγος ονομαστικών παροχών:	0,23
Μήκος διώρυγας (km):	5,49
Μήκος αγωγού πτώσεως (m):	218,31
Διάμετρος αγωγού προσαγωγής (m):	1,52
Υδραυλική πτώση (m):	115,18
Συντελεστής ενεργ/κής αξιοποίησης:	82%
Συντελεστής φορτίου:	58%

<b>ΘΕΣΗ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ</b>	
Χαρτογραφική X(m):	294136,2
Χαρτογραφική Y(m):	4335864,07
Υψόμετρο Z(m):	600,00
<b>ΘΕΣΗ ΔΕΞ/ΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ</b>	
Χαρτογραφική X(m):	292937,22
Χαρτογραφική Y(m):	4331589,35
Υψόμετρο Z(m):	594,51
<b>ΘΕΣΗ ΥΗΣ</b>	
Χαρτογραφική X(m):	292768,14
Χαρτογραφική Y(m):	4331513,19
Υψόμετρο Z(m):	479,33
<b>ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ</b>	
Εσωτερική απόδοση της επένδυσης:	24%
Καθαρή παρούσα αξία (ευρώ):	8572197
Κόστος (ευρώ) ανά εγκατ/μένο KW:	1934
Περίοδος αποπληρωμής (έτη):	6



Σχήμα Ε.2-1: Βέλτιστη διάταξη του ΜΥΗ με στόχο τη μεγιστοποίηση του IRR



### E.2.3: Σχολιασμός αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης απλού στόχου

Σε πρώτη φάση θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να εξεταστεί θεωρητικά το μέγεθος του ενδογενούς ποσοστού απόδοσης (*IRR*) και να διευκρινιστεί από ποιους παράγοντες εξαρτάται και πως αυτοί συνδέονται με τις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν τεθεί. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να προκύψουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν.

Όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό κεφάλαιο το *IRR* αποτελεί το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο μηδενίζεται η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης του ΜΥΗ. Ως εκ τούτου επηρεάζεται άμεσα από τις χρηματοροές (*cash flow*) που προκύπτουν κάθε φορά. Αποτελεί στην ουσία το αποτέλεσμα ενός συσχετισμού μεταξύ των ωφελειών και των δαπανών του έργου στον χρονικό ορίζοντα λειτουργίας του. Ο υπολογιστικός κώδικας προσομοιώνει και αξιολογεί τη λειτουργία για πληθώρα εναλλακτικών σεναρίων σχεδίασης του ΜΥΗ. Εξετάζοντας μία μεγαλύτερη εγκατάσταση η αύξηση του συνολικού ύψους της επένδυσης τείνει να προκαλέσει μείωση στο *IRR*. Ταυτόχρονα ωστόσο η ενδεχόμενη αύξηση της παραγόμενης ενέργειας, λόγω αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος, τείνει προκαλέσει αύξηση στο *IRR*.

Ας εξετάσουμε όμως τώρα πως συνδέονται το συνολικό ύψος επένδυσης και η ενεργειακή παραγωγή με τις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος. Η τιμή που αποδίδει η συνάρτηση κόστους επηρεάζεται, κατά την ανάλυση που έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο, από τις ονομαστικές παροχές των υδροστροβίλων (τιμές των μεταβλητών  $Q_{on1}$ ,  $Q_{on2}$ ), τη θεωρητική υδραυλική πτώση και το μήκος των έργων προσαγωγής του νερού. Οι τελευταίες δύο παράμετροι καθορίζονται φυσικά από τη χωροταξική διάταξη του έργου όπως αυτή προκύπτει από τις τιμές των μεταβλητών *LRIVER* και *LCON*. Από όλους τους προηγούμενους παράγοντες εξαρτάται βέβαια και η ενεργειακή παραγωγή του ΜΥΗ καθώς η ονομαστική παροχή και η υδραυλική πτώση καθορίζουν την εγκατεστημένη ισχύ στον ΥΗΣ ενώ το μήκος των έργων προσαγωγής συνδέεται με τις υδραυλικές απώλειες.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν είναι εμφανής η τάση του κώδικα να αυξήσει την εγκατεστημένη ισχύ προκειμένου να επιτύχει υψηλότερη ενεργειακή παραγωγή, η οποία θα αυξήσει την αποδοτικότητα της επένδυσης. Η τάση αυτή φαίνεται τόσο από τη χωροταξική διάταξη που προέκυψε όσο και από το μέγεθος της συνολικής ονομαστικής παροχής των υδροστροβίλων.

Όσον αφορά τη χωροταξική διάταξη του έργου στο βέλτιστο σενάριο φαίνεται ότι οι θέσεις που επιλέχθηκαν από τον κώδικα βελτιστοποίησης προκειμένου να τοποθετηθεί η δεξαμενή φόρτισης και ο ΥΗΣ εξασφαλίζουν υψηλή τιμή της θεωρητικής υδραυλικής πτώσης. Ειδικότερα ο κώδικας επιδιώκει να εξασφαλίσει υψηλή τιμή της υδραυλικής πτώσης αυξάνοντας το μήκος της διώρυγας προσαγωγής το οποίο προκύπτει περίπου  $5,5\text{km}$ . Αντίθετα, το μήκος του αγωγού πτώσεως στη βέλτιστη εγκατάσταση είναι συγκριτικά πολύ μικρότερο και βρίσκεται σε μια αναλογία με τη θεωρητική υδραυλική πτώση:  $L_{pipe}/head < 2$  που κρίνεται απόλυτα λογική. Το γεγονός αυτό φανερώνει καλή λειτουργία της συνάρτησης κόστους. Σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο η συνάρτηση κόστους «δηλώνει» στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ότι το μήκος του αγωγού πτώσεως επιβαρύνει περισσότερο τον στόχο που έχει τεθεί σε σχέση πάντα με το μήκος της διώρυγας προσαγωγής. Σε κάθε περίπτωση βέβαια δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε ότι στη κατεύθυνση αυτή συμβάλει και ο περιορισμός που έχει τεθεί για διατήρηση των υδραυλικών απωλειών σε ποσοστό μικρότερο του 5% του θεωρητικού ύψους πτώσης.

