

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΟΥ
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ (Μ.Υ.Η.Ε.)



Άννα Κοντίνη
Επιβλέπων: Νικόλαος Μαμάσης
Αθήνα, 2016

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΟΥ
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ (Μ.Υ.Η.Ε.)

Άννα Κοντίνη

Επιβλέπων: Νικόλαος Μαμάσης

Αθήνα, 2016

Ευχαριστίες

Καταρχήν, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Μαμάση, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την δυνατότητα που μου προσέφερε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ώστε να εκπονήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Οι γνώσεις, η εμπειρία αλλά και η εποικοδομητική κριτική του αποτέλεσαν εφελθτήριο για τις δικές μου προσπάθειες.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον κ. Αθανάσιο Στάμο, μέλος ΕΔΙΠ της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος με προσωπικό ενδιαφέρον συνεισέφερε στην επίλυση προγραμματιστικών ζητημάτων που ανέκυψαν κατά τη διάρκεια κατασκευής του παρόντος λογισμικού.

Παράλληλα, ευχαριστώ πολύ τον καλό μου φίλο και συνάδελφο Γεώργιο Πουλιάση για τις συμβουλές και τις ιδέες του στην αρχή της διπλωματικής μου εργασίας οι οποίες υπήρξαν ιδιαίτερα πολύτιμες.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου, τους γονείς μου Λεωνίδα και Χαρίκλεια και τα αδέρφια μου, καθώς και τους φίλους μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο.

Κοντίνη Άννα

Ιούλιος 2016

Περιεχόμενα

Σελίδα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	1
1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	2
1.4 Υδροηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα.....	3
1.5 Διάκριση μεταξύ Μικρών και Μεγάλων Υδροηλεκτρικών Έργων.....	6
1.6 Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα.....	9
2. Συνιστώσες Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων (ΜΥΗΕ).....	13
2.1 Αρχή λειτουργίας	13
2.2 Τεχνικά Έργα Υδροληψίας.....	14
2.3 Το σύστημα προσαγωγής.....	15
2.4 Ο σταθμός παραγωγής.....	17
2.5 Υδροστρόβιλοι κατάλληλοι για Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα.....	21
2.5.1 Francis.....	21
2.5.2 Αξονικής ροής (σωληνωτοί, βολβοειδής, Kaplan).....	22
2.5.3 Pelton.....	24
2.5.4 Cross-Flow.....	26
2.5.6 Turgo.....	27
2.6 Κριτήρια επιλογής υδροστροβίλου.....	28
2.7 Αποδοτικότητα υδροστροβίλου.....	29
3. Στάδια μελέτης και αλγόριθμος υπολογισμού ΜΥΗΕ.....	31
3.1 Μέση ετήσια δυνητική ενέργεια για σταθερό συντελεστή.....	37
3.2 Ετήσια ενέργεια για συγκεκριμένο τύπο στροβίλου με δεδομένη ονομαστική παροχή.....	38
3.2.1 Σταθερός συντελεστής απόδοσης.....	38
3.2.2 Μεταβλητός συντελεστής απόδοσης.....	39
3.3 Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργία υδροηλεκτρικού.....	42
3.4 Ετήσια ενέργεια για δύο στροβίλους συγκεκριμένου τύπου δεδομένης ονομαστικής παροχής.....	45
3.4.1 Σταθερός συντελεστής απόδοσης.....	46

3.4.2	Μεταβλητός συντελεστής απόδοσης.....	48
4.	Ανάλυση λειτουργίας προγράμματος.....	53
4.1	Γενικές αρχές προγράμματος Matlab.....	53
4.2	Τα υπό εξέταση σενάρια.....	55
4.3	Δεδομένα εισόδου.....	55
4.3.1	Κώδικας 1.....	57
4.3.2	Κώδικας 2.....	61
4.3.3	Κώδικες 3 και 4.....	64
4.3.4	Μηνύματα ελέγχου στην εισαγωγή δεδομένων.....	67
4.4	Λειτουργίες και αποτελέσματα.....	69
4.4.1	Κώδικας 1.....	69
4.4.2	Κώδικας 2.....	73
4.4.3	Κώδικας 3.....	74
4.4.4	Κώδικας 4.....	78
4.4.5	Μηνύματα ελέγχου στην έξοδο αποτελεσμάτων.....	82
5.	Εφαρμογή σε δεδομένο πρόβλημα.....	85
5.1	Κώδικας 1.....	85
5.2	Κώδικας 3.....	88
5.3	Κώδικας 2.....	92
5.4	Κώδικας 4.....	96
6.	Μελλοντική έρευνα.....	104
6.1	Επιλογή διαμέτρου αγωγού προσαγωγής.....	104
6.2	Οικονομική αποτίμηση λύσεων.....	109
7.	Συμπεράσματα.....	111
8.	Αναφορές.....	114
9.	Παράρτημα.....	117
9.1	Κώδικας 1.....	117
9.2	Κώδικας 2.....	122
9.3	Κώδικας 3.....	129
9.4	Κώδικας 4.....	134

Περίληψη

Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (ΜΥΗΕ) στην Ελλάδα αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρά το γεγονός αυτό η τεχνογνωσία που εφαρμόζεται στο σχεδιασμό στηρίζεται περισσότερο στην εμπειρία του παρελθόντος και λιγότερο σε θεωρητικό υπόβαθρο.

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη βελτίωση του σχεδιασμού με την κατασκευή ενός υπολογιστικού μοντέλου σε περιβάλλον Matlab το οποίο αποτελεί μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία διαστασιολόγησης ΜΥΗΕ με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής τους παραγωγής.

Αρχικά στο πρώτο μέρος της εργασίας παρατίθεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στα ΜΥΗΕ και παρουσιάζεται αναλυτικά ο μαθηματικός αλγόριθμος που διέπει τον τρόπο λειτουργίας τους. Στη συνέχεια αναλύεται το περιβάλλον του λογισμικού που κατασκευάστηκε. Τέλος εξετάζονται τέσσερα σενάρια λειτουργίας. Στους Κώδικες 1 & 2 πραγματοποιείται προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας ενός ΜΥΗΕ είτε αυτός διαθέτει έναν υδροστρόβιλο είτε δύο. Ακολούθως προκύπτει η ανάγκη επέκτασης του λογισμικού στους Κώδικες 3 & 4 όπου πραγματοποιείται ενεργειακή βελτιστοποίηση για τις περιπτώσεις εφαρμογής ενός ή δύο υδροστροβίλων αντιστοίχως.

Η εργασία αξιοποιεί την εφαρμογή του λογισμικού σε πραγματικές εγχώριες εγκαταστάσεις, κάνοντας χρήση μακροχρόνιων μετρήσεων του υδάτινου δυναμικού και χαρακτηριστικών λειτουργίας εμπορικών υδροστροβίλων. Συγκρίνονται τα διάφορα αποτελέσματα και εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση προτάσεων για μελλοντική έρευνα η οποία διακρίνεται σε δύο σκέλη, στην επιλογή της βέλτιστης διαμέτρου αγωγού προσαγωγής και στην εύρεση της βέλτιστης οικονομικά λύσης.

Το μοντέλο αυτό θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το μηχανικό, είτε σε προκαταρκτικό στάδιο με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης για τον σταθμό που θα κατασκευαστεί, είτε σε στάδιο ελέγχου για έναν ήδη υπάρχοντα υδροηλεκτρικό σταθμό με σκοπό την πιθανή επέκταση ή/και τροποποίηση του.

Abstract

Small Hydroelectric Plants (SHP) in Greece are one of the most common applications of renewable energy sources. Despite this fact the technical knowledge that is applied to their design is mostly based on previous experience than on theoretical background.

This thesis aims to design improvement by constructing a calculating program in Matlab environment which consists of a complete methodology of designing a SHP in purpose of optimizing energy production.

At the first stage of this thesis the theoretical knowledge concerning SHP is briefly stated and the mathematical algorithm determining their function is presented thoroughly. At a second stage the software interface that was constructed is analyzed. Finally four operation cases are being examined. On Codes 1 & 2 there is a simulation of a SHP daily operation either consisting of one water turbine or two. Consequently this necessitates expanding the current software on Codes 3 & 4 which conduct energy optimization in cases of one or two water turbines.

This thesis utilizes the application of this software in real national facilities, using long-term data of water sources and the functional characteristics of commercial water turbines. Various results are being compared and the necessary results are being extracted.

This thesis is completed by presenting suggestions for future research which consist of two parts, the choice of the optimum diameter for the penstock and the detection of the optimum financial solution.

This software can be used by an engineer, either in a primer stage, providing the optimum solution for a station that will be constructed, or in stage of inspection for an existing SHP regarding its possible expansion and/or amendment.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα αποτελούν συμφέρουσες, περιβαλλοντικά συμβατές και κατά κανόνα οικονομικά αποδοτικές ενεργειακές επενδύσεις (Καλδέλλης κ.ά., 2006). Σε αρκετές περιπτώσεις όμως η απειρία σχεδιασμού οδηγεί σε λανθασμένη διαστασιολόγηση του έργου με συνέπεια αρχικά τη μη αξιοποίηση ολόκληρου του υδατικού δυναμικού και έπειτα την οικονομική ζημεία.

Ως αποτέλεσμα, προέκυψε η ανάγκη σχεδιασμού ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ΜΥΗΕ αλλά και η επέκτασή του σε μοντέλο βελτιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής του ΜΥΗΕ. Στόχος της εργασίας αυτής είναι να κατασκευαστεί ένα λογισμικό με παραμετρικά δεδομένα όπου ο μελετητής θα μπορεί να χρησιμοποιήσει σε οποιαδήποτε μελέτη ΜΥΗΕ, ανεξαρτήτως του εξοπλισμού που επιλέγεται. Κάνοντας χρήση του λογισμικού ο μελετητής θα είναι σε θέση να γνωρίζει τα βασικά στοιχεία λειτουργίας ενός ΜΥΗΕ για τη δεδομένη διάταξη που επέλεξε ή σε αντίθετη περίπτωση να συμβουλευτεί το λογισμικό ώστε να επιλέξει τη βέλτιστη λύση επιλογής εξοπλισμού που θα επιφέρει μεγιστοποίηση της ενέργειας.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στη συνέχεια του πρώτου κεφαλαίου παρουσιάζονται βασικές έννοιες και στοιχεία που αφορούν την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας αλλά και τη συνεισφορά των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων στην παραγωγή αυτή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η αρχή λειτουργίας των ΜΥΗΕ και γίνεται περιγραφή των βασικών συνιστωσών που απαρτίζουν έναν υδροηλεκτρικό σταθμό με εμβάθυνση στους υδροστροβίλους και τη λειτουργία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται τοποθέτηση του προβλήματος, που καλείται να επιλύσει η παρούσα μελέτη, προσομοίωση λειτουργίας και ενεργειακή βελτιστοποίηση ΜΥΗΕ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο και οι αριθμητικές σχέσεις που απαρτίζουν την επίλυση του προβλήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος Matlab που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια αναλύονται τα σενάρια που εξετάστηκαν και παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία εισόδου και εξόδου καθώς και οι λειτουργίες του κώδικα κάθε σεναρίου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται εφαρμογές του λογισμικού που αναπτύχθηκε για διαφορετικές εκδοχές του προβλήματος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν και τέλος διεξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα.

Το έκτο κεφάλαιο αποτελείται από ιδέες και προτάσεις για μελλοντική επέκταση της παρούσας μελέτης.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα μελέτη.

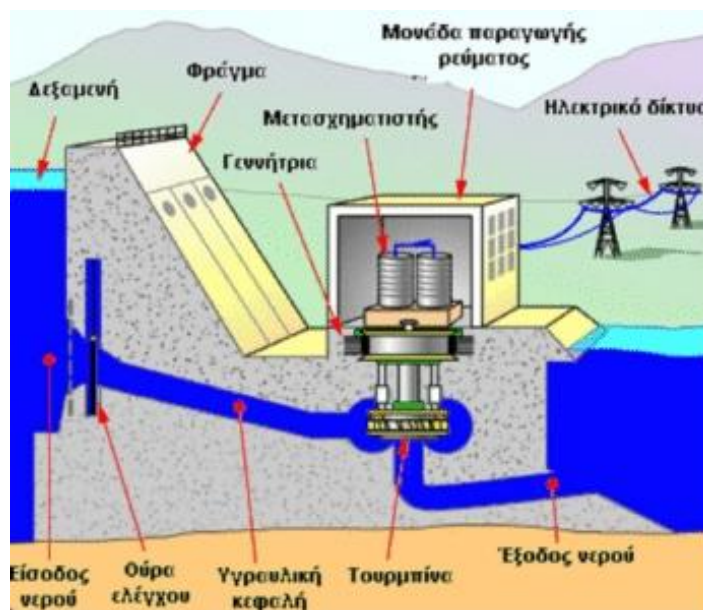
1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενη την ενέργεια του νερού καλείται υδροηλεκτρική ενέργεια. Το νερό ευρισκόμενο σε μεγάλα υψόμετρα έχει δυναμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε κινητική κατά την ροή σε χαμηλότερα υψόμετρα. Στη συνέχεια, με την χρήση των υδροστροβίλων παράγεται μηχανική ενέργεια η οποία τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων γίνεται η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ).

Η δέσμευση και αποθήκευση ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες, για έναν Υδροηλεκτρικό Σταθμό, ισοδυναμεί πρακτικά με αποταμίευση υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η προγραμματισμένη αποδέσμευση αυτών των ποσοτήτων ύδατος και η εκτόνωσή τους στους υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδάτινων πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις, η Υδροηλεκτρική ενέργεια καθίσταται μια σημαντικότερη εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Η αξιοποίηση του υδροδυναμικού μιας χώρας αποτελεί οπωσδήποτε έναν εθνικό στόχο δεδομένου ότι πρόκειται για μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτά

είναι οι μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η μεγάλη ειδική ισχύς (ισχύς ανά βάρος του εξοπλισμού) αλλά και η δυνατότητα συνδυασμού με άλλες χρήσεις του νερού. Παράλληλα, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, το νερό δεν αχρηστεύεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς. Στην Εικόνα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία μιας μονάδας Υδροηλεκτρικής ενέργειας με ταμιευτήρα.



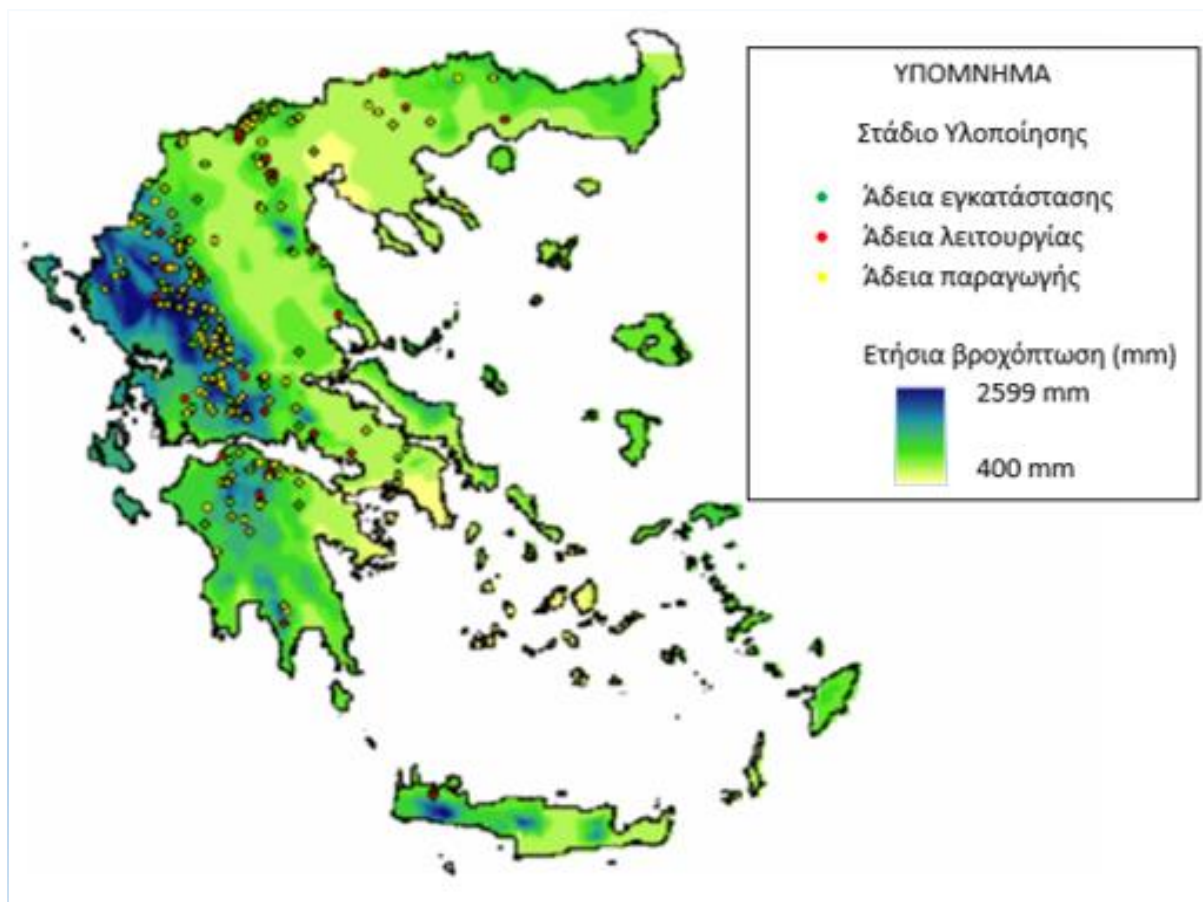
Εικόνα 1.1 Βασικά στοιχεία μιας μονάδας παραγωγής Υδροηλεκτρικής ενέργειας με ταμιευτήρα

(Πηγή: www.renewablegreece.wikispaces.com)

1.4 Υδροηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα

Στη Δυτική και Βόρεια Ελλάδα υπάρχει ιδιαίτερα πλούσιο δυναμικό υδατοπτώσεων, λόγω της διαμόρφωσης λεκανών απορροής με έντονες κλίσεις καθώς και των σημαντικών βροχοπτώσεων.

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από την Εικόνα 1.2 στην οποία φαίνεται ενδεικτικά το ύψος βροχής (μεγαλύτερο ύψος βροχής όσο πιο μπλε γίνεται το χρώμα) ενώ με κουκίδες σημειώνονται οι θέσεις των ΥΗΕ που ήδη λειτουργούν ή έχουν αδειοδοτηθεί.



Εικόνα 1.2 Χάρτης της Ελλάδας με ένδειξη του ύψους βροχής και τα ΥΗΕ που είναι ήδη σε λειτουργία ή έχουν αδειοδοτηθεί

(Προέλευση: ΥΠ.ΑΝ. μετά από προσαρμογή)

Η μέση συνεισφορά της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα αντιπροσωπεύει το 8 - 10% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που προέρχεται από Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς καλύπτει ηλεκτρικά φορτία αιχμής. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 3060 MW και η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας κυμαίνεται από 4000 έως 5000 GWh. Τα τρία μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα στην Ελλάδα βρίσκονται στα Κρεμαστά (437 MW), στο Θησαυρό (384 MW) και στο Πολύφυτο (375 MW). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει μεγάλη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης υδροηλεκτρικών σταθμών. (Μαμάσης κ.α., 2015)

Την αξιοποίηση των υδατοπτώσεων που αντιστοιχούν σε μεγάλη ισχύ αναλαμβάνουν οι εταιρείες παραγωγής και διανομής ενέργειας, όπως η ΔΕΗ, για δύο βασικούς λόγους. Αρχικά διότι τα μεγάλα ΥΗΕ είναι απαραίτητα σε ένα μεγάλο δίκτυο επειδή είναι τα μόνα που

μπορούν να καλύψουν αποτελεσματικά τις αιχμές ζήτησης του δικτύου και έπειτα διότι το κόστος κατασκευής τους είναι πολύ υψηλό (Ροντήρης, 2007).

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται 16 μεγάλα και 11 μικρά υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ που βρίσκονται σε λειτουργία. Σημειώνεται το έτος ένταξης του κάθε έργου καθώς και ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα για τα μεγάλα ΥΗΕ.

Πίνακας 1.1 27 ΥΗΕ της ΔΕΗ σε λειτουργία

16 Μεγάλα ΥΗΕ			11 Μικρά ΥΗΕ	
Θέση	Έτος ένταξης	Ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα (hm ³)	Θέση	Έτος ένταξης
ΛΟΥΡΟΣ	1954	0.035	ΓΛΑΥΚΟΣ	1927
ΑΓΡΑΣ	1954	3.8	ΒΕΡΜΙΟ	1929
ΛΑΔΩΝΑΣ	1955	46.2	ΑΓΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	1929
ΠΛΑΣΤΗΡΑΣ	1960	300	ΑΛΜΥΡΟΣ ΚΡΗΤΗΣ	1931
ΚΡΕΜΑΣΤΑ	1966	2805	ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΕΡΡΩΝ	1931
ΚΑΣΤΡΑΚΙ	1969	53	ΓΚΙΩΝΑ	1988
ΕΔΕΣΣΑΙΟΣ	1969	0.46	ΣΤΡΑΤΟΣ II	1988
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	1974	1020	ΜΑΚΡΟΧΩΡΙ	1992
ΠΟΥΡΝΑΡΙ	1981	303	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ	2008
ΑΣΩΜΑΤΑ	1985	10	ΣΜΟΚΟΒΟ	2008
ΣΦΗΚΙΑ	1985	16	ΠΑΠΑΔΙΑ	2010
ΣΤΡΑΤΟΣ	1989	11		
ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ	1990	145		
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	1997	570		
ΠΟΥΡΝΑΡΙ II	1999	3.6		
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	1999	12		

1.5 Διάκριση μεταξύ μικρών και μεγάλων Υδροηλεκτρικών Έργων (ΥΗΕ)

Η υδροηλεκτρική ενέργεια ταξινομείται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Η μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική ενέργεια διαφέρει σημαντικά από τη μεγάλης κλίμακας σε ό,τι αφορά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και μεγάλων ταμιευτήρων με σημαντικές επιπτώσεις στο άμεσο περιβάλλον. Τα μικρής κλίμακας συστήματα τοποθετούνται δίπλα σε ποτάμια και κανάλια και έχουν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον οικοσύστημα. Στην Εικόνα 1.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα επί μέρους τμήματα τυπικής διάταξης ενός ΜΥΗΕ.



Εικόνα 1.3 Τυπική διάταξη ενός ΜΥΗΕ

(Πηγή: energy.ltgovernors.com μετά από προσαρμογή)

Θα πρέπει αρχικά να διευκρινισθεί ότι από πλευράς αρχής λειτουργίας, τόσο στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική όσο και στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ένα μικρό ΥΗΕ δεν διαφέρει από ένα μεγάλο. Παράλληλα δεν διαφέρουν ως προς το πλήθος και το είδος των επί μέρους τμημάτων από τα οποία απαρτίζεται ένα ΥΗΕ.

Ο Παπαντώνης (2008, σ. 4) τονίζει πως ο χαρακτηρισμός ενός ΥΗΕ ως «μικρού» δεν αναφέρεται αποκλειστικά στην εγκατεστημένη ισχύ ή στις διαστάσεις των μονάδων αλλά σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών, πολλά από τα οποία δεν είναι μετρήσιμα, δηλαδή οι διαφορές μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ δεν είναι μόνο ποσοτικές αλλά κυρίως και ποιοτικές.

Ως μικρό χαρακτηρίζεται ένα ΥΗΕ όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη των 10 MW, χωρίς η τιμή αυτή να αποτελεί ένα γενικά αποδεκτό όριο. Σημειώνεται ότι σε ορισμένες χώρες το όριο διάκρισης μεταξύ μεγάλων και μικρών ΥΗΕ ορίζεται στα 5 MW, ενώ για την Ελλάδα συγκεκριμένα το όριο αυτό ορίζεται στα 15 MW. Το γεγονός ότι το όριο διάκρισης μεταξύ τους δεν είναι ιδιαίτερα σαφές οφείλεται στο ότι οι διαφορές τους δεν είναι μόνο ποσοτικές αλλά και ποιοτικές και αφορούν στην επιλογή του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, στη διαμόρφωση και στην εκμετάλλευση ΥΗΕ.

Όπως προκύπτει, μια βασική διαφοροποίηση μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ έγκειται στο γεγονός ότι στα μικρά ΥΗΕ γίνεται επιλογή και εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τυποποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τον εξοπλισμό μικρών ΥΗΕ φθάνει συνήθως μέχρι την ισχύ των 10 MW (αν και ορισμένες εταιρείες προσφέρουν τυποποιημένους υδροστροβίλους ονομαστικής ισχύος μέχρι 15 MW), φαίνεται ότι η τιμή αυτή αποτελεί το πλέον αποδεκτό όριο διάκρισης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ, όπως άλλωστε δέχονται σχεδόν όλες οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το όριο διάκρισης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ έχει σημασία και από πλευράς διαδικασιών και αδειοδοτήσεων καθώς για τα μικρά ΥΗΕ προβλέπονται διαδικασίες απλούστερες ενώ σε ορισμένες χώρες, όπως στην Ελλάδα, ένα μεγάλο ΥΗΕ δεν μπορεί να κατασκευασθεί παρά μόνο από την ΔΕΗ.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν και άλλες διακρίσεις ως προς την ονομαστική ισχύ. Συγκεκριμένα ένα ΥΗΕ χαρακτηρίζεται ως:

- micro όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη των 100 kW
- mini όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη από 1 MW
- μικρό (small) όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μεταξύ 1 MW και 10 MW

Τα όρια αυτά μεταξύ micro, mini και μικρού ΥΗΕ δεν είναι απόλυτα και υπάρχουν αποκλίσεις σε διάφορες χώρες καθώς σχετίζονται κυρίως με τις διαδικασίες αδειοδότησης και με τις προδιαγραφές σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο.

Μία άλλη διάκριση των ΥΗΕ αναφέρεται στο μέγεθος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H , η τιμή της οποίας σχετίζεται με την ανά μονάδα μάζας υδραυλική ενέργεια του νερού και την τάξη μεγέθους της στατικής πίεσης στον αγωγό προσαγωγής και το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου, ενώ από αυτή κυρίως εξαρτάται η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες:

- μικρού ύψους όταν το H είναι μικρότερο των 20 m
- μέσου ύψους όταν $20 < H < 150$ m
- μεγάλου ύψους όταν $H > 150$ m

Δεδομένου ότι η υδραυλική ισχύς είναι γινόμενο της παροχής του νερού και της υδραυλικής πτώσης γίνεται φανερό ότι το κόστος κατασκευής ενός μικρού ΥΗΕ είναι τόσο μικρότερο, και άρα η επένδυση τόσο πιο αποδοτική, όσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική πτώση. Όμως κατά κανόνα οι μεγάλες υδραυλικές πτώσεις αναπτύσσονται σε ορεινές και απομακρυσμένες περιοχές οπότε ενδέχεται το κόστος των γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι τόσο υψηλό ώστε να αντισταθμίζει το πλεονέκτημα του σχετικά χαμηλού κόστους του μικρού ΥΗΕ. Το αντίθετο συμβαίνει με τα μικρά ΥΗΕ μικρής υδραυλικής πτώσης. Το ύψος της επένδυσης είναι αυξημένο, όμως κατά κανόνα βρίσκονται κοντά σε πεδινές και κατοικήσιμες περιοχές οπότε το κόστος των έργων σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο είναι μικρό.

Τέλος, τα ΥΗΕ χαρακτηρίζονται από το εάν το φράγμα σχηματίζει ταμιευτήρα (δεξαμενή αποθήκευσης) μεγάλου όγκου.

Ένα μικρό ΥΗΕ δεν πρέπει να θεωρηθεί ως μικρογραφία ενός μεγάλου καθώς η προσέγγιση αυτή θα οδηγήσει σε οικονομική αποτυχία την επένδυση. Άλλοι ευνοϊκοί παράγοντες για την κατασκευή ενός μικρού ΥΗΕ είναι ότι μπορεί πιο εύκολα να συνδυασθεί με άλλες διευθετήσεις, π.χ. ύδρευση, άρδευση, οπότε θα ήταν δυνατόν να αξιοποιηθούν υπάρχοντα μικρά αρδευτικά φράγματα. Ακόμη, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρουν τα μικρά ΥΗΕ είναι πολύ μικρότερες από αυτές των μεγάλων, καθώς οι περισσότερες από αυτές οφείλονται στον σχηματισμό μεγάλου ταμιευτήρα ανάντη.

Ως αποτέλεσμα, ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελεί ένα έργο απόλυτα συμβατό με το περιβάλλον, καθώς το σύνολο των επιμέρους παρεμβάσεων στην περιοχή εγκατάστασης μπορεί να ενταχθεί αισθητικά και λειτουργικά στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας τους τοπικούς διαθέσιμους πόρους. Τέλος, οι πολύ υψηλοί βαθμοί απόδοσης των υδροστροβίλων, που μερικές φορές υπερβαίνουν και το 90%, και η πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής των υδροηλεκτρικών έργων, που μπορεί να υπερβαίνει και τα 100 έτη, αποτελούν δύο χαρακτηριστικούς δείκτες για την ενεργειακή αποτελεσματικότητα και την τεχνολογική ωριμότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.

Ειδικότερα ένας τυπικός ΜΥΗ Σταθμός ισχύος 5 MW επιφέρει τα εξής αποτελέσματα:

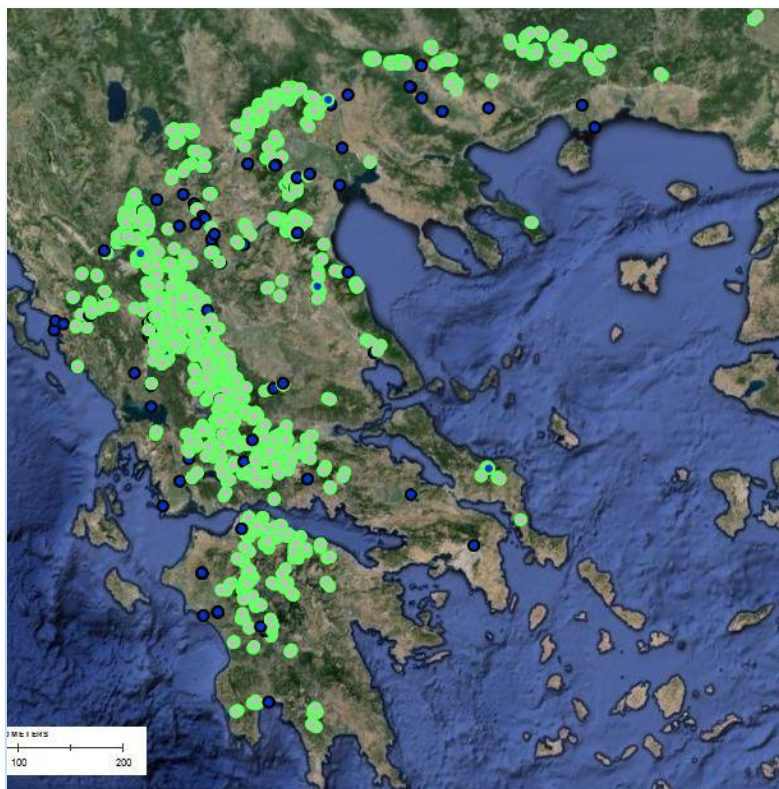
- Υποκαθιστά 1.375 ΤΠΠ (Τόνος Ισοδύναμου Πετρελαίου).
- Δημιουργεί εργασία για 23 άτομα ανά έτος, κατά το σχεδιασμό και την ανέγερση.
- Παράγει κατά μέσο όρο ηλεκτρική ενέργεια για 5.300 οικογένειες.
- Μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά 16.000 τόνους ανά έτος.

Παρά τα πολλά τους πλεονεκτήματα τα ΜΥΗΕ παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες. Αρχικά, λόγω της απουσίας μεγάλου ανάντι ταμιευτήρα, τα εισερχόμενα νερά δεν έχουν το χρόνο να ηρεμήσουν οπότε τα αιωρούμενα σωματίδια, κυρίως η άμμος, δεν συγκρατείται παρά με την διαμόρφωση ειδικών δεξαμενών εξάμμοσης. Επίσης, λόγω πάλι της απουσίας μεγάλου ανάντι ταμιευτήρα, η διάρκεια πλήρωσης της δεξαμενής ανάντι της υδροληψίας από τα φερτά του ποταμού είναι πολύ μικρή και για αυτό το λόγο διαμορφώνεται διώρυγα έκπλυσης ελεγχόμενη από θυρόφραγμα ενώ θα πρέπει να προβλέπεται η εύκολη προσπέλαση μηχανημάτων για τον καθαρισμό της λεκάνης.

1.6 Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (ΜΥΗΕ) στην Ελλάδα

Η μορφολογία της Ελλάδας ευνοεί τη διαμόρφωση ταμιευτήρων με υψηλή ρυθμιστική ικανότητα ενώ αντίθετα η έλλειψη μεγάλων ποταμών με κατά το δυνατόν συνεχή και ομοιόμορφη παροχή δεν επιτρέπει την κατασκευή μεγάλων ΥΗΕ βάσεως. Για τους λόγους αυτούς τα μεγάλα ΥΗΕ της Ελλάδας χρησιμεύουν κυρίως για την κάλυψη των φορτίων αιχμής του δικτύου. Όμως, η ορεινή επιφανειακή διαμόρφωση της χώρας μας ευνοεί το σχηματισμό μικρών υδατορευμάτων με ευνοϊκά χαρακτηριστικά για οικονομική εκμετάλλευση, δηλαδή μεγάλη διαθέσιμη υδραυλική πτώση.

Ένα σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό της σημερινής εικόνας στον τομέα των ΜΥΗΕ, είναι η χωρική τους κατανομή στην ελληνική επικράτεια (Kaldellis, 2007). Ο φυσικός πόρος που αξιοποιούν τα ΜΥΗΕ για την ηλεκτροπαραγωγή είναι το νερό, δηλαδή η βροχόπτωση ή γενικότερα η κατακρήμνιση και είναι φυσικό η ανάπτυξή τους να προσανατολίζεται στις περιοχές με πλούσιο υδατικό δυναμικό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4 όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των ΜΥΗΕ σε σχεδιασμό και λειτουργία μέχρι και το έτος 2015.



Εικόνα 1.4 Θέσεις Μικρών ΥΗΕ σε σχεδιασμό και λειτουργία μέχρι και το έτος 2015

(Πηγή: www.rae.gr/geo)

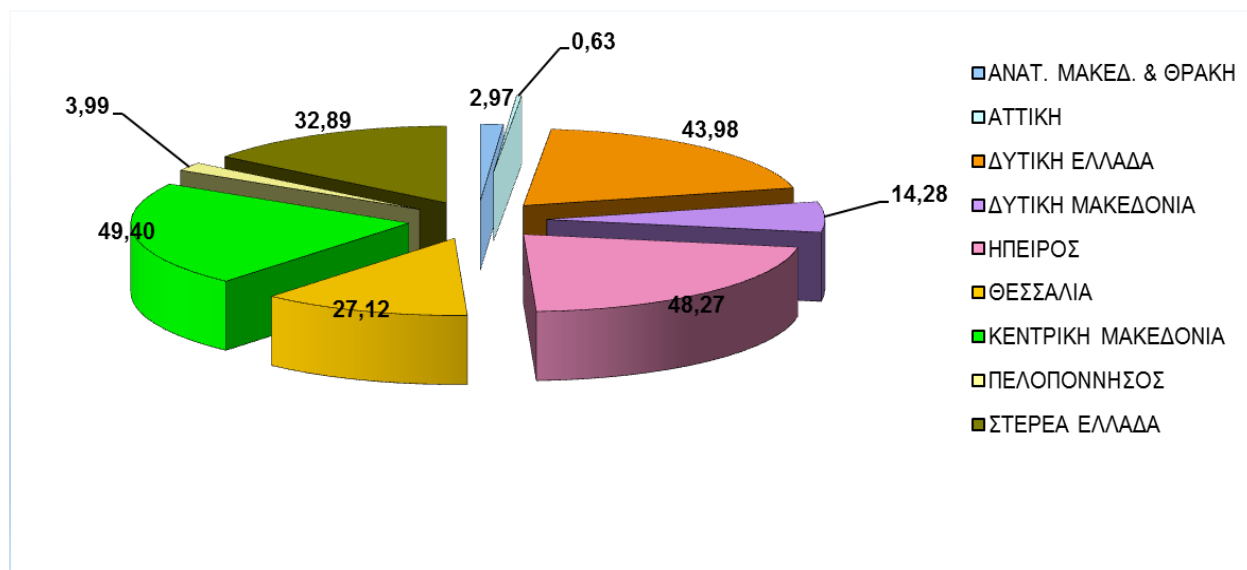
Ακόμη παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.2 η κατανομή των ΜΥΗΕ έργων τον Ιανουάριο του 2009 προσδιορίζοντας το μέγεθος των υπαρχόντων υδροηλεκτρικών σταθμών καθώς και το που ανήκουν.

Πίνακας 1.2 Μικρά ΥΗΕ σε λειτουργία (Ιανουάριος 2009)

Πλήθος Έργων (%)	Μέγεθος	MW (%)
42 (53)	0 < Ισχύς <= 1	28,7 (17)
15 (19)	1 < Ισχύς <= 2	23,2 (14)
15 (19)	2 < Ισχύς <= 5	50,6 (30)
5 (6)	5 < Ισχύς <= 10	36,1 (21)
3 (4)	10 < Ισχύς <= 11	31,5 (19)
80 (100)	Σύνολο	170,1 (100)
Πλήθος Έργων (%)	Ιδιοκτησία	MW (%)
61 (76)	Ιδιώτες	96,9 (57)
7 (9)	ΕΥΔΑΠ ή Δήμοι	5,0 (3)
3 (4)	ΔΕΗ Αν.+Ιδιώτες	14,9 (9)
9 (11)	ΔΕΗ	53,2 (31)

(Πηγή: <http://www.desmie.gr>)

Στη συνέχεια στο Διάγραμμα 1.1 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή και η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος (MW) των ΜΥΗΕ συνδεδεμένων στο διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας (ΛΑΓΗΕ, 2016).



Διάγραμμα 1.1 Γεωγραφική κατανομή εγκατεστημένης ισχύος σε MW

(Πηγή: www.lagie.gr)

Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες έχει εγκαταστήσει ήδη δεκαπέντε ΜΥΗΕ και ακόμα οκτώ βρίσκονται υπό κατασκευή. Πέρα όμως από τα υπάρχοντα και τα αναπτυσσόμενα έργα, έρχεται να λάβει μέρος η δυνατότητα της εκμετάλλευσής της και στον ιδιωτικό τομέα. Ήδη αρκετοί ιδιώτες αλλά και κοινότητες έχουν ξεκινήσει την κατασκευή και εκμετάλλευση μικρών υδροηλεκτρικών εργοστασίων. Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον όμως των πολιτών αλλά και της ΔΕΗ Ανανεώσιμες αρκετές περιοχές της Ελλάδας παραμένουν αναξιοποίητες μέχρι και σήμερα. Η αξιοποίησή τους δεν θα επιφέρει μόνο περιβαλλοντικά οφέλη αλλά και μια "παράξενη" ομορφιά.

Τέλος, παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.5 το νομοθετικό υπόβαθρο για την αδειοδότηση ΜΥΗ Σταθμών στην Ελλάδα.

➔ Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (μΥΗΣ)

$P_{installed} \leq 50 \text{ kW}$	$50 \text{ kW} < P_{installed} \leq 15 \text{ MW}$
Δεν απαιτείται Άδεια Παραγωγής, ούτε άλλη σχετική διαπιστωτική απόφαση (Ν.3468/2006, αρθ.4, όπως αντικαταστάθηκε με τον Ν.3851/2010, αρθ.2, §12).	Απαιτείται Άδεια Παραγωγής. Η αίτηση προς την ΡΑΕ πρέπει να συνοδεύεται από τεκμηριωμένη υδρολογική μελέτη.
Πρέπει να υποβληθεί αίτηση για την διατύπωση Προσφοράς Σύνδεσης προς τον αρμόδιο Διαχειριστή, ο οποίος και θεωρεί τα τοπογραφικά διαγράμματα αποτύπωσης του τρόπου σύνδεσης. Χορηγείται Προσφορά Σύνδεσης καταρχήν μη δεσμευτική. Αυτή οριστικοποιείται και καθίσταται δεσμευτική μετά το τέλος της περιβαλλοντικής αδειοδότησης (έκδοση απόφασης ΕΠΟ).	
Για όλες τις κατηγορίες μΥΗΣ απαιτείται Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ). Η απόφαση έγκρισης εκδίδεται κατόπιν αιτήσεως που συνοδεύεται από Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) ή Περιβαλλοντικής Έκθεσης (εφόσον το έργο ενταχθεί στην κατηγορία Β4 κατά το αρθ.10, §1 του Ν.3468). Απαιτείται Άδεια Χρήσης Νερού (ενεργειακή χρήση, ΥΑ.43504/2005, αρθ.1, §1).	Απαιτείται Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ). Η αίτηση πρέπει να συνοδεύεται από Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ). Απαιτείται Ενιαία Άδεια Χρήσης Νερού και Εκτέλεσης Έργων Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων (ενεργειακή χρήση, ΥΑ.43504/2005, αρθ.1, §1 και αρθ.6, §3).
Εφόσον πρόκειται να εκτελεστούν δομικά έργα, απαιτούνται Οικοδομικές Άδειες. Απαιτείται Σύμβαση Σύνδεσης. Απαιτείται Σύμβαση Αγοραπωλησίας.	
Δεν απαιτείται Άδεια Εγκατάστασης ή Άδεια Εκτέλεσης Έργων Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων.	Απαιτείται Άδεια Εγκατάστασης. Η ΥΑ.13310/2007, δίνει την δυνατότητα υποβολής μίας αίτησης (Παράρτημα, Μέρος 1 και Μέρος 2, §2) για την έκδοση μίας άδειας που ενσωματώνει την Ενιαία Άδεια και την Άδεια Εγκατάστασης.
Δεν απαιτείται Δοκιμαστική Λειτουργία. Δεν απαιτείται ούτε Άδεια Λειτουργίας (Ν.3468/2006, αρθ.8, όπως αντικαταστάθηκε με τον Ν.3851/2010, αρθ.3, §2).	Απαιτείται Προσωρινή Σύνδεση για Δοκιμαστική Λειτουργία που γίνεται κατόπιν αιτήσεως προς τον αρμόδιο Διαχειριστή. Εφόσον επιτευχθεί απροβλημάτιστη λειτουργία 15 ημερών, ο Διαχειριστής εκδίδει βεβαίωση επιτυχούς περάτωσης των δοκιμών (ΥΑ.13310/2007, ΦΕΚ.Β'1153, αρθ.14). Απαιτείται Άδεια Λειτουργίας.