Περιοριστικό παράγοντα στην περεταίρω αύξηση της υδραυλικής πτώσης αποτελεί επομένως η εμφάνιση της χαράδρας κατά τη πορεία χάραξης της διώρυγας. Η εν λόγω χαράδρα διαμορφώνεται λόγω απόκλισης της διαδρομής της ισούψους από το κύριο υδατόρευμα. Ο υπολογιστικός κώδικας φαίνεται ότι «αντιλαμβάνεται» πως η χάραξη της διώρυγας προσαγωγής κατά μήκος της ισούψους από ένα σημείο και πέρα αυξάνει το κόστος του έργου χωρίς να επιτυγχάνει βελτίωση της ενεργειακής παραγωγής. Αντίθετα προκαλείται μείωση στη συνολικά παραγόμενη ενέργεια λόγω των υδραυλικών απωλειών κατά τη προσαγωγή του νερού με έργα αυξημένου μήκους. Αποτέλεσμα των προηγούμενων είναι να επιλέγεται η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της δεξαμενής φόρτισης λίγο πριν αρχίσει η ισούψης να αποκλίνει από τη πορεία του υδατορεύματος.

Σχετικά με την συνολική ονομαστική παροχή τώρα, στο βέλτιστο σενάριο προκύπτει ότι οι εγκατεστημένοι υδροστρόβιλοι έχουν λόγο μεγέθους περίπου  $Q_{on,2}/Q_{on,1} = 0,25$ . Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την παραμετρική ανάλυση του υπολογιστικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου, για τιμή του συγκεκριμένου λόγου στο εύρος  $0,25 - 0,5$  οι υδροστρόβιλοι επιτυγχάνουν τη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή. Η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής αυξάνει όπως έχει αναφερθεί τις ωφέλειες του επενδυτή από τη πώληση της ενέργειας. Η πολύ καλή εκμετάλλευση της φυσικής απορροής που επιτυγχάνεται στο παραπάνω σενάριο σχεδίασης φαίνεται και από την υψηλή τιμή που λαμβάνει ο συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης (82%). Αποτέλεσμα αυτού είναι η χαμηλή τιμή που προκύπτει για το συντελεστή φορτίου της εγκατάστασης (58%)

Τέλος, θα ήταν χρήσιμο να γίνει ένα ακόμα σχόλιο για τα αποτελέσματα, το οποίο αφορά τη λειτουργία της συνάρτησης κόστους σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ στον ΥΗΣ. Παρατηρούμε ότι για τη βέλτιστη εγκατάσταση που προέκυψε θέτοντας ως στόχο τη μεγιστοποίηση του *IRR*, η εγκατεστημένη ισχύς είναι πολύ κοντά μεν αλλά ελάχιστα χαμηλότερη δε από τα *5MW*. Σημαντικό παράγοντα στην εξέλιξη αυτή πιθανότατα αποτέλεσε το υψηλό κόστος που δηλώθηκε (κατά τη σύνταξη της συνάρτησης κόστους) ότι επιβαρύνει τον προϋπολογισμό του έργου όταν η εγκατεστημένη ισχύς γίνει μεγαλύτερη από τα *5MW* λόγω της κατασκευής υποσταθμού υψηλής τάσης.

### ***E.3: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΠΛΟΥ ΣΤΟΧΟΥ***

#### ***E.3.1: Ο συντελεστής φορτίου (CF)***

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο ο συντελεστής φορτίου του ΜΥΗ εκφράζει τον λόγο της ετησίως παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν οι υδροστρόβιλοι λειτουργούσαν συνεχώς επί ένα έτος υπό την εγκατεστημένη ονομαστική ισχύ. Ως εκ τούτου ο συγκεκριμένος συντελεστής εκφράζει τον βαθμό εκμετάλλευσης της εγκατεστημένου ισχύος στον ΥΗΣ και πρέπει να έχει υψηλή τιμή.

Στη συνέχεια θα ήταν χρήσιμο να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται η τιμή του συντελεστή φορτίου με τις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν οριστεί. Από την παραμετρική ανάλυση φάνηκε ότι ο συντελεστής φορτίου ακολουθεί φθίνουσα μεταβολή καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ονομαστικής παροχής των εγκατεστημένων υδροστροβίλων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μηχανές με μικρότερη ονομαστική παροχή μπορούν να λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του έτους.

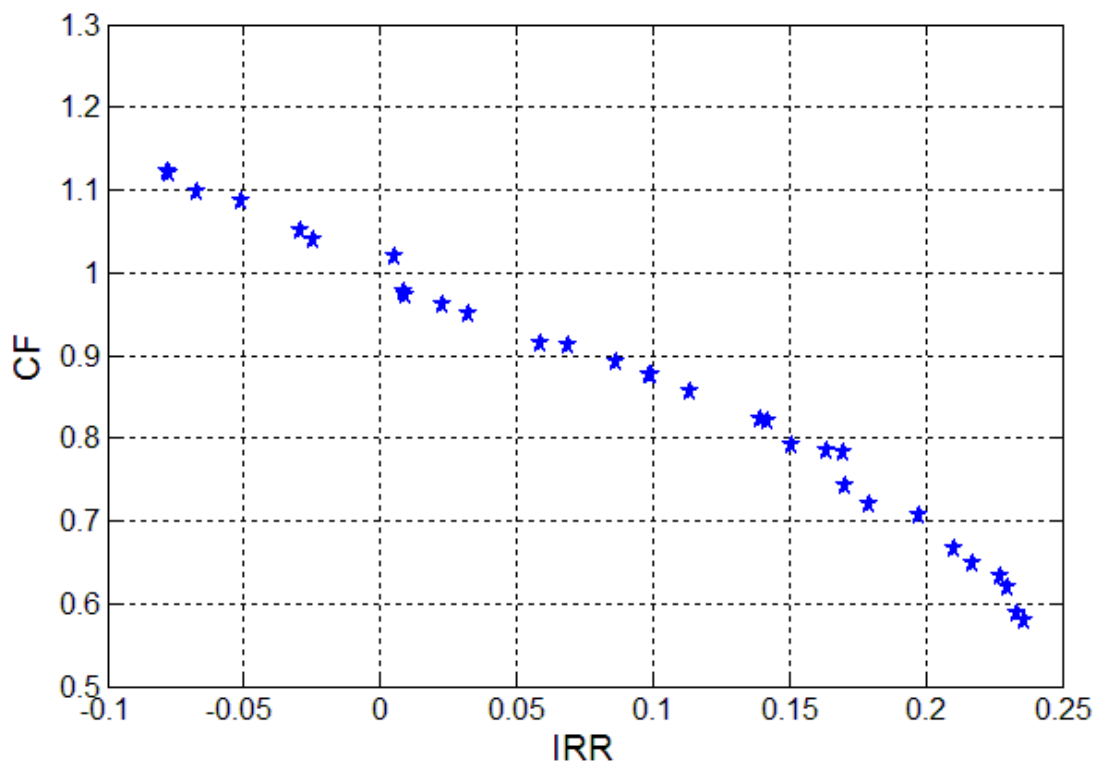
Εξετάζοντας τη λειτουργία του υπολογιστικού μοντέλου τώρα, μεταξύ των διαφορετικών διατάξεων του ΜΥΗ ο συντελεστής φορτίου επηρεάζεται και από την διαθέσιμη υδραυλική πτώση στο βαθμό που αυτή καθορίζει τον τύπο των υδροστροβίλων και άρα τα όρια λειτουργίας της εγκατάστασης. Ταυτόχρονα στον συντελεστή φορτίου επιδρά (σε πολύ μικρότερο βαθμό βέβαια) το μήκος του αγωγού πτώσεως αφού καθορίζει το μέγεθος των γραμμικών απωλειών στη σωλήνωση και άρα επιδρά στην ενεργειακή παραγωγή.