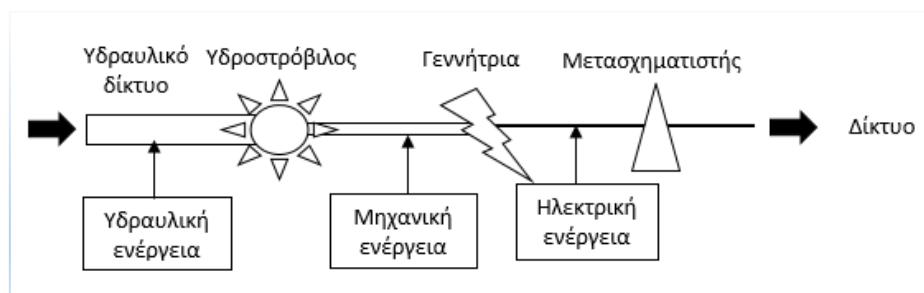
Εικόνα 1.5 Αδειοδότηση ΜΥΗ Σταθμών

(Πηγή: <http://www.desmie.gr/ape-sithya/>)

2. Συνιστώσες Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων (ΜΥΗΕ)

2.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των ΜΥΗΕ βασίζεται στην εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των επιφανειακών νερών, με μετατροπή της αρχικά σε κινητική και εν συνεχεία σε ηλεκτρική ενέργεια, σύμφωνα με τους νόμους των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η διαδικασία μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική (περιστροφική κίνηση), μέσω του στροβίλου και σε ηλεκτρική, μέσω της γεννήτριας.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα μετατροπής ενέργειας ΜΥΗΕ

Η ισχύς λειτουργίας, δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας, της εγκατάστασης υπολογίζεται από τη σχέση (2.1):

$$I = n * \rho * g * Q * H_{net} \quad (2.1)$$

Όπου:

- I η ισχύς λειτουργίας (kW)
- n ο βαθμός απόδοσης ($n = n_{\text{στροβίλου}} * n_{\text{γεννήτριας}} * n_{\text{μετασχηματιστή}}$)
- ρ η πυκνότητα του νερού ($\approx 1.0 \text{ t/m}^3$)
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)
- Q η διερχόμενη εκ του στροβίλου παροχή (m^3/s)
- H_{net} το καθαρό ύψος πτώσης αφού αφαιρεθούν οι γραμμικές και τοπικές απώλειες (m)

Η παραγόμενη ενέργεια σε χρονικό διάστημα Δt υπολογίζεται με χρονική ολοκλήρωση της ισχύος λειτουργίας, σύμφωνα με τη σχέση (2.2):

$$E = \sum_{t=0}^{\Delta t} I * dt \quad (2.2)$$

Όπου:

- E η παραγόμενη ενέργεια σε χρονικό διάστημα Δt (kWh)
- I η ισχύς λειτουργίας για κάθε στοιχειώδες χρονικό διάστημα dt (kW)
- dt το στοιχειώδες χρονικό διάστημα για το οποίο η ισχύς θεωρείται σταθερή (h)

Η εγκατάσταση ενός ΜΥΗΕ αξιοποιεί τη φυσική πτώση των επιφανειακών υδάτων, μέσω ενός υπό πίεση υδραυλικού συστήματος που διοχετεύει το νερό στο στρόβιλο. Τα βασικά επιμέρους τεχνικά έργα, που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι η υδροληψία (intake), το σύστημα προσαγωγής και ο σταθμός παραγωγής (power house).

2.2 Τεχνικά Έργα Υδροληψίας

Το πρώτο εν σειρά, από ανάντη, έργο είναι το τεχνικό υδροληψίας με το οποίο αποσπάται η ενεργειακά εκμεταλλεύσιμη παροχή από το φυσικό υδατόρευμα ή, γενικότερα από την πηγή ύδατος. Οι κύριοι τύποι υδροληψίας είναι η ορεινή (tyrolean intake), η πλευρική (side intake) και η υδροληψία τύπου σίφωνα (siphon intake). Οι δύο πρώτοι τύποι εφαρμόζονται συνήθως όταν το νερό προέρχεται από φυσικό υδατόρευμα, ενώ ο τρίτος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις αξιοποίησης νερού από υφιστάμενο ταμιευτήρα ή κανάλι.

Μία σημαντική ειδοποιός διαφορά των ΜΥΗΕ από τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, εκτός του τυπικού ορίου των 15 MW εγκατεστημένης ισχύος, έγκειται στον τρόπο λειτουργίας της υδροληψίας. Ο αναβαθμός που κατασκευάζεται στις υδροληψίες των ΜΥΗΕ, έχει πολύ μικρό ύψος και δε στοχεύει στην αναρρύθμιση της φυσικής απορροής με τη δημιουργία ταμιευτήρα, αλλά στη διαμόρφωση κατάλληλων συνθηκών για τη διοχέτευση της απαιτούμενης παροχής στο σύστημα προσαγωγής.

Η υδροληψία είναι σχεδιασμένη ώστε ένα μέρος της παροχής (οικολογική παροχή) να αποδίδεται απευθείας στο φυσικό υδατόρευμα, προκειμένου να διατηρούνται ικανές συνθήκες επιβίωσης για το παρόχθιο οικοσύστημα. Όπου απαιτείται κατασκευάζεται ειδικό τεχνικό για τη διευκόλυνση της μετακίνησης των ψαριών κατά μήκος της κοίτης (ιχθυόσκαλα, fish ladder)

(Λαμπροπούλου και Κορνάρος, 2004). Στις πλευρικές υδροληψίες προβλέπεται η ενσωμάτωση θυροφραγμάτων στον αναβαθμό για την εκκένωση των φερτών, ώστε σε κάθε περίπτωση να μη παρεμποδίζεται η στερεομεταφορά κατά μήκος της κοίτης. Με επίπεδο αναφοράς την υφιστάμενη κοίτη, κυμαίνεται στο διάστημα 0 έως 5 m.

Αφού αποσπαστεί από την κοίτη το νερό διοχετεύεται με ελεύθερη ροή στη δεξαμενή καθίζησης ή εξαμμωτή (desilter), με εξαίρεση τις υδροληψίες τύπου σίφωνα, όπου δεν απαιτείται τεχνικό εξάμμωσης. Η δεξαμενή καθίζησης έχει κατάλληλες διαστάσεις ώστε να εξασφαλίζεται η κατακράτηση της ελάχιστης διάστασης κόκκου φερτών, η οποία καθορίζεται από τις προδιαγραφές του στροβίλου.

Σε συνέχεια του εξαμμωτή βρίσκεται η δεξαμενή φόρτισης (forebay), η οποία σχεδιάζεται ώστε να εξασφαλίζονται οι κατάλληλες υδραυλικές συνθήκες εισόδου στον υπό πίεση αγωγό προσαγωγής. Βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό της δεξαμενής φόρτισης είναι η μη εισροή αέρα στον αγωγό προσαγωγής, που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σπηλαιώσης.

2.3 Το σύστημα προσαγωγής

Το βασικό τεχνικό έργο του συστήματος προσαγωγής είναι ο αγωγός, μέσω του οποίου μεταφέρεται η παροχή στο στρόβιλο. Το υλικό κατασκευής και οι διαστάσεις του αγωγού επιλέγονται με τεχνοοικονομικά κριτήρια, επιδιώκεται δηλαδή η βέλτιστη οικονομικά λύση που πληροί συγκεκριμένα τεχνικά κριτήρια σχεδιασμού. Η όδευση του αγωγού εξαρτάται από τη θέση της δεξαμενής φόρτισης και του σταθμού παραγωγής, την υφιστάμενη τοπογραφία και τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Το μήκος του μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα.

Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας, συνθετικά υλικά (PVC, GRP), οπλισμένο ή άοπλο σκυρόδεμα (σήραγγες) και, σπανιότερα, ξύλο. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού σχετίζεται με τις επιτόπου συνθήκες εγκατάστασης, τις αναμενόμενες καταπονήσεις και τα διατιθέμενα μέσα και κατασκευαστικές δυνατότητες. Βασικά κριτήρια για την επιλογή διαμέτρου είναι ο περιορισμός των υδραυλικών απωλειών, του κόστους καθώς και η διατήρηση της ταχύτητας σε συγκεκριμένα επίπεδα (1 έως 5 m/s). Προκειμένου όμως να μειωθεί το κόστος μεταφοράς συχνά επιλέγονται δύο ή τρεις διαφορετικές κατηγορίες

διαμέτρου με τους μικρότερους σωλήνες να τοποθετούνται μέσα στους μεγαλύτερους κατά τη μεταφορά (nesting).

Η εγκατάσταση του αγωγού μπορεί να είναι υπόγεια ή επιφανειακή, με πιο συνηθισμένη την πρώτη. Ο αγωγός τοποθετείται συνήθως σε σκάμμα και επανεπιχώνεται, τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους, όσο και για προστασία από φυσική ή ανθρωπογενή φθορά. Παράλληλα στον αγωγό προσαγωγής τοποθετούνται και οι απαραίτητες καλωδιώσεις για τον τηλεέλεγχο των θυροφραγμάτων της υδροληψίας από το σταθμό παραγωγής.

Απαραίτητα συνοδευτικά τεχνικά έργα του αγωγού είναι οι εξαεριστικές βαλβίδες και οι βαλβίδες εκκένωσης φερτών, στα ψηλά και χαμηλά σημεία της χάραξης αντίστοιχα και το σύστημα αντιπληγματικής προστασίας, εφόσον είναι απαραίτητο. Σε συνθήκες απότομης εκκίνησης ή παύσης της λειτουργίας (απόρριψη φορτίου) μπορεί να αναπτυχθούν στον αγωγό υποπίεσεις ή υπερπίεσεις πολλαπλάσιες της στατικής, λόγω μεταβατικών δυναμικών φαινομένων που συνοψίζονται στον όρο υδραυλικό πλήγμα. Η ένταση του πλήγματος, που μπορεί να είναι καταστρεπτικό, εξαρτάται από τον τύπο στροβίλου, το μήκος, τη διατομή και το υλικό του αγωγού αλλά και τις συνθήκες εκκίνησης και παύσης. Οι συνήθεις κατασκευές περιορισμού του πλήγματος είναι οι βαλβίδες ανακούφισης, οι δεξαμενές και οι πύργοι ανάπλασης.

Οι μεγάλες πιέσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό, συμπεριλαμβανομένων των υπερπίεσεων λόγω πλήγματος, έχουν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών ωστικών δυνάμεων (thrust forces) στις θέσεις όπου υπάρχουν γωνίες ή αλλαγές διαμέτρου. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του αγωγού και, στην περίπτωση που είναι αυτοφερόμενος να περιοριστούν οι τάσεις στα τοιχώματα, κατασκευάζονται σώματα αγκύρωσης (thrust blocks) από σκυρόδεμα με τα οποία μεταφέρονται οι ωθήσεις στο έδαφος. Οι διαστάσεις των σωμάτων αγκύρωσης εξαρτώνται από την εσωτερική πίεση σχεδιασμού, τη διάμετρο του αγωγού και τέλος τις υφιστάμενες εδαφικές συνθήκες.

2.4 Ο σταθμός παραγωγής

Ο σταθμός παραγωγής είναι ο χώρος όπου καταλήγει το σύστημα προσαγωγής και εγκαθίσταται ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, δηλαδή οι στρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου του έργου. Ο τύπος και το πλήθος των στροβίλων επιλέγεται ανάλογα με τα μεγέθη σχεδιασμού (παροχή, ύψος πτώσης) και το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας του σταθμού. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι στροβίλων είναι οι Francis, Kaplan, Pelton και Turgo. Από αυτούς οι δύο πρώτοι χρησιμοποιούνται κυρίως για μικρά και μεσαία ύψη πτώσης και μεγάλες παροχές, ενώ οι δύο τελευταίοι για μεγάλα ύψη πτώσης και έχουν μεγάλο εύρος παροχών λειτουργίας.

Η διάταξη του σταθμού παραγωγής εξαρτάται από την υφιστάμενη τοπογραφία, τις συνθήκες ροής του φυσικού υδατορεύματος και τον τύπο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η χωροθέτηση του εξοπλισμού είναι διαφορετική για στρόβιλο οριζοντίου, κατακόρυφου και διαγώνιου άξονα. Ο σταθμός παραγωγής μπορεί να είναι υπόγειος ή επιφανειακός. Στη δεύτερη περίπτωση ο όγκος και η χωροθέτηση του σταθμού υπόκεινται στους όρους δόμησης της περιοχής και πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένες αποστάσεις από τα όρια του οικοπέδου και την οριογραμμή του υδατορεύματος.

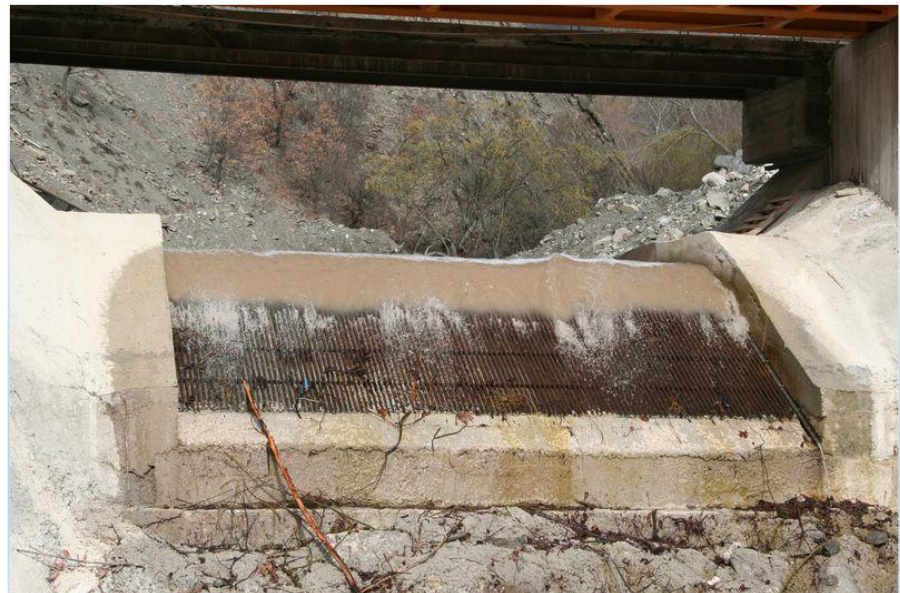
Μετά την έξοδο από το στρόβιλο το νερό αποδίδεται στη φυσική ροή του υδατορεύματος μέσω της διώρυγας φυγής (outlet channel). Η διώρυγα φυγής είναι σχεδιασμένη ώστε να διατηρούνται ομαλές συνθήκες ελεύθερης ροής και να αποφεύγεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης, όταν πρόκειται για στρόβιλους αντίδρασης (Kaplan, Francis).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται (Εικόνες 2.2 έως 2.7) τα βασικά τεχνικά έργα υδροληψίας του ΜΥΗ Σταθμού Θερμόρεμα με σκοπό την αντιστοιχία τους με το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται το έργο υδροληψίας και η υπερχείλιση, ενώ στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η εσχάρα υδροληψίας. Στη συνέχεια, στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η διώρυγα προσαγωγής με τις παγίδες φερτών και στην Εικόνα 2.5 οι δεξαμενές εξάμμοσης. Ακολούθως, στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται η δεξαμενή φόρτισης και τέλος στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ο αγωγός προσαγωγής στη φάση τοποθέτησης του. Ο σταθμός, συγκεκριμένα, βρίσκεται στη Σπερχειάδα Φθιοτίδας με εγκατεστημένη ισχύ 1.95 MW και τέθηκε σε λειτουργία το έτος 2003.



Εικόνα 2.2 Υδροληψία και υπερχειλίση

(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2015)



Εικόνα 2.3 Εσχάρα υδροληψίας

(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2015)



Εικόνα 2.4 Διώρυγα προσαγωγής και παγίδες φερτών
(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2015)



Εικόνα 2.5 Δεξαμενές εξάμμοσης
(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2015)



Εικόνα 2.6 Δεξαμενή φόρτισης

(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2015)



Εικόνα 2.7 Αγωγός προσαγωγής

(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2015)

2.5 Υδροστρόβιλοι κατάλληλοι για ΜΥΗΕ

2.5.1 Francis

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Francis καλύπτουν το ευρύτερο πεδίο στο διάγραμμα παροχής-υδραυλικής πτώσεως και για τον λόγο αυτό η εφαρμογή τους είναι συχνότερη. Κατασκευάζονται τυποποιημένοι από μεγάλο πλήθος κατασκευαστών καλύπτοντας περιοχή ισχύος από 100 περίπου kW μέχρι 10 ή 15 MW. Επίσης προσφέρονται σε διάφορες διαμορφώσεις και διατάξεις που αναφέρονται κυρίως στη διεύθυνση του άξονα περιστροφής και στο τμήμα εισόδου (Παπαντώνης, 2008).

Συγκεκριμένα, ο άξονας περιστροφής μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην οριζόντια διάταξη ο δρομέας του υδροστροβίλου εδράζεται συνήθως σε δικά του έδρανα. Με τον τρόπο αυτόν η ηλεκτρική γεννήτρια είναι τυποποιημένη και απλής κατασκευής, ενώ η άτρακτος της γεννήτριας συνδέεται με αυτή του υδροστροβίλου μέσω τυποποιημένου ελαστικού συνδέσμου. Αντίθετα, στην κατακόρυφη διάταξη ο δρομέας του υδροστροβίλου είναι δυνατόν να εδράζεται στα έδρανα της ηλεκτρικής γεννήτριας η οποία όμως για τον λόγο αυτόν είναι ειδικής σχεδίασης. Η απουσία ελαστικού συνδέσμου μεταξύ γεννήτριας και υδροστροβίλου έχει ως πλεονέκτημα να καταλαμβάνει η μονάδα μικρότερο χώρο, όμως απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην εγκατάσταση της μονάδας και συγκεκριμένα στην ευθυγράμμισή της.



Εικόνα 2.8 Δρομείς υδροστροβίλων τύπου Francis

(Πηγή: Κωτσοβίνος Ν., Σύντομες Σημειώσεις Για Υδροστροβίλους, 2009)

Όσον αφορά το τμήμα εισόδου διακρίνονται δύο επιλογές: να είναι μορφής σπειροειδούς κελύφους ή όχι. Στην δεύτερη περίπτωση διακρίνονται επίσης δύο δυνατότητες: να είναι τύπου ανοιχτού θαλάμου για μικρές ισχύς και μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ή να είναι μορφής κλειστού θαλάμου. Ο δρομέας κατασκευάζεται συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα, συγκολλητός, ενώ για μικρά μεγέθη δρομέα μπορεί να κατασκευαστεί χυτός από μπρούντζο νικελίου-αλουμινίου.

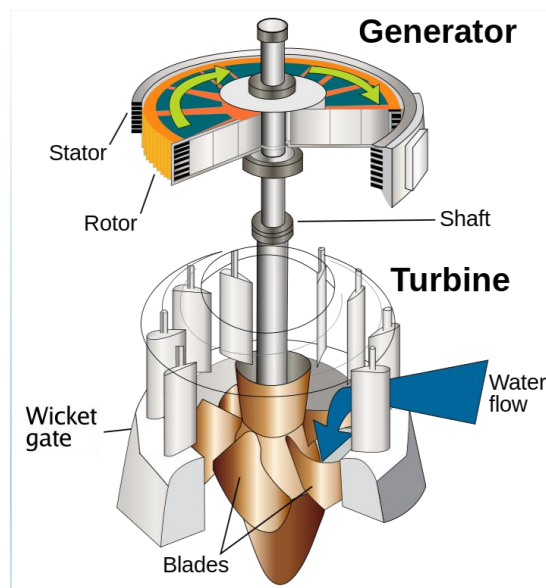
Στους υδροστροβίλους Francis κλειστού θαλάμου η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων και ο δρομέας περιβάλλονται από κλειστό θάλαμο, αντί του σπειροειδούς κελύφους. Το νερό στο εσωτερικό του θαλάμου και μέχρι την είσοδό του στην στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων δεν ακολουθεί προκαθορισμένη διαδρομή και ως αποτέλεσμα ο ολικός βαθμός είναι της τάξεως του 0.85-0.87, δηλαδή είναι χαμηλότερος από ότι στην περίπτωση εισόδου με σπειροειδές κέλυφος. Η μείωση του βαθμού απόδοσης αντισταθμίζεται εν μέρει από το μειωμένο κόστος του υδροστροβίλου.

Αντίθετα, οι υδροστροβίλοι Francis ανοικτού θαλάμου δεν φέρουν σπειροειδές κέλυφος και εμβαπτίζονται σε φρεάτιο τροφοδοσίας (θάλαμος). Το χαμηλότερο κόστος λόγω της απουσίας του σπειροειδούς κελύφους και η εύκολη προσπέλαση στον δρομέα και την στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων αποτελούν τα βασικότερα πλεονεκτήματα των υδροστροβίλων αυτού του τύπου. Ο δρομέας περιβάλλεται από στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων η οποία προσδίδει στο νερό την απαιτούμενη συστροφή. Οι ελάχιστες διαστάσεις του θαλάμου τροφοδοσίας καθορίζονται σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή του υδροστροβίλου ώστε να εξασφαλίζονται ομοιόμορφες συνθήκες τροφοδοσίας σε όλη την περιφέρεια. Η τιμή της υδραυλικής πτώσης σχετίζεται άμεσα με το ύψος του ανοιχτού φρεατίου τροφοδοσίας και ως αποτέλεσμα οι υδροστροβίλοι αυτού του τύπου καλύπτουν περιοχή χαμηλών τιμών της υδραυλικής πτώσης (από 2 έως 10 m).

2.5.2 Αξονικής ροής (σωληνωτοί, βολβοειδείς, Kaplan)

Οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής προσφέρονται τυποποιημένοι σε μεγάλη ποικιλία διαμορφώσεων. Η κλασική διαμόρφωση (Εικόνα 2.9) υδροστροβίλου τύπου Kaplan (σπειροειδές κέλυφος και ρυθμιστικά πτερύγια σε ακτινικό επίπεδο) σπάνια προσφέρεται για μικρές ισχύς καθώς για την περιοχή αυτή έχουν αναπτυχθεί τύποι υδροστροβίλων αξονικής ροής μικρότερου όγκου και κόστους. Από τις συνηθέστερες διαμορφώσεις υδροστροβίλων

αξονικής ροής μικρής ισχύος είναι ο σωληνωτός υδροστρόβιλος και ο βολβοειδής στις διάφορες παραλλαγές τους.



Εικόνα 2.9 Υδροστρόβιλος τύπου Kaplan

(Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_turbine)

Οι σωληνωτοί υδροστρόβιλοι είναι απλούστεροι στην κατασκευή, εγκατάσταση και συντήρηση από έναν αντίστοιχο βολβοειδή. Επιπλέον καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και τα έργα πολιτικού μηχανικού για την κατασκευή του Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΥΗΣ) δεν είναι το ίδιο περίπλοκα. Όμως για κατασκευαστικούς λόγους δεν προσφέρονται για ισχύ μεγαλύτερη των 5-10 MW (ανάλογα με την κατασκευάστρια εταιρεία). Λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, οι σωληνωτοί υδροστρόβιλοι έχουν ουσιαστικά εκτοπίσει τους βολβοειδείς σε περιοχές λειτουργίας που καλύπτονται από τους σωληνωτούς, δηλαδή για ισχύ μέχρι 7 MW περίπου. Τόσο οι σωληνωτοί υδροστρόβιλοι όσο και οι βολβοειδείς κατασκευάζονται για διαθέσιμη υδραυλική πτώση μέχρι 20 mΣΥ ή και μικρότερη ανάλογα με τον τύπο. Για τιμές της υδραυλικής πτώσης μεγαλύτερες των 20 mΣΥ περίπου, δηλαδή εκτός των ορίων κατασκευής των σωληνωτών και βολβοειδών υδροστρόβιλων, θα πρέπει να επιλεγεί υδροστρόβιλος Kaplan με σπειροειδές κέλυφος ή υδροστρόβιλος Francis.

Στους υδροστρόβιλους αξονικής ροής μικρής ισχύος και με σκοπό τη μείωση του κόστους είναι δυνατή η επιλογή διπλής ή απλής ρύθμισης. Στην περίπτωση της διπλής ρύθμισης, τόσο τα ρυθμιστικά πτερύγια όσο και τα πτερύγια του δρομέα έχουν δυνατότητα περιστροφής με σκοπό τη βέλτιστη κάθε φορά λειτουργία τους. Αντίθετα, στην απλή ρύθμιση έχουν δυνατότητα περιστροφής είτε τα πτερύγια του δρομέα είτε τα ρυθμιστικά πτερύγια, όχι

συνδυαστικά όμως. Η διαφορά κόστους μεταξύ διπλής και απλής ρύθμισης είναι της τάξεως του 10%, όμως σε αντάλλαγμα, η καμπύλη του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου γίνεται απότομη, γεγονός που έχει αντίκτυπο στην παραγωγή ενέργειας και το εύρος λειτουργίας της μονάδας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε η κλασική διαμόρφωση του υδροστροβίλου Kaplan (σπειροειδές κέλυφος, ακτινική στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων, αξονικής ροής δρομέας) έχει σχεδόν εκτοπιστεί από τους άλλους τύπους αξονικών υδροστροβίλων για τις μικρές ισχύς και για τον λόγο αυτό κατασκευάζονται από λίγες μόνο εταιρίες. Το κυριότερο πεδίο εφαρμογής τους είναι η αντικατάσταση των υδροστροβίλων παλαιών μικρών ΥΗΕ που ήταν ήδη εξοπλισμένοι με μικρούς υδροστροβίλους Kaplan.

2.5.3 Pelton

Οι υδροστροβίλοι τύπου Pelton (Εικόνα 2.10) είναι κατάλληλοι για μεγάλες τιμές της υδραυλικής πτώσης. Κατασκευάζονται τυποποιημένοι για ισχύ από 50 W (για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μεμονωμένων ορεινών κατοικιών) μέχρι 10 ή και 15 MW. Οι υδροστροβίλοι Pelton πολύ μικρής ισχύος (μέχρι περίπου 70 kW για ένα ακροφύσιο) κατασκευάζονται συνήθως με τον άξονα κατακόρυφο, καθώς η γεννήτρια, λόγω του μικρού μεγέθους της, εδράζεται στο κέλυφος του υδροστροβίλου και έχει κοινή άτρακτο με τον δρομέα.

Οι μεγαλύτεροι τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Pelton είναι οριζοντίου άξονα, διάταξη που διευκολύνει την εγκατάσταση και την συντήρηση, όμως δεν επιτρέπει την διάταξη περισσότερων από δύο ακροφύσια. Στην περίπτωση περισσότερων των δύο ακροφυσίων θα πρέπει ο άξονας να είναι κατακόρυφος έτσι ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυσμενής επίδραση στις δέσμες από τα απόνερα του δρομέα, αν και στις μικρής ισχύος μονάδες Pelton η διάταξη περισσότερων των δύο ακροφυσίων είναι κατά κανόνα αντισυμβατική (υψηλότερο κόστος, μεγαλύτερος συνολικά χώρος).



Εικόνα 2.10 Διάταξη υδροστροβίλου Pelton οριζοντίου άξονα περιστροφής με ένα ακροφύσιο

(Πηγή: <http://www.turbinesinfo.com/what-is-a-turbine/>)

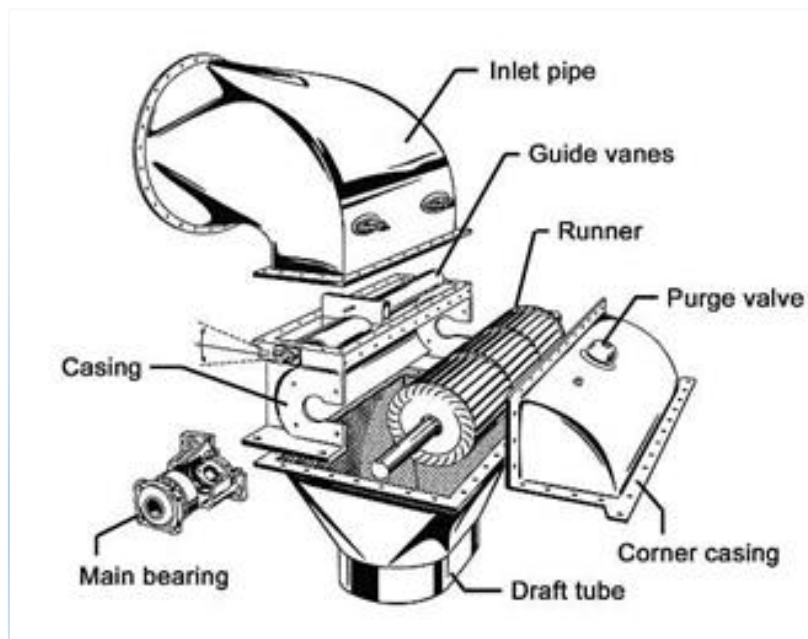
Ο δρομέας (Εικόνα 2.11) κατασκευάζεται κατά κύριο λόγο ολόσωμος από ανοξείδωτο χάλυβα. Τέλος, επισημαίνεται ότι για τον ίδιο δρομέα και την ίδια ταχύτητα περιστροφής, η αύξηση της παροχής και άρα και της ισχύος επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση περισσότερων ακροφυσίων.



Εικόνα 2.11 Πτερωτή υδροστροβίλου τύπου Pelton και μορφή σκαφιδίων
(Πηγή: <http://www.hydrohrom.cz/EN/horizontal-compact-pelton-turbine.html>)

2.5.4 Cross-Flow

Ο υδροστρόβιλος Cross-Flow (Εικόνα 2.12) χαρακτηρίζεται συχνά και ως Mitchell ή Banki (από τα ονόματα των μηχανικών που τους ανέπτυξαν). Χαρακτηρίζεται από τον δρομέα μορφής τυμπάνου ο οποίος λειτουργεί (δηλαδή μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική) σε δύο φάσεις: η πρώτη κατά την είσοδο του νερού στο πάνω σημείο του τυμπάνου και η δεύτερη κατά την έξοδο του νερού από το τύμπανο, στην χαμηλότερη περιοχή του τυμπάνου. Η ροή στον δρομέα είναι ουσιαστικά ισόθλιπτη (δηλαδή πρόκειται για υδροστρόβιλο δράσεως) και δισδιάστατη. Το νερό, μετά την έξοδο από τον δρομέα οδηγείται λόγω βαρύτητας, στη διάωρυγα απαγωγής και για τον λόγο αυτό ο υδροστρόβιλος Cross-Flow τοποθετείται πάντοτε υψηλότερα από τη στάθμη απαγωγής. Η τροφοδοσία του δρομέα και η ρύθμιση της παροχής γίνεται από ένα ορθογωνικής διατομής ακροφύσιο εισόδου μέσω μιας διάταξης η οποία έχει συνήθως την μορφή πεταλούδας.



Εικόνα 2.12 Υδροστρόβιλος Cross-Flow

(Πηγή: <http://www.freeflowhydro.co.uk/>)

Ο υδροστρόβιλος κατασκευάζεται πάντοτε με οριζόντια την άτρακτο, γεγονός που διευκολύνει τη μεταφορά ισχύος στην ηλεκτρική γεννήτρια, είτε με κατευθείαν σύμπλεξη είτε μέσω μετάδοσης με γραναζωτό κιβώτιο ή με ιμάντα. Όπως και στους άλλους τύπους υδροστροβίλων η οριζόντια διάταξη διευκολύνει την εγκατάσταση και συντήρηση όμως αυξάνει τις απαιτούμενες διαστάσεις του ΥΗΣ.

Γίνεται φανερό ότι πρόκειται για υδροστρόβιλο απλής κατασκευής ο οποίος μπορεί να κατασκευαστεί από ένα μηχανουργείο χωρίς την ανάγκη ειδικών εργαλειομηχανών και αυτό ακριβώς είναι το πλεονέκτημα του. Επίσης, απλή είναι και η έδραση της ατράκτου, η οποία είναι αμφιέριστη και στην οποία δεν αναπτύσσονται αξονικές δυνάμεις (άρα δεν απαιτείται ισχυρό ωστικό έδρανο). Το βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου υδροστροβίλου έγκειται στο ότι η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης δεν ξεπερνά το 84 %, όμως η καμπύλη είναι αρκετά επίπεδη δίνοντας έτσι τη δυνατότητα καλής λειτουργίας και σε μερικά φορτία.

2.5.5 Turgo

Ο υδροστρόβιλος Turgo πρόκειται για υδροστρόβιλο αντιδράσεως ο οποίος διαφέρει από τον Pelton κυρίως στο ότι η δέσμη προσπίπτει στον δρομέα υπό κλίση της τάξεως των 20° ως προς επίπεδο κάθετο προς τον άξονα του δρομέα (η γωνία αυτή είναι μηδενική σε περίπτωση του υδροστροβίλου Pelton στον οποίο η δέσμη βρίσκεται στο επίπεδο το κάθετο προς τον άξονα του δρομέα. Συνέπεια αυτής της επιλογής είναι ότι η ροή και ως επέκταση ο δρομέας δεν είναι συμμετρικοί.

Ο δρομέας (Εικόνα 2.13) φέρει περύγια που περιμετρικά συγκρατούνται από στεφάνη ενώ το πλήθος τους (περίπου 20 με 22) είναι παρόμοιο με αυτό των σκαφιδίων υδροστροβίλου Pelton. Όπως και στους υδροστροβίλους Pelton, ο υδροστρόβιλος Turgo, μπορεί να εξοπλιστεί με ένα ή δύο ακροφύσια, όχι όμως περισσότερα κυρίως λόγω έλλειψης χώρου.



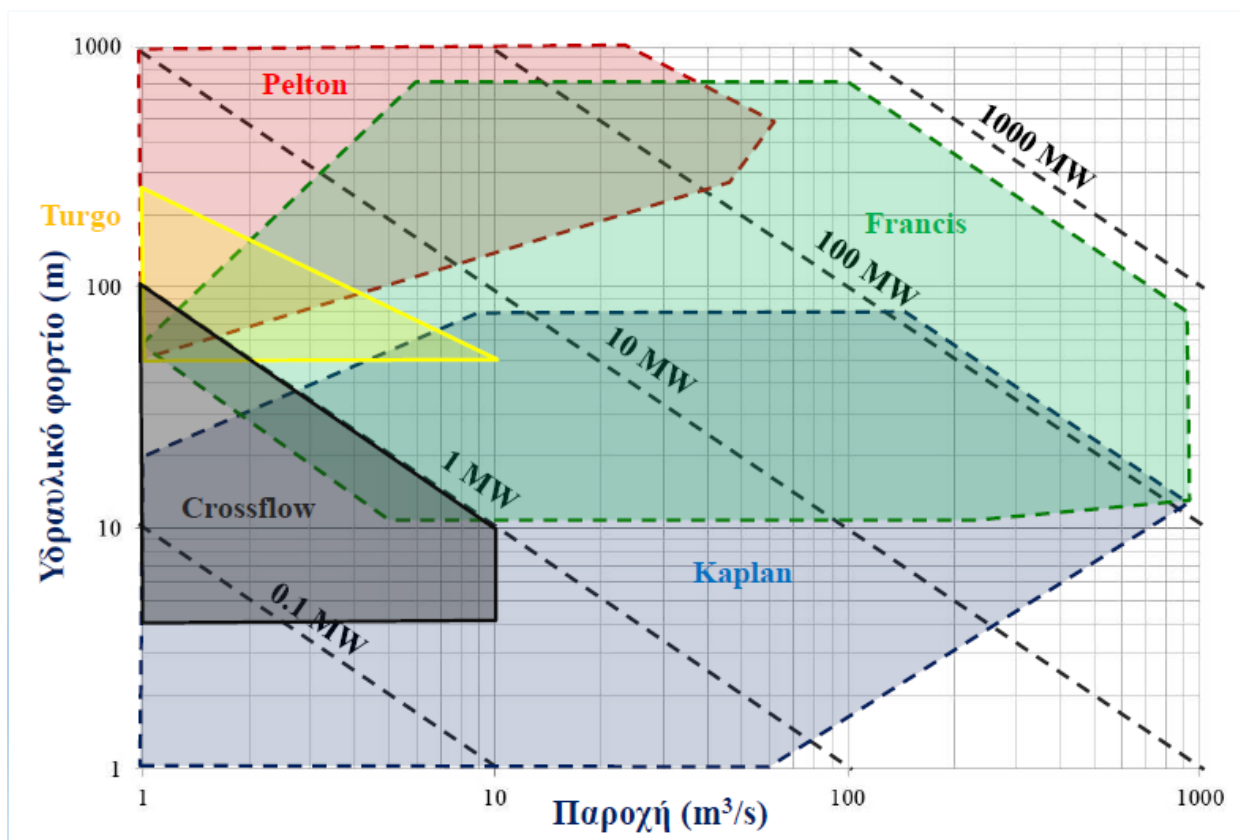
Εικόνα 2.13 Δρομέας υδροστροβίλου Turgo
(Πηγή: <http://www.microhydropower.com>)

Οι υδροστροβίλοι Turgo καλύπτουν μια περιοχή ανάμεσα στους υδροστροβίλους Pelton με πολλά ακροφύσια και τους υδροστροβίλους Francis με υψηλή τιμή της υδραυλικής πτώσης όταν είναι επιθυμητή η λειτουργία σε μερικά φορτία. Τέλος, έχουν όλα τα χαρακτηριστικά των υδροστροβίλων Francis όσον αφορά τη λειτουργία σε μερικά φορτία, όμως καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο λόγω της κλίσης που έχει η δέσμη.

2.6 Κριτήρια επιλογής υδροστροβίλου

Ο τύπος, η γεωμετρία και οι διαστάσεις του υδροστροβίλου καθορίζονται κατά κύριο λόγο από τα ακόλουθα κριτήρια:

- Το καθαρό ύψος πτώσης
- Το εύρος των παροχών του νερού που διέρχεται από τον στρόβιλο
- Την ταχύτητα περιστροφής
- Προβλήματα σπηλαιώσης
- Το κόστος



Διάγραμμα 2.1 Εύρος εφαρμογής στροβίλων
(Πηγή: Μαμάσης κ.α., Γενική διάταξη Υ/Η έργων, 2015)

Στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζεται το εύρος λειτουργίας των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων σε συνάρτηση με το ύψος πτώσης και την παροχή. Το ύψος πτώσης από μόνο του αποτελεί το πρώτο κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου στροβίλου (Paish, 2002). Ο επόμενος πίνακας (Πίνακας 2.1) δείχνει το εύρος του επιτρεπόμενου ύψους πτώσης για τους διάφορους τύπους υδροστροβίλων.

Πίνακας 2.1 Επιτρεπόμενο ύψος πτώσης για κάθε τύπο στροβίλου

Τύπος στροβίλου	Επιτρεπόμενο ύψος πτώσης
Karlan και έλικας	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 250$
Pelton	$70 < H < 1200$
Cross-Flow	$6 < H < 200$
Turgo	$40 < H < 200$

Για το ίδιο καθαρό ύψος πτώσης, είναι δυσκολότερη η κατασκευή ορισμένων στροβίλων από ότι άλλων, συνεπώς είναι και ακριβότεροι. Για παράδειγμα, στα μικρά ύψη πτώσης, ένας στροβίλος τύπου έλικας είναι φθηνότερος από ένα στροβίλο Karlan που έχει σχεδιασθεί για την ίδια ονομαστική παροχή. Σε ένα σύστημα μέσου ύψους πτώσης, ένας στροβίλος εγκάρσιας ροής θα είναι φθηνότερος από ένα τύπου Francis, του οποίου ο δρομέας είναι πιο περίπλοκος όμως η απόδοση του υψηλότερη. Για περισσότερες πληροφορίες για τους βαθμούς απόδοσης των υδροστροβίλων βλ. Σούλης, 1994.

2.7 Αποδοτικότητα υδροστροβίλου

Ως αποδοτικότητα ενός υδροστροβίλου ορίζεται ο λόγος της ισχύος που παρέχει ο στροβίλος (μηχανική ισχύς μεταδιδόμενη από τον άξονα του στροβίλου) προς την απορροφούμενη ισχύ (υδραυλική ισχύς η οποία ισοδυναμεί με την μετρούμενη παροχή υδάτων βάσει του καθαρού ύψους πτώσης). Με σκοπό τον υπολογισμό της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος η αποδοτικότητα του στροβίλου πολλαπλασιάζεται με αυτές του πολλαπλασιαστή στροφών (εάν χρησιμοποιείται) και της ηλεκτρογεννήτριας.

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.5 που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, η αποδοτικότητα μειώνεται ραγδαία κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής

παροχής. Ο υδροστρόβιλος προορίζεται από κατασκευής του να λειτουργεί κοντά ή ακριβώς στο σημείο της καλύτερης απόδοσης του, συνήθως στο 80% της μέγιστης παροχής. Καθώς η ροή αποκλίνει από αυτήν τη συγκεκριμένη τιμή, αποκλίνει και η υδραυλική αποδοτικότητα του στρόβιλου (Voros *et al*, 2000).

Το εύρος των παροχών που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται, και συνακόλουθα η παραγόμενη ενέργεια, διαφέρει εάν:

- η μονάδα θα πρέπει να παρέχει ηλεκτρισμό σε ένα μικρό δίκτυο ή
- η μονάδα προορίζεται για σύνδεση με ένα μεγάλο δίκτυο διανομής

Στην πρώτη περίπτωση, θα πρέπει να επιλεγεί μια παροχή που να επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρισμού κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση, η ονομαστική παροχή θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται τα καθαρά έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Οι στρόβιλοι Kaplan και Pelton διπλής ρύθμισης λειτουργούν ικανοποιητικά σε ένα ευρύ φάσμα ροών (πάνω από το ένα πέμπτο της ονομαστικής παροχής). Οι στρόβιλοι Kaplan μονής ρύθμισης έχουν αποδεκτή αποδοτικότητα πάνω από το ένα τρίτο και οι στρόβιλοι Francis από το ήμισυ της ονομαστικής παροχής. Κάτω από το 40% της ονομαστικής παροχής τους, οι στρόβιλοι Francis μπορεί να παρουσιάσουν αστάθεια η οποία οδηγεί σε κραδασμούς ή μηχανικές δονήσεις. Οι στρόβιλοι τύπου έλικα με σταθερά πτερύγια μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά μόνο σε ένα περιορισμένο εύρος κοντά στην ονομαστική παροχή τους. Θα πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι η αποδοτικότητα των στρόβιλων έλικα μονής ρύθμισης είναι εν γένει καλύτερη από αυτή των μηχανών με ρυθμιζόμενο δρομέα.

3. Στάδια μελέτης και αλγόριθμος υπολογισμού ΜΥΗΕ

Μελετάται η κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού έργου σε γνωστή θέση ποταμού και με γνωστό καθαρό ύψος πτώσης. Σκοπός της μελέτης όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι η κατασκευή ενός υπολογιστικού μοντέλου το οποίο θα υπολογίζει την ενεργειακή παραγωγή του υδροηλεκτρικού σταθμού. Το μοντέλο αυτό θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το μηχανικό είτε σε προκαταρκτικό στάδιο με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης για τον σταθμό που θα κατασκευαστεί, είτε σε στάδιο ελέγχου για έναν ήδη υπάρχον υδροηλεκτρικό σταθμό με σκοπό την πιθανή επέκταση ή τροποποίηση του.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από υπάρχον υδροηλεκτρικό σταθμό έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται σε πραγματικά μεγέθη. Παράλληλα με αυτόν τον τρόπο υπήρχε η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα δεδομένα του υδροηλεκτρικού σταθμού που μελετήθηκε έτσι ώστε να ελέγχεται η ορθότητα και η αξιοπιστία του μοντέλου.

Για τη διερεύνηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τα υδρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα που αντιστοιχούν σε ένα υπάρχον δεδομένο Υδροηλεκτρικό Σταθμό. Θεωρείται δεδομένο καθαρό ύψος πτώσης. Για τη θέση υδροληψίας διατίθενται καθαρές μέσες ημερήσιες παροχές για περίοδο 10 υδρολογικών ετών. Τα δεδομένα που παρέχονται αντιστοιχούν σε 3653 ημέρες. Οι μέσες ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές που διατίθενται προέκυψαν από τις αρχικές μέσες ημερήσιες παροχές αφαιρώντας όμως την οικολογική παροχή. Τις ημέρες όπου η οικολογική παροχή ξεπερνάει τη μέση ημερήσια, η εκμεταλλεύσιμη ημερήσια παροχή τίθεται μηδέν.

$$Q_{εκμ.} = Q_{ημ.} - Q_{οικ.} \quad (3.1)$$

Σύμφωνα με το ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και αειφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008) η ελάχιστη απαιτούμενη οικολογική παροχή νερού που παραμένει στη φυσική κοίτη υδατορεύματος, αμέσως κατάντη του έργου υδροληψίας του υπό χωροθέτηση ΜΥΗΕ., πρέπει να εκλαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα εξής μεγέθη:

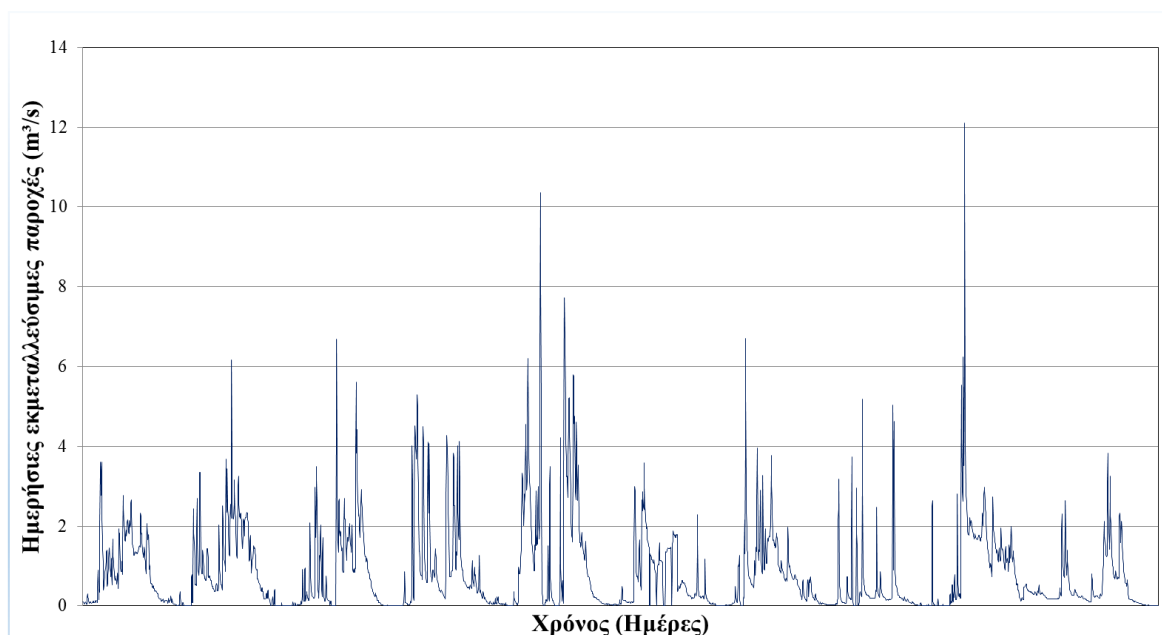
- 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου ή
- 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου ή
- 30 lt/sec σε κάθε περίπτωση

Η παραπάνω οδηγία ορίζει ως εξαίρεση την περίπτωση να απαιτείται τεκμηριωμένα η αύξησή της οικολογικής παροχής, λόγω των απαιτήσεων του κατάντη οικοσυστήματος (ύπαρξη σημαντικού οικοσυστήματος). Η οικολογική παροχή στη συγκεκριμένη μελέτη υπολογίστηκε ως το 30% της μέσης τιμής των μέσων μηνιαίων παροχών των θερινών μηνών Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου.

$$Q_{οικ.} = 0.3 * \frac{Q_{ΙΟΥΝ.} + Q_{ΙΟΥΛ.} + Q_{ΑΥΓ.}}{3} \quad (3.2)$$

Αρχικά ποσοτικοποιούνται τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων. Προκύπτουν η μέση παροχή εκμετάλλευσης, η καμπύλη διάρκειας παροχής, η καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής και η καμπύλη ποσοστού όγκου-χρόνου. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να γίνει μια πρώτη χονδρική εκτίμηση της παροχής λειτουργίας. Η παροχή λειτουργίας που αξιοποιεί καλύτερα την καμπύλη διάρκειας-παροχής, δηλαδή καταλαμβάνει το μεγαλύτερο εμβαδόν της καμπύλης, αποτελεί τη βέλτιστη υδρολογική και ενεργειακή λύση. Επισημαίνεται ότι οι λύσεις που γίνονται δεχτές στην συνέχεια ικανοποιούν τα νομοθετικά όρια για το ποσοστό χρόνου λειτουργίας αλλά και το ποσοστό όγκου αξιοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό χρόνου λειτουργίας πρέπει να ξεπερνάει το 30% για να είναι αποδεκτή η λύση που επιλέχθηκε καθώς και το ποσοστό όγκου αξιοποίησης πρέπει να ξεπερνάει το 75%.

Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται η ημερήσια χρονοσειρά εκμεταλλεύσιμων παροχών για τη θέση υδροληψίας που μελετάται.



Διάγραμμα 3.1 Χρονοσειρά ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών. Συγκεκριμένα υπολογίζεται η μέση παροχή εκμετάλλευσης ως ο μέσος όρος των εκμεταλλεύσιμων ημερήσιων παροχών των 10 υδρολογικών ετών που διατίθενται αφού αφαιρεθεί η οικολογική παροχή. Ακόμη υπολογίζονται η διασπορά, η τυπική απόκλιση, συντελεστής ασυμμετρίας και κύρτωσης της χρονοσειράς.

Πίνακας 3.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά χρονοσειράς ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών

Μέση τιμή	0.82
Διασπορά	1.18
Τυπική απόκλιση	1.08
Συντελεστής ασυμμετρίας	2.64
Συντελεστής κύρτωσης	11.92

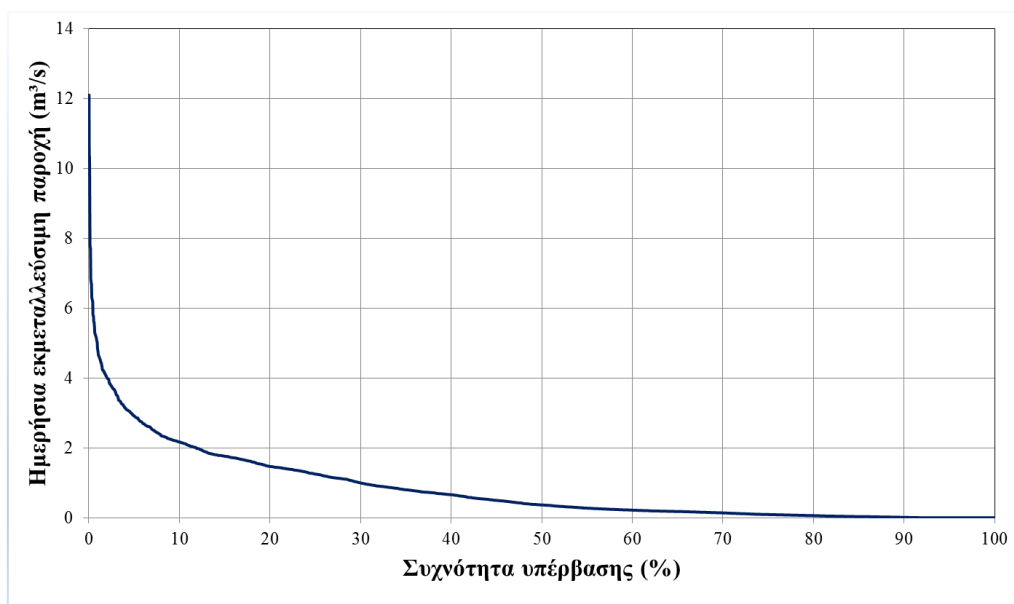
Με σκοπό την παράσταση της χρονικής μεταβλητότητας της παροχής υπολογίζεται στη συνέχεια η καμπύλη διάρκειας παροχής η οποία αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για την πορεία της μελέτης. Η καμπύλη διάρκειας παροχής είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στα υδροηλεκτρικά έργα χωρίς καθόλου ταμειυτήρα ή με πολύ μικρό ταμειυτήρα. Αντίθετα, στα υδροηλεκτρικά έργα με μεγάλο ταμειυτήρα δεν εξυπηρετεί ιδιαίτερα διότι εκεί χάνεται η πληροφορία της χρονικής ακολουθίας της παροχής στην εξεταζόμενη θέση.

Ως καμπύλη διάρκειας της παροχής σε μία εξεταζόμενη διατομή υδατορεύματος, ορίζεται η καμπύλη που παριστάνει την τιμή της παροχής συναρτήσει του χρονικού διαστήματος επί τις εκατό (% του χρόνου) για το οποίο η παροχή έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από αυτή της καμπύλης. Ουσιαστικά προκύπτει από τις μετρήσεις τις παροχής ταξινομημένες κατά σειρά μεγέθους και από την αδιαστατοποιημένη κλίμακα του χρόνου. Ανάλογα με τη χρονική βάση των παροχών οι καμπύλες κατατάσσονται σε ημερήσιες, μηνιαίες κ.λ.π. (Μιμίκου, 2006).

Όπως προκύπτει από την καμπύλη διάρκειας παροχής (Διάγραμμα 3.2) στο 0% του χρόνου αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή της παροχής και στο 100% του χρόνου αντιστοιχεί η ελάχιστη. Το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη διάρκειας της παροχής είναι ίσο προς τον όγκο του νερού που διέρχεται από την επιφάνεια εξόδου κατά το χρονικό διάστημα που αντιπροσωπεύει η κλίμακα του χρόνου.

Ένα από τα συχνότερα προβλήματα στη μελέτη υδροηλεκτρικών έργων, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, είναι η έλλειψη μετρήσεων παροχής στη θέση εγκατάστασης και άρα η έλλειψη καμπύλης διάρκειας παροχής. Αυτό το φαινόμενο είναι συχνό κυρίως για τα μικρά υδροηλεκτρικά τα οποία βρίσκονται σε δευτερεύοντες κλάδους ποταμών ή σε μικρά ποτάμια, όπου δεν υπάρχει δίκτυο μέτρησης παροχής ή είναι ελλιπές. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαία η μεταφορά της πληροφορίας της καμπύλης διάρκειας παροχών από άλλη θέση, όπου υπάρχουν μετρήσεις, μέσα στην ίδια υδρολογικά ομοιογενή περιοχή. Ο ασφαλέστερος τρόπος για να γίνει αυτή η μεταφορά είναι η εντοπική ανάλυση, δηλαδή η ανάπτυξη μέσα σε μία υδρολογικά ομοιογενή περιοχή ομοιώματος γεωγραφικής μεταβολής των παραμέτρων της καμπύλης διάρκειας, χρησιμοποιώντας ως στοιχεία εισόδου στο ομοίωμα ανεξάρτητα κλιματολογικά, μορφολογικά και άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις ή είναι εύκολο να μετρηθούν από χάρτες.

Για την κατασκευή της καμπύλης διάρκειας παροχής (Διάγραμμα 3.2) στην παρούσα μελέτη, αρχικά τοποθετούνται οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές σε φθίνουσα σειρά. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συχνότητα υπέρβασης $f = i/n$ όπου i είναι ο αύξων αριθμός της παρατήρησης διατεταγμένης σε φθίνουσα σειρά και n είναι το πλήθος των παρατηρήσεων.



Διάγραμμα 3.2 Καμπύλη διάρκειας παροχής

Ακολουθώς, με σκοπό την παράσταση των ποσοστών όγκου νερού που αντιστοιχούν στις διάφορες εκμεταλλεύσιμες ημερήσιες παροχές κατασκευάζεται η καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής. Για την κατασκευή της καμπύλης υπολογίζονται αρχικά οι ημερήσιοι εκμεταλλεύσιμοι όγκοι και στη συνέχεια τοποθετούνται σε αύξουσα σειρά:

$$V_i = Q_i * 24 * 3600 \quad (3.3)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η αθροιστική χρονοσειρά των όγκων αυτών:

$$SV_1 = V_1 \quad (3.4)$$

$$SV_i = SV_{i-1} + V_i \quad (3.5)$$

Ο συνολικός όγκος καθαρής εισροής (χωρίς την οικολογική παροχή) προκύπτει αθροίζοντας τους ημερήσιους εκμεταλλεύσιμους όγκους νερού από την παρακάτω σχέση:

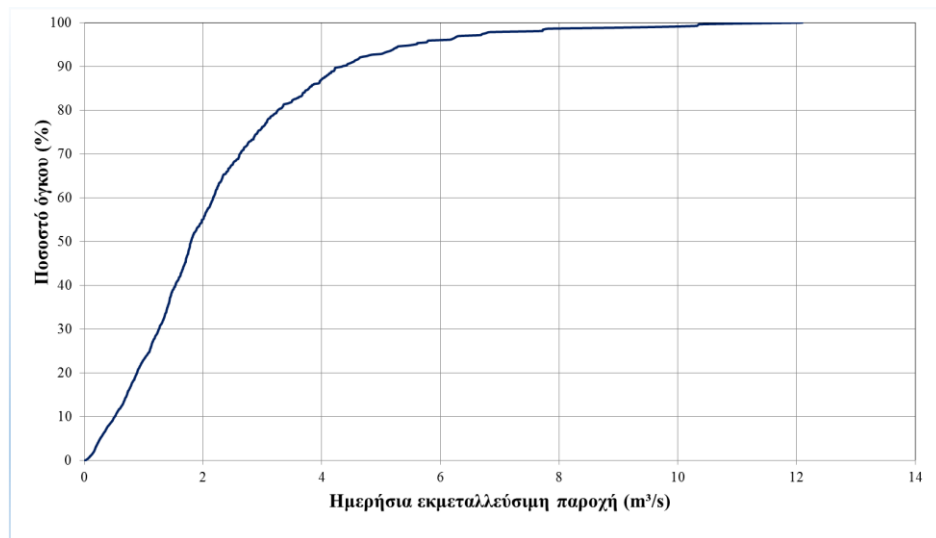
$$V_{tot} = \sum_1^n V_i \quad (3.6)$$

Υπολογίζεται τι ποσοστό (%) καταλαμβάνει κάθε αθροιστικός ημερήσιος εκμεταλλεύσιμος όγκος νερού επί του συνολικού όγκου καθαρής εισροής:

$$SV_i(\%) = \frac{SV_i}{V_{tot}} \quad (3.7)$$

Η καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής κατασκευάζεται τοποθετώντας στον άξονα y τα ποσοστά $SV_i(\%)$ και στον άξονα x τις εκμεταλλεύσιμες ημερήσιες παροχές σε αύξουσα σειρά.

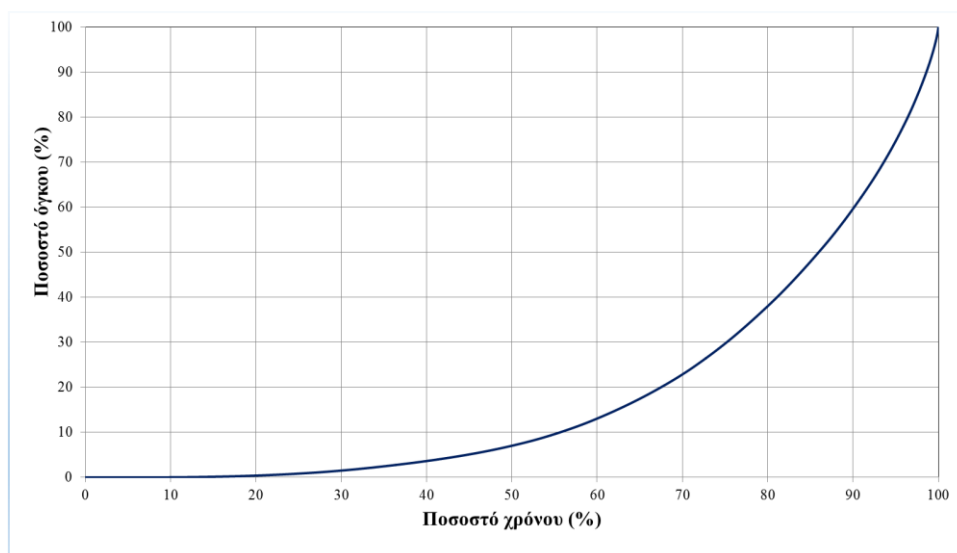
Η καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.3.



Διάγραμμα 3.3 Καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής

Από το διάγραμμα 3.3 εξάγουμε το συμπέρασμα ότι στις ημερήσιες παροχές από 0 έως 4 m³/s αντιστοιχεί το 85% του όγκου νερού.

Για την κατασκευή της καμπύλης ποσοστού όγκου-χρόνου χρησιμοποιείται η συχνότητα υπέρβασης $f = i/n$ των παρατηρήσεων όπου χρησιμοποιήθηκε και στην καμπύλη διάρκειας. Στον άξονα x τοποθετείται η συχνότητα υπέρβασης ενώ στον άξονα y η αθροιστική χρονοσειρά των όγκων όπως έχει υπολογιστεί από πάνω. Η καμπύλη ποσοστού όγκου-χρόνου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.4.



Διάγραμμα 3.4 Καμπύλη ποσοστού όγκου-χρόνου

Από το Διάγραμμα 3.4 προκύπτει ότι το 80% του εκμεταλλεύσιμου όγκου νερού εισέρχεται στο 32% του χρόνου, όπου ως χρόνος ορίζεται η διάρκεια των παρατηρήσεων και στην συγκεκριμένη μελέτη είναι 3653 ημέρες.

3.1 Μέση ετήσια δυνητική ενέργεια για σταθερό συντελεστή

Ο σταθμός θεωρούμε ότι λειτουργεί με ολικό συντελεστή απόδοσης σταθερό στην τιμή 0.85. Υπολογίζονται η ηλεκτρική ενέργεια και η ισχύς που παράγονται. Το στάδιο αυτό επιλέχθηκε με σκοπό την εκτίμηση των δυνητικών μεγεθών για πλήρη εκμετάλλευση.

Αρχικά υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια κάθε ημέρας σε kWh από τον παρακάτω τύπο:

$$E_i = \frac{n * \rho * g * H * V_i}{3600} \quad (3.8)$$

όπου $n=0.85$ είναι ο ολικός συντελεστής απόδοσης (θεωρείται σταθερός), $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ θεωρείται η πυκνότητα του νερού που εισέρχεται, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ (Νουτσόπουλος και Χριστοδούλου, 1996) είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H είναι το καθαρό ύψος πτώσης και τέλος V_i είναι οι ημερήσιοι εκμεταλλεύσιμοι όγκοι νερού.

Υπολογίζεται, τέλος, η μέση ετήσια δυνητική ηλεκτρική ενέργεια αθροίζοντας τις ημερήσιες ενέργειες και διαιρώντας με τον αριθμό των ετών του δείγματος:

$$E_{δυν.} = \left(\sum_i^n E_i \right) / 10 \quad (3.9)$$

3.2 Ετήσια ενέργεια για συγκεκριμένο τύπο στροβίλου με δεδομένη ονομαστική παροχή

Στη συνέχεια μελετάται η λειτουργία του υδροηλεκτρικού σταθμού ανάλογα με τον στρόβιλο που χρησιμοποιείται. Εκτιμάται ονομαστική παροχή από τον μελετητή, σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έργου. Η ονομαστική παροχή στροβίλου αποτελεί το μέγεθος από το οποίο κρίνεται η τελική ενεργειακή παραγωγή και επιλέγεται κατά περίπτωση από τον μελετητή. Γίνεται η παραδοχή ότι ο στρόβιλος λειτουργεί από το 10% της ονομαστικής παροχής του και πάνω. Για παροχές μικρότερες του 10% της ονομαστικής του, ο στρόβιλος δεν λειτουργεί καθόλου και το νερό δεν αξιοποιείται. Για παροχές όμως μεγαλύτερες του 100% της ονομαστικής, ο στρόβιλος λειτουργεί με την ονομαστική του παροχή και η υπόλοιπη παροχή μένει ανεκμετάλλευτη. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ένας στρόβιλος 3 m³/s οι παροχές που θα αξιοποιεί είναι από 0.3 m³/s έως 3 m³/s. Για παροχή 0.1 m³/s ο στρόβιλος δεν θα λειτουργήσει καθόλου και για παροχή 3.5 m³/s ο στρόβιλος θα αξιοποιήσει μόνο μέχρι και τα 3 m³/s.

Ο στρόβιλος, στο διάστημα λειτουργίας του, λειτουργεί με έναν συντελεστή απόδοσης που εξαρτάται από τον τύπο του στροβίλου αλλά και το ποσοστό της παροχής που εισέρχεται προς την ονομαστική παροχή του (Q/Q₀). Στη συνέχεια εξετάζονται δύο περιπτώσεις λειτουργίας στροβίλων. Η πρώτη αντιστοιχεί στην ιδεατή περίπτωση σταθερού συντελεστή στροβίλου από το 10 έως το 100% της ονομαστικής παροχής του. Η δεύτερη περίπτωση αντιστοιχεί στην επιλογή τυπικού στροβίλου εμπορίου.

3.2.1 Σταθερός συντελεστής απόδοσης

Θεωρείται σταθερός ολικός συντελεστής εγκατάστασης ίσος με 0.85. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί για παράδειγμα σε έναν ιδεατό στρόβιλο που λειτουργεί με σταθερό συντελεστή απόδοσης 0.885 και συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού 0.96. Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού επεξηγείται στη συνέχεια. Ο στρόβιλος

θεωρείται ότι λειτουργεί από το 10 έως το 100% της ονομαστικής του παροχής (Q_0) με σταθερό συντελεστή απόδοσης 0.885.

Υπολογίζεται επομένως η χρονοσειρά ημερήσιων ενεργειών σε kWh ξεχωριστά για τα τρία διακριτά διαστήματα των παροχών:

i. για $Q_i < 0.1 * Q_0$

$$E_i = 0 \quad (3.10i)$$

ii. για $Q_i \geq 0.1 * Q_0$ και $Q_i \leq Q_0$

$$E_i = n_{tot} * \rho * g * H * Q_i * 24 \quad (3.10ii)$$

iii. για $Q_i > Q_0$

$$E_i = n_{tot} * \rho * g * H * Q_0 * 24 \quad (3.10iii)$$

όπου $n_{tot}=0.85$ είναι ο ολικός συντελεστής απόδοσης (θεωρείται σταθερός), $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ θεωρείται η πυκνότητα του νερού που εισέρχεται, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H είναι το καθαρό ύψος πτώσης, Q_i είναι οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές νερού και Q_0 είναι η παροχή λειτουργίας της εγκατάστασης.

3.2.2 Μεταβλητός συντελεστής απόδοσης

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, εκτιμάται από τον μελετητή η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του στροβίλου. Υπολογίζονται για κάθε ημέρα τα ποσοστά των ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών προς την ονομαστική παροχή του στροβίλου:

$$pQ_i(\%) = 100 * \frac{Q_i}{Q_0} \quad (3.11)$$

Η επιλογή του στροβίλου που θα χρησιμοποιηθεί πραγματοποιείται εξετάζοντας αρχικά το καθαρό ύψος πτώσης. Για τον σκοπό αυτό εξετάζεται το διάγραμμα 2.1 που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζονται οι στρόβιλοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το καθαρό ύψος πτώσης αλλά και την ονομαστική παροχή του στροβίλου. Για τη συγκεκριμένη τοπογραφία όπου έχουμε καθαρό ύψος πτώσης 260 m και

παροχές που δεν ξεπερνούν τα 12 m³/s, προκύπτει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στροβίλους τύπου Pelton ή Francis.

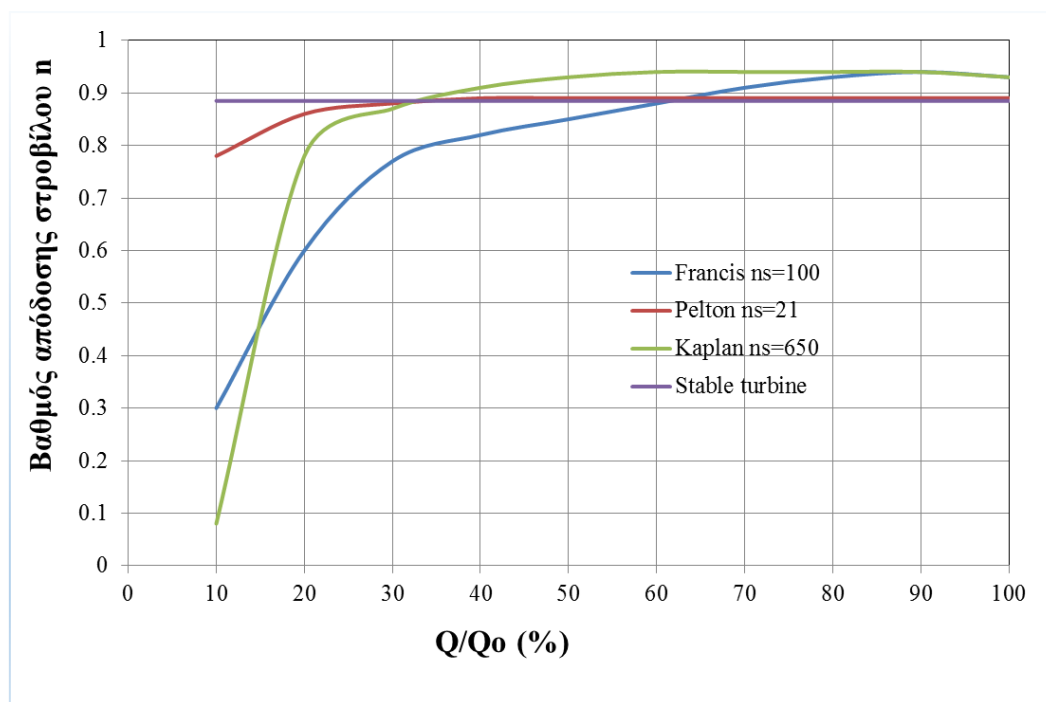
Οι συντελεστές απόδοσης του στροβίλου δίνονται κάθε φορά από τον κατασκευαστή του στροβίλου. Στην περίπτωση που ο στροβίλος είναι μεταχειρισμένος, οι συντελεστές απόδοσης μπορούν να βρεθούν βιβλιογραφικά για τον συγκεκριμένο τύπο. Οι συντελεστές απόδοσης εξαρτώνται αρχικά από τον τύπο του στροβίλου και έπειτα από τον αριθμό στροφών του. Ο αριθμός στροφών εκφράζει ουσιαστικά τη γεωμετρία του στροβίλου.

Από τη βιβλιογραφία προκύπτουν οι συντελεστές απόδοσης που αντιστοιχούν στα ποσοστά 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 και 100% της ονομαστικής παροχής των στροβίλων (Πίνακας 3.2). Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν να εξεταστούν στροβίλοι Francis (ns=100), Pelton (ns=21) και Kaplan (ns=650). Πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή για τις ενδιάμεσες τιμές. Όπως αναφέρθηκε για ποσοστά μικρότερα του 10% ο συντελεστής του στροβίλου θεωρείται μηδέν.

Πίνακας 3.2 Συντελεστές απόδοσης στροβίλων για διάφορους τύπους

Q/Q ₀	Francis ns=100	Pelton ns=21	Kaplan ns=650
10	0.3	0.78	0.08
20	0.6	0.86	0.78
30	0.77	0.88	0.87
40	0.82	0.89	0.91
50	0.85	0.89	0.93
60	0.88	0.89	0.94
70	0.91	0.89	0.94
80	0.93	0.89	0.94
90	0.94	0.89	0.94
100	0.93	0.89	0.93

Στο Διάγραμμα 3.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόδοσης στροβίλων τύπου Pelton (ns=21), Francis (ns=100), Kaplan (ns=650) αλλά και η καμπύλη του ιδεατού στροβίλου (σταθερός συντελεστής στροβίλου) που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση 3.2.1.



Διάγραμμα 3.5 Καμπύλες στρόβιλου που παρουσιάζουν τον βαθμό απόδοσης του στρόβιλου συναρτήσει του ποσοστού της διερχόμενης προς την ονομαστική του παροχή

Υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης στρόβιλου κάθε ημέρας:

- i. για $Q_i < 0.1 * Q_0$

$$n_i = 0 \quad (3.12i)$$

- ii. για $Q_i \geq 0.1 * Q_0$ και $Q_i \leq Q_0$

$$n_i = n(pQ_i) \quad (3.12ii)$$

(ο συντελεστής απόδοσης στρόβιλου προκύπτει από τον πίνακα 3.2 με γραμμική παρεμβολή για την τιμή pQ_i)

- iii. για $Q_i > Q_0$

$$n_i = n(100) \quad (3.12iii)$$

(ο στρόβιλος λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή του απόδοση)

Επισημαίνεται πως η τελική ενέργεια που παράγεται μειώνεται κατά ένα ποσοστό λόγω του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί. Ο ολικός συντελεστής απόδοσης προκύπτει τελικώς ως το γινόμενο του συντελεστή απόδοσης στρόβιλου επί τον συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Ο συντελεστής

απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έργου εφ' όσον δεν πραγματοποιηθούν αλλαγές στις εγκαταστάσεις. Από την βιβλιογραφία προκύπτει ως συνήθης τιμή συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού η τιμή 0.96.

Υπολογίζεται επομένως η ημερήσια ενέργεια που παράγεται σε kWh ξεχωριστά για τα τρία διακριτά διαστήματα των παροχών:

i. για $Q_i < 0.1 * Q_0$

$$E_i = 0 \quad (3.13i)$$

ii. για $Q_i \geq 0.1 * Q_0$ και $Q_i \leq Q_0$

$$E_i = n_i * n_e * \rho * g * H * Q_i * 24 \quad (3.13ii)$$

iii. για $Q_i > Q_0$

$$E_i = n_i * n_e * \rho * g * H * Q_0 * 24 \quad (3.13iii)$$

όπου n_i είναι ο ημερήσιος συντελεστής απόδοσης που λειτουργεί ο στρόβιλος, $n_e=0.96$ είναι ο συντελεστής απόδοσης ηλεκτρ/κού εξοπλισμού (σταθερός), $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ θεωρείται η πυκνότητα του νερού που εισέρχεται, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H είναι το καθαρό ύψος πτώσης, Q_i είναι οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές νερού και Q_0 είναι η παροχή λειτουργίας της εγκατάστασης (ονομαστική παροχή στροβίλου).

3.3 Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας υδροηλεκτρικού

Στο σημείο αυτό έχει υπολογιστεί η χρονοσειρά ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών είτε για θεώρηση σταθερού συντελεστή απόδοσης (Περίπτωση 3.2.1) είτε για θεώρηση μεταβλητού συντελεστή απόδοσης τυπικού στροβίλου (Περίπτωση 3.2.2). Για κάθε περίπτωση μπορούν επομένως να υπολογιστούν τα βασικά μεγέθη λειτουργίας της εγκατάστασης. Από το σημείο αυτό και έπεται οι σχέσεις υπολογισμού δεν διαφέρουν για τις δύο περιπτώσεις.

Αρχικά υπολογίζεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια της εγκατάστασης σε kWh, ανάλογα με το στρόβιλο που επιλέχθηκε, αθροίζοντας τις παραγόμενες ημερήσιες ενέργειες που υπολογίστηκαν στα κεφάλαια 3.2.1 και 3.2.2:

$$E_{εγκ.} = \sum_1^n E_i \quad (3.14)$$

Στη συνέχεια διαιρώντας την συνολική ενέργεια που προέκυψε με το πλήθος των ετών του δείγματος προκύπτει η ενέργεια που παράγει το υδροηλεκτρικό έργο σε kWh ανά έτος:

$$E_{εγκ./έτος} = \left(\sum_i^n E_i \right) / 10 \quad (3.15)$$

Υπολογίζεται έπειτα η ισχύς σε kW η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή παροχή εκμετάλλευσης, δηλαδή στην ονομαστική (μέγιστη) παροχή του στροβίλου. Ο υπολογισμός της ισχύος για την περίπτωση 3.2.1 παρουσιάζεται στη σχέση (3.16i) ενώ στην περίπτωση 3.2.2 αντιστοιχεί η σχέση (3.16ii).

$$I_{max} = n_{tot} * \rho * g * H * Q_0 \quad (3.16i)$$

$$I_{max} = n_e * \rho * g * H * Q_0 \quad (3.16ii)$$

Με σκοπό τον έλεγχο καταλληλότητας της ονομαστικής παροχής που επιλέχθηκε υπολογίζονται το ποσοστό του όγκου αξιοποίησης καθώς και το ποσοστό χρόνου λειτουργίας. Όπως έχει προαναφερθεί η νομοθεσία ορίζει το ποσοστό όγκου αξιοποίησης να υπερβαίνει την τιμή 75% καθώς και το ποσοστό χρόνου λειτουργίας να είναι μεγαλύτερο από 30%.

Για το ποσοστό όγκου αξιοποίησης αρχικά υπολογίζεται η χρονοσειρά ημερήσιων όγκων που αξιοποιούνται από τον στρόβιλο ξεχωριστά για τα τρία διαστήματα παροχών:

i. για $Q_i < 0.1 * Q_0$

$$V_{αξ.i} = 0 \quad (3.17i)$$

ii. για $Q_i \geq 0.1 * Q_0$ και $Q_i \leq Q_0$

$$V_{αξ.i} = Q_i * 24 * 3600 \quad (3.17ii)$$

iii. για $Q_i > Q_0$

$$V_{αξ.i} = Q_0 * 24 * 3600 \quad (3.17iii)$$

Υπολογίζεται το άθροισμα της χρονοσειράς:

$$\Sigma V_{\alpha\xi} = \sum_i^n V_{\alpha\xi.i} \quad (3.18)$$

Και στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσοστό επί τις εκατό του συνολικού όγκου νερού που αξιοποιείται τελικά από τον στρόβιλο προς τον ολικό διαθέσιμο όγκο νερού:

$$PV(\%) = 100 * \frac{\Sigma V_{\alpha\xi}}{V_{tot}} \quad (3.19)$$

Με σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή αξιοποίησης του έργου αρχικά ελέγχεται πόσες τιμές της χρονοσειράς ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών είναι μεγαλύτερες του μηδενός. Ο έλεγχος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα τελεστή k :

i. για $E_i = 0$

$$k_i = 1 \quad (3.20i)$$

ii. για $E_i > 0$

$$k_i = 0 \quad (3.20ii)$$

Αθροίζοντας τη χρονοσειρά των τελεστών k προκύπτει πόσες μέρες παράχθηκε ενέργεια:

$$Sk = \sum_1^n k_i \quad (3.21)$$

Τέλος, υπολογίζεται το ποσοστό των ημερών που παράχθηκε ενέργεια επί του πλήθους των παρατηρήσεων, δηλαδή το σύνολο των ημερών:

$$PT(\%) = 100 * \frac{Sk}{n} \quad (3.22)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής δυναμικότητας του έργου. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται πόση ενέργεια από την μέγιστη δυνατή αξιοποιείται. Μετατρέποντας τη μέγιστη δυνατή ισχύ σε μέγιστη δυνατή ενεργειακή παραγωγή, θεωρώντας συνεχή λειτουργία του

στροβίλου στο έτος, υπολογίζεται το ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ενέργειας προς τη μέγιστη δυνατή παραγωγή:

$$\Sigma\Delta = \frac{E_{εγκ./έτος}}{I_{max} * 24 * 365} \quad (3.23)$$

Ως αποτέλεσμα, ο συντελεστής δυναμικότητας εξαρτάται από την επιλογή τύπου στροβίλου αλλά και την ονομαστική παροχή που επιλέχθηκε. Στην περίπτωση που ο συντελεστής δυναμικότητας προκύψει πολύ μικρός σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε αρκετά μεγάλος στρόβιλος για να παραχθεί ενέργεια σχεδόν ίδια με αυτήν που θα παράγονταν με χρήση μικρότερου στροβίλου. Οδηγούμαστε, δηλαδή, στο συμπέρασμα ανάγκης μείωσης της ονομαστικής παροχής του στροβίλου.

3.4 Ετήσια ενέργεια για δύο στροβίλους συγκεκριμένου τύπου δεδομένης ονομαστικής παροχής

Σε πολλές περιπτώσεις ένα υδροηλεκτρικό έργο είναι εξοπλισμένο με περισσότερους του ενός υδροστροβίλους έτσι ώστε να αυξάνεται η ευελιξία λειτουργίας του και να βελτιώνεται η αξιοποίηση της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας. Η λύση των δύο στροβίλων είναι προτιμότερη της λύσης με έναν στρόβιλο στην περίπτωση όπου παράγεται μεγαλύτερη ενέργεια, ικανή να καλύψει τις διαφορές στο κόστος που προκύπτουν λόγω του δεύτερου στροβίλου αλλά και να επιφέρει μεγαλύτερο τελικό κέρδος. Στα πλαίσια της ενεργειακής βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται διερευνάται και η περίπτωση χρήσης δύο στροβίλων. Χρησιμοποιώντας δύο στροβίλους αυξάνεται το εύρος υδρολογικής αξιοποίησης και ως συνέπεια προκύπτει μεγαλύτερη ενεργειακή αξιοποίηση. Χρησιμοποιώντας για παράδειγμα έναν στρόβιλο ονομαστικής παροχής 3 m³/s όπως πριν αλλά και έναν στρόβιλο ονομαστικής παροχής 1 m³/s γίνεται αξιοποίηση παροχών από 0.1 έως 4 m³/s.