Σε κάθε περίπτωση η μεγιστοποίηση του συντελεστή φορτίου έχει την τάση να μειώσει την εγκατεστημένη ισχύ κυρίως επειδή μειώνεται η ονομαστική παροχή των υδροστροβίλων, έτσι ώστε να λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η τάση αυτή είναι αντίθετη της αντίστοιχης που παρουσιάζει η εσωτερική απόδοση της επένδυσης. Δημιουργείται έτσι η ανάγκη συμβιβασμού των δύο αντικρουόμενων στόχων που έχουν τεθεί. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για τη ΜΥΗ εγκατάσταση θέτοντας ως διπλό στόχο την μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης *IRR* και του συντελεστή φορτίου *CF*.

#### ***E.3.2: Μεγιστοποίηση της εσωτερικής απόδοσης (IRR) της επένδυσης και του συντελεστή φορτίου (CF)***

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση διπλού στόχου. Σε αυτή τη περίπτωση δεν περιμένουμε φυσικά ότι θα προκύψει μία μοναδική βέλτιστη λύση αλλά ένα σύνολο εξ αυτών. Το σύνολο των βέλτιστων αυτών λύσεων συνθέτει το λεγόμενο μέτωπο Pareto που έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

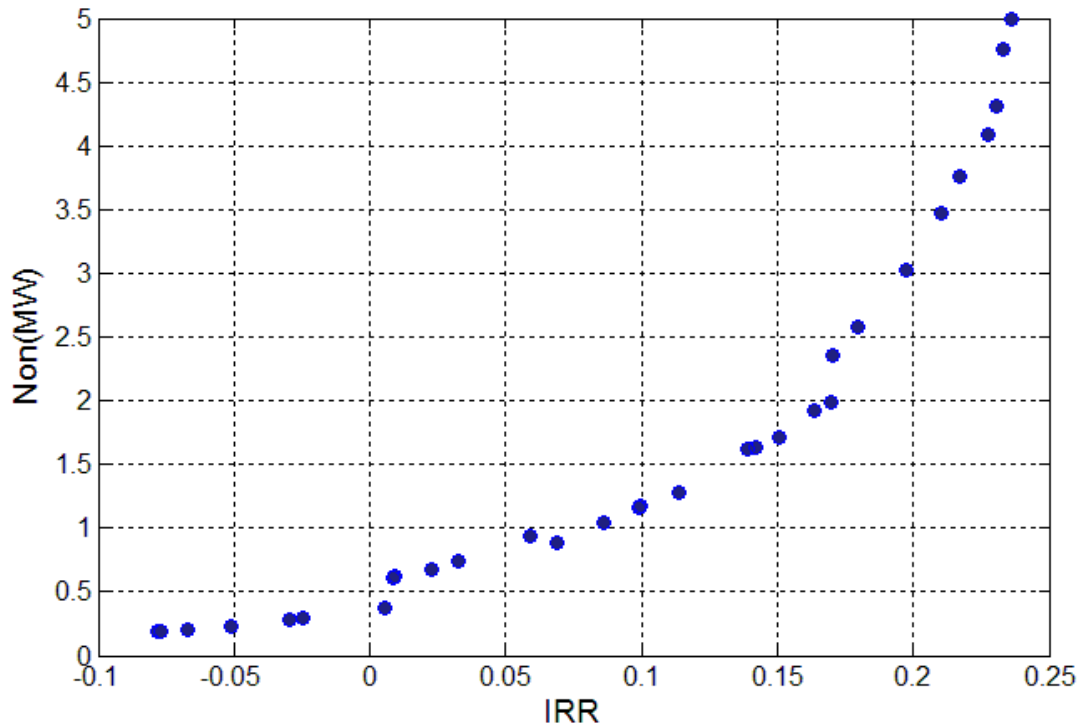
Από αυτό το σημείο και έπειτα η τελική επιλογή της μοναδικής βέλτιστης λύσης είναι καθαρά θέμα λήψης αποφάσεως από τον σχεδιαστή του ΜΥΗ. Στη προκειμένη περίπτωση θα εξεταστεί τι περιθώρια υπάρχουν να επιτευχθεί αύξηση στο συντελεστή φορτίου της βέλτιστης εγκατάστασης που προέκυψε από την ανάλυση απλού στόχου. Για το λόγο αυτό θα επιλεγεί ένα σημείο από το μέτωπο Pareto που θα εξασφαλίζει υψηλή τιμή του *IRR* και κατά το δυνατόν μεγαλύτερο συντελεστή φορτίου. Κατά την τελική επιλογή θα ληφθεί υπόψη ο περιορισμός που υπάρχει στην ελληνική νομοθεσία για το συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης.