Κατά κανόνα τίθεται σε λειτουργία πρώτα ο ένας στρόβιλος. Στη συνέχεια για παροχές μικρότερες από το 10 % της ονομαστικής του πρώτου στροβίλου, εάν ο δεύτερος στρόβιλος είναι μικρότερης ονομαστικής παροχής, τίθεται μόνο ο δεύτερος σε λειτουργία ώστε να καλύψει τις μικρές αυτές παροχές. Αντίστοιχα για παροχές μεγαλύτερες της ονομαστικής παροχής του πρώτου στροβίλου τίθεται σε λειτουργία και ο δεύτερος συμπληρωματικά έτσι

ώστε να αξιοποιηθεί όλο το αξιοποιήσιμο υδατικό δυναμικό. Στην περίπτωση δυο στρόβιλων ίδιας ονομαστικής παροχής αλλά διαφορετικού τύπου εξετάζονται οι καμπύλες απόδοσης τους. Επιλέγεται να τεθεί σε λειτουργία πρώτα ο στρόβιλος που αποδίδει καλύτερα σε μικρά ποσοστά της ονομαστικής παροχής και έπειτα ο στρόβιλος που αποδίδει καλύτερα σε μεγαλύτερα ποσοστά.

3.4.1 Σταθερός συντελεστής απόδοσης

Θεωρείται σταθερός ολικός συντελεστής εγκατάστασης ίσος με 0.85. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί για παράδειγμα σε δύο ιδεατούς στρόβιλους που λειτουργούν με σταθερό συντελεστή απόδοσης 0.885 και συντελεστή απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού 0.96. Ο κάθε στρόβιλος θεωρείται ότι λειτουργεί από το 10 έως το 100% της ονομαστικής του παροχής (Q_0) με σταθερό συντελεστή απόδοσης 0.885.

Ο κάθε στρόβιλος παράγει τη δική του χρονοσειρά ημερήσιων ενεργειών. Υπολογίζεται επομένως η χρονοσειρά ημερήσιων ενεργειών σε kWh ξεχωριστά για τους δύο στρόβιλους και στη συνέχεια αθροίζονται έτσι ώστε να υπολογιστούν οι ημερήσιες τελικές παραγόμενες ενέργειες. Στην περίπτωση που ο πρώτος στρόβιλος δεν αξιοποιεί ποσό της διαθέσιμης ημερήσιας εκμεταλλεύσιμης παροχής, αυτό υπολογίζεται στη χρονοσειρά περίσσειας παροχών (LQ_i) η οποία θα χρησιμοποιηθεί από το δεύτερο στρόβιλο.

Για τον πρώτο (α) στρόβιλο προκύπτουν:

$$i. \quad \text{για } Q_i < 0.1 * Q_{0a}$$

$$E_{i,\alpha} = 0 \quad (3.24i)$$

$$LQ_i = Q_i \quad (3.25i)$$

(ο πρώτος στρόβιλος δεν αξιοποιεί κανένα μέρος της ημερήσιας παροχής Q_i)

$$ii. \quad \text{για } Q_i \geq 0.1 * Q_{0a} \text{ και } Q_i \leq Q_{0a}$$

$$E_{i,\alpha} = n_{tot} * \rho * g * H * Q_i * 24 \quad (3.24ii)$$

$$LQ_i = 0 \quad (3.25ii)$$

(ο πρώτος στρόβιλος αξιοποιεί όλη την ημερήσια παροχή Q_i)

iii. για $Q_i > Q_{0a}$

$$E_{i,a} = n_{tot} * \rho * g * H * Q_{0a} * 24 \quad (3.24iii)$$

$$LQ_i = Q_i - Q_{0a} \quad (3.25iii)$$

(ο πρώτος στρόβιλος αξιοποιεί μέρος της ημερήσιας παροχής Q_i)

Αντίστοιχα για το δεύτερο (b) στρόβιλο εξετάζονται οι παροχές που περίσσεψαν από τη λειτουργία του πρώτου στροβίλου (LQ_i) και προκύπτει:

i. $LQ_i < 0.1 * Q_{0b}$

$$E_{i,b} = 0 \quad (3.26i)$$

(ο δεύτερος στρόβιλος δεν αξιοποιεί κανένα μέρος της ημερήσιας περισσευούμενης παροχής LQ_i)

ii. για $LQ_i \geq 0.1 * Q_{0b}$ και $LQ_i \leq Q_{0b}$

$$E_{i,b} = n_{tot} * \rho * g * H * LQ_i * 24 \quad (3.26ii)$$

(ο δεύτερος στρόβιλος αξιοποιεί όλη την ημερήσια περισσευούμενη παροχή LQ_i)

iii. για $LQ_i > Q_{0b}$

$$E_{i,b} = n_{tot} * \rho * g * H * Q_{0b} * 24 \quad (3.26iii)$$

(ο δεύτερος στρόβιλος αξιοποιεί μέρος της ημερήσιας περισσευούμενης παροχής LQ_i και η υπόλοιπη μένει ανεκμετάλλευτη)

όπου $n_{tot}=0.85$ είναι ο ολικός συντελεστής απόδοσης (θεωρείται σταθερός), $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ θεωρείται η πυκνότητα του νερού που εισέρχεται, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H είναι το καθαρό ύψος πτώσης, Q_i είναι οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές νερού, LQ_i είναι οι ημερήσιες παροχές νερού που περίσσεψαν από τον πρώτο στρόβιλο, Q_{0a} είναι η ονομαστική παροχή του πρώτου στροβίλου και Q_{0b} είναι η ονομαστική παροχή του δεύτερου στροβίλου.

Στη συνέχεια αθροίζονται για κάθε ημέρα οι ενέργειες που παράχθηκαν από κάθε στρόβιλο και υπολογίζεται έτσι η τελική ενέργεια που παράγει κάθε ημέρα η εγκατάσταση σε kWh:

$$E_i = E_{i,a} + E_{i,b} \quad (3.27)$$

3.4.2 Μεταβλητός συντελεστής απόδοσης

Όπως και στην περίπτωση του ενός τροβίλου εκτιμώνται από το μελετητή η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του κάθε τροβίλου. Η επιλογή των τροβίλων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται και εδώ από το καθαρό ύψος πτώσης αλλά και το εύρος των εκμεταλλεύσιμων παροχών. Για τη συγκεκριμένη τοπογραφία και το δεδομένο εύρος παροχών προκύπτει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τροβίλους τύπου Pelton ή Francis. Ο συνδυασμός των τροβίλων μπορεί να περιλαμβάνει είτε δύο στρόβιλοι ίδιου τύπου είτε διαφορετικού.

Όπως και στην περίπτωση του σταθερού συντελεστή απόδοσης, κάθε στρόβιλος παράγει τη δική του χρονοσειρά ημερήσιων ενεργειών και στο τέλος αθροίζονται έτσι ώστε να προκύψει η συνολική παραγόμενη ενέργεια κάθε ημέρας. Στην περίπτωση πάλι που ο πρώτος στρόβιλος δεν αξιοποιεί ποσό της διαθέσιμης ημερήσιας εκμεταλλεύσιμης παροχής, αυτό υπολογίζεται στη χρονοσειρά περίσσειας παροχών (LQ) η οποία θα χρησιμοποιηθεί από το δεύτερο στρόβιλο.

Για τον πρώτο (α) στρόβιλο υπολογίζονται για κάθε ημέρα τα ποσοστά των ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών προς την ονομαστική παροχή του τροβίλου:

$$pQ_{i,\alpha}(\%) = 100 * \frac{Q_i}{Q_{0,\alpha}} \quad (3.28)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης με τον οποίο λειτουργεί ο πρώτος στρόβιλος κάθε ημέρα:

$$i. \quad \text{για } Q_i < 0.1 * Q_{0,\alpha}$$

$$n_{i,\alpha} = 0 \quad (3.29i)$$

$$ii. \quad \text{για } Q_i \geq 0.1 * Q_{0,\alpha} \text{ και } Q_i \leq Q_{0,\alpha}$$

$$n_{i,\alpha} = n(pQ_{i,\alpha}) \quad (3.29ii)$$

(ο συντελεστής απόδοσης του πρώτου στρόβιλου προκύπτει από τον πίνακα 3.2 με γραμμική παρεμβολή για την τιμή $pQ_{i,a}$ ανάλογα με τον τύπο στρόβιλου που επιλέχθηκε)

iii. για $Q_i > Q_{0,a}$

$$n_{i,a} = n(100) \quad (3.29iii)$$

(ο πρώτος στρόβιλος λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή του απόδοση)

Υπολογίζεται επομένως η ημερήσια ενέργεια που παράγεται σε kWh ξεχωριστά για τα τρία διακριτά διαστήματα των παροχών καθώς και η χρονοσειρά περίσσειας παροχών (LQ_i) η οποία θα χρησιμοποιηθεί από το δεύτερο στρόβιλο στη συνέχεια:

i. για $Q_i < 0.1 * Q_{0,a}$

$$E_{i,a} = 0 \quad (3.30i)$$

$$LQ_i = Q_i \quad (3.31i)$$

ii. για $Q_i \geq 0.1 * Q_{0,a}$ και $Q_i \leq Q_{0,a}$

$$E_{i,a} = n_{i,a} * n_e * \rho * g * H * Q_i * 24 \quad (3.30ii)$$

$$LQ_i = 0 \quad (3.31ii)$$

iii. για $Q_i > Q_{0,a}$

$$E_{i,a} = n_{i,a} * n_e * \rho * g * H * Q_{0,a} * 24 \quad (3.30iii)$$

$$LQ_i = Q_i - Q_{0,a} \quad (3.31iii)$$

Για το δεύτερο (b) στρόβιλο υπολογίζονται για κάθε ημέρα τα ποσοστά των παροχών που περίσσεψαν από τον πρώτο στρόβιλο προς την ονομαστική παροχή του δεύτερου στρόβιλου:

$$pQ_{i,b}(\%) = 100 * \frac{LQ_i}{Q_{0,b}} \quad (3.32)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης με τον οποίο λειτουργεί ο δεύτερος στρόβιλος κάθε ημέρα:

i. για $LQ_i < 0.1 * Q_{0,b}$

$$n_{i,b} = 0 \quad (3.33i)$$

ii. για $LQ_i \geq 0.1 * Q_{0,b}$ και $LQ_i \leq Q_{0,b}$

$$n_{i,b} = n(pQ_{i,b}) \quad (3.33ii)$$

(ο συντελεστής απόδοσης του δεύτερου στροβίλου προκύπτει από τον πίνακα 3.2 με γραμμική παρεμβολή για την τιμή $pQ_{i,b}$ ανάλογα με τον τύπο στροβίλου που επιλέχθηκε)

iii. για $LQ_i > Q_{0,b}$

$$n_{i,b} = n(100) \quad (3.33iii)$$

(ο δεύτερος στροβίλος λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή του απόδοση)

Υπολογίζεται επομένως η ημερήσια ενέργεια που παράγεται από το δεύτερο στροβίλο σε kWh ξεχωριστά για τα τρία διακριτά διαστήματα των παροχών:

i. για $LQ_i < 0.1 * Q_{0,b}$

$$E_{i,b} = 0 \quad (3.34i)$$

ii. για $LQ_i \geq 0.1 * Q_{0,b}$ και $LQ_i \leq Q_{0,b}$

$$E_{i,b} = n_{i,b} * n_e * \rho * g * H * LQ_i * 24 \quad (3.34ii)$$

iii. για $LQ_i > Q_{0,b}$

$$E_{i,b} = n_{i,b} * n_e * \rho * g * H * Q_{0,b} * 24 \quad (3.34iii)$$

όπου $n_{i,a}$ είναι ο ημερήσιος συντελεστής απόδοσης που λειτουργεί ο πρώτος στροβίλος, $n_{i,b}$ είναι ο ημερήσιος συντελεστής απόδοσης που λειτουργεί ο δεύτερος στροβίλος, $n_e=0.96$ είναι ο συντελεστής απόδοσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (σταθερός), $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ θεωρείται η πυκνότητα του νερού που εισέρχεται, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, H είναι το καθαρό ύψος πτώσης, Q_i είναι οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές νερού, LQ_i είναι οι ημερήσιες παροχές νερού που περίσσεψαν από τον πρώτο στροβίλο, Q_{0a} είναι η ονομαστική παροχή του πρώτου στροβίλου και Q_{0b} είναι η ονομαστική παροχή του δεύτερου στροβίλου.

Στη συνέχεια αθροίζονται για κάθε ημέρα οι ενέργειες που παράχθηκαν από κάθε στροβίλο και υπολογίζεται έτσι η τελική ενέργεια που παράγει κάθε ημέρα η εγκατάσταση σε kWh. Ο

υπολογισμός γίνεται με τη χρήση της σχέσης (3.27) όπως και στην περίπτωση του σταθερού συντελεστή απόδοσης.

Η προσομοίωση λειτουργίας υδροηλεκτρικού με χρήση δύο στρόβιλων δεν διαφέρει από αυτήν που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3.3. Οι σχέσεις (3.14) έως (3.23) χρησιμοποιούνται με το ίδιο ακριβώς τρόπο εκτός της σχέσης (3.17) η οποία εξαρτάται από τον όγκο νερού που διέρχεται από κάθε στρόβιλο. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται οι επόμενες σχέσεις με σκοπό τον υπολογισμό των διερχόμενων όγκων νερού για κάθε στρόβιλο.

Για τον πρώτο (a) στρόβιλο προκύπτει:

$$i. \quad \text{για } Q_i < 0.1 * Q_{0,a}$$

$$V_{\alpha\xi,i,a} = 0 \quad (3.35i)$$

$$ii. \quad \text{για } Q_i \geq 0.1 * Q_{0,a} \text{ και } Q_i \leq Q_{0,a}$$

$$V_{\alpha\xi,i,a} = Q_i * 24 * 3600 \quad (3.35ii)$$

$$iii. \quad \text{για } Q_i > Q_{0,a}$$

$$V_{\alpha\xi,i,a} = Q_{0,a} * 24 * 3600 \quad (3.35iii)$$

Αντίστοιχα για το δεύτερο (b) στρόβιλο προκύπτει:

$$i. \quad \text{για } LQ_i < 0.1 * Q_{0,b}$$

$$V_{\alpha\xi,i,b} = 0 \quad (3.36i)$$

$$ii. \quad \text{για } LQ_i \geq 0.1 * Q_{0,b} \text{ και } LQ_i \leq Q_{0,b}$$

$$V_{\alpha\xi,i,b} = LQ_i * 24 * 3600 \quad (3.36ii)$$

$$iii. \quad \text{για } LQ_i > Q_{0,b}$$

$$V_{\alpha\xi,i,b} = Q_{0,b} * 24 * 3600 \quad (3.36iii)$$

Τελικώς, αθροίζονται οι ημερήσιοι όγκοι νερού που αξιοποιούνται από κάθε στρόβιλο και προκύπτει η χρονοσειρά ημερήσιων αξιοποιήσιμων όγκων νερού:

$$V_{\alpha\xi.i} = V_{\alpha\xi.i,a} + V_{\alpha\xi.i,b}$$

Αντίστοιχα διαφοροποιείται και η ισχύς στη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης όπου εξαρτάται πάλι από το συνδυασμό των ονομαστικών παροχών των δύο στροβίλων:

$$I_{max} = n_{tot} * \rho * g * H * (Q_{0,a} + Q_{0,b}) \quad (3.37i)$$

$$I_{max} = n_e * \rho * g * H * (Q_{0,a} + Q_{0,b}) \quad (3.37ii)$$

4. Ανάλυση λειτουργίας προγράμματος

4.1 Γενικές αρχές προγράμματος Matlab

Το Matlab είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλών επιδόσεων (high-performance language for technical computing). Η ονομασία του προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων MATrix LABoratory και δηλώνει ότι είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως η επίλυση γραμμικών συστημάτων, η εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, η αντιστροφή τετραγωνικού πίνακα κλπ.

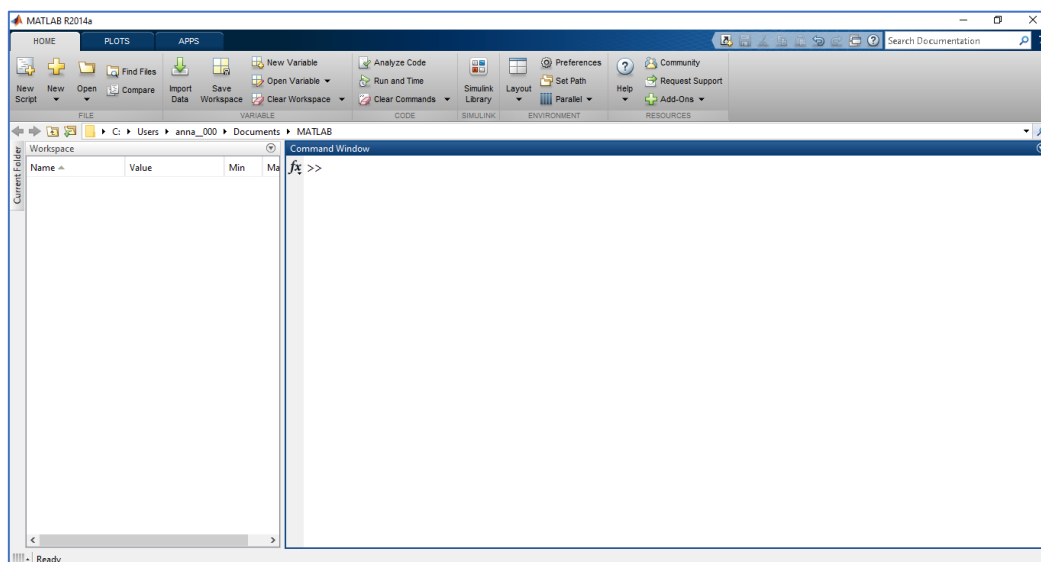
Το Matlab αποτελεί μια καλή επιλογή για την ανάπτυξη προγραμμάτων καθώς είναι γρήγορο στην εκμάθηση αλλά και εύκολο στη χρήση (φιλικό περιβάλλον για το χρήστη). Παράλληλα, είναι εφοδιασμένο με ένα εκτενές σύστημα βοήθειας (help) όπου κάθε εντολή επεξηγείται αναλυτικά και ακολουθείται από αντιπροσωπευτικά παραδείγματα. Ακόμη, το περιβάλλον εργασίας του Matlab διαθέτει ένα σύνολο χρήσιμων εργαλείων που βοηθούν το χρήστη ή τον προγραμματιστή, συμπεριλαμβανομένων των εργαλείων για την ανάπτυξη, τη διαχείριση και τον εντοπισμό σφαλμάτων. Τα προγράμματα μπορούν να εκτελούνται βήμα προς βήμα με πρόσβαση σε όλες τις μεταβλητές και λειτουργίες.

Το βασικό χαρακτηριστικό του περιβάλλοντος Matlab είναι η βιβλιοθήκη συναρτήσεων. Είναι μια ολοκληρωμένη συλλογή υπολογιστικών αλγορίθμων που περιλαμβάνει στοιχειώδεις συναρτήσεις (άθροισμα, ημίτονο, συνημίτονο, αριθμητική μιγαδικών αριθμών) αλλά και πιο εξελιγμένα μαθηματικά (αντιστροφή μητρώων, ιδιοτιμές μητρώων, μετασχηματισμός Fourier). Επιπλέον το Matlab διαθέτει μια οικογένεια από συγκεκριμένες εφαρμογές λύσεων που ονομάζονται εργαλειοθήκες. Οι εργαλειοθήκες αποτελούν ολοκληρωμένες συλλογές συναρτήσεων που επεκτείνουν το περιβάλλον του Matlab με σκοπό την επίλυση κάποιων ειδικών κατηγοριών προβλημάτων. Τέλος, το σύστημα γραφικών του Matlab περιλαμβάνει εντολές υψηλού επιπέδου όπως για παράδειγμα δισδιάστατη και τρισδιάστατη οπτικοποίηση δεδομένων σε γραφήματα, επεξεργασία εικόνας και animation.

Το βασικά μέρη του περιβάλλοντος Matlab, τα οποία αξιοποιεί ο χρήστης για την εκτέλεση των πράξεων, είναι τα ακόλουθα:

1. Παράθυρο Διαχείρισης (Command Window)
2. Βασικός χώρος λειτουργίας (Workspace)

Πιο συγκεκριμένα, το Παράθυρο Διαχείρισης εμφανίζεται με την έναρξη του προγράμματος και μέσα σε αυτό γράφονται οι εντολές, δίνεται η εντολή εκτέλεσης τους και τέλος εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πράξεων. Αποτελεί δηλαδή το χώρο όπου γίνονται οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με το πρόγραμμα. Αντίθετα, ο Βασικός Χώρος Λειτουργίας αποτελεί το χώρο διεκπεραίωσης των πράξεων και βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή. Συγκεκριμένα, στο χώρο αυτόν εκτελούνται οι πράξεις και ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες πράξεις. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η τυπική διάθρωση του περιβάλλοντος Matlab με εμφάνιση του Βασικού Χώρου Λειτουργίας στα αριστερά και του Παράθυρου Διαχείρισης στα δεξιά. Μεταβάλλοντας ορισμένες ρυθμίσεις υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής των βασικών αυτών χώρων έτσι ώστε να εμφανίζονται με τον τρόπο που επιθυμεί ο εκάστοτε χρήστης.



Εικόνα 4.1 Τυπική διάθρωση περιβάλλοντος Matlab

Το Matlab έχει εξελιχθεί με την πάροδο των χρόνων με τη συμβολή πολλών χρηστών. Σήμερα αποτελεί ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό πακέτο που χρησιμοποιείται ευρέως στην πανεπιστημιακή κοινότητα αλλά και τη βιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα, στην πανεπιστημιακή κοινότητα αποτελεί το βασικό εκπαιδευτικό εργαλείο εκμάθησης αλλά και έρευνας σε τομείς μαθηματικών και μηχανικής. Αντίστοιχα, στη βιομηχανία αποτελεί εργαλείο επιλογής όταν πρόκειται για έρευνα υψηλής παραγωγικότητας, ανάπτυξης και ανάλυσης.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και τις αρχές του προγράμματος Matlab είναι διαθέσιμη η επίσημη ιστοσελίδα της Matlab:

<http://www.mathworks.com>

4.2 Τα υπό εξέταση σενάρια

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή της εργασίας, σκοπός της είναι η δημιουργία λογισμικού σε περιβάλλον Matlab το οποίο θα προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ΜΥΗΕ. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη επικεντρώνεται στον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής ενός σταθμού ΜΥΗΕ είτε αυτός διαθέτει έναν υδροστρόβιλο είτε δύο. Καθώς η οικονομική βιωσιμότητα ενός ΜΥΗΕ εξαρτάται άμεσα από την ενεργειακή παραγωγή του, προέκυψε η ανάγκη επέκτασης του λογισμικού με σκοπό την εύρεση μίας ενεργειακά βέλτιστης λύσης για τις περιπτώσεις εφαρμογής ενός και δύο στροβίλων. Ως αποτέλεσμα, το λογισμικό διακρίνεται σε τέσσερις επιμέρους προγραμματιστικούς κώδικες οι οποίοι διαχωρίζονται αρχικά από τον αριθμό των στροβίλων που επιλέγεται να εγκατασταθούν και έπειτα από το εάν η λύση που προκύπτει είναι η ενεργειακά βέλτιστη. Οι τέσσερις κώδικες που αναπτύχθηκαν είναι οι εξής:

1. one_turbine
2. two_turbines
3. opti_one_turbine
4. opti_two_turbines

Συνοπτικά, ο κώδικας 1 προσομοιώνει τη λειτουργία εγκατάστασης ΜΥΗΕ που διαθέτει ένα στρόβιλο, ενώ ο κώδικας 2 τη λειτουργία εγκατάστασης ΜΥΗΕ που διαθέτει δύο στροβίλους. Επιλέγοντας έτσι συγκεκριμένο τύπο στροβίλου καθώς και ονομαστική (μέγιστη) παροχή στροβίλου υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη λειτουργίας της εγκατάστασης.

Αντίθετα για τον κώδικα 3 επιλέγεται μόνο ο τύπος του στροβίλου που θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια προκύπτει η ονομαστική (μέγιστη) παροχή στροβίλου που μεγιστοποιεί τη συνολική παραγωγή ενέργειας και παράλληλα υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη λειτουργίας της εγκατάστασης. Αντίστοιχα στον κώδικα 4 επιλέγονται οι τύποι και των δύο στροβίλων και προκύπτουν πάλι οι ονομαστικές παροχές για κάθε στρόβιλο που βελτιστοποιούν την ενεργειακή παραγωγή καθώς και τα βασικά μεγέθη λειτουργίας.

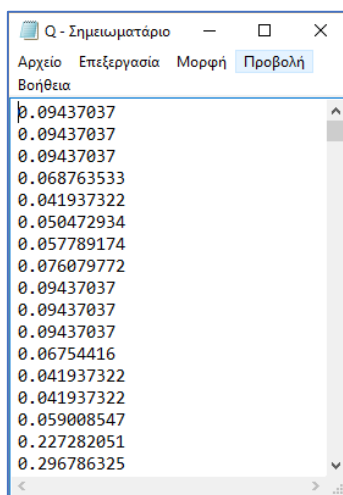
4.3 Δεδομένα εισόδου

Με σκοπό τη δυνατότητα εφαρμογής του λογισμικού σε κάθε ΜΥΗΕ προέκυψε η ανάγκη όλα τα δεδομένα εισόδου να είναι παραμετρικά. Για το λόγο αυτό το λογισμικό εφαρμόζεται για κάθε χρονοσειρά εκμεταλλεύσιμων παροχών που θα του παρέχει ο χρήστης, ανεξαρτήτως

μεγέθους. Αυτό σημαίνει πως το λογισμικό υπολογίζει συνολικά τελικά αποτελέσματα, είτε το δείγμα για παράδειγμα αντιπροσωπεύει παροχές τριών είτε πέντε ετών. Παράλληλα, εκτός από τον τύπο και την ονομαστική παροχή του στροβίλου, που όπως αναφέρθηκε επιλέγονται από το χρήστη, παραμετρικές μεταβλητές είναι και το καθαρό ύψος πτώσης της θέσης αλλά και ο συντελεστής ηλεκτρ/κού εξοπλισμού.

Τα μεγέθη που αναφέρθηκαν είναι προφανές ότι θα επηρεάσουν όλη την ανάλυση που θα ακολουθήσει, σε κάθε βήμα της. Έτσι κάθε φορά που θα εκτελείται το λογισμικό θα πρέπει να επιλέγονται εκ νέου τα μεγέθη αυτά με σκοπό τη λήψη των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

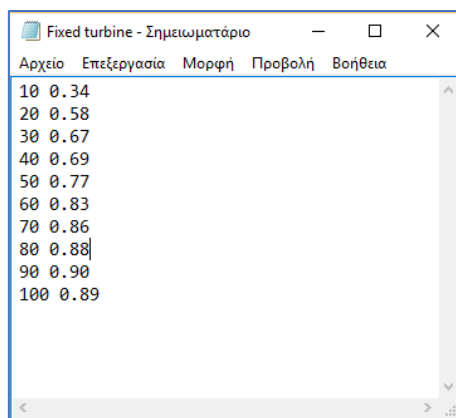
Για να επιτευχθεί άμεση εκτέλεση του προγράμματος απαιτείται αρχικά μια προετοιμασία των δεδομένων εισόδου. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόγραμμα δέχεται ως δεδομένα εισόδου τη χρονοσειρά των ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών (m^3/s). Η χρονοσειρά αυτή πρέπει να αποθηκευτεί στον υπολογιστή και συγκεκριμένα να βρίσκεται σε αρχείο μορφής κειμένου (.txt) με τις παροχές να εμφανίζονται σε μορφή στήλης όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Καταχώρηση χρονοσειράς ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών σε αρχείο μορφής κειμένου

Παράλληλα, επισημαίνεται πως το λογισμικό διαθέτει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ τριών τύπων στροβίλων, Francis (ns=100), Pelton (ns=21) και Kaplan (ns=650). Εάν όμως ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει συγκεκριμένο τύπου στροβίλου όπου γνωρίζει τους συντελεστές απόδοσης του, πρέπει να αποθηκεύσει τα δεδομένα αυτά στον υπολογιστή πριν ξεκινήσει η εκτέλεση του προγράμματος. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει τους συντελεστές απόδοσης αυτού του στροβίλου που αντιστοιχούν στο 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 και 100% της ονομαστικής του παροχής. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές πρέπει να

βρίσκονται επίσης σε αρχείο μορφής κειμένου (.txt) όπου σε κάθε σειρά γράφεται στα αριστερά το ποσοστό της ονομαστικής παροχής του στροβίλου και στα δεξιά ο συντελεστής απόδοσης που του αντιστοιχεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



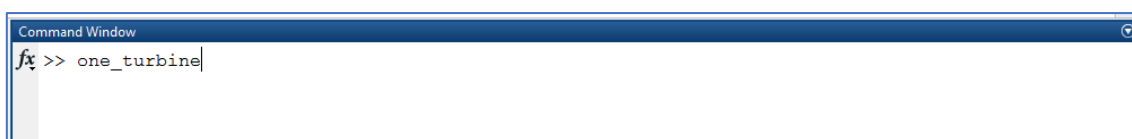
Power (%)	Efficiency
10	0.34
20	0.58
30	0.67
40	0.69
50	0.77
60	0.83
70	0.86
80	0.88
90	0.90
100	0.89

Εικόνα 4.3 Καταχώρηση συντελεστών απόδοσης του στροβίλου που θα χρησιμοποιηθεί σε αρχείο μορφής κειμένου

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει τη λύση των δύο στροβίλων οι οποίοι να είναι και οι διαφορετικού τύπου από αυτούς που προσφέρονται από το πρόγραμμα, τότε πρέπει να δημιουργήσει δύο αρχεία όπως της Εικόνας 4.3 όπου θα αντιστοιχούν στον κάθε στρόβιλο.

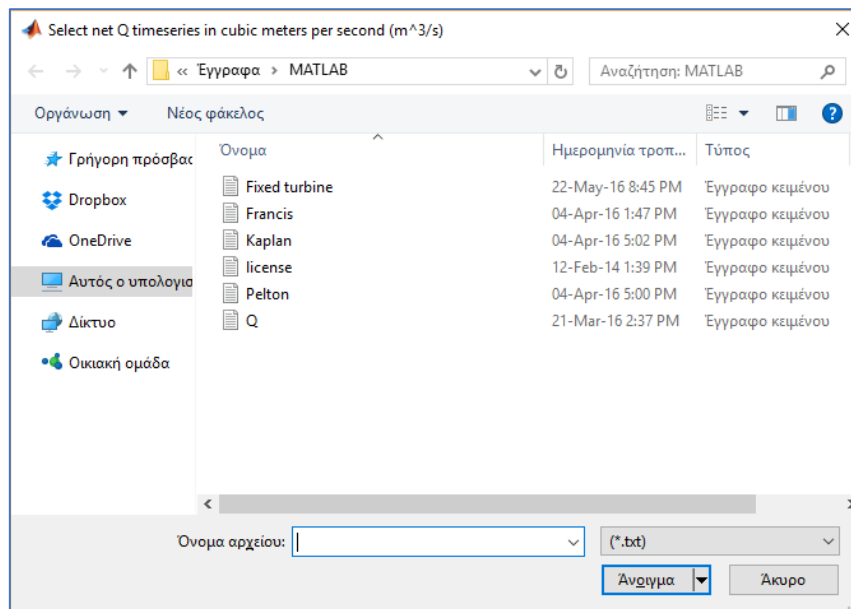
4.3.1 Κώδικας 1

Εφόσον ο χρήστης επιθυμεί να επιλέξει τον κώδικα 1 πρέπει αρχικά να καταχωρήσει την επιλογή του στο πρόγραμμα. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου η αλληλεπίδραση του χρήστη με το πρόγραμμα matlab πραγματοποιείται στο παράθυρο διαχείρισης. Ο χρήστης μετά την έναρξη του προγράμματος πληκτρολογεί το όνομα του κώδικα στο παράθυρο διαχείρισης και ξεκινάει η εκτέλεση του (Εικόνα 4.4). Επισημαίνεται ότι ο χρήστης μετά από κάθε εντολή που πληκτρολογεί πρέπει να πατήσει το πλήκτρο enter ώστε αυτή να εκχωρηθεί στο πρόγραμμα. Για περισσότερες πληροφορίες για την εκχώρηση δεδομένων βλ. Διαμαντάρας και Γουλιάνας (2013).



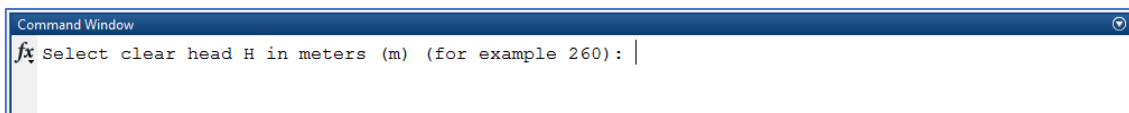
Εικόνα 4.4 Εντολή έναρξης κώδικα 1

Με την έναρξη του κώδικα εμφανίζονται οι εντολές εκχώρησης των δεδομένων εισόδου. Αρχικά ο χρήστης καλείται να επιλέξει το αρχείο της χρονοσειράς ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών. Ανοίγει στην οθόνη το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 4.5 και ο χρήστης αφού βρει το ζητούμενο αρχείο, το επιλέγει και πατάει το πλήκτρο enter.



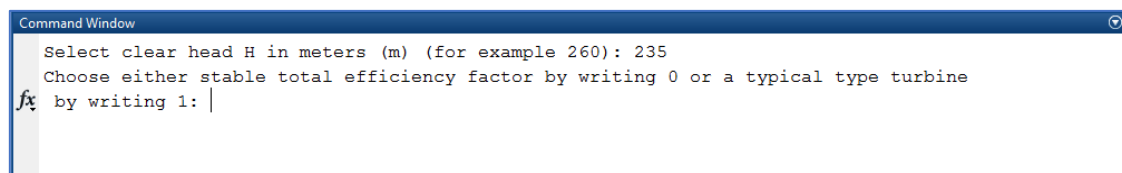
Εικόνα 4.5 Επιλογή χρονοσειράς ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών (m^3/s)

Στη συνέχεια ζητείται από το χρήστη να εισάγει τη τιμή του καθαρού ύψους πτώσης σε μέτρα (m) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6.



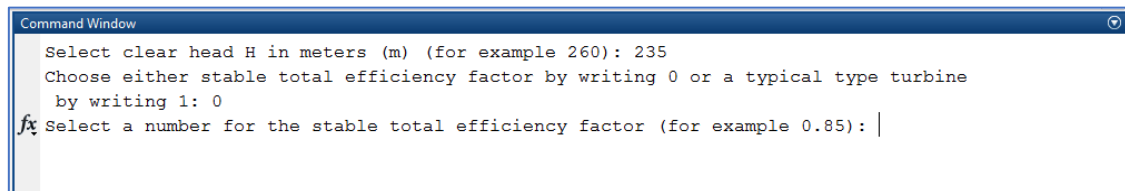
Εικόνα 4.6 Καταχώρηση καθαρού ύψους πτώσης (m)

Ακολούθως ο χρήστης ζητείται να επιλέξει ανάμεσα σε λειτουργία ΜΥΗΕ με σταθερό συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης και σε λειτουργία ΜΗΥΕ με στρόβιλο μεταβλητού συντελεστή απόδοσης (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7 Επιλογή λειτουργίας του ΜΥΗΕ με σταθερό ή μεταβλητό συντελεστή απόδοσης

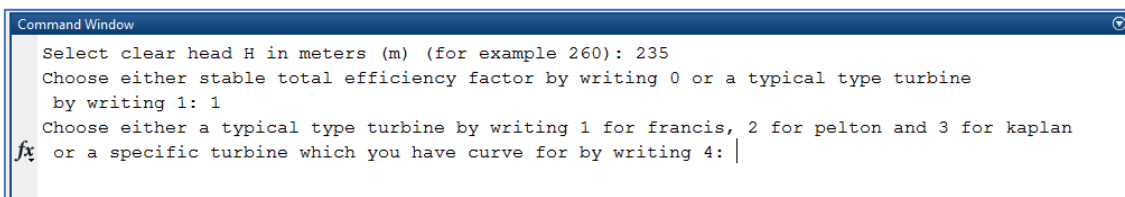
Η πρώτη περίπτωση όπως έχει αναπτυχθεί και στο κεφάλαιο 3 αντιστοιχεί σε έναν ιδεατό στρόβιλο ο οποίος λειτουργεί με σταθερό βαθμό απόδοσης ανεξαρτήτως του ποσοστού της ονομαστικής του παροχής. Εάν ο χρήστης επιλέξει την πρώτη περίπτωση τότε πρέπει στη συνέχεια να εισάγει τον ολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης (Εικόνα 4.8). Ο ολικός βαθμός απόδοσης προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το σταθερό βαθμό απόδοσης του στρόβιλου με το συντελεστή απόδοσης του ηλεκτρ/κού εξοπλισμού.



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 0
fx Select a number for the stable total efficiency factor (for example 0.85): |
```

Εικόνα 4.8 Καταχώρηση ολικού συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης

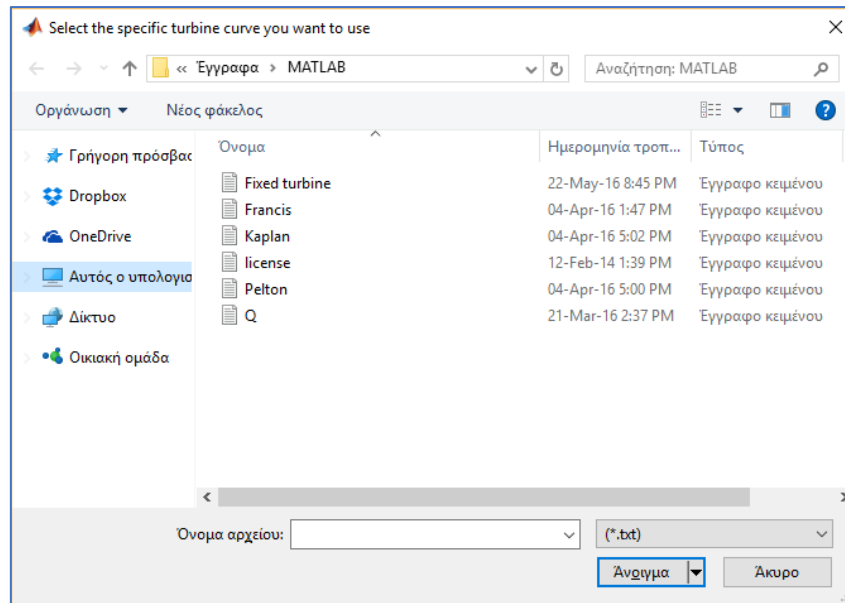
Αντίθετα, στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει τη λειτουργία ΜΗΥΕ με μεταβλητό συντελεστή απόδοσης τότε πρέπει να επιλέξει το τύπο στρόβιλου που θα χρησιμοποιηθεί. Οι επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα είναι στρόβιλοι τύπου Francis (ns=100), Pelton (ns=21) και Kaplan (ns=650) αλλά και η δυνατότητα επιλογής διαφορετικού τύπου στρόβιλου όπου ο χρήστης έχει καταχωρήσει τους συντελεστές απόδοσης του πριν την έναρξη του προγράμματος. Οι επιλογές αυτές εμφανίζονται με την ίδια σειρά στο χρήστη (Εικόνα 4.9).



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 1
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
fx or a specific turbine which you have curve for by writing 4: |
```

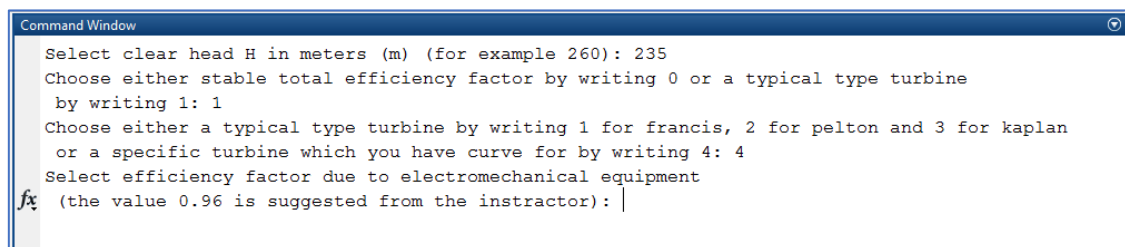
Εικόνα 4.9 Επιλογή τύπου στρόβιλου

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει τον ειδικό τύπο στρόβιλου (τέταρτη επιλογή) εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο που του ζητάει να επιλέξει το αρχείο όπου περιλαμβάνει τους βαθμούς απόδοσης του στρόβιλου. Ο χρήστης επιλέγει το αρχείο και πατώντας enter καταχωρείται η επιλογή του (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10 Επιλογή αρχείου βαθμών απόδοσης ειδικού στροβίλου

Είτε ο χρήστης επιλέξει ένα στρόβιλο από τους Francis, Pelton και Kaplan είτε επιλέξει στρόβιλο ειδικού τύπου (τέταρτη περίπτωση), στη συνέχεια ζητείται να καταχωρήσει το συντελεστή ηλεκτρ/κού εξοπλισμού (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11 Καταχώρηση συντελεστή απόδοσης ηλεκτρ/κού εξοπλισμού

Στο σημείο αυτό έχουν καταχωρηθεί είτε ο ολικός συντελεστής απόδοσης στην περίπτωση λειτουργίας με σταθερό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης είτε ο τύπος στροβίλου που θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το συντελεστή απόδοσης ηλεκτρ/κού εξοπλισμού στην περίπτωση μεταβλητού βαθμού απόδοσης στροβίλου. Το τελευταίο δεδομένο που μένει να καταχωρηθεί και για τις δύο περιπτώσεις είναι η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του στροβίλου (Εικόνα 4.12). Γνωρίζουμε ήδη πως η ονομαστική παροχή είναι το δεδομένο που θα επηρεάσει σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα του κώδικα καθώς αποτελεί την κύρια συνιστώσα της παραγόμενης ενέργειας. Μετά τη καταχώρηση και της ονομαστικής παροχής προκύπτουν τα αποτελέσματα του κώδικα.

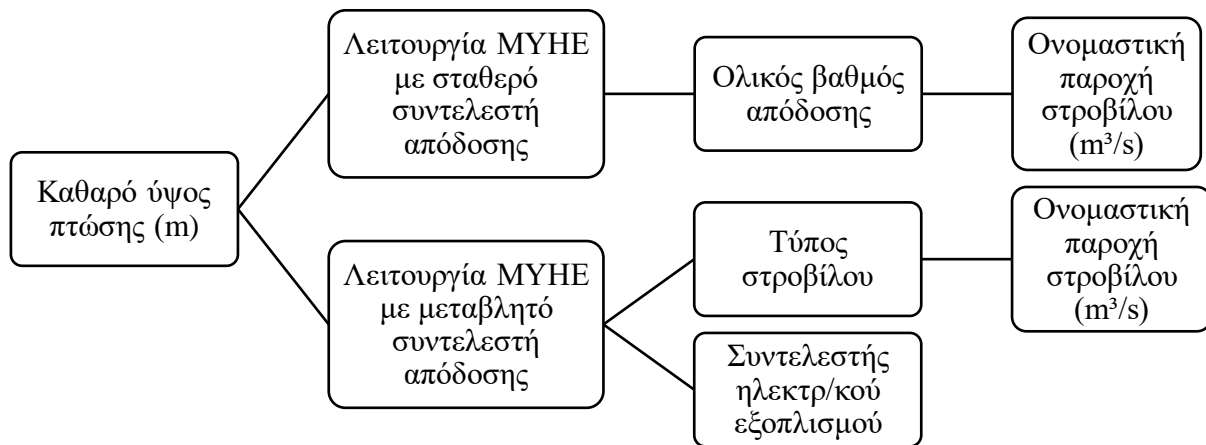

```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 1
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 4
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
(the value 0.96 is suggested from the instructor): 0.95
fx Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) (for example 0.5): |

```

Εικόνα 4.12 Καταχώρηση ονομαστικής παροχής στροβίλου (m^3/s)

Στη συνέχεια (Σχήμα 4.1) παρουσιάζεται συνοπτικά το διάγραμμα ροής επιλογής δεδομένων εισόδου που ακολουθεί ο χρήστης στον κώδικα 1.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής καταχώρισης δεδομένων εισόδου κώδικα 1

4.3.2 Κώδικας 2

Εφόσον ο χρήστης επιθυμεί να επιλέξει τον κώδικα 2, δηλαδή ένα ΜΥΗΕ με δύο στροβίλους δεδομένων ονομαστικών παροχών, πρέπει αρχικά να καταχωρήσει την επιλογή του στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13.

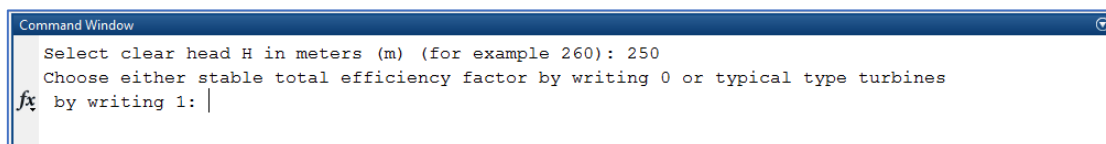
```

Command Window
fx >> two_turbines|

```

Εικόνα 4.13 Εντολή έναρξης κώδικα 2

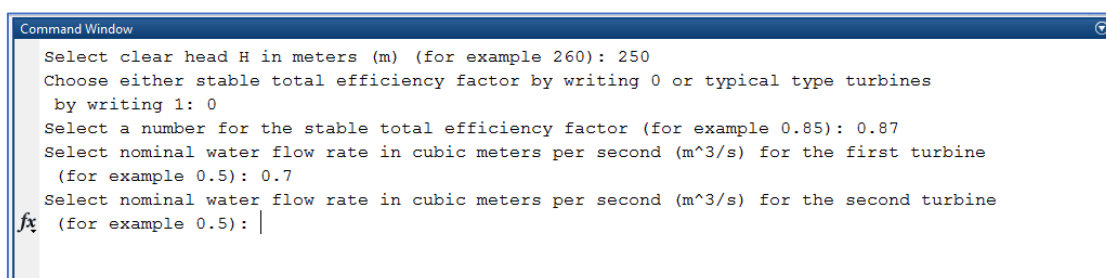
Στη συνέχεια ο χρήστης καταχωρεί με τον ίδιο τρόπο όπως και στον κώδικα 1 τη χρονοσειρά ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών (Εικόνα 4.5) καθώς και το καθαρό ύψος πτώσης (Εικόνα 4.6). Έπειτα ο χρήστης επιλέγει εάν θα θεωρήσει ότι ο ΜΥΗ Σταθμός λειτουργεί με ολικό συντελεστή απόδοσης σταθερό ή ότι λειτουργεί με μεταβλητούς συντελεστές απόδοσης για τους δύο στρόβιλους. Επομένως επιλέγει όπως και στον κώδικα 1 (Εικόνα 4.14).



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 250
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
fx by writing 1: |
```

Εικόνα 4.14 Επιλογή λειτουργίας του ΜΥΗΕ με σταθερό ή μεταβλητό συντελεστή απόδοσης

Εάν ο χρήστης επιλέξει το σταθερό συντελεστή απόδοσης τότε στη συνέχεια καταχωρεί τη τιμή του ολικού συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης ο οποίος περιλαμβάνει τους συντελεστές απόδοσης των δύο στρόβιλων αλλά και το συντελεστή ηλεκτρ/κού εξοπλισμού (Εικόνα 4.8). Αφού ο χρήστης καταχωρήσει τον ολικό συντελεστή απόδοσης μένει να οριστούν οι ονομαστικές παροχές των δύο στρόβιλων όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15.



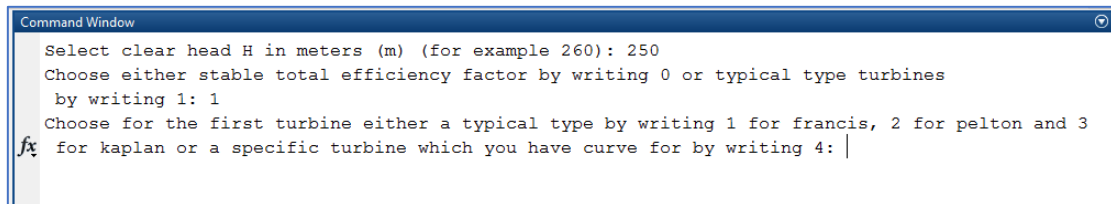
```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 250
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
by writing 1: 0
Select a number for the stable total efficiency factor (for example 0.85): 0.87
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the first turbine
(for example 0.5): 0.7
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the second turbine
fx (for example 0.5): |
```

Εικόνα 4.15 Επιλογή ονομαστικών παροχών για τον πρώτο και δεύτερο στρόβιλο (m^3/s)

Αντίθετα εάν ο χρήστης επιλέξει τη λύση με το μεταβλητό βαθμό απόδοσης τότε πρέπει να επιλέξει τον τύπο των δύο στρόβιλων καθώς και τις ονομαστικές (μέγιστες) παροχές τους. Όπως και στην περίπτωση του κώδικα 1 ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει για κάθε στρόβιλο ανάμεσα σε στρόβιλους τύπου Francis, Pelton και Kaplan αλλά και διαφορετικού τύπου στρόβιλο όπου ο χρήστης έχει καταχωρήσει τους συντελεστές απόδοσης του πριν την έναρξη του προγράμματος (Εικόνα 4.10).

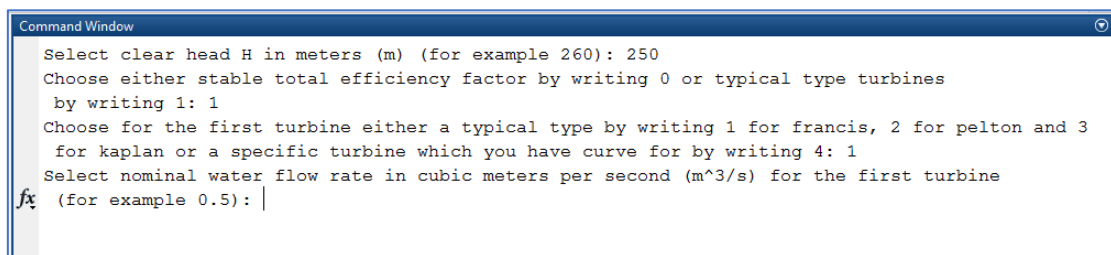
Συγκεκριμένα ζητείται από το χρήστη αρχικά να επιλέξει το τύπο του πρώτου στρόβιλου (Εικόνα 4.16) και στη συνέχεια την ονομαστική του παροχή (Εικόνα 4.17). Στο σημείο αυτό ο χρήστης πρέπει να προσέξει να αντιστοιχίσει τον τύπο του κάθε στρόβιλου με την ονομαστική

του παροχή. Επισημαίνεται ότι η επιλογή για παράδειγμα πρώτα ενός στροβίλου Francis και στη συνέχεια ενός στροβίλου Pelton δεν θα επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα με την επιλογή των δύο στροβίλων σε αντίστροφη σειρά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιρροή του συντελεστή απόδοσης που διαφέρει από στροβίλο σε στροβίλο. Οι στροβίλοι λειτουργούν με τη σειρά που παρουσιάστηκε και στο θεωρητικό υπόβαθρο του κεφαλαίου 3, πρώτα λειτουργεί ο πρώτος στροβίλος που καταχωρεί ο χρήστης και με τις παροχές που περισσεύουν λειτουργεί ο δεύτερος στροβίλος που καταχωρείται.



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 250
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
  by writing 1: 1
Choose for the first turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3
fx for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: |
```

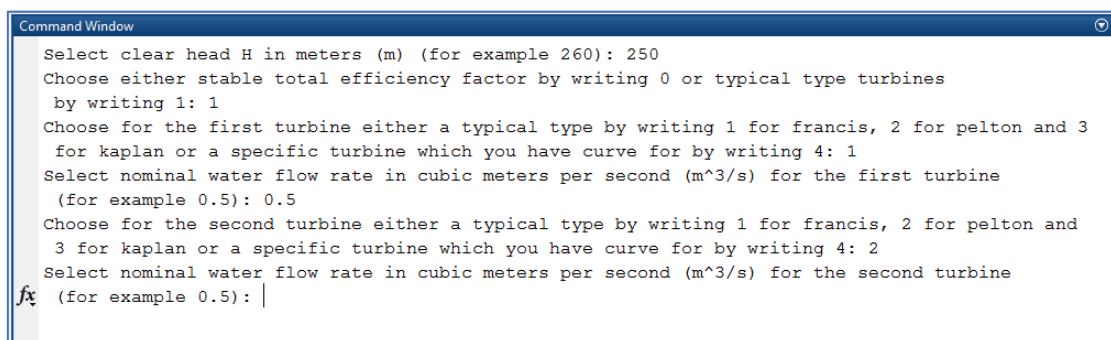
Εικόνα 4.16 Επιλογή τύπου στροβίλου για τον πρώτο στροβίλο



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 250
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
  by writing 1: 1
Choose for the first turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3
  for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 1
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the first turbine
fx (for example 0.5): |
```

Εικόνα 4.17 Επιλογή ονομαστικής παροχής στροβίλου για τον πρώτο στροβίλο (m^3/s)

Ακολούθως, ο χρήστης καταχωρεί τον τύπο και την ονομαστική παροχή του δεύτερου στροβίλου (Εικόνα 4.18) και ξεκινούν οι υπολογισμοί του κώδικα 2.



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 250
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
  by writing 1: 1
Choose for the first turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3
  for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 1
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the first turbine
  (for example 0.5): 0.5
Choose for the second turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and
  3 for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 2
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the second turbine
fx (for example 0.5): |
```

Εικόνα 4.18 Επιλογή τύπου και ονομαστικής παροχής στροβίλου για το δεύτερο στροβίλο (m^3/s)

Σε αντιστοιχία με τον κώδικα 1 παρουσιάζεται στη συνέχεια (Σχήμα 4.2) συνοπτικά το διάγραμμα ροής που ακολουθείται στην επιλογή δεδομένων εισόδου από το χρήστη για τον κώδικα 2.

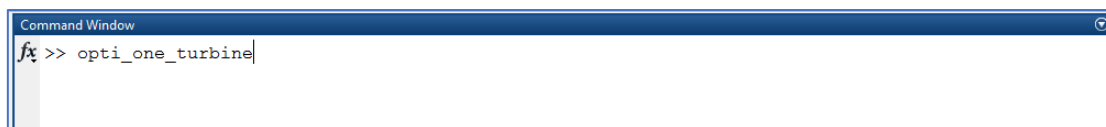


Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ροής καταχώρισης δεδομένων εισόδου κώδικα 2

4.3.3 Κώδικες 3 και 4

Μεταβάλλοντας την ονομαστική παροχή του στροβίλου στον κώδικα 1 και τις παροχές των δύο στροβίλων στον κώδικα 2 παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στην ενεργειακή παραγωγή. Για το λόγο αυτό διερευνάται η βέλτιστη ονομαστική παροχή στροβίλου για ένα δεδομένο τύπο στροβίλου με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα μελέτη δεν εξετάζονται τα οικονομικά δεδομένα των μεγεθών και για το λόγο αυτό η βελτιστοποίηση είναι καθαρά ενεργειακή. Ο μελετητής στη συνέχεια μπορεί να συνδυάσει την παρούσα μελέτη με μια μελέτη οικονομικής βελτιστοποίησης και να επιλέξει μια βέλτιστη αλλά και οικονομικά βιώσιμη λύση.

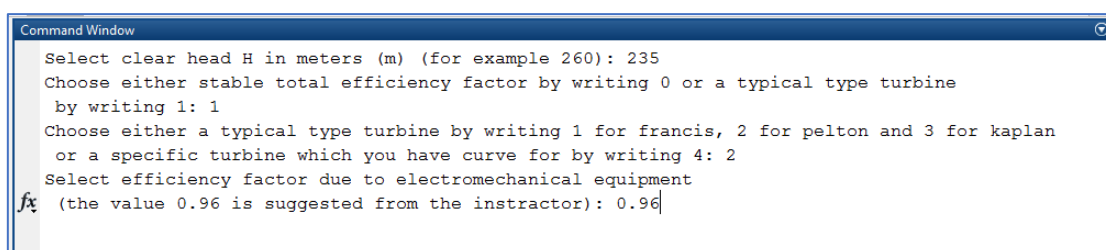
Αρχικά ο χρήστης επιλέγει τον κώδικα 3, δηλαδή βελτιστοποίηση ενός ΜΥΗΕ με ένα στροβίλο, καταχωρώντας την εντολή εκτέλεσης στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.19.



```
Command Window
fx >> opti_one_turbine|
```

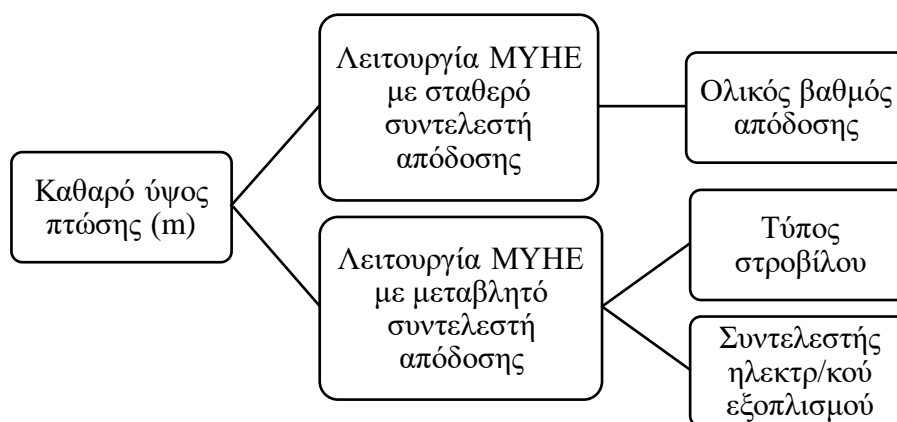
Εικόνα 4.19 Εντολή έναρξης κώδικα 3

Η ανάγνωση των δεδομένων εισόδου του κώδικα 3 είναι ακριβώς ίδια με αυτήν που παρουσιάστηκε στον κώδικα 1 με μόνη εξαίρεση ότι ο χρήστης δεν επιλέγει ονομαστική παροχή για το στρόβιλο καθώς αυτή θα προκύψει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης που πραγματοποιεί ο κώδικας 3. Η καταχώρηση των δεδομένων του κώδικα 3 παρουσιάζεται συνοπτικά στην Εικόνα 4.20 και το αντίστοιχο διάγραμμα ροής που ακολουθείται σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 1
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 2
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
fx (the value 0.96 is suggested from the instructor): 0.96|
```

Εικόνα 4.20: Καταχώρηση δεδομένων εισόδου στον κώδικα 3



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ροής καταχώρισης δεδομένων εισόδου κώδικα 3

Αντίστοιχα εάν ο χρήστης επιθυμεί να επιλέξει τον κώδικα 4, δηλαδή βελτιστοποίηση ενός ΜΥΗΕ με δύο στρόβιλους, καταχωρεί την εντολή εκτέλεσης στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.21.

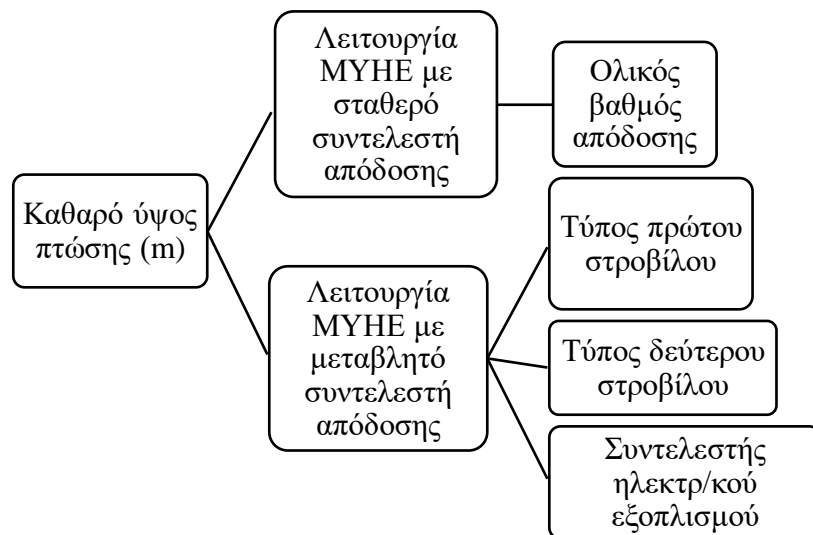
```
Command Window
fx >> opti_two_turbines|
```

Εικόνα 4.21 Εντολή έναρξης κώδικα 4

Στη συνέχεια καταχωρούνται τα δεδομένα εισόδου από το χρήστη όπως και στον κώδικα 2 με εξαίρεση όμως τις ονομαστικές παροχές των στροβίλων όπου σε αυτήν την περίπτωση αποτελούν αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του κώδικα 4. Η καταχώριση των δεδομένων εισόδου παρουσιάζεται συνοπτικά στην Εικόνα 4.22 και στη συνέχεια (Σχήμα 4.4) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που ακολουθείται στην περίπτωση του κώδικα 4.

```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 240
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
by writing 1: 1
Choose for the first turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3
for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 1
Choose for the second turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and
3 for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 2
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
fx (the value 0.96 is suggested from the instructor): 0.96|
```

Εικόνα 4.22 Καταχώριση δεδομένων εισόδου στον κώδικα 4

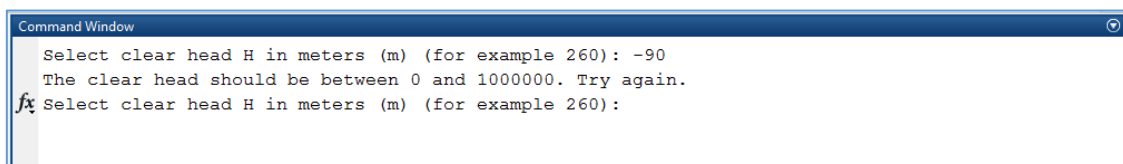


Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής καταχώρισης δεδομένων εισόδου κώδικα 4

4.3.4 Μηνύματα ελέγχου στην εισαγωγή δεδομένων

Με σκοπό τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με το πρόγραμμα η εισαγωγή των δεδομένων ακολουθείται από μια σειρά ελέγχων των τιμών που καταχωρούνται. Πιο συγκεκριμένα ο χρήστης ειδοποιείται με αντίστοιχο μήνυμα εάν η τιμή που καταχώρησε στον κώδικα είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων ή μη αληθής και του ζητείται να καταχωρήσει την τιμή εκ νέου αλλά στα επιτρεπόμενα όρια. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί εάν για παράδειγμα ο χρήστης πληκτρολογούσε μία αρνητική τιμή για τον ολικό συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης, κάτι το οποίο δεν θα μπορούσε να συμβαίνει σε ένα ΜΥΗΕ. Τα μηνύματα ελέγχου αφορούν όλες τις τιμές που καταχωρούνται στο πρόγραμμα και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

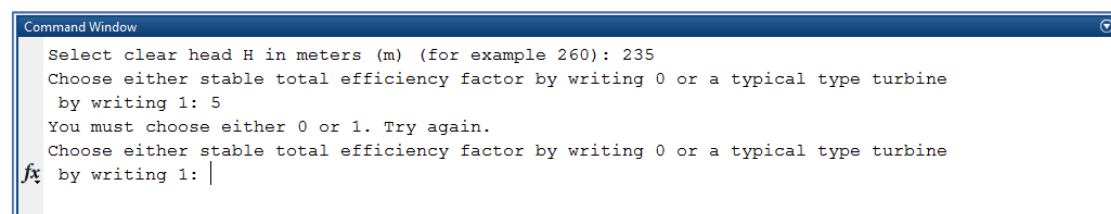
Αρχικά το καθαρό ύψος πτώσεως θα πρέπει να είναι θετικός αριθμός όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.23.



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): -90
The clear head should be between 0 and 1000000. Try again.
fx Select clear head H in meters (m) (for example 260):
```

Εικόνα 4.23 Μήνυμα μη εγκυρότητας της καταχωρημένης τιμής του καθαρού ύψους πτώσεως (m)

Στη συνέχεια ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ανάμεσα σε σταθερό ή μεταβλητό συντελεστή απόδοσης, συγκεκριμένα πρέπει να καταχωρήσει την τιμή 0 για την πρώτη περίπτωση ή την τιμή 1 για τη δεύτερη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.24.



```
Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 5
You must choose either 0 or 1. Try again.
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
fx by writing 1: |
```

Εικόνα 4.24 Μήνυμα μη εγκυρότητας για την επιλογή ανάμεσα σε σταθερό και μεταβλητό συντελεστή απόδοσης

Εάν ο χρήστης επιλέξει σταθερό συντελεστή απόδοσης θα πρέπει να καταχωρήσει στη συνέχεια την τιμή του ολικού συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης (Εικόνα 4.25). Είναι προφανές ότι ο συντελεστής κυμαίνεται από 0 έως 1.


```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 0
Select a number for the stable total efficiency factor (for example 0.85): 1.6
The total efficiency factor should be between 0 and 1. Try again.
fx Select a number for the stable total efficiency factor (for example 0.85): |

```

Εικόνα 4.25 Μήνυμα μη εγκυρότητας της καταχωρημένης τιμής του ολικού συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης

Αντίθετα εάν ο χρήστης επιλέξει να χρησιμοποιήσει μεταβλητό συντελεστή απόδοσης τότε θα πρέπει αρχικά να επιλέξει τον τύπο του στροβίλου που θα χρησιμοποιηθεί καταχωρώντας την τιμή 1 για στρόβιλο Francis, την τιμή 2 για στρόβιλο Pelton, την τιμή 3 για στρόβιλο Kaplan και τέλος την τιμή 4 για διαφορετικό στρόβιλο. Οποιαδήποτε άλλη τιμή είναι μη έγκυρη και σταματάει ο κώδικας μέχρι να καταχωρηθεί μία από τις παραπάνω επιτρεπόμενες τιμές όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.26.

```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 1
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 0
You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
or a specific turbine which you have curve for by writing 4: |

```

Εικόνα 4.26 Μήνυμα μη εγκυρότητας στην επιλογή του τύπου στροβίλου

Στην περίπτωση που ο χρήστης εκτελεί τους κώδικες 1 ή 2, απαιτείται στη συνέχεια η καταχώρηση της ονομαστική παροχής του στροβίλου (ή των στροβίλων). Η ονομαστική παροχή θα πρέπει να είναι θετικός αριθμός και συγκεκριμένα μικρότερος ή ίσος της μέγιστης παροχής που εμφανίζεται στη χρονοσειρά ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών (Εικόνα 4.27). Μία ονομαστική παροχή στροβίλου μεγαλύτερη της μέγιστης ημερήσιας παροχής δεν αποτελεί σίγουρα βέλτιστη λύση αλλά θα οδηγούσε και σε προφανή μη εκμετάλλευση του υδατικού δυναμικού της θέσης εγκατάστασης.

```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 0
Select a number for the stable total efficiency factor (for example 0.85): 0.87
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) (for example 0.5): 13
The nominal water flow rate should be between 0 and 12.098. Try again.
fx Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) (for example 0.5):

```

Εικόνα 4.28 Μήνυμα μη εγκυρότητας της καταχωρημένης τιμής της ονομαστικής παροχής (m³/s)

Τέλος, ζητείται από το χρήστη να καταχωρήσει την τιμή του συντελεστή απόδοσης ηλεκτρ/κού εξοπλισμού. Η τιμή αυτή κυμαίνεται ανάμεσα στο 0 και στο 1 με το συντελεστή να τείνει προς τη μονάδα όσο καλύτερη είναι η απόδοση του εξοπλισμού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η τιμή 0.96 είναι η πιο συνήθης για τις μελέτες ΜΗΥΕ και προτείνεται στο χρήστη (Εικόνα 4.28).

```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 235
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 1
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 2
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
(the value 0.96 is suggested from the instructor): 1.2
The efficiency factor due to electromechanical equipment should be between 0 and 1. Try again.
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
fx (the value 0.96 is suggested from the instructor): |

```

Εικόνα 4.28 Μήνυμα μη εγκυρότητας της καταχωρημένης τιμής του συντελεστή απόδοσης ηλεκτρ/κού εξοπλισμού

4.4 Λειτουργίες και Αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές λειτουργίες που υλοποιούνται από κάθε κώδικα που αναπτύχθηκε καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν αντιστοίχως.

4.4.1 Κώδικας 1

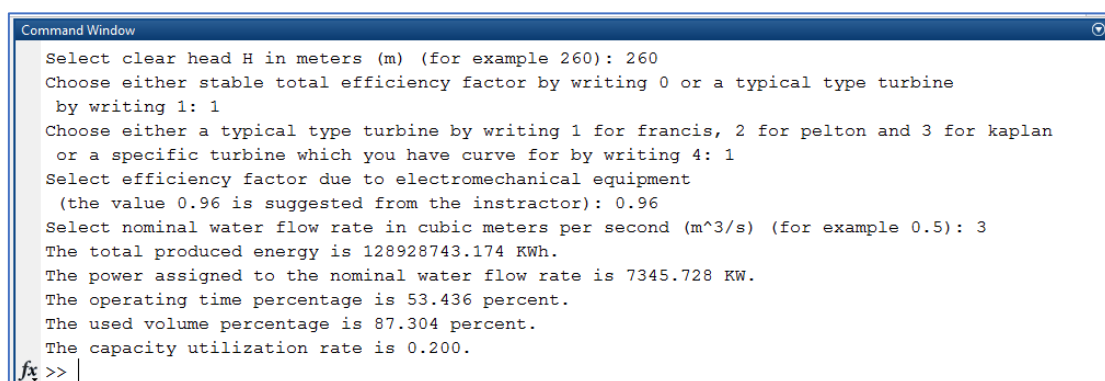
Οι βασικές λειτουργίες που πραγματοποιεί ο κώδικας είναι οι εξής:

- Ανάλυση του υδάτινου δυναμικού και παρουσίαση των αντίστοιχων γραφημάτων
- Υπολογισμός ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας

- Υπολογισμός ημερήσιων βαθμών απόδοσης του στροβίλου
- Υπολογισμός ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών
- Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας ΜΥΗΕ με έναν στρόβιλο (υπολογισμός των βασικών μεγεθών λειτουργίας της εγκατάστασης και παρουσίαση τους στην έξοδο)
- Παρουσίαση των χρονοσειρών της παραγόμενης ενέργειας και του όγκου νερού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή

Τα αποτελέσματα του κώδικα παρουσιάζονται στην έξοδο του σε μορφή κειμένου αλλά και με γραφήματα απεικόνισης.

Αρχικά εμφανίζονται στο παράθυρο διαχείρισης η συνολική παραγωγή ενέργειας (total produced energy) σε kWh, η ισχύς στη μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης (power assigned to the nominal water flow rate) σε kW, το ποσοστό (%) του χρόνου λειτουργίας στο έτος (operating time percentage), το ποσοστό (%) του όγκου νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ενέργειας (used volume percentage) και τέλος ο συντελεστής δυναμικότητας της εγκατάστασης (capacity factor). Η μορφή που εμφανίζονται τα αποτελέσματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.29.



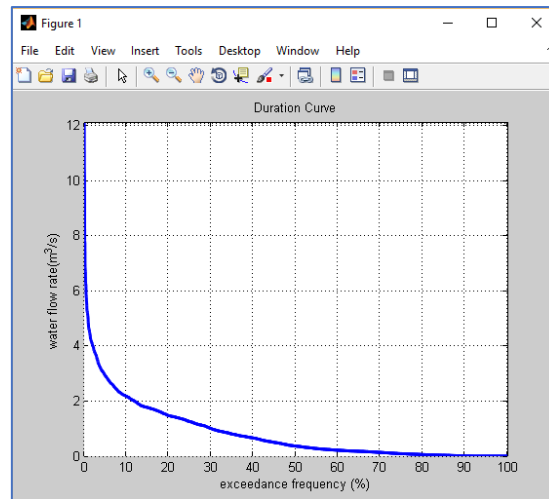
```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 260
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 1
Choose either a typical type turbine by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan
or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 1
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
(the value 0.96 is suggested from the instructor): 0.96
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) (for example 0.5): 3
The total produced energy is 128928743.174 kWh.
The power assigned to the nominal water flow rate is 7345.728 KW.
The operating time percentage is 53.436 percent.
The used volume percentage is 87.304 percent.
The capacity utilization rate is 0.200.
fx >> |

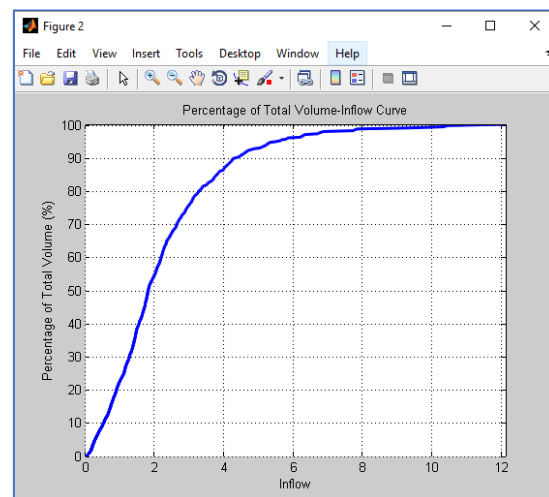
```

Εικόνα 4.29 Αποτελέσματα εξόδου κώδικα 1

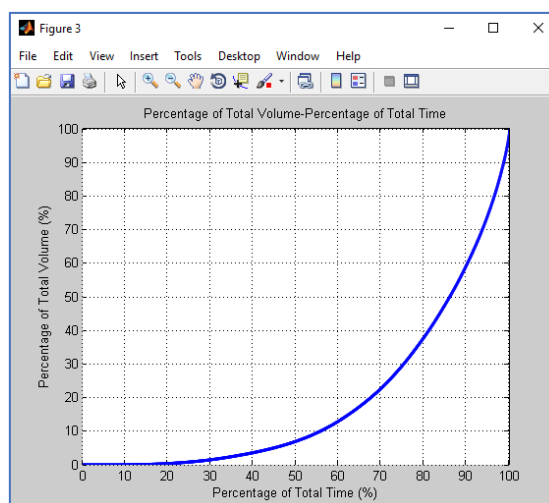
Στη συνέχεια εμφανίζονται τα διαγράμματα ανάλυσης του υδάτινου δυναμικού. Αρχικά εμφανίζεται η καμπύλη διάρκειας παροχής (Διάγραμμα 4.1), έπειτα η καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής (Διάγραμμα 4.2) και τέλος η καμπύλη ποσοστού όγκου-χρόνου (Διάγραμμα 4.3). Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν συνάρτηση των δεδομένων του υδάτινου δυναμικού και δεν μεταβάλλονται ανεξαρτήτως της διάταξης του ΜΥΗΕ. Ως αποτέλεσμα, για δεδομένη χρονοσειρά ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών τα Διαγράμματα 4.1 έως 4.3 είναι ίδια και στους τέσσερις κώδικες του λογισμικού που κατασκευάστηκε.



Διάγραμμα 4.1 Καμπύλη διάρκειας παροχής από το λογισμικό

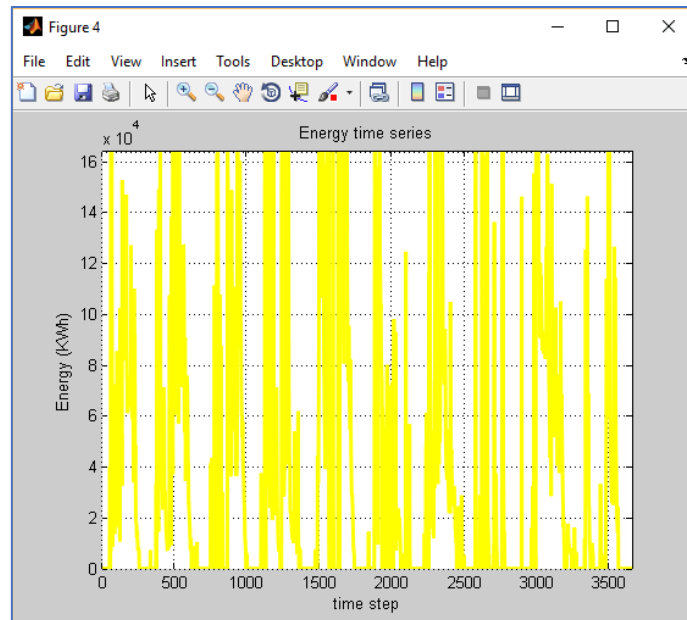


Διάγραμμα 4.2 Καμπύλη ποσοστού όγκου-παροχής από το λογισμικό

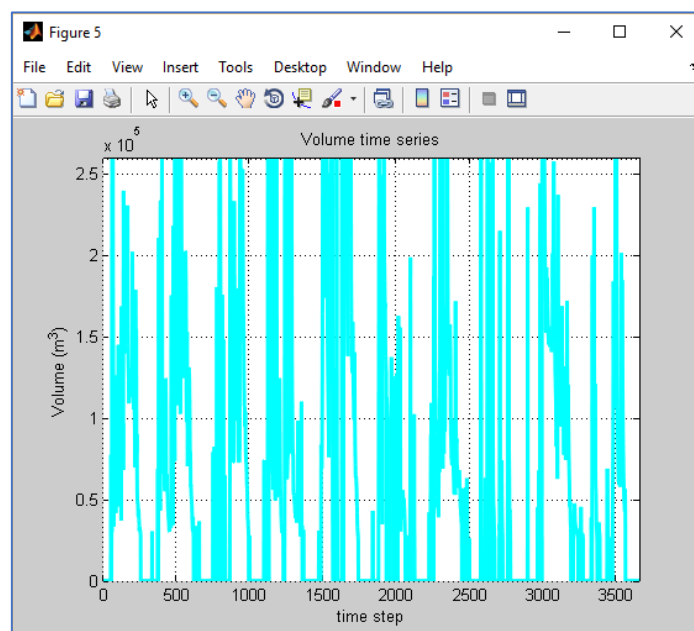


Διάγραμμα 4.3 Καμπύλη ποσοστού όγκου-χρόνου από το λογισμικό

Στη συνέχεια εμφανίζονται η χρονοσειρά ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών (Διάγραμμα 4.4) και η χρονοσειρά ημερήσιων όγκων νερού που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας (Διάγραμμα 4.5).



Διάγραμμα 4.4 Χρονοσειρά ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών



Διάγραμμα 4.5 Χρονοσειρά ημερήσιων όγκων νερού που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή της ενέργειας

Τα Διαγράμματα 4.4 και 4.5 εξυπηρετούν στην ποιοτική εκτίμηση της καταλληλότητας της ονομαστικής παροχής που επέλεξε ο χρήστης. Δοκιμάζοντας ονομαστικές παροχές με μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους παρατηρείται ότι ενώ η πιο αποδοτική λύση παράγει χρονοσειρές με υψηλές κορυφές, η λύση που δεν θεωρείται τόσο αποδοτική παράγει χρονοσειρές με μειωμένο αριθμό κορυφών οι οποίες εμφανίζονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

4.4.2 Κώδικας 2

Οι βασικές λειτουργίες που πραγματοποιεί ο κώδικας είναι οι εξής:

- Ανάλυση του υδάτινου δυναμικού και παρουσίαση των αντίστοιχων γραφημάτων
- Υπολογισμός ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας του πρώτου στροβίλου
- Υπολογισμός ημερήσιων βαθμών απόδοσης του πρώτου στροβίλου
- Υπολογισμός ημερήσιων ενεργειών που παράγει ο πρώτος στρόβιλος
- Υπολογισμός περίσσειας ημερήσιων παροχών που δεν χρησιμοποιήθηκαν από τον πρώτο στρόβιλο
- Από την περίσσεια παροχών υπολογίζονται οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας του δεύτερου στροβίλου
- Υπολογισμός ημερήσιων βαθμών απόδοσης του δεύτερου στροβίλου
- Υπολογισμός ημερήσιων ενεργειών που παράγει ο δεύτερος στρόβιλος
- Υπολογισμός συνολικής ενέργειας που παράγεται από το ΜΥΗΕ
- Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας ΜΥΗΕ με δύο στροβίλους (υπολογισμός των βασικών μεγεθών λειτουργίας της εγκατάστασης και παρουσίαση τους στην έξοδο)
- Παρουσίαση των χρονοσειρών της συνδυαστικής παραγόμενης ενέργειας και του όγκου νερού που χρησιμοποιήθηκε και από τους δύο στροβίλους για την παραγωγή

Τα αποτελέσματα του κώδικα 2 είναι στην ίδια ακριβώς μορφή με αυτή των αποτελεσμάτων του κώδικα 1. Επισημαίνεται ότι σε αυτόν τον κώδικα τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα που εμφανίζονται προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά και των δύο στροβίλων συνδυαστικά. Συνοπτικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.30 τα αποτελέσματα εξόδου του κώδικα 2.

```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 260
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or typical type turbines
by writing 1: 1
Choose for the first turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3
for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 2
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the first turbine
(for example 0.5): 4.5
Choose for the second turbine either a typical type by writing 1 for francis, 2 for pelton and
3 for kaplan or a specific turbine which you have curve for by writing 4: 1
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) for the second turbine
(for example 0.5): 0.5
Select efficiency factor due to electromechanical equipment
(the value 0.96 is suggested from the instructor): 0.96
The total produced energy is 150950277.624 kWh.
The power assigned to the nominal water flow rate is 12242.880 kW.
The operating time percentage is 81.029 percent.
The used volume percentage is 98.020 percent.
The capacity utilization rate is 0.141.
fx >> |

```

Εικόνα 4.30 Αποτελέσματα εξόδου κώδικα 2

4.4.3 Κώδικας 3

Οι βασικές λειτουργίες που πραγματοποιεί ο κώδικας είναι οι εξής:

- Ανάλυση του υδάτινου δυναμικού και παρουσίαση των αντίστοιχων γραφημάτων
- Παραγωγή όλων των πιθανών τιμών της ονομαστικής παροχής του στροβίλου

Για κάθε μία πιθανή τιμή ονομαστικής παροχής πραγματοποιείται:

- Υπολογισμός ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας
- Υπολογισμός ημερήσιων βαθμών απόδοσης του στροβίλου
- Υπολογισμός ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών
- Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας ΜΥΗΕ με έναν στρόβιλο (υπολογισμός των βασικών μεγεθών λειτουργίας της εγκατάστασης και αποθήκευση τους σε πίνακες)

Στη συνέχεια, συγκεντρωτικά για όλες τις λύσεις υλοποιούνται οι εξής λειτουργίες:

- Εκλογή των επιτρεπτών λύσεων από τους κανονισμούς
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης σε πίνακα με φθίνουσα κατάταξη
- Παρουσίαση γραφημάτων απεικόνισης των τάσεων των μεγεθών λειτουργίας

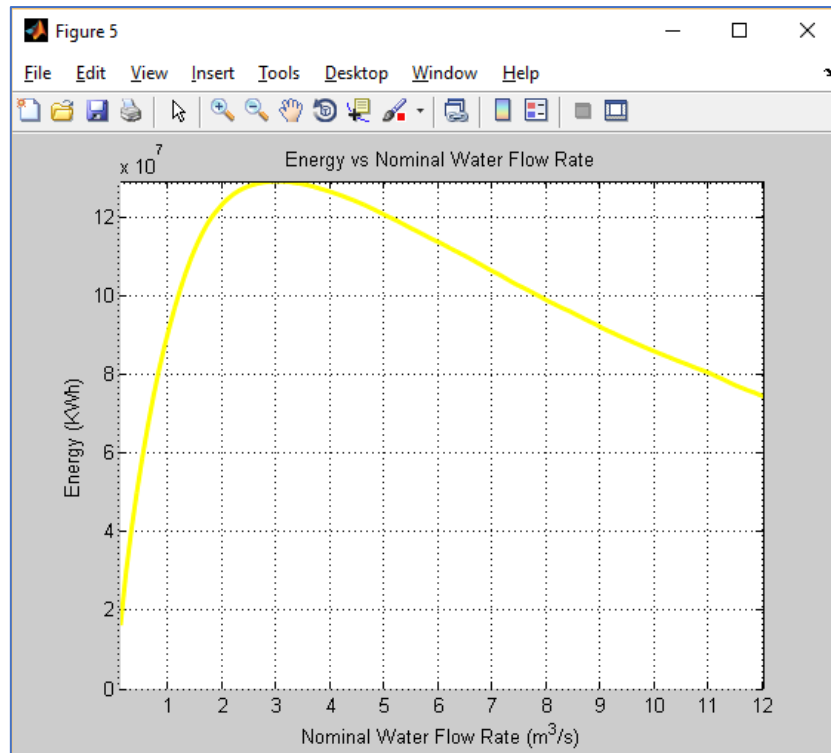
Η έξοδος του κώδικα 3 επικεντρώνεται κυρίως στη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων με σκοπό την σύγκριση των πιθανών λύσεων που μελετήθηκαν. Καθώς ο κώδικας πραγματοποιεί βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής μεταβάλλοντας την ονομαστική

παροχή του στροβίλου πρέπει να παρέχει στο χρήστη την τάση του κάθε μεγέθους ημερήσιας λειτουργίας του ΜΥΗΕ συναρτήσει αυτής της μεταβολής. Ο χρήστης θα μπορέσει έτσι να επιλέξει μία λύση ανάμεσα στις πιο αποδοτικές ανάλογα με το μέγεθος λειτουργίας που θέλει να επικεντρωθεί. Μετά την απεικόνιση των Διαγραμμάτων 4.1 έως 4.3, που όπως αναφέρθηκε παρουσιάζονται σε κάθε κώδικα, παρουσιάζεται πίνακας με την συνολική παραγόμενη ενέργεια σε kWh σε φθίνουσα σειρά και τις ονομαστικές παροχές σε m^3/s που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια (Εικόνα 4.31).