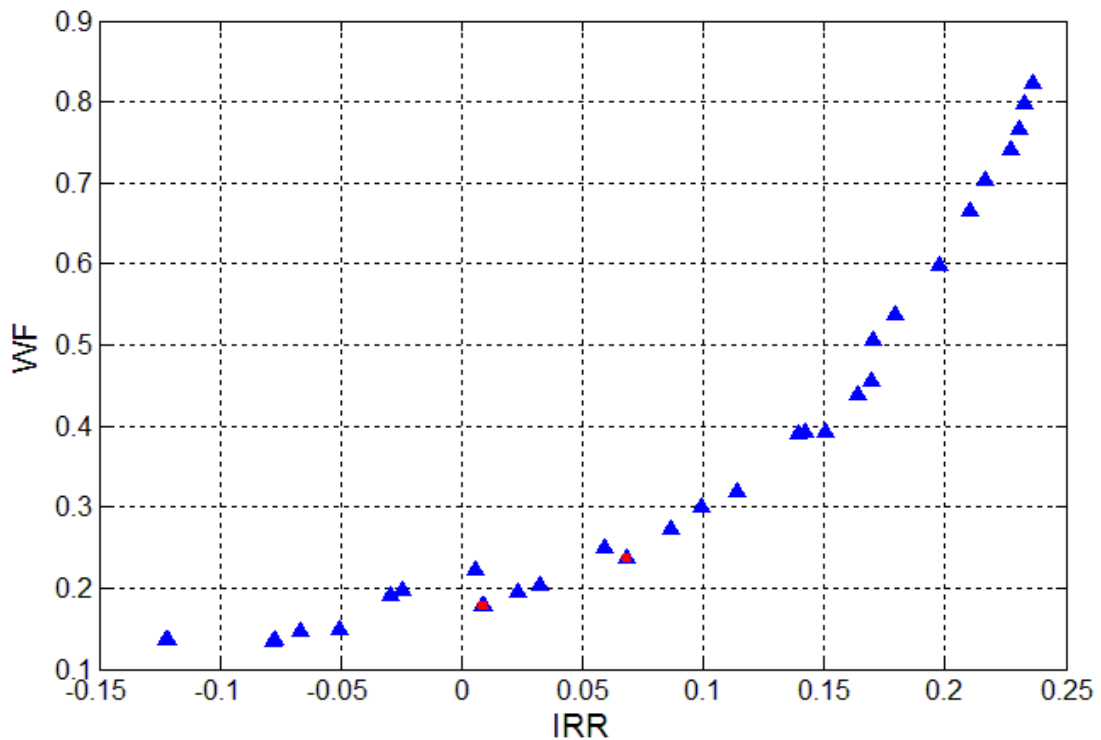
Σχήμα E.3-1: Μέτωπο Pareto βέλτιστων λύσεων (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

Στο προηγούμενο σχήμα παριστάνονται γραφικά τα σημεία του μετώπου Pareto που αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν για τους δύο εξεταζόμενους στόχους. Τα σημείο που βρίσκεται στο αριστερό άκρο του μετώπου είναι αυτό, στο οποίο μεγιστοποιείται ο συντελεστής φορτίου ( $CF$ ) του ΜΥΗ. Αντίστοιχα στο σημείο που βρίσκεται στο δεξιό άκρο του μετώπου λαμβάνει μέγιστες τιμές το ενδογενές ποσοστό απόδοσης ( $IRR$ ). Κάθε ενδιάμεσο σημείο αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ των δύο αντικρουόμενων στόχων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή του συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης ( $WF$ ) και της ονομαστικής ισχύος ( $N_{on}$ ) της εγκατάστασης για τα διάφορα σημεία του μετώπου Pareto. Η γραφική απεικόνιση των συγκεκριμένων μεγεθών γίνεται σε συνάρτηση με την τιμή του  $IRR$ , η οποία αντιστοιχεί σε κάθε σημείο του μετώπου.



Σχήμα E.3-2: Εγκατεστημένη ισχύς στον ΥΗΣ για τα διάφορα σημεία του μετώπου Pareto (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



Σχήμα E.3-3: Συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης για τα διάφορα σημεία του μετώπου Pareto (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

### E.3.3: Σχολιασμός αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης διπλού στόχου

Από τα σχήματα E.3 – 1 και E.3 – 2 είναι εμφανής η τάση που έχει προαναφερθεί ότι παρουσιάζει η μεγιστοποίηση κάθε εξεταζόμενου στόχου. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι η αύξηση του ενδογενούς ποσοστού απόδοσης (*IRR*) συνεπάγεται αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στον ΥΗΣ, η οποία με τη σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή φορτίου (*CF*). Ομοίως, κάνοντας τον αντίστροφο συλλογισμό η αύξηση του συντελεστή φορτίου συνεπάγεται μείωση της εγκατεστημένης ισχύος και άρα μείωση του *IRR*.

Από τα σχήματα E.3 – 1 και E.3 – 3 επίσης προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ονομαστική παροχή των υδροστροβίλων αποτελεί την πιο καθοριστική παράμετρο σχεδίασης που επηρεάζει τον συντελεστή φορτίου στο δεδομένο πρόβλημα. Για το μέτωπο Pareto αναφέρεται ότι καθώς αυξάνεται το *IRR* και αντίστοιχα μειώνεται ο συντελεστής φορτίου, η βέλτιστη εγκατάσταση διαθέτει όλο και μεγαλύτερους υδροστροβίλους λόγω της τάσης για αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος. Το γεγονός αυτό φαίνεται από την γενική αύξηση που επιτυγχάνεται στο συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης *WF* καθώς μεταβαίνουμε σε σημεία με υψηλότερο *IRR*. Τα μοναδικά σημεία στα οποία ενώ σημειώνεται μείωση του συντελεστή φορτίου παρατηρείται ταυτόχρονα μείωση και της αντίστοιχης τιμής του συντελεστή ενεργειακής αξιοποίησης έχουν σημειωθεί στο σχήμα E.3 – 3 με κόκκινο χρώμα. Αναφέρεται ότι η σύντομη αυτή διακύμανση του *WF* καθώς αυξάνεται το *IRR* δικαιολογείται από το γεγονός ότι στα συγκεκριμένα σημεία έχουμε αλλαγή στο τύπο του υδροστροβίλου και άρα στα όρια λειτουργίας της εγκατάστασης.

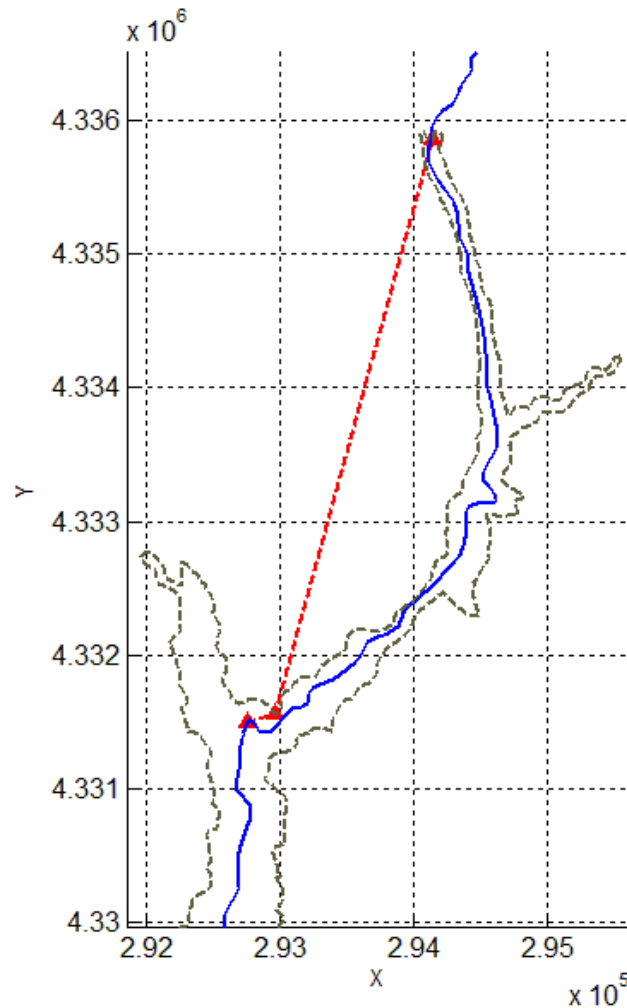
### E.3.4: Επιλογή βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto