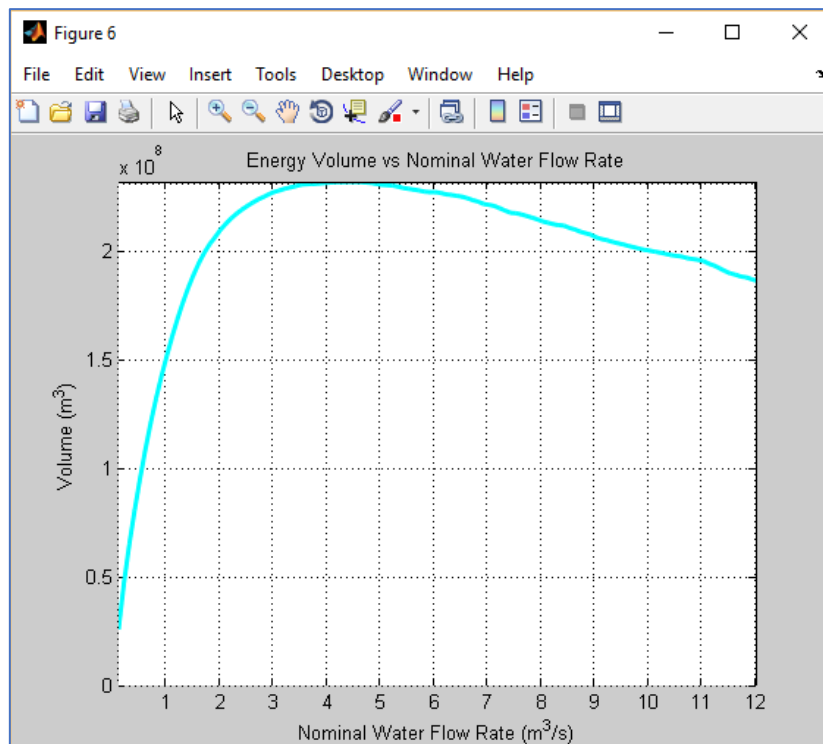
Q (m^3/s)	SE (kWh)
3.000	128928743.17
2.900	128874055.79
3.100	128849754.00
3.200	128749160.18
2.800	128728256.22
3.300	128555364.66
2.700	128536574.87
3.400	128344311.98
2.600	128225672.21
3.500	128115744.38
2.500	127810499.70
3.600	127778997.24
3.700	127399931.70
2.400	127274762.04
3.800	126986380.27
2.300	126608338.26
3.900	126573811.14
4.000	126132545.40
2.200	125753913.48
4.100	125673451.82
4.200	125181132.83

Εικόνα 4.31 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης κώδικα 3

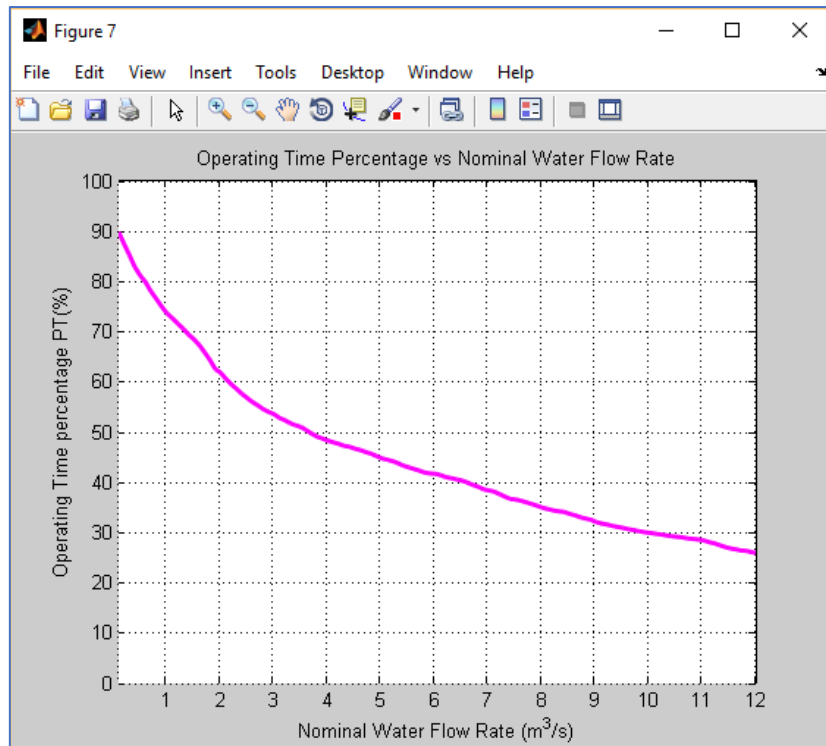
Με σκοπό την απεικόνιση των τάσεων των μεγεθών λειτουργίας του ΜΥΗΕ κατασκευάζονται από τον κώδικα 3 τα παρακάτω διαγράμματα και εμφανίζονται στην έξοδο του. Συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 4.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας σε kWh συναρτήσει των πιθανών τιμών της ονομαστικής παροχής σε m^3/s και αντίστοιχα στο Διάγραμμα 4.7 παρουσιάζεται η μεταβολή του συνολικού όγκου νερού σε m^3 που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας συναρτήσει πάλι των πιθανών τιμών της ονομαστικής παροχής σε m^3/s . Στα Διαγράμματα 4.8 και 4.9 παρουσιάζονται η μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος (%) και αντίστοιχα η μεταβολή του ποσοστού όγκου νερού που αξιοποιείται (%), συναρτήσει της ονομαστικής παροχής σε m^3/s .



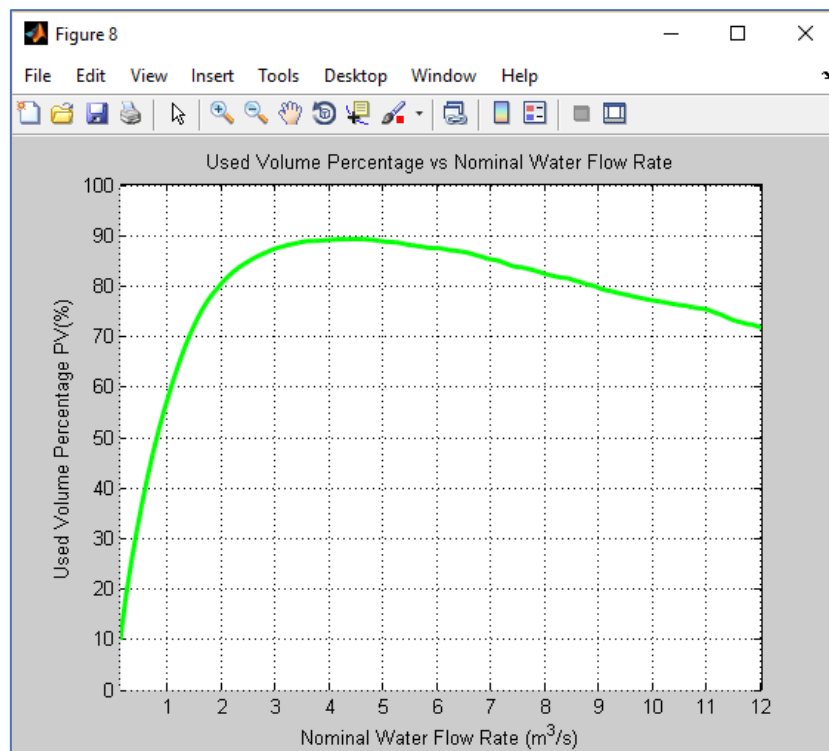
Διάγραμμα 4.6 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m³/s)



Διάγραμμα 4.7 Μεταβολή του συνολικού όγκου νερού (m³) που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m³/s)



Διάγραμμα 4.8 Μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος (%) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m³/s)



Διάγραμμα 4.9 Μεταβολή του ποσοστού όγκου νερού που αξιοποιείται (%) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m³/s)

4.4.4 Κώδικας 4

Οι βασικές λειτουργίες που πραγματοποιεί ο κώδικας είναι οι εξής:

- Ανάλυση του υδάτινου δυναμικού και παρουσίαση των αντίστοιχων γραφημάτων
- Παραγωγή όλων των δυνατών συνδυασμών των πιθανών τιμών ονομαστικής παροχής των δύο στρόβιλων

Για κάθε έναν δυνατό συνδυασμό πραγματοποιείται:

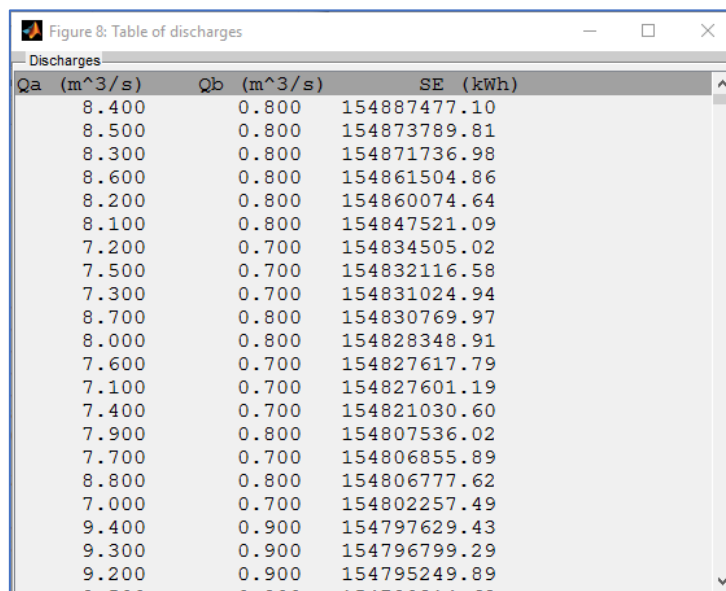
- Υπολογισμός των ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας του πρώτου στρόβιλου
- Υπολογισμός ημερήσιων βαθμών απόδοσης του πρώτου στρόβιλου
- Υπολογισμός ημερήσιων ενεργειών που παράγει ο πρώτος στρόβιλος
- Υπολογισμός περίσσειας ημερήσιων παροχών που δεν χρησιμοποιήθηκαν από τον πρώτο στρόβιλο
- Από την περίσσεια παροχών υπολογίζονται οι ημερήσιες εκμεταλλεύσιμες παροχές που συμμετέχουν στην παραγωγή της ενέργειας του δεύτερου στρόβιλου
- Υπολογισμός ημερήσιων βαθμών απόδοσης του δεύτερου στρόβιλου
- Υπολογισμός ημερήσιων ενεργειών που παράγει ο δεύτερος στρόβιλος
- Υπολογισμός συνολικής ενέργειας που παράγεται από το ΜΥΗΕ
- Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας ΜΥΗΕ με δύο στρόβιλους (υπολογισμός των βασικών μεγεθών λειτουργίας της εγκατάστασης και αποθήκευση της σε πίνακες)

Στη συνέχεια, συγκεντρωτικά για όλους της συνδυασμούς υλοποιούνται οι εξής λειτουργίες:

- Εκλογή των επιτρεπτών λύσεων από της κανονισμούς
- Παρουσίαση γραφημάτων απεικόνισης των τάσεων των συνολικών μεγεθών λειτουργίας του ΜΥΗΕ
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης σε πίνακα με φθίνουσα κατάταξη
- Παρουσίαση γραφήματος που αποτυπώνει την τάση της παραγόμενης ενέργειας σε συνάρτηση με της δύο ονομαστικές παροχές που περιέχει ο κάθε συνδυασμός

Όπως είναι προφανές τα αποτελέσματα του κώδικα 4 παρουσιάζονται στην ίδια μορφή με αυτά του κώδικα 3. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάζεται και παρουσιάζεται πίνακας με την συνολική

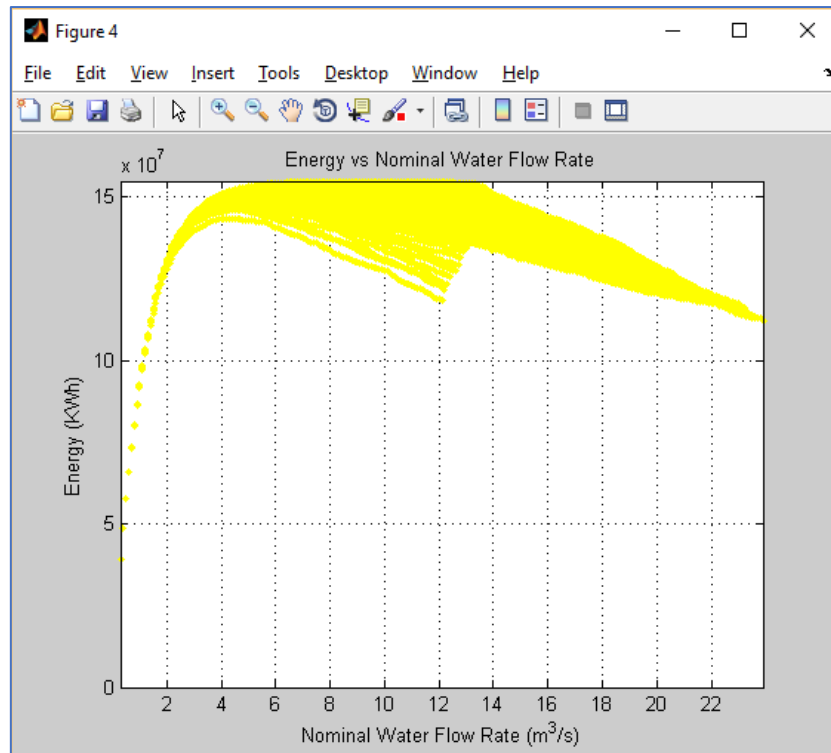
παραγόμενη ενέργεια σε kWh σε φθίνουσα σειρά και τις ονομαστικές παροχές του κάθε στροβίλου σε m^3/s που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια (Εικόνα 4.32). Επισημαίνεται ότι Q_a είναι η παροχή του πρώτου στροβίλου και Q_b η παροχή του δεύτερου.



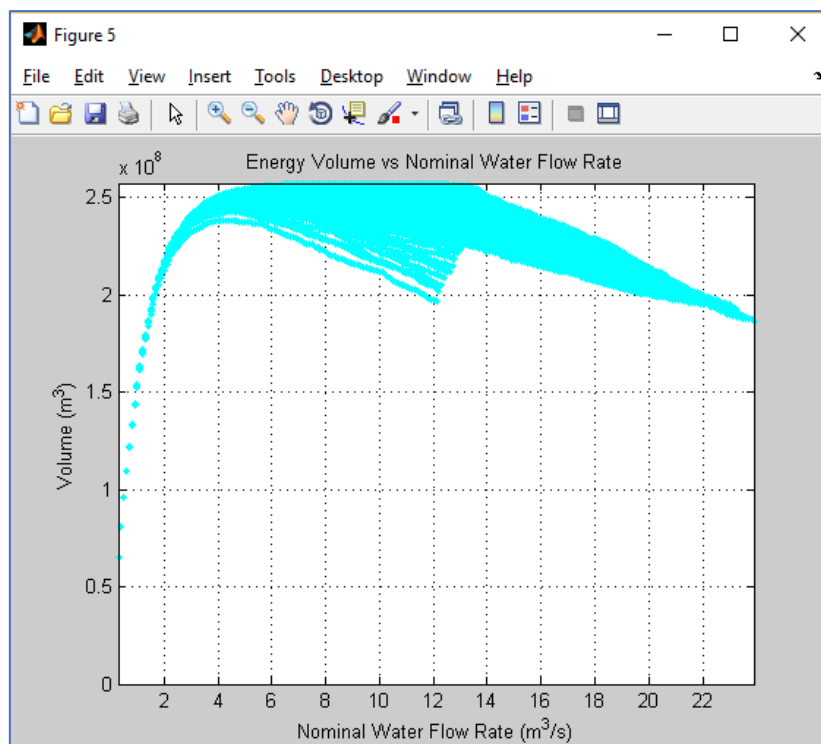
Qa (m^3/s)	Qb (m^3/s)	SE (kWh)
8.400	0.800	154887477.10
8.500	0.800	154873789.81
8.300	0.800	154871736.98
8.600	0.800	154861504.86
8.200	0.800	154860074.64
8.100	0.800	154847521.09
7.200	0.700	154834505.02
7.500	0.700	154832116.58
7.300	0.700	154831024.94
8.700	0.800	154830769.97
8.000	0.800	154828348.91
7.600	0.700	154827617.79
7.100	0.700	154827601.19
7.400	0.700	154821030.60
7.900	0.800	154807536.02
7.700	0.700	154806855.89
8.800	0.800	154806777.62
7.000	0.700	154802257.49
9.400	0.900	154797629.43
9.300	0.900	154796799.29
9.200	0.900	154795249.89

Εικόνα 4.32 Πίνακας αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης κώδικα 4

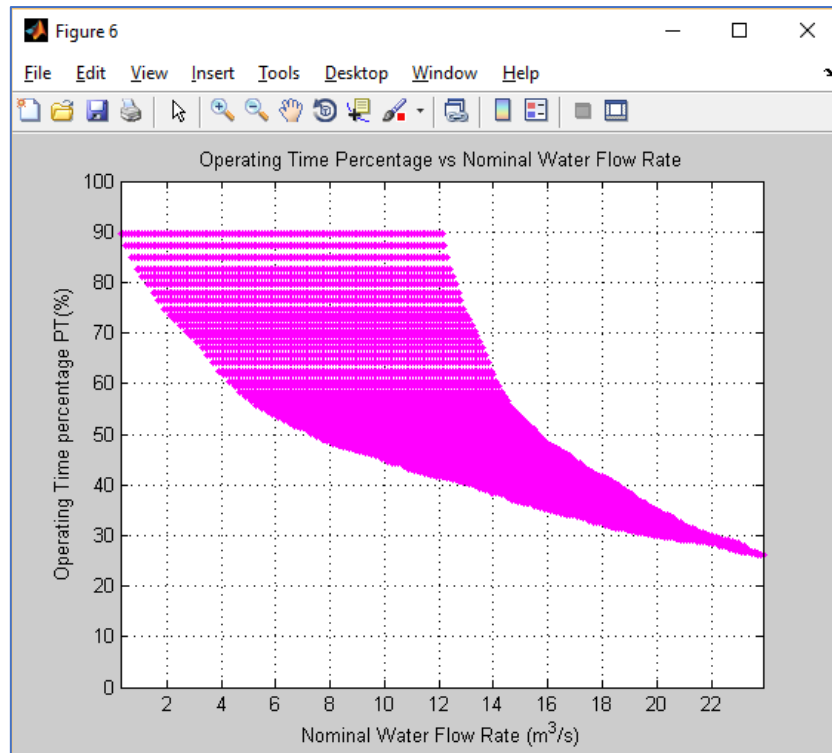
Στη συνέχεια υπολογίζονται τα συνολικά μεγέθη ημερήσιας λειτουργίας του ΜΥΗΕ λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά και των δύο στροβίλων. Για την απεικόνιση των τάσεων των μεγεθών αυτών παρουσιάζονται τα διαγράμματα 4.10 έως 4.13. Συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 4.10 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (αθροιστικά από τους δύο στροβίλους) σε kWh συναρτήσει των πιθανών τιμών αθροιστικής ονομαστικής παροχής σε m^3/s και αντίστοιχα στο Διάγραμμα 4.11 παρουσιάζεται η μεταβολή του συνολικού όγκου νερού σε m^3 που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας των δύο στροβίλων συναρτήσει πάλι των πιθανών τιμών αθροιστικής ονομαστικής παροχής σε m^3/s . Στα Διαγράμματα 4.12 και 4.13 παρουσιάζονται η μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος (%) και αντίστοιχα η μεταβολή του ποσοστού όγκου νερού που αξιοποιείται (%), συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής των δύο στροβίλων σε m^3/s .



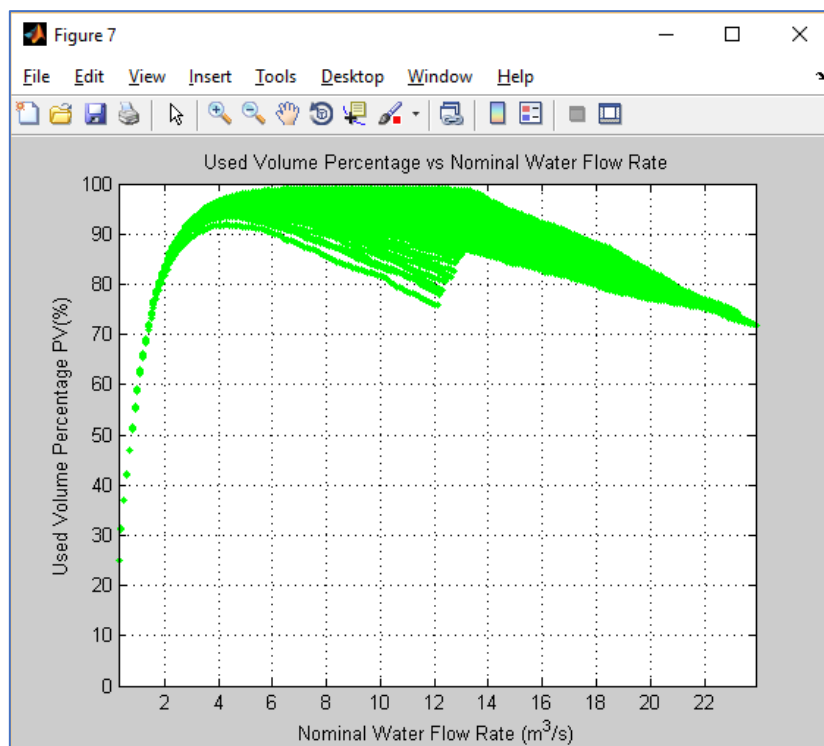
Διάγραμμα 4.10 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m^3/s)



Διάγραμμα 4.11 Μεταβολή του συνολικού όγκου νερού (m^3) που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m^3/s)

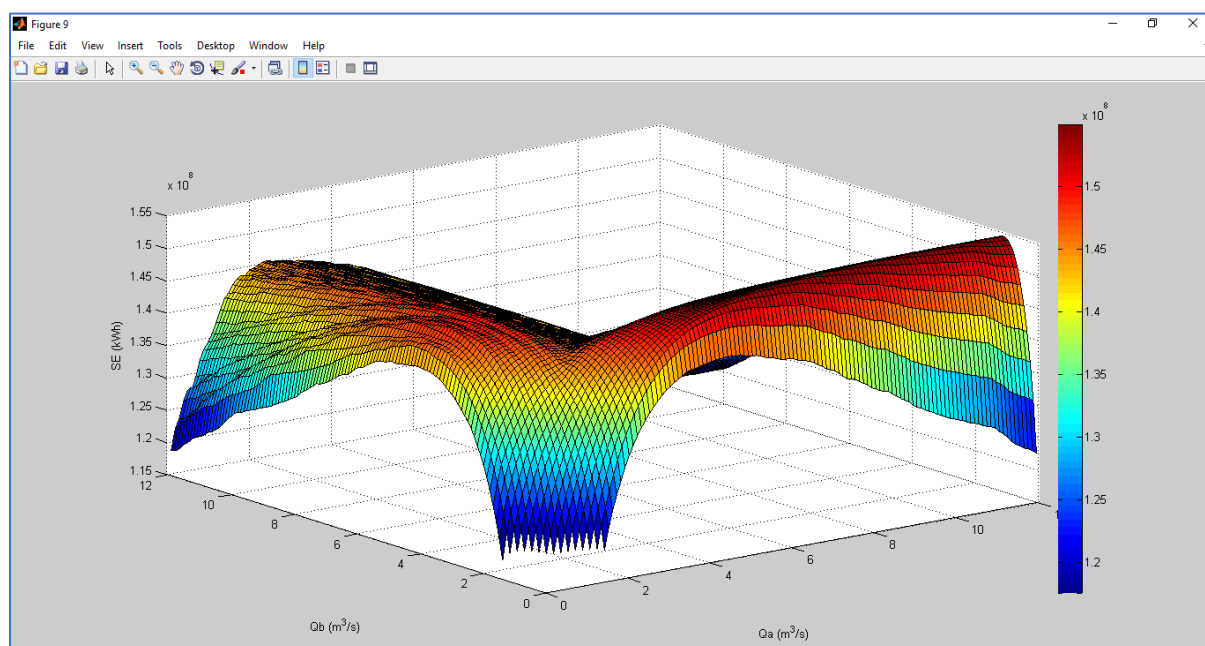


Διάγραμμα 4.12 Μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος (%) συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m³/s)



Διάγραμμα 4.13 Μεταβολή του ποσοστού όγκου νερού που αξιοποιείται (%) συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m³/s)

Τέλος, με σκοπό την απεικόνιση της συνεισφοράς του κάθε στροβίλου στην παραγωγή της συνολικής ενέργειας κατασκευάζεται το τρισδιάστατο Διάγραμμα 4.14. Στους άξονες x και y τοποθετούνται αντίστοιχα οι ονομαστικές παροχές των δύο στροβίλων σε m^3/s και στον άξονα z τοποθετείται η συνολική ενέργεια που παράγεται από τον συνδυασμό των δύο στροβίλων σε kWh. Οι πιο αποδοτικές ενεργειακά λύσεις αντιπροσωπεύονται από το κόκκινο φάσμα ενώ οι λύσεις που πρέπει να αποφευχθούν από το μπλε φάσμα.

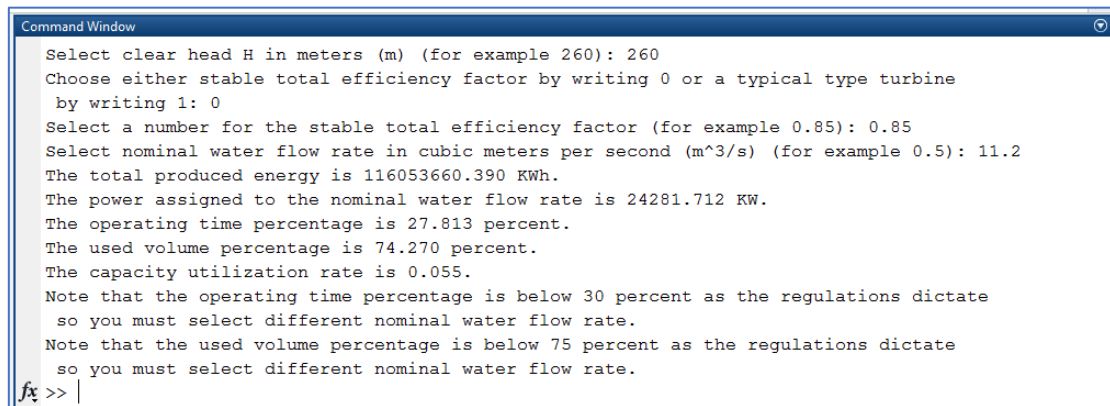


Διάγραμμα 4.14 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει των ονομαστικών παροχών των δύο στροβίλων (m^3/s)

4.4.5 Μηνύματα ελέγχου στην έξοδο αποτελεσμάτων

Οι κώδικες 1 και 2, όπως έχει αναφερθεί, παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει ο ίδιος την ονομαστική παροχή του στροβίλου. Η δυνατότητα αυτή όμως ελλοχεύει τον κίνδυνο η επιλογή που έκανε ο χρήστης να ανταποκρίνεται σε λειτουργία της εγκατάστασης εκτός των επιτρεπτών κανονισμών. Συγκεκριμένα ο κανονισμός ορίζει ότι το ποσοστό όγκου νερού που αξιοποιείται θα πρέπει να ξεπερνάει το 75% και το ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος να βρίσκεται πάνω από το 30%. Για το λόγο αυτό μαζί με τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο χρήστη στο παράθυρο διαχείρισης, εμφανίζεται κ μήνυμα που να προειδοποιεί το χρήστη εάν η επιλογή του δεν ανταποκρίνεται σε κάποιον από τους δύο κανονισμούς. Στην περίπτωση που

συμβεί αυτό ο χρήστης θα πρέπει να τρέξει ξανά τον κώδικα αλλάζοντας όμως την ονομαστική παροχή που επέλεξε. Στην Εικόνα 4.33 παρουσιάζονται τα προειδοποιητικά μηνύματα όπως εμφανίζονται στο χρήστη. Επισημαίνεται ότι ο συγκεκριμένος κίνδυνος δεν ακολουθείται στους κώδικες 3 και 4 καθώς οι τιμές των ονομαστικών παροχών, που παράγουν λειτουργία του ΜΥΗΕ εκτός των επιτρεπτών ορίων, έχουν αφαιρεθεί από τους τελικούς πίνακες αποτελεσμάτων.



```

Command Window
Select clear head H in meters (m) (for example 260): 260
Choose either stable total efficiency factor by writing 0 or a typical type turbine
by writing 1: 0
Select a number for the stable total efficiency factor (for example 0.85): 0.85
Select nominal water flow rate in cubic meters per second (m^3/s) (for example 0.5): 11.2
The total produced energy is 116053660.390 KWh.
The power assigned to the nominal water flow rate is 24281.712 KW.
The operating time percentage is 27.813 percent.
The used volume percentage is 74.270 percent.
The capacity utilization rate is 0.055.
Note that the operating time percentage is below 30 percent as the regulations dictate
so you must select different nominal water flow rate.
Note that the used volume percentage is below 75 percent as the regulations dictate
so you must select different nominal water flow rate.
fx >> |
  
```

Εικόνα 4.33 Μηνύματα ελέγχου στην έξοδο των αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι οι κώδικες, κατά τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών, αποθηκεύουν όλες τις μεταβλητές και τους πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν στην διεκπεραίωση των εντολών. Αυτό σημαίνει πως εάν ο χρήστης επιθυμεί να διαβάσει οποιοδήποτε ενδιαμέσο αποτέλεσμα μορφής πίνακα ή μεταβλητής αρκεί να μελετήσει τον αντίστοιχο κώδικα που παρουσιάζεται στο παράρτημα της εργασίας και να ψάξει το ζητούμενο μέγεθος στο Βασικό Χώρο Λειτουργίας (Workspace) (Εικόνα 4.34) του λογισμικού όπου αποθηκεύονται όλα τα αποτελέσματα των πράξεων που πραγματοποιήθηκαν. Εάν για παράδειγμα ο χρήστης εκτελεί τον κώδικα 1 και θέλει να εμφανιστεί ο πίνακας με τους βαθμούς απόδοσης που λειτουργεί ο στρόβιλος κάθε ημέρα αρκεί να βρει τον πίνακα n στο Βασικό Χώρο Λειτουργίας (Workspace) και πατώντας διπλό κλικ εμφανίζονται οι τιμές του ζητούμενου πίνακα-στήλη. Για περισσότερες πληροφορίες για το Βασικό Χώρο Λειτουργίας του Matlab βλ. Van Loan and Bass (2009).

Name	Value	Min
a	10x2 double	0.8500
a1	[10;20;30;40;50;60;70;...	10
a2	[0.8500;0.8500;0.8500;...	0.8500
dl	3653x1 logical	
E	3653x1 double	0
f	3653x1 double	0.0274
factor	0	0
H	260	260
i	3653	3653
l	2.8567e+04	2.8567...
k	1016	1016
l	3653	3653
n	3653x1 double	0.8500
ne	0	0
Nfit	1x1 cfit	
ntot	0.8500	0.8500
pQ	3653x1 double	0
PT	27.8128	27.8128
PV	74.2699	74.2699
Q	3653x1 double	0
Qmax	12.0979	12.0979
Qo	11.2000	11.2000
Qsort	3653x1 double	0
Qssort	3653x1 double	0
SD	0.0464	0.0464
SE	1.1605e+08	1.1605...
str	0	0
sv	1.0271e+08	1.0271...

Εικόνα 4.34 Αναζήτηση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων στο Βασικό Χώρο Λειτουργίας

5. Εφαρμογή σε δεδομένο πρόβλημα

Με σκοπό την κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου που παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 3 αλλά και την εξαγωγή συμπερασμάτων σε υπαρκτό πρόβλημα, στη συνέχεια πραγματοποιείται εφαρμογή του λογισμικού που σχεδιάστηκε. Πιο συγκεκριμένα εκτελούνται οι κώδικες που κατασκευάστηκαν, τοποθετώντας στην είσοδο δεδομένων τη χρονοσειρά ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών αλλά και το καθαρό ύψος πτώσης του προβλήματος που μελετήθηκε στο κεφάλαιο 3. Ανάλογα με τον κώδικα που χρησιμοποιείται δοκιμάζονται διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις για το πρόβλημα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τους. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα για τις τάσεις των μεγεθών που υπολογίζονται.

5.1 Κώδικας 1

Αρχικά εκτελείται ο κώδικας 1 όπου θεωρείται ότι το ΜΥΗΕ διαθέτει έναν στρόβιλο. Ο κώδικας εκτελείται για σταθερό και μεταβλητό συντελεστή εγκατάστασης αλλά και διαφορετική τιμή της ονομαστικής παροχής του στρόβιλου και προσομοιώνεται η λειτουργία της εγκατάστασης για κάθε λύση. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που εξάγει κάθε φορά ο κώδικας εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1.

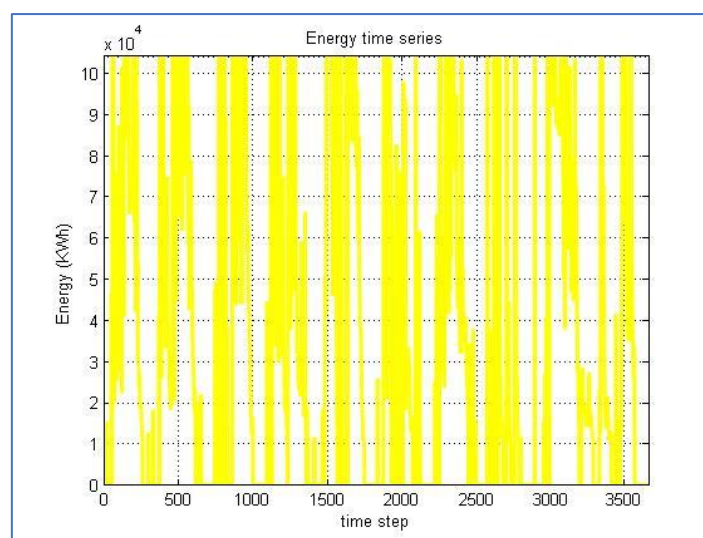
Πίνακας 5.1 Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας εγκατάστασης για έναν στρόβιλο

	Σταθερός συντελεστής		Μεταβλητός συντελεστής	
			Francis(ns=100)	Pelton(ns=21)
n_e	-	-	0.96	0.96
n_{tot}	0.85	0.85	-	-
Q_{max} (m³/s)	10	2	2	2
Q_{min} (m³/s)	1	0.2	0.2	0.2
I_{max} (MW)	21.7	4.3	4.9	4.9
PT (%)	29.9	61.7	61.7	61.7
PV (%)	76.9	80.6	80.6	80.6
E (GWh)	120.2	126.0	123.4	125.9
E (GWh/y)	12.0	12.6	12.3	12.6
ΣΔ	0.063	0.332	0.288	0.293

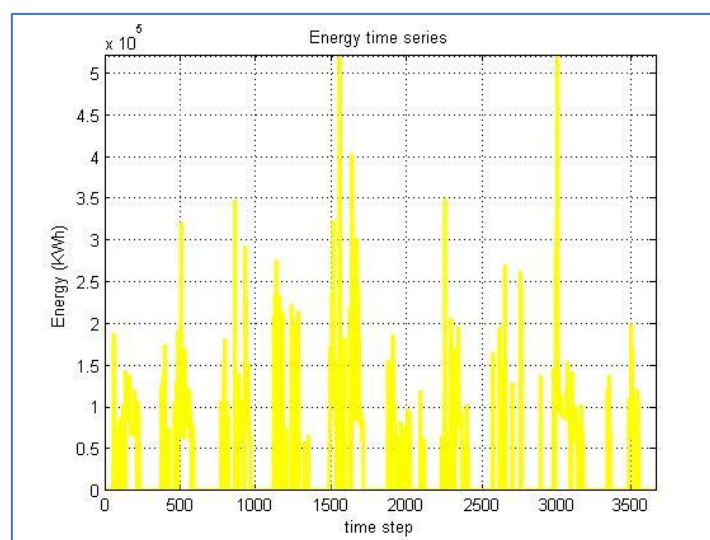
Καθώς η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του στροβίλου αποτελεί το μέγεθος που επηρεάζει περισσότερο την ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης ήταν αναμενόμενο ότι οι περιπτώσεις 2, 3 και 4 που υπολογίστηκαν για ίση ονομαστική παροχή δεν θα εμφανίσουν μεγάλες αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορές που εμφανίζουν τα αποτελέσματα οφείλονται στους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης. Για το λόγο αυτό παρατηρείται ότι η περίπτωση του σταθερού συντελεστή, όπου μπορεί να αντιστοιχηθεί για παράδειγμα στην ιδεατή περίπτωση στροβίλου σταθερού συντελεστή 0.885 και εγκατάστασης με συντελεστή ηλεκτρ/κού εξοπλισμού 0.96, παράγει τη μεγαλύτερη συνολική ενέργεια. Αυτό συμβαίνει διότι οι τυπικοί στρόβιλοι Francis και Pelton εμφανίζουν μείωση του βαθμού απόδοσης τους στα μικρά ποσοστά παροχών εν αντιθέσει με τον ιδεατό στρόβιλο που διατηρεί την τιμή 0.885 σταθερή σε όλο το εύρος παροχών λειτουργίας του. Αντίστοιχα παρατηρώντας τις καμπύλες στροβίλων του Διαγράμματος 3.5 είναι φανερό ότι ο στρόβιλος Pelton παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το στρόβιλο Francis για ποσοστά παροχών από 15 έως 80%. Ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας προκύπτει στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιώντας στρόβιλο Pelton έναντι στροβίλου Francis. Συνοπτικά αναφέρεται ότι τα ποσοστά όγκου αξιοποίησης αλλά και τα ποσοστά χρόνου λειτουργίας στο έτος προκύπτουν ίσα για ίδιες ονομαστικές παροχές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο όγκος νερού που αξιοποιείται και ο χρόνος λειτουργίας είναι συναρτήσεις του διαστήματος παροχών που λειτουργεί η εγκατάσταση και δεν λαμβάνουν υπόψη τους συντελεστές απόδοσης της.