Υπενθυμίζεται ότι ως βασικό σενάριο σχεδίασης του ΜΥΗ χαρακτηρίστηκε η διάταξη που έχει προκύψει από τη βελτιστοποίηση με μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίηση του ενδογενούς ποσοστού απόδοσης της επένδυσης. Στη συνέχεια θα πρέπει να επιλεγεί από το μέτωπο Pareto το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης που θα προκύψει από τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου που πραγματοποιήθηκε. Με μία προσεκτική ματιά στα σχήματα E.3 – 1 και E.3 – 3 θα παρατηρήσουμε ότι δεν υπάρχουν εξαιρετικά μεγάλα περιθώρια βελτίωσης του συντελεστή φορτίου λόγω του νομικού περιορισμού που ισχύει για το βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης και απαιτεί να είναι μεγαλύτερο από 75%. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά βάση στην ύπαρξη σημαντικής πλημμυρικής απορροής σε μικρό ποσοστό του έτους όπως μπορεί να διαπιστωθεί από την ημερήσια καμπύλη διάρκειας. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν κάποια όρια βελτίωσης του *CF* σε σχέση με την αρκετά χαμηλή τιμή που προέκυψε για την ΜΥΗ εγκατάσταση από την βελτιστοποίηση απλού στόχου.

Από τα σημεία του μετώπου Pareto θα επιλεγεί αυτό που αντιστοιχεί σε εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης *IRR* = 23% και συντελεστή φορτίου *CF* = 63%. Στη πραγματικότητα στο συγκεκριμένο σημείο ο συντελεστής ενεργειακής αξιοποίησης προκύπτει ελάχιστα μικρότερος από το όριο του 75%. Ειδικότερα προκύπτει ότι παίρνει την τιμή *WF* = 74%. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τον ακαδημαϊκό σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η τιμή αυτή θεωρείται ικανοποιητική και χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή. Το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης που επιλέχθηκε από το μέτωπο Pareto παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια. Κατά αναλογία με τη παρουσίαση που έγινε στα αποτελέσματα για τη βελτιστοποίηση απλού στόχου θα παρουσιαστεί και εδώ πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά του έργου και την διάταξη για το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης.

Πίνακας Ε.3-1:  
Αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ΜΥΗ εγκατάστασης  
θέτοντας διπλό στόχο τη μεγιστοποίηση IRR και CF

<b>ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ: ΙΣΟΥΨΗΣ 600m</b>	
Στόχος: Μεγιστοποίηση IRR και CF	
<b>ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	
Εγκατεστημένη ισχύς (MW):	4,09
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (MWh):	22716
Ονομαστική παροχή (m <sup>3</sup> /2):	4,07
Πλήθος υδροστροβίλων:	2
Λόγος ονομαστικών παροχών:	0,24
Μήκος διόρυγας (km):	5,45
Μήκος αγωγού πτώσεως (m):	247,71
Διάμετρος αγωγού προσαγωγής (m):	1,42
Υδραυλική πτώση (m):	115,48
Συντελεστής ενεργ/κής αξιοποίησης:	74%
Συντελεστής φορτίου:	63%
<b>ΘΕΣΗ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ</b>	
Χαρτογραφική X(m):	294136,20
Χαρτογραφική Y(m):	4335864,07
Υψόμετρο Z(m):	600,00
<b>ΘΕΣΗ ΔΕΞ/ΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ</b>	
Χαρτογραφική X(m):	292965,01
Χαρτογραφική Y(m):	4331568,70
Υψόμετρο Z(m):	594,55
<b>ΘΕΣΗ ΥΗΣ</b>	
Χαρτογραφική X(m):	292755,43
Χαρτογραφική Y(m):	4331504,69
Υψόμετρο Z(m):	479,07
<b>ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ</b>	
Εσωτερική απόδοση της επένδυσης:	23%
Καθαρή παρούσα αξία (ευρώ):	7450409
Κόστος (ευρώ) ανά εγκατ/μένο KW:	2167
Περίοδος αποπληρωμής (έτη):	6



Σχήμα E.3-4: Βέλτιστη διάταξη του MYH με διπλό στόχο τη μεγιστοποίηση του IRR και του CF

Παρατηρούμε ότι η χωροταξική διάταξη που προέκυψε για το MYH από τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου ομοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη που προέκυψε από την ανάλυση απλού στόχου. Το γεγονός αυτό επιχειρήθηκε να ερμηνευτεί ως εξής: Το σημείο που επιλέχθηκε από το μέτωπο Pareto βρίσκεται πολύ κοντά στο αριστερό άκρο όπου μεγιστοποιείται η τιμή του IRR. Ως εκ τούτου είναι εμφανής η τάση να αυξηθεί η θεωρητική υδραυλική πτώση προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η εγκατεστημένη ισχύς. Αυτό όμως προϋποθέτει αύξηση του μήκους της διώρυγας προσαγωγής. Την ίδια στιγμή όμως ο συντελεστής φορτίου δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αύξηση στο μήκος της διώρυγας προσαγωγής καθώς δεν υπάρχει αλλαγή στον τύπο του υδροστροβίλου για την υδραυλική πτώση που επιτυγχάνεται. Έτσι οι μεταβλητές *LRIVER* και *LCON* καταλήγουν σε μια διάταξη που μεγιστοποιεί το IRR και ο συντελεστής φορτίου επηρεάζεται καθοριστικά από τις ονομαστικές παροχές  $Q_{on1}$ ,  $Q_{on2}$  των υδροστροβίλων.

Κατά τα λοιπά οι ονομαστικές παροχές των υδροστροβίλων προκύπτουν μικρότερες σε σχέση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης απλού στόχου. Το ίδιο ισχύει και για την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης. Έτσι στο εναλλακτικό σενάριο ο συντελεστής φορτίου προκύπτει τελικά αυξημένος και το IRR ελάχιστα μειωμένο σε σχέση με το βασικό σενάριο σχεδίασης.



## E.4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

### E.4.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων μελέτης ευαισθησίας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για τα δύο σενάρια σχεδίασης, τα οποία προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση απλού και διπλού στόχου αντίστοιχα. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η επίδραση που μπορούν να έχουν στη λειτουργία και την οικονομική αποδοτικότητα των προτεινόμενων ΜΥΗ εγκαταστάσεων κάποιες βασικές παράμετροι που αφορούν το υπό σχεδίαση έργο. Τέτοιες θεωρήθηκαν:

1. Το αρχικό ύψος επένδυσης
2. Η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας
3. Οι υδρολογικές συνθήκες

Ειδικότερα μελετήθηκε η πιθανή μεταβολή στο αρχικό ύψος επένδυσης σε ένα εύρος  $-20\%$  έως  $+20\%$  της τιμής του προσδοκώμενου κόστους. Ομοίως η τιμή πώλησης της ενέργειας θεωρήθηκε ότι μπορεί και αυτή να μεταβληθεί σε ένα εύρος  $-20\%$  έως  $+20\%$  σε σχέση με τη σημερινή της αξία. Τα αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας σε αυτούς τους δύο παράγοντες για το βασικό και το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης παρουσιάζονται ακολούθως:

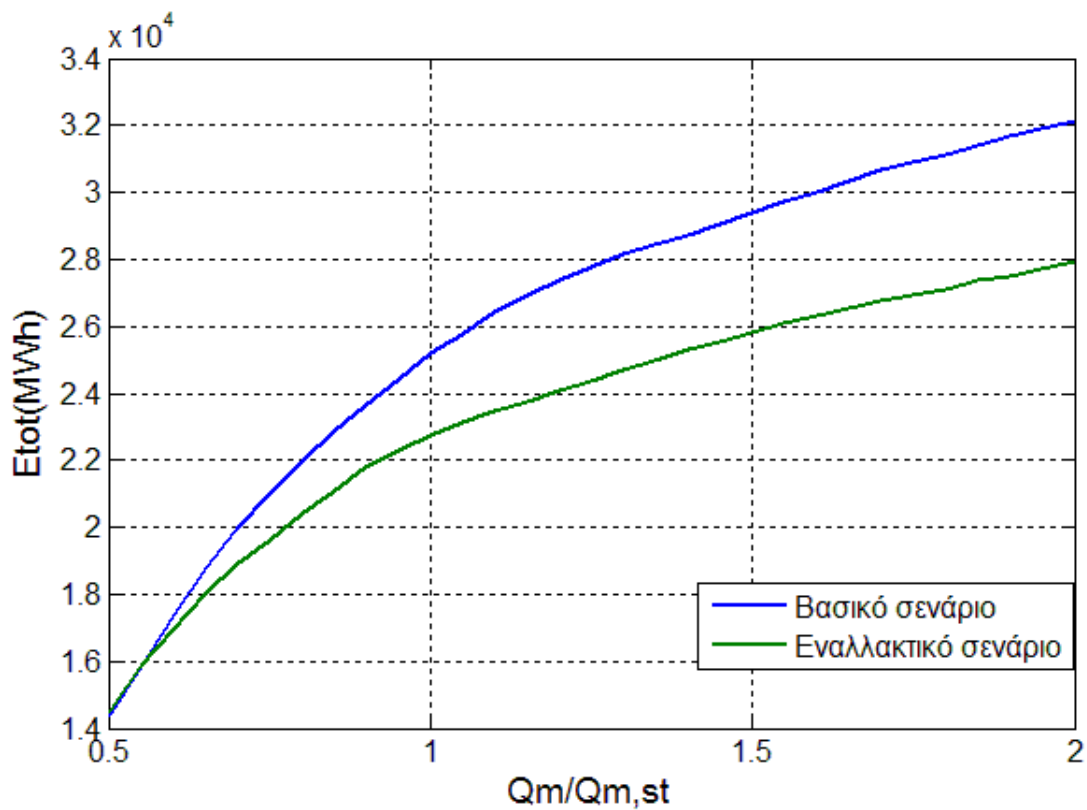
Πίνακας E.4-1:

Αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας για μεταβολή στο αρχικό ύψος επένδυσης και τη τιμή πώλησης της ενέργειας

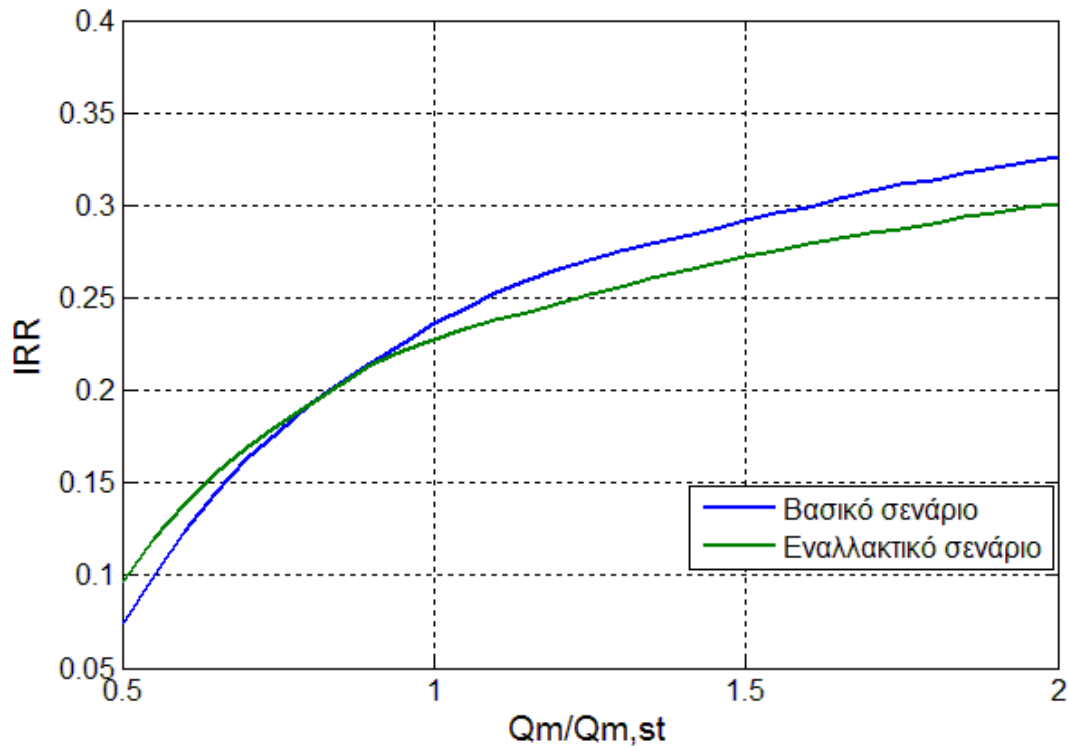
<b>ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ:</b>		<b>IRR= 24%</b>
Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό ύψος επένδυσης COtot		
Μεταβολή	IRR	Μεταβολή IRR (%):
"-20% "	31%	7%
" +20% "	18%	-6%
Ανάλυση ευαισθησίας στη τιμή πώλησης της ενέργειας		
Μεταβολή	IRR	Μεταβολή IRR (%):
"-20% "	17%	-7%
" +20% "	30%	6%