Στη συνέχεια συγκρίνονται οι λύσεις 1 και 2. Ο σταθμός λειτουργεί με σταθερό ολικό συντελεστή 0.85 μόνο που στην πρώτη περίπτωση επιλέγεται ονομαστική παροχή $10 \text{ m}^3/\text{s}$ έναντι της δεύτερης όπου επιλέχθηκε η τιμή $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Η μεγάλη διαφορά στην ονομαστική παροχή είναι εμφανές ότι θα επιφέρει και μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα. Στην πρώτη περίπτωση η εγκατάσταση λειτουργεί για παροχές από 1 έως $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώ στη δεύτερη από παροχές 0.2 έως $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Όπως προκύπτει, η δεύτερη λύση επιφέρει αρκετά μεγαλύτερη ενεργειακή παραγωγή καθώς και μεγαλύτερα ποσοστά όγκου και χρόνου. Ως αποτέλεσμα η χρονοσειρά των ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών αντιπροσωπεύεται καλύτερα από το διάστημα $[0.2, 2]$ έναντι του διαστήματος $[1, 10]$. Το γεγονός αυτό φαίνεται και από την τεράστια μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος, όπου στην πρώτη περίπτωση η εγκατάσταση λειτουργεί στο 29.9% (κάτω από το επιτρεπόμενο όριο), που σημαίνει ότι μόνο το 29.9% των παροχών είναι μεγαλύτερες της τιμής $1 \text{ m}^3/\text{s}$ και άρα συνεισφέρουν στην παραγωγή της ενέργειας. Παράλληλα, ενδεικτική είναι και η μεγάλη απόκλιση του συντελεστή

δυναμικότητας στις δύο περιπτώσεις. Ο συντελεστής δυναμικότητας της ονομαστικής παροχής $10 \text{ m}^3/\text{s}$ υπολογίζεται στην τιμή 0.063 . Το μικρό μέγεθος της τιμής του συντελεστή δυναμικότητας κάνει εμφανές στο χρήστη ότι η ίδια ενέργεια και ενδεχομένως μεγαλύτερη θα μπορούσε να παραχθεί χρησιμοποιώντας μικρότερη ονομαστική παροχή, όπου θα αποτελούσε και μια πιο συμφέρουσα λύση από οικονομική σκοπιά. Το συμπέρασμα αυτό επικυρώνεται μειώνοντας την ονομαστική παροχή στα $2 \text{ m}^3/\text{s}$ όπου ο συντελεστής δυναμικότητας της εγκατάστασης ανήλθε στην τιμή 0.332 . Τέλος, με σκοπό την απεικόνιση της μεγάλης απόκλισης των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις 1 και 2 παρουσιάζονται ακολούθως οι χρονοσειρές ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών (Διαγράμματα 5.1 και 5.2).



Διάγραμμα 5.1 Χρονοσειρά ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών ($n_{\text{tot}}=0.85$ και $Q_0=2 \text{ m}^3/\text{s}$)



Διάγραμμα 5.2 Χρονοσειρά ημερήσιων παραγόμενων ενεργειών ($n_{\text{tot}}=0.85$ και $Q_0=10 \text{ m}^3/\text{s}$)

5.2 Κώδικας 3

Από τον κώδικα 1 έγινε σαφές ότι οι επιλογές της ονομαστικής παροχής σε συνδυασμό με τον τύπο του στροβίλου είναι υπεράριθμες και επιφέρουν αποτελέσματα με μεγάλες αποκλίσεις. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε η ενεργειακή βελτιστοποίηση του κώδικα 3 για ΜΥΗΕ με ένα στρόβιλο. Ο κώδικας εκτελείται αρχικά για στρόβιλο τύπου Francis και έπειτα για στρόβιλο τύπου Pelton, τις δύο δηλαδή δυνατές λύσεις που μπορεί να επιλέξει ο μελετητής. Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού επιλέχθηκε ίσος με 0.96. Ο κώδικας για την ονομαστική παροχή του στροβίλου δοκιμάζει όλες τις τιμές που βρίσκονται ενδιάμεσα από την ελάχιστη και τη μέγιστη μέση ημερήσια εκμεταλλεύσιμη παροχή με βήμα 0.1 m³/s. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες με τις συνολικές παραγόμενες ενέργειες της εγκατάστασης ανάλογα με την τιμή που παίρνει η ονομαστική παροχή για στρόβιλο τύπου Francis (Εικόνα 5.1) και στρόβιλο τύπου Pelton (Εικόνα 5.2). Οι πίνακες είναι καταναμημένοι σε φθίνουσα σειρά και περιέχουν μόνο τις λύσεις που είναι αποδεκτές από τη νομοθεσία.

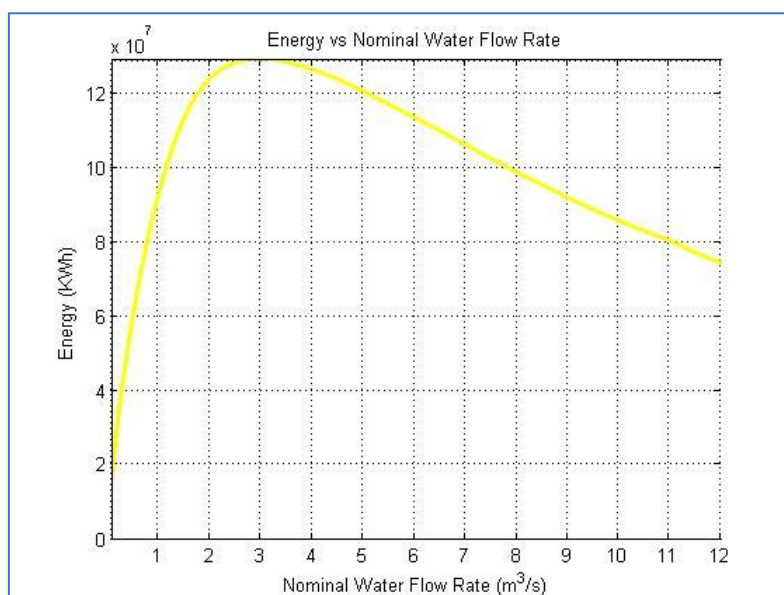
Q (m ³ /s)	SE (kWh)
3.000	128928743.17
2.900	128874055.79
3.100	128849754.00
3.200	128749160.18
2.800	128728256.22
3.300	128555364.66
2.700	128536574.87
3.400	128344311.98
2.600	128225672.21
3.500	128115744.38
2.500	127810499.70
3.600	127778997.24
3.700	127399931.70
2.400	127274762.04
3.800	126986380.27
2.300	126608338.26
3.900	126573811.14
4.000	126132545.40
2.200	125753913.48
4.100	125673451.82
4.200	125181132.83

Εικόνα 5.1 Πίνακας ενεργειακής βελτιστοποίησης για ΜΥΗΕ με ένα στρόβιλο Francis

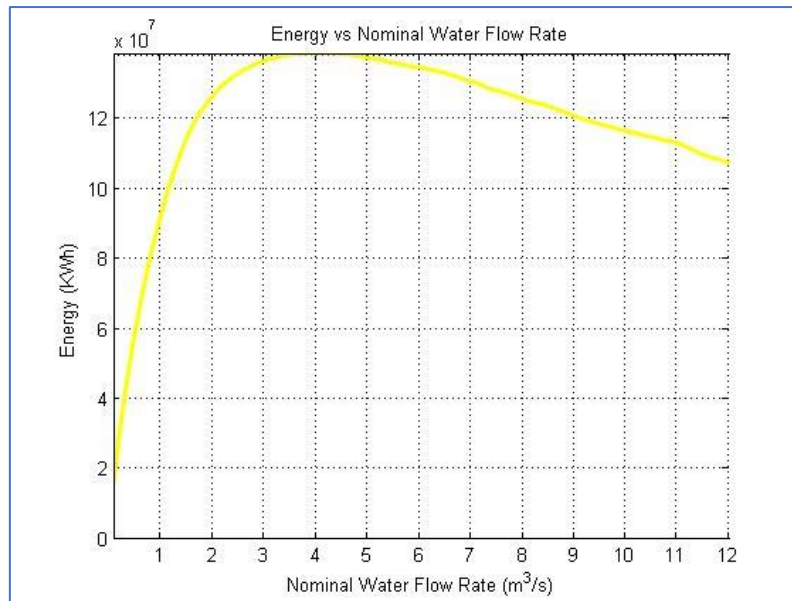
Q (m ³ /s)	SE (kWh)
4.200	138091538.92
4.100	138074077.18
4.400	138035676.03
4.000	138028916.88
3.900	137986464.63
4.300	137985169.59
4.500	137900470.39
3.800	137894256.26
3.700	137869966.69
3.600	137844711.31
4.600	137815754.15
3.500	137755398.16
4.700	137614353.87
4.800	137437286.92
3.400	137424322.29
4.900	137133477.00
3.300	137098433.21
5.000	136819934.34
3.200	136810871.81
5.100	136651155.06
5.200	136464520.78

Εικόνα 5.2 Πίνακας ενεργειακής βελτιστοποίησης για ΜΥΗΕ με ένα στρόβιλο Pelton

Όπως ήταν αναμενόμενο οι δύο τύποι στροβίλου δεν επιφέρουν τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας για τις ίδιες ονομαστικές παροχές. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί όμως είναι η αύξηση της μέγιστης ενέργειας στην περίπτωση που το ΜΥΗΕ λειτουργήσει με στρόβιλο τύπου Pelton. Η μέγιστη συνολική παραγόμενη ενέργεια σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζει αύξηση 7% και φτάνει τις 138.1 GWh σε αντίθεση με την περίπτωση χρήσης στροβίλου Francis που φτάνει τις 128.9 GWh. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα διαγράμματα που προκύπτουν από τον κώδικα 3 για τις δύο δυνατές λύσεις.

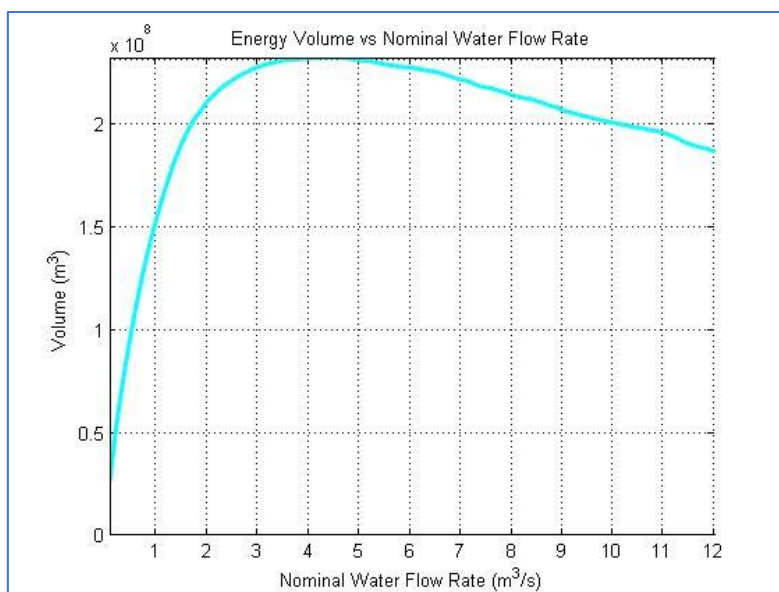


Διάγραμμα 5.3 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m³/s) για στρόβιλο Francis



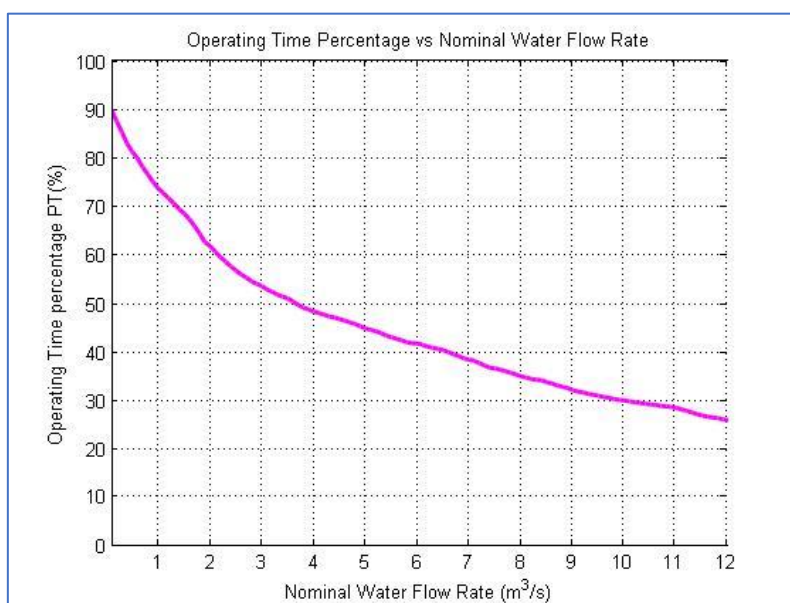
Διάγραμμα 5.4 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m^3/s) για στρόβιλο Pelton

Τα Διαγράμματα 5.3 και 5.4 αποτελούν γραφική απεικόνιση των πινάκων βελτιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής που παρουσιάστηκαν ακριβώς πριν. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται σε μία περιοχή κοντά στην κορυφή του διαγράμματος το οποίο μειώνεται σχεδόν γραμμικά εκατέρωθεν της βέλτιστης περιοχής. Τα υπόλοιπα διαγράμματα που προκύπτουν από τον κώδικα 3 είναι ακριβώς ίδια και για τους δύο τύπους στροβίλους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κανένα από τα μεγέθη που συμμετέχουν στην κατασκευή των διαγραμμάτων δεν εξαρτάται από τους βαθμούς απόδοσης των στροβίλων και ως συνέπεια από το είδος του στροβίλου.



Διάγραμμα 5.5 Μεταβολή του συνολικού όγκου νερού (m^3) που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m^3/s) για στρόβιλο Francis ή Pelton

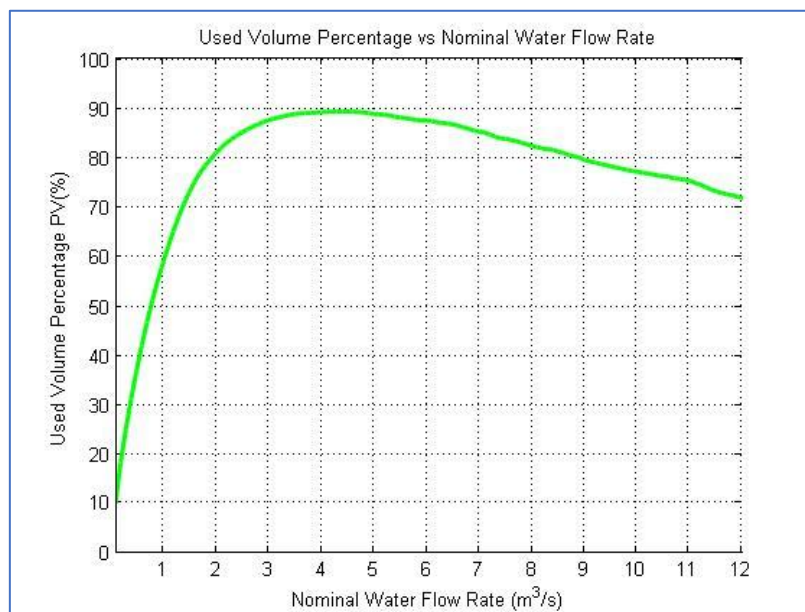
Για την κατασκευή των διαγραμμάτων έχουν συμπεριληφθεί όλες οι τιμές των ονομαστικών παροχών που δοκιμάστηκαν από τον κώδικα. Για το λόγο αυτό τα διαγράμματα εμφανίζουν και τις λύσεις εκτός των επιτρεπόμενων ορίων από τη νομοθεσία για το ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος καθώς και το ποσοστό όγκου αξιοποίησης.



Διάγραμμα 5.6 Μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος (%) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m^3/s) για στρόβιλο Francis ή Pelton

Ειδικά όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.6, για ονομαστικές παροχές πάνω από την τιμή 9.7 m³/s περίπου προκύπτει ποσοστό χρόνου λειτουργίας στο έτος κάτω του επιτρεπόμενου ορίου που είναι το 30%.

Αντίστοιχα, μελετώντας το Διάγραμμα 5.7 προκύπτει ότι για ονομαστικές παροχές κάτω από 1.8 m³/s περίπου και πάνω από 11 m³/s το ποσοστό όγκου αξιοποίησης προκύπτει κάτω από το επιτρεπόμενο όριο δηλαδή την τιμή 75%.



Διάγραμμα 5.7 Μεταβολή του ποσοστού όγκου νερού που αξιοποιείται (%) συναρτήσει της ονομαστικής παροχής (m³/s) για στρόβιλο Francis ή Pelton

5.3 Κώδικας 2

Ακολούθως εκτελείται ο κώδικας 2 όπου αντιστοιχεί σε λειτουργία ΜΥΗΕ που διαθέτει δύο στρόβιλους. Ο κώδικας εκτελείται για σταθερό και μεταβλητό συντελεστή εγκατάστασης αλλά και διαφορετική τιμή της ονομαστικής παροχής των στρόβιλων και προσομοιώνεται η λειτουργία της εγκατάστασης για κάθε λύση. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που εξάγει κάθε φορά ο κώδικας εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.2. Συνοπτικά εξετάζεται η περίπτωση σταθερού συντελεστή εγκατάστασης για τρεις διαφορετικές ονομαστικές παροχές των δύο στρόβιλων. Ακολούθως εξετάζονται οι τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί (για το παρών πρόβλημα) τύπων στρόβιλου καταχωρώντας τον ίδιο συνδυασμό ονομαστικών παροχών σε κάθε λύση. Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων κάνει εμφανής την σημαντικότητα της

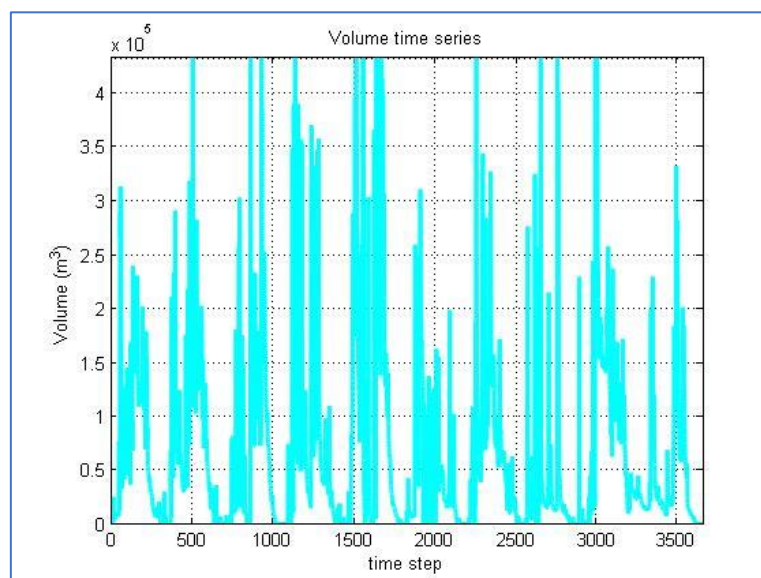
σωστής επιλογής τύπων στροβίλων στην τελική ενεργειακή παραγωγή αλλά και με τη σωστή σειρά. Με τον ακριβή και πλήρη σχεδιασμό της λειτουργίας της εγκατάστασης ο μελετητής καταφέρνει να σχεδιάσει ένα έργο ενεργειακά αποδοτικό που θα επιφέρει το ζητούμενο κέρδος.

Πίνακας 5.2 Προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας εγκατάστασης για δύο στροβίλους

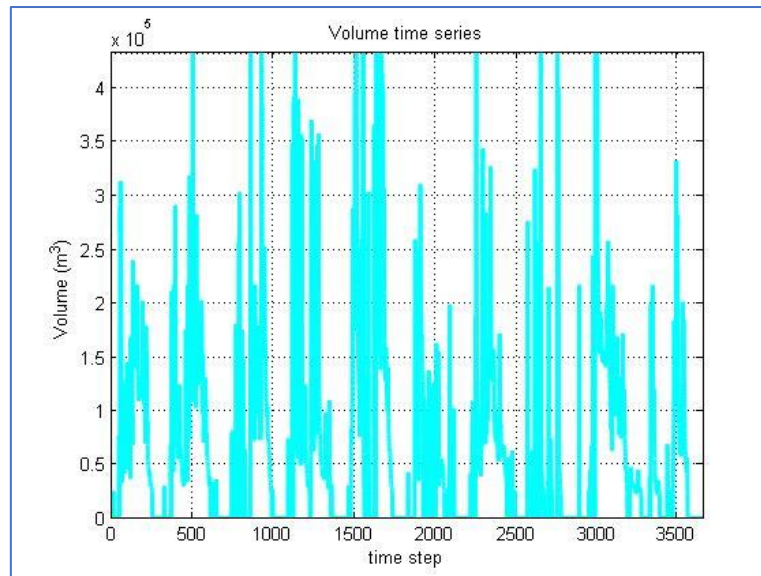
	Σταθερός συντελεστής			Μεταβλητός συντελεστής			
				1.Francis 2.Pelton	1.Pelton 2.Francis	1.Francis 2.Francis	1.Pelton 2.Pelton
ne	-	-	-	0.96	0.96	0.96	0.96
ntot	0.85	0.85	0.85	-	-	-	-
Q_{max1} (m³/s)	4.5	0.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Q_{min1} (m³/s)	0.45	0.05	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Q_{max2} (m³/s)	0.5	4.5	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Q_{min2} (m³/s)	0.05	0.45	0.25	0.05	0.05	0.05	0.05
Imax (MW)	10.8	10.8	10.8	7.3	7.3	7.3	7.3
PT (%)	81.0	81.0	56.6	81.0	81.0	81.0	81.0
PV (%)	98.0	94.4	93.6	92.6	92.6	92.6	92.6
E (GWh)	153.2	147.5	146.2	139.9	143.6	139.0	144.4
E (GWh/y)	15.3	14.7	14.6	14.0	14.4	13.9	14.4
ΣΔ	0.161	0.155	0.154	0.217	0.223	0.216	0.224

Αρχικά, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.2, οι εναλλαγές στην ονομαστική παροχή των δύο στροβίλων στην περίπτωση σταθερού συντελεστή εγκατάστασης επιφέρουν αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται αρχικά η περίπτωση στροβίλων ίδιων ονομαστικών παροχών (4.5 m³/s ο ένας στρόβιλος και 5 m³/s ο άλλος) αλλά με αντίστροφη σειρά. Όπως προκύπτει η σειρά που θα λειτουργούν οι ονομαστικές παροχές των δύο στροβίλων επηρεάζει τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα προκύπτουν καλύτερες αποδόσεις όταν επιλέγεται για τον πρώτο στρόβιλο η μεγαλύτερη ονομαστική παροχή από τις δύο. Αυξάνονται η παραγόμενη ενέργεια, το ποσοστό όγκου νερού που αξιοποιείται και εφόσον η ισχύς παραμένει ίδια, αυξάνεται και ο συντελεστής δυναμικότητας της εγκατάστασης.

Στη συνέχεια, εξετάζονται οι περιπτώσεις ένα και τρία όπου εμφανίζουν διαφορετικές ονομαστικές παροχές οι οποίες όμως αθροιστικά δίνουν την ίδια μέγιστη παροχή εγκατάστασης ($5 \text{ m}^3/\text{s}$). Στη μία περίπτωση ο μελετητής επιλέγει μία σχετικά μεγάλη ονομαστική παροχή για τον πρώτο στρόβιλο ($4.5 \text{ m}^3/\text{s}$) και μία αρκετά μικρή για το δεύτερο ($0.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Η επιλογή αυτή είναι προφανές ότι εξυπηρετεί την εγκατάσταση καθώς καλύπτει μεγαλύτερο φάσμα ημερήσιων παροχών και ως αποτέλεσμα παράγει μεγαλύτερη συνολική ενέργεια από τη δεύτερη περίπτωση. Στην άλλη περίπτωση επιλέγονται δύο ίδιοι στρόβιλοι ονομαστικής παροχής ($2.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Η περίπτωση αυτή εξυπηρετεί οικονομικά τον μελετητή καθώς είναι συχνό φαινόμενο δύο ίδιοι στρόβιλοι να πωλούνται φθηνότερα στην αγορά από δύο στρόβιλους διαφορετικής ισχύος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η αύξηση του συντελεστή δυναμικότητας της εγκατάστασης στην περίπτωση επιλογής των διαφορετικών παροχών ($4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) σε σύγκριση με το συντελεστή που προκύπτει εάν χρησιμοποιηθούν ίδιες παροχές ($2.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Το αποτέλεσμα αυτό επικυρώνει το συμπέρασμα καλύτερης απόδοσης της εγκατάστασης για κλιμακούμενες ονομαστικές παροχές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα (Διαγράμματα 5.8 και 5.9) των χρονοσειρών του όγκου νερού που αξιοποιείται συνδυαστικά από τους δύο στρόβιλους για τις δύο αυτές περιπτώσεις επιλογής ονομαστικών παροχών στρόβιλων σε εγκατάσταση με σταθερό συντελεστή ίσο με 0.85.



Διάγραμμα 5.8 Χρονοσειρά ημερήσιων όγκων νερού που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή της ενέργειας για δύο στρόβιλους ($n_{\text{tot}}=0.85$, $Q_{0\alpha}=4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και $Q_{0\beta}=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)



Διάγραμμα 5.9 Χρονοσειρά ημερήσιων όγκων νερού που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή της ενέργειας για δύο στρόβιλους ($\eta_{tot}=0.85$, $Q_{0a}=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και $Q_{0b}=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$)

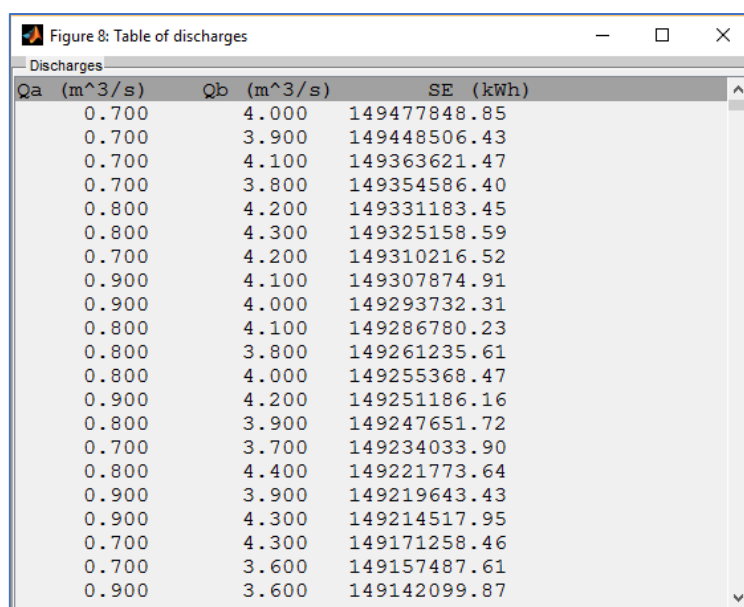
Στη συνέχεια, εξετάζοντας τις περιπτώσεις 4 έως 6 φαίνεται από τον Πίνακα 5.2 ότι οι ενεργειακές παραγωγές είναι συνάρτηση του τύπου των στρόβιλων αλλά και της σειράς με την οποία αυτοί θα λειτουργούν. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από την αύξηση της τελικής ενεργειακής παραγωγής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται στρόβιλος Pelton για την μεγάλη ονομαστική παροχή και Francis για τη μικρή αντί για το αντίστροφο. Αυτό συμβαίνει διότι ο στρόβιλος Pelton αποδίδει καλύτερα από τον στρόβιλο Francis στο μεγαλύτερο εύρος των ποσοστών της ονομαστικής του παροχής. Ως αποτέλεσμα με την επιλογή στρόβιλου τύπου Pelton για την κύρια αξιοποίηση των παροχών (στρόβιλος 1) προκύπτει αποδοτικότερη παραγωγή της εγκατάστασης. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο η λύση με την επιλογή τύπου Pelton και για τους δύο στρόβιλους παράγει μεγαλύτερη συνολική ενέργεια και από τους τέσσερις συνδυασμούς που εξετάστηκαν.

Η σύγκριση των τεσσάρων συνδυασμών που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.2 δικαιολογεί την επιλογή στρόβιλων τύπου Pelton στα περισσότερα ΜΥΗΕ στην Ελλάδα αλλά και στο εξωτερικό.

5.4 Κώδικας 4

Από το σχολιασμό του κώδικα 2 έγινε σαφές ότι οι επιλογές της ονομαστικής παροχής σε συνδυασμό με το τύπο των δύο στροβίλων είναι υπεράριθμες και επιφέρουν αποτελέσματα με μεγάλες αποκλίσεις. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε η ενεργειακή βελτιστοποίηση του κώδικα 4 για ΜΥΗΕ με δύο στροβίλους. Ο κώδικας εκτελείται όπως φαίνεται στη συνέχεια για τις τέσσερις δυνατές λύσεις που μπορεί να επιλέξει ο μελετητής (συνδυασμοί στροβίλων τύπου Francis ή και Pelton). Ο συντελεστής ηλεκτρ/κού εξοπλισμού επιλέχθηκε ίσος με 0.96. Ο κώδικας δοκιμάζει ως ονομαστική παροχή για κάθε στρόβιλο όλες τις τιμές που βρίσκονται ενδιάμεσα από την ελάχιστη και τη μέγιστη μέση ημερήσια εκμεταλλεύσιμη παροχή με βήμα $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ αλλά και όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τους. Είναι προφανές ότι οι συνδυασμοί που θα προκύψουν είναι υπεράριθμοι και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε εξαρχής η κατασκευή του κώδικα σε περιβάλλον Matlab το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για το γρήγορο υπολογισμό πράξεων μεταξύ πινάκων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες με τις συνολικές παραγόμενες ενέργειες της εγκατάστασης ανάλογα με τις τιμές που παίρνει η ονομαστική παροχή κάθε στροβίλου για τους τέσσερις πιθανούς συνδυασμούς τύπων στροβίλων. Οι πίνακες είναι κατανεμημένοι σε φθίνουσα σειρά και περιέχουν μόνο τις λύσεις που είναι αποδεκτές από τη νομοθεσία.



Qa (m ³ /s)	Qb (m ³ /s)	SE (kWh)
0.700	4.000	149477848.85
0.700	3.900	149448506.43
0.700	4.100	149363621.47
0.700	3.800	149354586.40
0.800	4.200	149331183.45
0.800	4.300	149325158.59
0.700	4.200	149310216.52
0.900	4.100	149307874.91
0.900	4.000	149293732.31
0.800	4.100	149286780.23
0.800	3.800	149261235.61
0.800	4.000	149255368.47
0.900	4.200	149251186.16
0.800	3.900	149247651.72
0.700	3.700	149234033.90
0.800	4.400	149221773.64
0.900	3.900	149219643.43
0.900	4.300	149214517.95
0.700	4.300	149171258.46
0.700	3.600	149157487.61
0.900	3.600	149142099.87

Εικόνα 5.3 Πίνακας ενεργειακής βελτιστοποίησης για ΜΥΗΕ με ένα στρόβιλο Francis (Qa) και ένα στρόβιλο Pelton (Qb)

Qa (m ³ /s)	Qb (m ³ /s)	SE (kWh)
5.600	0.500	151567870.69
5.500	0.500	151562528.13
5.700	0.500	151560520.01
5.400	0.500	151556556.60
5.800	0.500	151539964.21
4.900	0.400	151532470.78
5.300	0.500	151526963.84
5.000	0.400	151525663.51
5.100	0.400	151523250.62
4.800	0.400	151517086.78
5.200	0.400	151514308.93
5.900	0.500	151490806.47
5.200	0.500	151484811.69
5.300	0.400	151483308.92
4.700	0.400	151470777.15
5.100	0.500	151450568.35
6.000	0.500	151436972.07
5.400	0.400	151423144.32
5.000	0.500	151402691.35
4.600	0.400	151398600.67
6.100	0.500	151380830.85

Εικόνα 5.4 Πίνακας ενεργειακής βελτιστοποίησης για ΜΥΗΕ με ένα στρόβιλο Pelton (Qa) και ένα στρόβιλο Francis (Qb)

Qa (m ³ /s)	Qb (m ³ /s)	SE (kWh)
1.600	3.100	145014440.16
1.600	3.200	145011996.55
1.600	3.000	145009512.81
1.700	3.100	145009111.33
1.600	3.300	145002733.91
1.700	3.000	145001206.22
1.400	3.000	144989742.33
1.600	2.900	144987942.25
1.400	2.900	144987039.17
1.400	3.100	144986129.36
1.700	3.200	144975216.25
1.700	3.300	144969396.54
1.600	3.400	144963646.07
1.700	2.900	144960755.67
1.400	2.800	144950253.38
1.600	2.800	144935091.89
1.500	3.000	144925464.14
1.700	3.400	144925389.08
1.600	3.500	144925058.18
1.500	3.100	144918166.83
1.500	2.900	144914310.09

Εικόνα 5.5 Πίνακας ενεργειακής βελτιστοποίησης για ΜΥΗΕ με δύο στρόβιλους Francis (Qa και Qb)

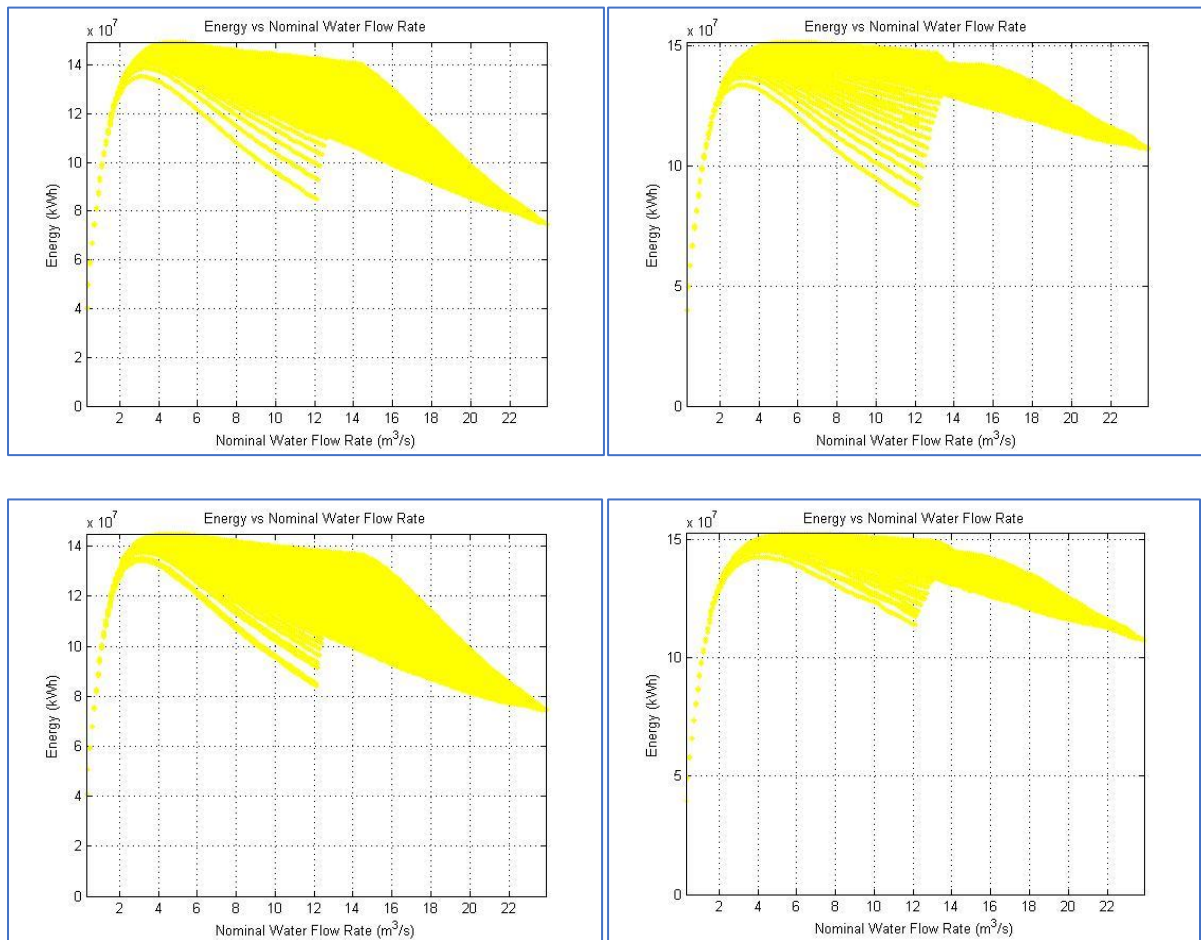
Qa (m ³ /s)	Qb (m ³ /s)	SE (kWh)
5.800	0.600	152361291.41
5.700	0.600	152356283.47
5.600	0.600	152348838.85
5.400	0.500	152344227.70
5.500	0.500	152339567.36
5.900	0.600	152338589.39
5.300	0.500	152334570.91
5.600	0.500	152329471.41
5.500	0.600	152326592.12
5.700	0.500	152309984.83
5.200	0.500	152308740.37
5.400	0.600	152303016.80
6.000	0.600	152296797.71
5.100	0.500	152289666.47
6.100	0.600	152280158.06
5.800	0.500	152269007.57
6.200	0.600	152267506.54
5.300	0.600	152258878.25
5.000	0.500	152251669.93
5.200	0.600	152227234.67
6.300	0.600	152221596.06

Εικόνα 5.6 Πίνακας ενεργειακής βελτιστοποίησης για ΜΥΗΕ με δύο στροβίλους Pelton (Qa και Qb)

Η λύση με την μεγαλύτερη συνολική παραγωγή ενέργειας προκύπτει η τελευταία με εγκατάσταση δύο στροβίλων τύπου Pelton ονομαστικής παροχής 5.8 m³/s και 0.6 m³/s. Η ενεργειακή παραγωγή που προκύπτει από αυτή τη λύση είναι 152.3 GWh, η οποία προσεγγίζει ικανοποιητικά τη δυνητική παραγόμενη ενέργεια για πλήρη εκμετάλλευση που υπολογίστηκε στις 156.2 GWh για εγκατάσταση σταθερού συντελεστή 0.85 από τη Σχέση 3.9.

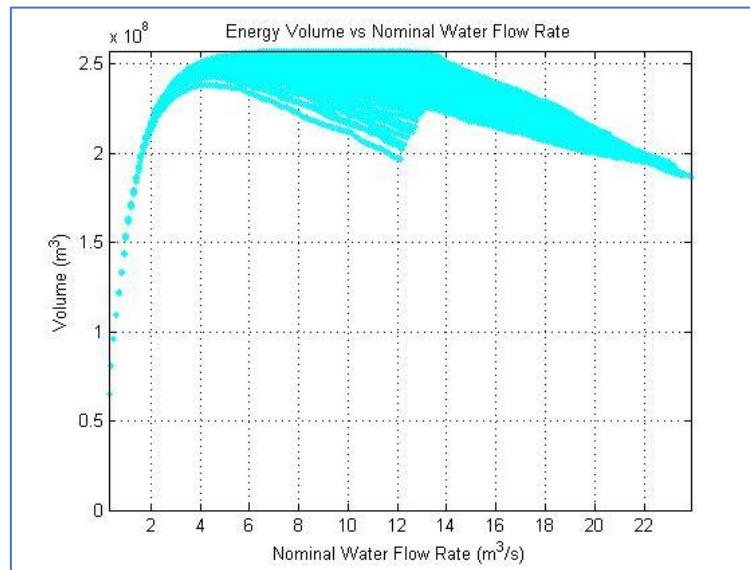
Ο μελετητής στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και το αντίστοιχο κόστος του κάθε στροβίλου μπορεί να επιλέξει από τους πίνακες μία ενεργειακά αποδοτική λύση η οποία θα τον συμφέρει και οικονομικά. Στην περίπτωση που η μελέτη ορίζει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα είδος στροβίλου, ο μελετητής αρκεί να επιλέξει λύση από τον αντίστοιχο πίνακα για δύο στροβίλους ίδιου τύπου.

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα διαγράμματα που προκύπτουν από τον κώδικα 4 για τις τέσσερις δυνατές λύσεις.