<b>ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ:</b>		<b>IRR= 23%</b>
Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό ύψος επένδυσης COtot		
Μεταβολή	IRR	Μεταβολή IRR (%):
"-20% "	30%	7%
" +20% "	18%	-5%
Ανάλυση ευαισθησίας στη τιμή πώλησης της ενέργειας		
Μεταβολή	IRR	Μεταβολή IRR (%):
"-20% "	16%	-7%
" +20% "	29%	6%

Το αρχικό κόστος επένδυσης και η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται αποκλειστικά με τους οικονομικούς δείκτες αξιολόγησης του ΜΥΗ. Οι υδρολογικές συνθήκες ωστόσο, των οποίων η επίδραση διερευνάται στη συνέχεια, επηρεάζουν τόσο την ενεργειακή παραγωγή του ΜΥΗ όσο και την αποδοτικότητα της επένδυσης. Στη παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι η καμπύλη διάρκειας παροχής διατηρεί το ίδιο προφίλ και ότι η αθροιστική απορροή δύναται να διαφέρει από την προσδοκώμενη σε ένα εύρος  $-50\%$  έως  $+200\%$ . Έτσι χαράχθηκαν τα επόμενα διαγράμματα που δίνουν την μεταβολή της ενεργειακής παραγωγής και του  $IRR$  για διάφορες τιμές του λόγου  $Q_m/Q_{m,st}$  που εκφράζει τη μεταβολή της μελλοντικής μέσης παροχής  $Q_m$  σε σχέση με τη μέση παροχή  $Q_{m,st}$  της δεδομένης καμπύλης διάρκειας.



Σχήμα E.4-1: Επίδραση της διακύμανσης της μέσης παροχής στην ενεργειακή παραγωγή του ΜΥΗ (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)



Σχήμα E.4-2: Επίδραση της διακύμανσης της μέσης παροχής στην εσωτερική απόδοση της επένδυσης του ΜΥΗ (Πηγή υδρολογικών στοιχείων ΔΕΗ/ΔΥΗΠ)

#### E.4.2: Σχολιασμός αποτελεσμάτων της μελέτης ευαισθησίας

Η αύξηση του αρχικού ύψους επένδυσης κατά 20% προφανώς προκαλεί μείωση στο *IRR* και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Στη δυσμενή για την επένδυση περίπτωση το *IRR* μειώνεται κατά 6% στο βασικό σενάριο σχεδίασης και κατά 5% στο εναλλακτικό. Η διαφορά είναι μικρή υποδηλώνει ωστόσο μικρότερη ευαισθησία του δείκτη *IRR* στη μεταβολή του ύψους επένδυσης για το εναλλακτικό σενάριο που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου. Αντίστοιχα στη περίπτωση μείωσης του ύψους επένδυσης κατά 20% η εσωτερική απόδοση της επένδυσης αυξάνεται κατά 7% και στα δύο σενάρια σχεδίασης. Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν αν μελετήσουμε τα αποτελέσματα για τη μεταβολή στις τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το *IRR* παρουσιάζει την ίδια ευαισθησία για τα δύο σενάρια σχεδίασης για μεταβολή της τιμής πώλησης της ενέργειας κατά  $\pm 20\%$ .

Εξετάζοντας τη μεταβολή της μέσης παροχής στο υδατόρευμα κατά τον τρόπο που έχει αναλυθεί, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των ευνοϊκών υδρολογικών συνθηκών το σενάριο μεγιστοποίησης του *IRR* παρουσιάζει αύξηση στην παραγόμενη ενέργεια ( $\approx +28\%$ ) που είναι μεγαλύτερη σε σχέση αυτή που επιτυγχάνεται στο σενάριο μεγιστοποίησης και των δύο στόχων ( $\approx +23\%$ ). Ως εκ τούτου η αύξηση που παρατηρείται στο *IRR* στο βασικό σενάριο σχεδίασης ( $\approx +9\%$ ) είναι και αυτή μεγαλύτερη σε σχέση με το εναλλακτικό σενάριο ( $\approx +7\%$ ). Αντίθετα εξετάζοντας η δυσμενή περίπτωση των υδρολογικών συνθηκών το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης φαίνεται να πλεονεκτεί σημαντικά καθώς παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή αυτών, τόσο στη παραγόμενη ενέργεια ( $\approx -36\%$ ) όσο και στο δείκτη εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης ( $\approx -13\%$ ) σε σχέση πάντα με το βασικό σενάριο σχεδίασης (μεταβολή στη παραγόμενη ενέργεια περίπου  $-44\%$  και στο *IRR* περίπου  $\approx -16\%$ ).

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στο σημείο αυτό κρίθηκε χρήσιμο να γίνει ένας συνολικός απολογισμός της δουλειάς που έγινε στη παρούσα διπλωματική, παραθέτοντας παράλληλα κάποια γενικά συμπεράσματα. Το υπολογιστικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για τη παρούσα διπλωματική μελετήθηκε και αξιολογήθηκε αρχικά μέσα από τη διαδικασία της παραμετρικής ανάλυσης. Από τα αποτελέσματα αυτής διαπιστώθηκε ότι λειτουργεί πολύ ικανοποιητικά.

Στη συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία της βελτιστοποίησης, η οποία πραγματοποιήθηκε αρχικά με μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίηση του ενδογενούς ποσοστού απόδοσης (*IRR*) και στη συνέχεια με διπλό στόχο το *IRR* και το συντελεστή φορτίου (*CF*). Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν δύο δυνατά σενάρια σχεδίασης του ΜΥΗ στο υδατόρευμα του Αγραφιώτη. Τα δύο αυτά σενάρια διέφεραν κυρίως ως προς το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος στον ΥΗΣ και άρα και ως προς το συνολικό ύψος επένδυσης. Στο βασικό σενάριο σχεδίασης που προέκυψε θέτοντας ως μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίηση του ενδογενούς ποσοστού απόδοσης, η εγκατάσταση προέκυψε ότι έχει υψηλή εγκατεστημένη ισχύ και χαμηλό συντελεστή φορτίου έτσι ώστε να μεγιστοποιεί τη ωφέλεια από τη λειτουργία του έργου. Στο εναλλακτικό σενάριο που προέκυψε από την βελτιστοποίηση διπλού στόχου (με επιλογή από το μέτωπο Pareto) επετεύχθη καλύτερος συμβιβασμός των δύο μεγεθών. Η εγκατεστημένη ισχύς του έργου προέκυψε χαμηλότερη κυρίως λόγω του μικρότερου μεγέθους των εγκατεστημένων υδροστροβίλων. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η αύξηση του συντελεστή φορτίου και η μικρή μείωση του *IRR* σε σχέση με το βασικό σενάριο.

Στο τέλος πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη μελέτη ευαισθησίας για τη λειτουργία και την οικονομική αποδοτικότητα των δύο σεναρίων σχεδίασης κατά τη μεταβολή τριών βασικών παραγόντων: του κόστους του έργου, της τιμής πώλησης της ενέργειας και των υδρολογικών συνθηκών. Το *IRR* προέκυψε ότι παρουσιάζει περίπου την ίδια ευαισθησία στην μεταβολή του ύψους επένδυσης και της τιμής πώλησης της ενέργειας για τα δύο σενάρια σχεδίασης. Αντίθετα κατά την μεταβολή των υδρολογικών συνθηκών το εναλλακτικό σενάριο σχεδίασης φαίνεται ότι πλεονεκτεί καθώς ο υψηλός συντελεστής φορτίου εξασφαλίζει μικρότερη ευαισθησία του *IRR* στη μεταβολή των υδρολογικών συνθηκών και διασφαλίζει περισσότερο τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω η εγκατάσταση που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου και εξασφαλίζει υψηλότερο συντελεστή φορτίου κρίνεται ως πιο ικανοποιητική δεδομένου ότι συνδυάζει υψηλή απόδοση κεφαλαίου και μικρότερο ρίσκο της επένδυσης λόγω της υδρολογικής αβεβαιότητας.

## ***ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ***

- *Ελληνική Βιβλιογραφία:*
  1. *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*, Δ. Ε. Παπαντώνης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2001
  2. *Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες- Υδροστρόβιλοι*, Δ. Ε. Παπαντώνης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2002.
  3. *Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις*, Δ. Ε. Παπαντώνης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1998
  4. *Σημειώσεις Βιομηχανικής Ρευστομηχανικής*, Μαθιουλάκης Δ.Σ., Αναγνωστόπουλος Ι.Σ., Τουζόπουλος Δ.Γ., Εκδόσεις ΕΜΠ
  5. *Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας*, Ι.Κ. Καλδέλης, Κ.Α. Καββαδίας, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2005
  6. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Α. Ζέρβος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
  7. *Συστημική Μεθοδολογία και Τεχνική Οικονομική*, Δ.Χ. Παναγιωτακόπουλος, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη 2005
  8. *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*, Ε. Παπαδόπουλος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2000
  9. *Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC*, Stephen J. Charman, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
  10. *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, Μ.Α. Μιμίκου, Παπασωτηρίου Εκδόσεις, Αθήνα 2006
  11. *Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*, Γ. Τσακίρης, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1995
  12. *Αρχές Γεωπληροφορικής και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών*, Μ. Καβούρας, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004
  13. *Ψηφιακή Χαρτογραφία*, Λύσανδρος Τσούλος, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2004
  14. *Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική*, Γιαννάκογλου Κ.Χ., Εκδόσεις ΕΜΠ, 2005
  15. *MATLAB για Επιστήμονες και Μηχανικούς*, Ευάγγελος Β. Χατζίκος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- *Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία:*
  1. *Micro Hydro Design Manual*, Adam Harvey, Practical Action Publishing, 1993
  2. *Mini Hydropower*, Jiandong Tong, Chichester : John Wiley & Sons , 1997
  3. *ESHA European Small Hydropower Association, Layman's Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site (Part I, Part II)*, 2006
  4. *Microhydro: Clean power from water*, Scott Davis, New Society Publishers, 2003
  5. *Hydraulic Machines: Turbines and Pumps*, Grigori Krivchenko, Lewis Publishers, 1994
  6. *Evaluation of Methods Used for Estimating Selected Stream Flow, and Flood Frequency and Magnitude for Small Basins in North Coastal California*, Michael Mann, Julie Rizzardo, Richard Satkowski, Scientific Investigations Report, 2004

- Δημοσιεύσεις:
  1. *A systematic assessment of the technical feasibility and economic viability of small hydroelectric system installations*, Athanassios D. Karlis, Demetrios P. Papadopoulos, 2000
  2. *Small hydro power: technology and current status*, Oliver Paish, 2002
  3. *Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis*, J.K. Kaldellis, D.S. Vlachou, G. Korbakis, 2005
  4. *Optimal Sizing of a run-of-river small hydropower plant*, John S. Anagnostopoulos, Dimitris E. Papantonis, 2007
  5. *An approach to the investment analysis of small and medium hydro-power plants*, F. Forouzbakhs, S.M.H. Hossein, M. Vakilian, 2007
  6. *Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant*, B. Ogayar, P.G. Vidal, 2009
  
- Διπλωματικές εργασίες:
  1. *Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας του ποταμού Αγραφιότη με χρήση του μοντέλου SWAT*, Αθανασία Γεωργία, 2010
  2. *Μελέτη βέλτιστης μετατροπής υδροηλεκτρικού σταθμού σε αναστρέψιμο, για τη διαχείριση και αποθήκευση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας*, Στυλλιανός Σ. Γιαννουλάκης, 2010
  3. *Προσομοίωση συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας με χρήση θαλασσινού νερού*, Βαρβάρα Κρούσκα, 2011
  4. *Προσομοίωση και βελτιστοποίηση σχεδιασμού υβριδικού σταθμού παραγωγής από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και σύστημα αντλιοστάθμευσης σε μη διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Διερεύνηση δυνατοτήτων διοχέτευσης της παραγωγής ΑΠΕ κατά προτεραιότητα στο ηλεκτρικό της Λέσβου*, Μιχελιάκη Πέτρος, 2011