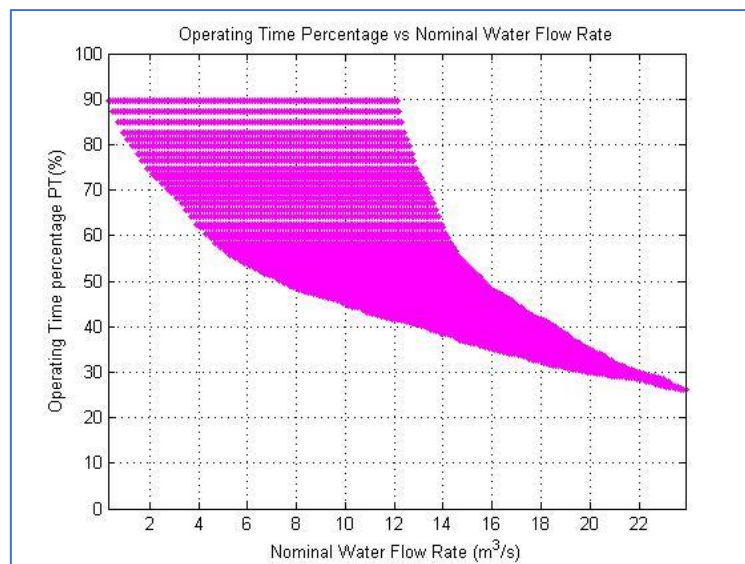


Διαγράμματα 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m^3/s) για τους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς (από τα αριστερά προς τα δεξιά: Francis-Pelton, Pelton-Francis, Francis-Francis, Pelton-Pelton)

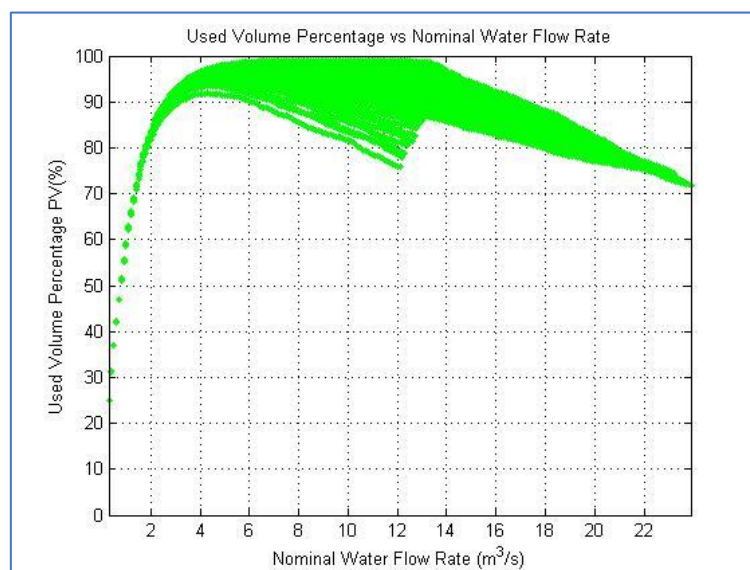
Τα υπόλοιπα διαγράμματα που προκύπτουν από τον κώδικα 4 είναι ακριβώς ίδια και για τους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς τύπων στροβίλων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κανένα από τα μεγέθη που συμμετέχουν στην κατασκευή των διαγραμμάτων δεν εξαρτάται από τους βαθμούς απόδοσης των στροβίλων και ως συνέπεια από το είδος του στροβίλου που επιλέγεται σε κάθε συνδυασμό. Ακόμη τα ζεύγη τιμών ονομαστικών παροχών που δοκιμάζονται είναι τα ίδια και γι' αυτό τα διαγράμματα παρουσιάζουν την ίδια ακριβώς μορφή. Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Διάγραμμα 5.14 Μεταβολή του συνολικού όγκου νερού (m³) που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m³/s)



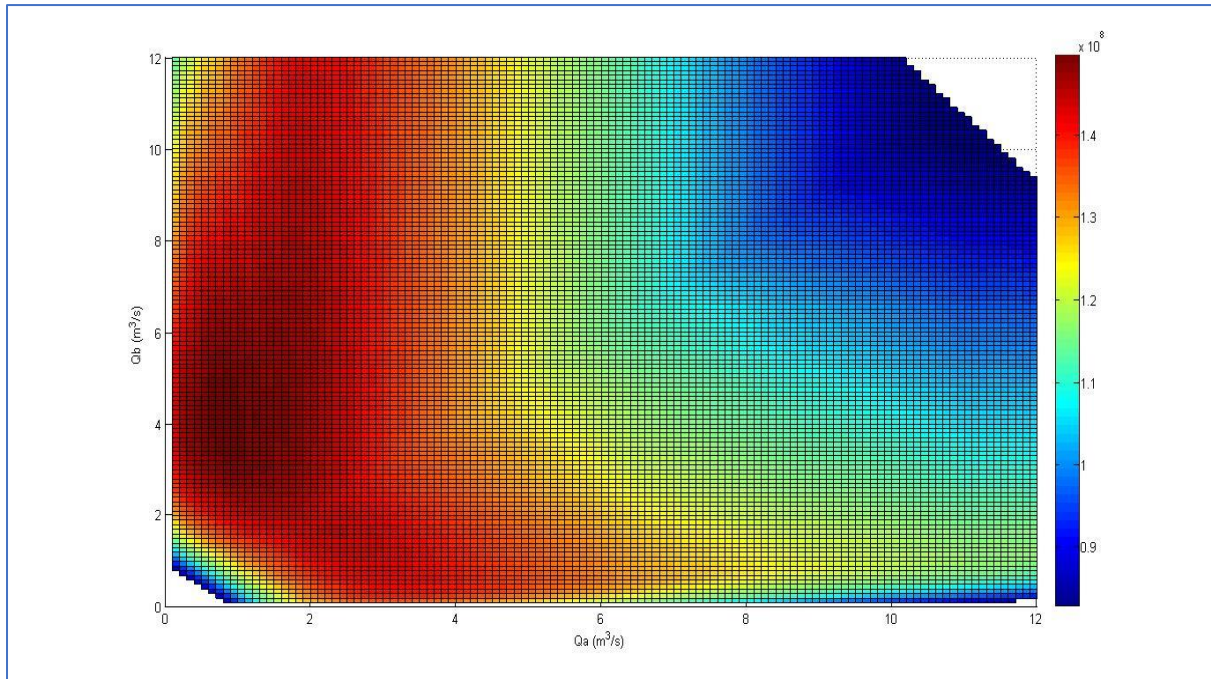
Διάγραμμα 5.15 Μεταβολή του ποσοστού χρόνου λειτουργίας στο έτος (%) συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m³/s)



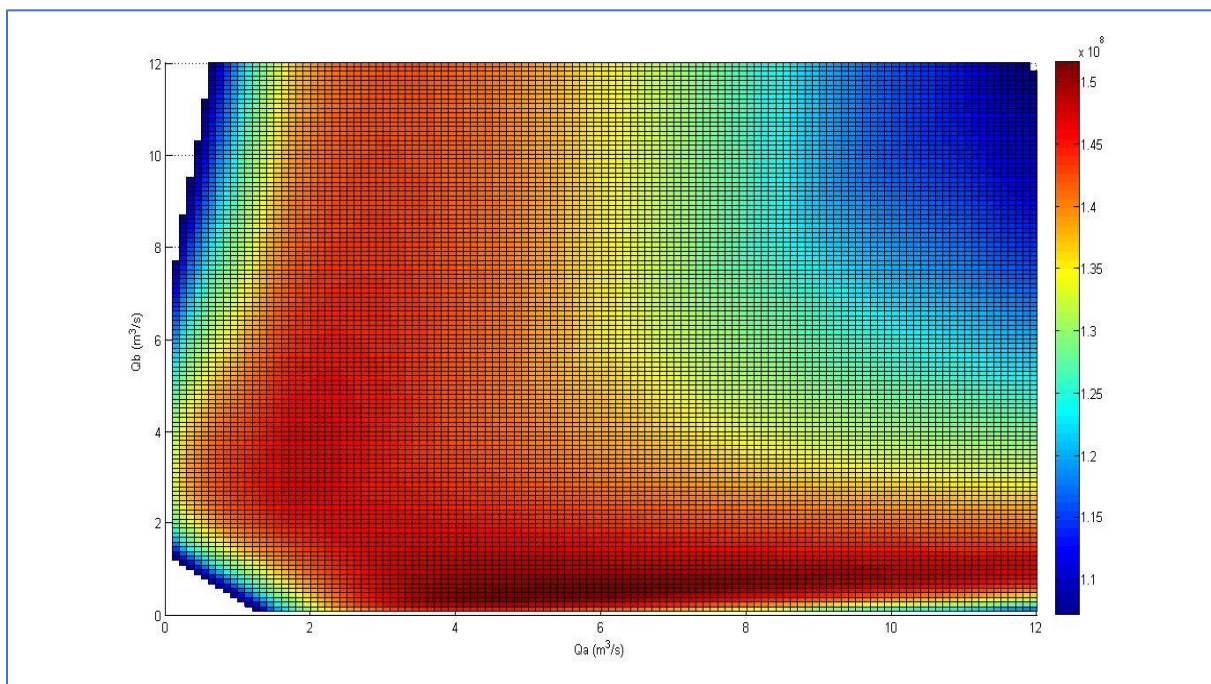
Διάγραμμα 5.16 Μεταβολή του ποσοστού όγκου νερού που αξιοποιείται (%) συναρτήσει της αθροιστικής ονομαστικής παροχής (m^3/s)

Εξάιρεση αποτελεί το διάγραμμα μεταβολής της συνολικής παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει των ονομαστικών παροχών των δύο στροβίλων. Καθώς το διάγραμμα κατασκευάζεται λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή παραγωγή, διαφέρει για τους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς. Όπως προκύπτει από τους Πίνακες 5.3 έως 5.6 η βέλτιστη λύση η οποία προκύπτει σε κάθε συνδυασμό είναι διαφορετική. Το ίδιο συμβαίνει και με την περιοχή βέλτιστων λύσεων η οποία αποτελείται από έναν αριθμό λύσεων που ακολουθείται της βέλτιστης. Η περιοχή βέλτιστων λύσεων εμφανίζεται με ακρίβεια στο διάγραμμα μεταβολής της συνολικής παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει των ονομαστικών παροχών και οδηγεί το μελετητή να επιλέξει μία λύση συνδυασμού ονομαστικών παροχών που δεν ξεφεύγει από την επιθυμητή ή και σε μερικές περιπτώσεις αναγκαστική παραγωγή.

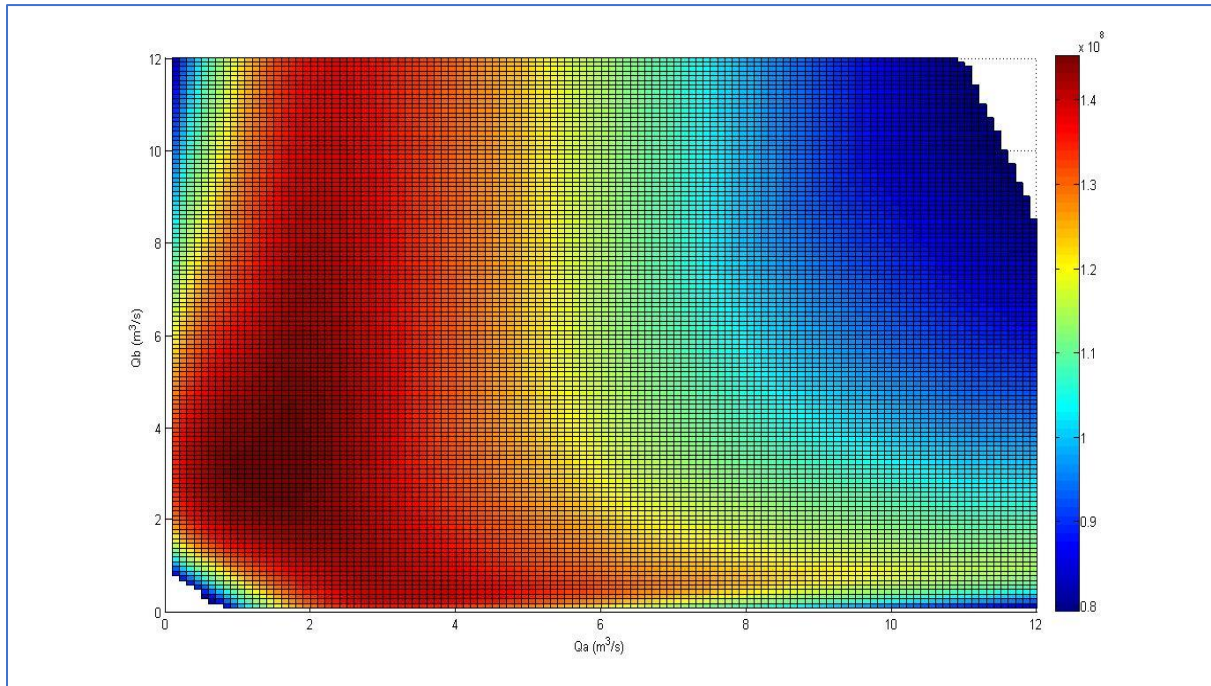
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά για τους τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς και επισημαίνονται οι περιοχές βέλτιστων λύσεων για κάθε συνδυασμό. Οι πιο αποδοτικές ενεργειακά λύσεις όπως έχει αναφερθεί αντιπροσωπεύονται από το σκούρο κόκκινο φάσμα ενώ οι λύσεις που πρέπει να αποφευχθούν από το μπλε φάσμα. Με σκοπό την καλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε κάτοψη. Σύμφωνα με τους Θεοδώρου και Θεοδώρου (2007) η δυνατότητα αυτή παρέχεται από το πρόγραμμα Matlab καθώς ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει περιμετρικά το διάγραμμα.



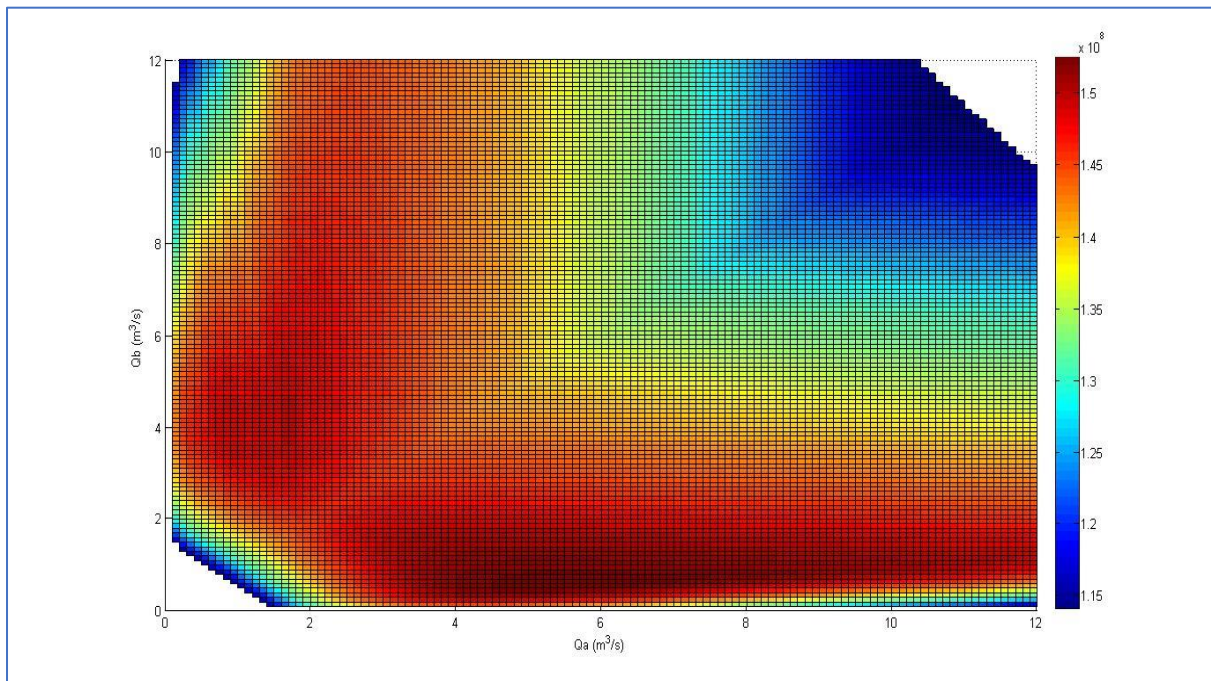
Διάγραμμα 5.17 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει των ονομαστικών παροχών (m^3/s) για ένα στρόβιλο Francis (άξονας x) και ένα στρόβιλο Pelton (άξονας y)



Διάγραμμα 5.18 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει των ονομαστικών παροχών (m^3/s) για ένα στρόβιλο Pelton (άξονας x) και ένα στρόβιλο Francis (άξονας y)



Διάγραμμα 5.19 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει των ονομαστικών παροχών (m³/s) για δύο στροβίλους Francis (άξονες x και y)



Διάγραμμα 5.20 Μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (kWh) συναρτήσει των ονομαστικών παροχών (m³/s) για δύο στροβίλους Pelton (άξονες x και y)

6. Μελλοντική έρευνα

Μια μελέτη ΜΥΗΕ, εκτός από τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής, απαιτεί παράλληλα τη διαστασιολόγηση των λοιπών μεγεθών της εγκατάστασης. Ανάλογα με τα μεγέθη που θα επιλεχθούν προκύπτει η οικονομική αποτίμηση της εκάστοτε λύσης.

Ως αποτέλεσμα, το παρών πρόβλημα μπορεί να επεκταθεί σε δύο σκέλη. Αρχικά να κατασκευαστεί κώδικας υπολογισμού της διαμέτρου του αγωγού προσαγωγής και να συνδυαστεί με το λογισμικό που κατασκευάστηκε στην παρούσα μελέτη έτσι ώστε να πραγματοποιείται ένας ακριβής υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής της εγκατάστασης. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τα οικονομικά στοιχεία των μεγεθών που επιλέχτηκαν να υπολογίζεται η οικονομικά βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ενσωματώνοντας τα δύο αυτά νέα στοιχεία στο παρών λογισμικό, ο μελετητής θα έχει στη διάθεση του ένα εργαλείο ακριβούς ποσοτικής μελέτης ενός ΜΥΗΕ.

6.1 Επιλογή διαμέτρου αγωγού προσαγωγής

Η διαστασιολόγηση του ΜΥΗΕ περιλαμβάνει αρχικά την επιλογή αριθμού και τύπων υδροστροβίλων καθώς και την επιλογή της ονομαστικής παροχής τους. Το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Η ενεργειακή παραγωγή που προέκυψε από το παρών λογισμικό στηρίχθηκε σε μία δεδομένη τιμή καθαρού ύψους πτώσεως η οποία θεωρήθηκε γνωστή εκ των υστέρων. Κάτι τέτοιο όμως δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική ροή των υπολογισμών. Ο μελετητής στην πραγματικότητα γνωρίζει το ολικό ύψος πτώσης, τα ύψη ανάντη και κατόντη του αγωγού πτώσεως, έχοντας τοποθετήσει στο τοπογραφικό χάρτη τη διαδρομή που θα καλύπτει ο αγωγός. Το καθαρό ύψος πτώσεως (Σχέση 5.1) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη ενεργειακές απώλειες οι οποίες υπολογίζονται συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού πτώσεως. Οι ενεργειακές απώλειες υπολογίζονται αθροίζοντας τις γραμμικές με τις τοπικές απώλειες ενέργειας (Σχέση 5.2).

$$H = H_A - H_K - h_E \quad (5.1)$$

$$h_E = h_\tau + h_f \quad (5.2)$$

Εφ' όσον σε αυτό το στάδιο ο μελετητής δεν γνωρίζει τις ενεργειακές απώλειες υπολογίζει την συμβατική ενεργειακή παραγωγή (E_{conv}) θεωρώντας μηδενικές απώλειες. Πραγματοποιείται δηλαδή η ενεργειακή βελτιστοποίηση του κώδικα 3 στην περίπτωση ενός στροβίλου και του κώδικα 4 στην περίπτωση των δύο στροβίλων θεωρώντας ως καθαρό ύψος πτώσεως το ολικό διαθέσιμο (H_{tot}). Από την ενεργειακή βελτιστοποίηση προκύπτει μια βέλτιστη τιμή ονομαστικής παροχής (ή βέλτιστη τιμή αθροιστικής ονομαστικής παροχής για τους δύο στροβίλους). Η ονομαστική παροχή είναι αυτή με την οποία θα διαστασιολογηθεί ο αγωγός πτώσεως που θα τροφοδοτεί το υδροηλεκτρικό.

Στο σημείο αυτό δοκιμάζονται όλες οι δυνατές τιμές διαμέτρων εμπορίου (από 0.1 m μέχρι 3 m). Για κάθε μία διάμετρο υπολογίζονται οι γραμμικές απώλειες και ως συνέπεια το καθαρό ύψος πτώσεως. Αρχικά υπολογίζεται η ταχύτητα ροής στον αγωγό συναρτήσει της παροχής που διέρχεται και της εκάστοτε διαμέτρου (κυκλική διατομή):

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad (5.3)$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η σχέση των Darcy-Weisbach με σκοπό τον υπολογισμό της κλίσης των γραμμικών απωλειών ενέργειας:

$$J_E = \frac{f}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (5.4)$$

όπου ο συντελεστής f υπολογίζεται από την πεπλεγμένη σχέση των Colebrook-White:

$$f = \left(1.14 - 2 * \log \left(\frac{k_s}{D} + \frac{9.35}{Re * \sqrt{f}} \right) \right)^{-2} \quad (5.5)$$

Ακολούθως υπολογίζονται οι γραμμικές απώλειες λαμβάνοντας υπόψη το μήκος του αγωγού που όπως αναφέρθηκε προκύπτει από την τοπογραφία της περιοχής και τη διαδρομή του αγωγού:

$$h_f = J_E * L \quad (5.6)$$

αλλά και οι τοπικές απώλειες του αγωγού από τη σχέση:

$$h_{\tau} = \frac{0.5 * V^2}{2 * g} \quad (5.7)$$

Τέλος, υπολογίζοντας τις ολικές ενεργειακές απώλειες (Σχέση 5.2) προκύπτει το καθαρό ύψος πτώσεως που αντιστοιχεί σε κάθε διάμετρο που δοκιμάστηκε (Σχέση 5.1).

Στο σημείο αυτό ο μελετητής θα πρέπει να επιλέξει τη διάμετρο του αγωγού σύμφωνα με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Επειδή το μήκος του αγωγού είναι σημαντικό, μια υπερδιαστασιολόγηση θα οδηγήσει σε οικονομικά ασύμφορη λύση. Είναι εμφανές ότι στο στάδιο αυτό είναι αναγκαία η συμμετοχή των οικονομικών στοιχείων της εγκατάστασης παρά το γεγονός ότι έως τώρα δεν είχαν ληφθεί καθόλου υπόψη στη μελέτη.

Λαμβάνοντας υπόψη τη διάμετρο του αγωγού προκύπτει το αρχικό κόστος εγκατάστασης του σε € από την παρακάτω προσεγγιστική σχέση (Κουτσογιάννης, 2015) :

$$T_c = 70 * 10^D * L \quad (5.8)$$

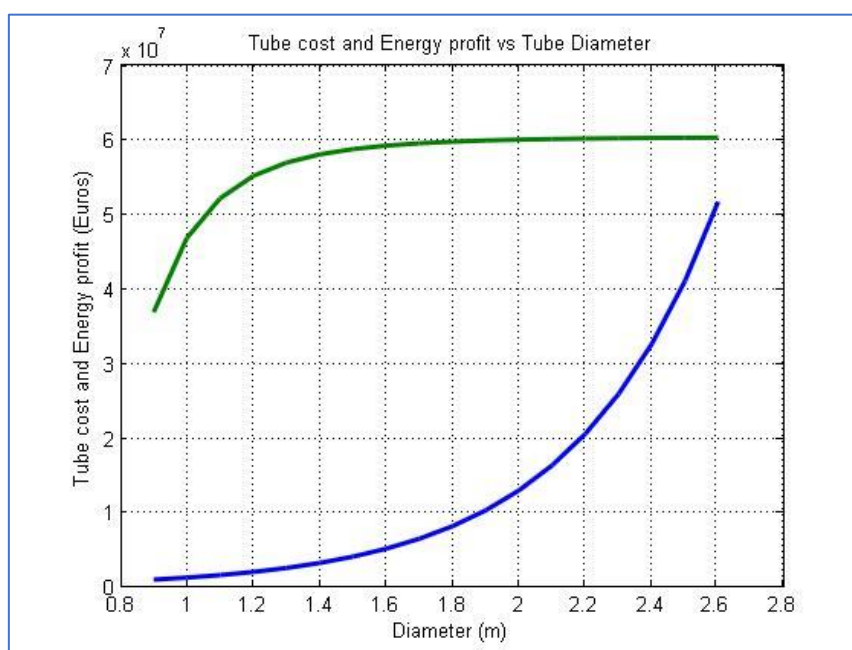
Στη συνέχεια για κάθε διάμετρο πολλαπλασιάζεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια ανά έτος που προέκυψε από τους κώδικες 3 ή 4 με το λόγο του καθαρού ύψους πτώσεως προς το ολικό διαθέσιμο. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η πραγματική παραγόμενη ενέργεια ανά έτος σε kWh που θα έχει το ΜΥΗΕ χρησιμοποιώντας την εκάστοτε διάμετρο για τον αγωγό πτώσεως:

$$E = \frac{H}{H_{tot}} * E_{conv} \quad (5.9)$$

Γνωρίζοντας ότι για Μικρά Υδροηλεκτρικά στην Ελλάδα η τιμή αποπληρωμής τους είναι περίπου 90.000 €/GWh προκύπτει το κέρδος που θα έχει το ΜΥΗΕ, από τη συνολική παραγωγή ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε μία διάμετρο, εάν θεωρήσουμε ότι θα λειτουργεί για 40 έτη:

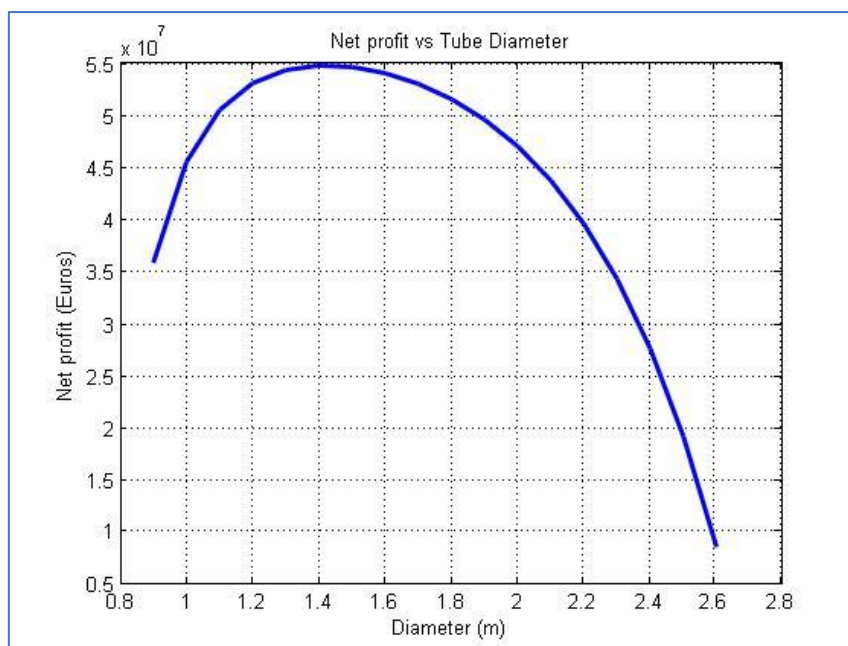
$$K_E = E * 90.000 * 40 \quad (5.10)$$

Οι συναρτήσεις κέρδους και κόστους που προέκυψαν από τις Σχέσεις 5.8 και 5.10 αποτυπώνονται γραφικά στη συνέχεια για ένα δεδομένο πρόβλημα. Εάν για παράδειγμα το ΜΥΗΕ που μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια λειτουργεί με δύο στροβίλους Francis αθροιστικής παροχής στροβίλων $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$ και προκύπτει από τον κώδικα 4 για ολικό ύψος πτώσεως 260 m συνολική παραγωγή ενέργειας 14.5 GWh το έτος. Δοκιμάζοντας διαμέτρους από 0.9 m έως 2.6 m προκύπτει η συνάρτηση κέρδους του υδροηλεκτρικού στο Διάγραμμα 6.1 με πράσινο χρώμα. Αντίστοιχα θεωρώντας ένα μήκος αγωγού 1850 m προκύπτει η συνάρτηση κόστους του αγωγού συναρτήσει της διαμέτρου με μπλε χρώμα. Η αύξηση του κόστους του αγωγού συναρτήσει της διαμέτρου ήταν αναμενόμενη.



Διάγραμμα 6.1 Μεταβολή του κέρδους της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (€) και του κόστους αγωγού πτώσεως (€) συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού (m)

Δημιουργώντας τη συνάρτηση καθαρού κέρδους του ΜΥΗΕ αφαιρώντας από το κέρδος της υδροηλεκτρικής ενέργειας το κόστος του αγωγού εμφανίζεται η βέλτιστη διάμετρος που θα επιφέρει το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος. Η συνάρτηση καθαρού κέρδους παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.2.



Διάγραμμα 6.2 Μεταβολή του καθαρού κέρδους (€) του ΜΥΗΕ συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού (m)

Ο μελετητής στη συνέχεια μπορεί να επιλέξει τη διάμετρο που επιθυμεί γνωρίζοντας όμως τις απώλειες που θα έχει στην παραγωγή ενέργειας καθώς και την αναλογία κόστους που θα προκύψει από τον αγωγό.

Από το Διάγραμμα 6.2 φαίνεται πως η βέλτιστη διάμετρος στο παράδειγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι 1.4 m. Στη συνέχεια, από το Διάγραμμα 6.1 φαίνεται πως για διάμετρο 1.4 m το κέρδος της συνολικής παραγόμενης ενέργειας μειώνεται περίπου 8% από το συμβατικό κέρδος παραγόμενης ενέργειας θεωρώντας μηδενικές ενεργειακές απώλειες.

Θεωρώντας ότι η προσεγγιστική αυτή μελέτη ανταποκρίνεται στο μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων ΜΥΗΕ προκύπτει το συμπέρασμα πως μια αρχική υπόθεση ενεργειακών απωλειών 8-10% του ολικού ύψους πτώσεως θα οδηγήσει σε αρκετά καλή ενεργειακή λύση αποφεύγοντας έτσι τον υπολογισμό που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο.

6.2 Οικονομική αποτίμηση λύσεων

Η παρούσα μελέτη όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου δεν περιλαμβάνει οικονομικά στοιχεία. Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται για το ΜΥΗΕ είναι ενεργειακή και παρά το γεγονός ότι η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή αποδίδει και το μέγιστο δυνατό κέρδος εάν ληφθεί υπόψη το κόστος αγοράς του στροβίλου που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση η τελική λύση δεν είναι πάντα και η πιο αποδοτική.

Για το λόγο αυτό προκύπτει η ανάγκη επέκτασης του παρόντος λογισμικού με ένα λογισμικό αποτίμησης των οικονομικών μεγεθών των λύσεων που εξετάζονται. Με τον τρόπο αυτό ο μελετητής θα μπορεί να επιλέξει την ενεργειακά βέλτιστη αλλά και οικονομικά συμφέρουσα λύση. Ένα τέτοιο λογισμικό θα πρέπει να περιλαμβάνει τα οικονομικά μεγέθη αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης των στοιχείων που θα περιλαμβάνει η κάθε λύση της μελέτης του ΜΥΗΕ. Τα στοιχεία αυτά θα ανταποκρίνονται στη σημερινή αγορά και για το λόγο αυτό θα πρέπει να ανανεώνονται ανάλογα με τα ισχύοντα τιμολόγια.

Στην περίπτωση αυτή, για μια αρχική αξιολόγηση των διαθέσιμων ενεργειακών επιλογών λαμβάνεται υπόψιν το αρχικό κόστος του ΜΥΗΕ δεδομένου ότι το κόστος συντήρησης μιας αντίστοιχης εγκατάστασης είναι σχετικά περιορισμένο και δεν υπερβαίνει σε ετήσια βάση το 1% του αρχικού κεφαλαίου.

Υπολογίζεται αναλυτικά το κόστος κάθε στοιχείου της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης και βρίσκεται στη συνέχεια το συνολικό αρχικό κόστος της. Το κόστος του κάθε στοιχείου θα πρέπει να αυξάνεται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 5%, έτσι ώστε να καλυφθούν απρόβλεπτα έξοδα που θα προκύψουν ή περιοδικές αυξήσεις των τιμών των στοιχείων.

Μία σαφής κοστολόγηση του συστήματος θα πρέπει να περιλαμβάνει μια λεπτομερή εκτίμηση του αρχικού κεφαλαίου που θα χρειαστεί για το έργο, το οποίο χωρίζεται στο κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού, στο κόστος της σύνδεσης στο δίκτυο, στο κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τέλος στις αμοιβές μηχανικού και στα έξοδα διαχείρισης του έργου.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας και των ετήσιων εσόδων. Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η απόδοση του συστήματος από την άποψη της μέγιστης δυναμικής ισχύος εξόδου σε kW και η μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

σε kWh το έτος, από το λογισμικό που έχει ήδη κατασκευαστεί, η οποία μετατρέπεται σε ετήσια έσοδα (€/έτος).

Τέλος, αφαιρώντας από τα συνολικά έσοδα για τα προβλεπόμενα χρόνια λειτουργίας του ΜΥΗΕ το αρχικό κεφάλαιο που θα δαπανηθεί, μπορεί να υπολογιστεί το καθαρό κέρδος που θα προκύψει για κάθε λύση που μελετάται.

7. Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στη συνέχεια παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια κατασκευής του λογισμικού αλλά και κατά την εφαρμογή του στο δεδομένο πρόβλημα που μελετήθηκε.

Πιο συγκεκριμένα, έχει γίνει πια σαφές ότι η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του στροβίλου αποτελεί το μέγεθος που επηρεάζει περισσότερο την ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης ενός ΜΥΗΕ. Για το λόγο αυτό οδηγηθήκαμε στην ανάγκη επέκταση του λογισμικού σε ενεργειακή βελτιστοποίηση ως προς το μέγεθος της ονομαστικής παροχής.

Το ΜΥΗΕ παράγει διαφορετική συνολική ενέργεια όταν επιλέγεται στρόβιλος τύπου Pelton και όταν επιλέγεται στρόβιλος τύπου Francis αλλά και όταν θεωρήσουμε την ιδεατή περίπτωση σταθερού συντελεστή εγκατάστασης. Οι διαφορές που εμφανίζουν τα αποτελέσματα οφείλονται στους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης. Αυτό συμβαίνει διότι οι τυπικοί στρόβιλοι Francis και Pelton εμφανίζουν μείωση του βαθμού απόδοσης τους στα μικρά ποσοστά παροχών εν αντιθέσει με τον ιδεατό στρόβιλο που διατηρεί σταθερή τιμή σε όλο το εύρος παροχών λειτουργίας του. Αντίστοιχα ο στρόβιλος Pelton παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το στρόβιλο Francis για ποσοστά παροχών από 15 έως 80%. Ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας προκύπτει στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιώντας στρόβιλο Pelton έναντι στροβίλου Francis για μία δεδομένη ονομαστική παροχή.

Συγκρίνοντας διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής προκύπτει το συμπέρασμα πως η βέλτιστη απόδοση του ΜΥΗΕ παράγεται όταν το διάστημα λειτουργίας του στροβίλου, θεωρώντας ότι ο στρόβιλος λειτουργεί από το 10% της ονομαστικής του παροχής, καταλαμβάνει το μεγαλύτερο όγκο στο διάγραμμα της καμπύλης διάρκειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δεδομένη ονομαστική παροχή να αντιπροσωπεύει καλύτερα τη χρονοσειρά των ημερήσιων εκμεταλλεύσιμων παροχών συγκριτικά με μία άλλη πιθανή τιμή.

Καθώς η χρήση δύο στροβίλων συνδυαστικά σε ένα ΜΥΗΕ είναι συνήθης για τη χώρα μας, μελετήθηκε αντίστοιχα η λειτουργία του ΜΥΗΕ του παρόντος προβλήματος με δύο στροβίλους. Όπως ήταν αναμενόμενο η χρήση δύο στροβίλων μπορεί να επιφέρει ακόμη καλύτερα ενεργειακά αποτελέσματα για τις σωστές ονομαστικές παροχές αλλά και το σωστό συνδυασμό τύπων στροβίλων.

Συγκεκριμένα, οι δύο τύποι στροβίλου δεν επιφέρουν τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας για τις ίδιες ονομαστικές παροχές. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί όμως είναι η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας στην περίπτωση που το ΜΥΗΕ λειτουργήσει με στρόβιλο τύπου Pelton είτε μόνο για τον έναν στρόβιλο είτε ακόμη καλύτερα και για τους δύο.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας την περίπτωση δύο στροβίλων ίδιας αθροιστικής ονομαστικής παροχής αλλά με αντίστροφη σειρά λειτουργίας, προκύπτει ότι η σειρά που θα λειτουργούν οι ονομαστικές παροχές των δύο στροβίλων επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ειδικά, προκύπτουν καλύτερες αποδόσεις όταν επιλέγεται για τον πρώτο στρόβιλο η μεγαλύτερη ονομαστική παροχή από τις δύο, αυξάνονται η παραγόμενη ενέργεια, το ποσοστό όγκου νερού που αξιοποιείται και εφόσον η ισχύς παραμένει ίδια, αυξάνεται και ο συντελεστής δυναμικότητας της εγκατάστασης.

Συγκρίνοντας πάλι δύο περιπτώσεις ίδιας αθροιστικής ονομαστικής παροχής για τους δύο στροβίλους και συγκεκριμένα στη μία περίπτωση επιλέγεται μία σχετικά μεγάλη ονομαστική παροχή για τον πρώτο στρόβιλο και μία αρκετά μικρή για το δεύτερο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση επιλέγονται δύο στρόβιλοι ίσης ονομαστικής παροχής, τα αποτελέσματα προκύπτουν να αποκλίνουν. Η πρώτη περίπτωση καλύπτει μεγαλύτερο φάσμα ημερήσιων παροχών και ως αποτέλεσμα παράγει μεγαλύτερη συνολική ενέργεια από τη δεύτερη περίπτωση.

Στη συνέχεια, η ενεργειακή βελτιστοποίηση με δύο στροβίλους οδηγεί στο συμπέρασμα πως είναι δυνατόν με τον κατάλληλο συνδυασμό τύπων και ονομαστικών παροχών των στροβίλων μπορεί να επιτευχθεί συνολική παραγωγή ενέργειας αρκετά κοντά στη δυνητική. Τέλος, η σύγκριση των τεσσάρων συνδυασμών των τύπων των στροβίλων δικαιολογεί την επιλογή στροβίλων τύπου Pelton στα περισσότερα ΜΥΗΕ στην Ελλάδα αλλά και στο εξωτερικό.

Στο στάδιο αυτό επισημαίνεται πως η μελέτη ενός ΜΥΗΕ από πλευράς μηχανικού έχει λυθεί. Παρόλα αυτά υπάρχουν ποιοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την τελική λύση του προβλήματος καθώς και την πραγματοποίησή της. Πιο συγκεκριμένα, περιβαλλοντικοί, πολιτικοί αλλά και πολιτιστικοί παράγοντες εμποδίζουν σε ορισμένες περιπτώσεις την πραγματοποίηση των μελετών ΜΥΗΕ που έχουν ήδη μελετηθεί και ως αποτέλεσμα υδατικό δυναμικό και δυνάμενη υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας μένει ανεκμετάλλευτη. Στην περίπτωση που οι παράγοντες αυτοί δεν σταθούν εμπόδιο κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης του έργου, ο μελετητής μπορεί πλέον να σχεδιάσει και να φέρει εις πέρας

ένα ενεργειακά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμο σε μέγιστο βαθμό Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο.

8. Αναφορές

Ελληνικές βιβλιογραφικές αναφορές:

Διαμαντάρας, Κ., και Κ. Γουλιάνας, *Σύντομο Εγχειρίδιο Matlab*, Τμήμα Πληροφορικής, Αλεξάνδρειο ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2013.

Θεοδώρου, Γ., και Ν. Θεοδώρου, *Πρακτικός Οδηγός στο Matlab*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2007.

Καλδέλλης, Ι.Κ., Β. Κατσίρου, Α. Κονδύλη και Γ. Κορμπάκης, *Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων Για Τη Μεγιστοποίηση Της Ενεργειακής Παραγωγής*, Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Πειραιά, Αθήνα, 2006.

Καλδέλλης, Ι.Κ., και Κ.Α. Καββαδίας, *Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας: Αιολική Ενέργεια-Μικρά Υδροηλεκτρικά*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα, 2005.

Κουτσογιάννης, Δ., Αστικά Υδραυλικά Έργα, *Υδρευτικά έργα, Σχεδιασμός και υπολογισμός σύνθετου εξωτερικού υδραγωγείου*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

Κωτσοβίνος, Ν., *Σύντομες Σημειώσεις Για Υδροστροβίλους*, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 2009.

ΛΑΓΗΕ (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.), *Συνοπτικό Πληροφοριακό Δελτίο Μάρτιος 2016*, Αθήνα, 2016.

Λαμπροπούλου, Β., Μ. Κορνάρος, Α. Καραγεωργόπουλος και Θ. Τσούτσος, Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς – Η Ελληνική Εμπειρία, *Τεχν. Χρον. Επιστ.*, Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, Τεύχ. 1-2, 2004.

Μαμάσης, Ν., Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης, *Υδροηλεκτρικά Έργα, Ενέργεια, Ηλεκτρική Ενέργεια, Υδροηλεκτρική Ενέργεια*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

Μαμάσης, Ν., Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης, *Υδροηλεκτρικά Έργα, Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

Μιμίκου, Μ., *Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2006.

Νεστορίδου, Ε., Μ. Χατζηδάκης και Β. Ευταξιοπούλου, *Μικρά Υδροηλεκτρικά Στα Δίκτυα Της ΕΥΔΑΠ: Εμπειρία – Προοπτικές*, Η συμβολή των υδροηλεκτρικών έργων στον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, ΤΕΕ & ΤΕΕ - Τμ. Ηπείρου, Ιωάννινα, 2009.

Νουτσόπουλος, Γ. και Γ. Χριστοδούλου, *Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών*, Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα, 1996.

Παπαντώνης, Δ.Ε., *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2008.

Ράμπιας, Ε.Ε., Σ.Κ. Κωτσάκος και Ι.Π. Στεφανάκος, *Μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο αρδευτικό φράγμα Νεστορίου Καστοριάς*, Εισήγηση στο 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων Με Διεθνή Συμμετοχή, Λάρισα, 2008.

Ροντήρης, Σ., *Η ανάπτυξη των μικρών υδροηλεκτρικών έργων από τη ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ*, Εισήγηση στο Επιστημονικό Τριήμερο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, 2007.

Σούλης, Ι. Β., *Μικρά Υδροδυναμικά Έργα*, Τομέας Υδραυλικών Έργων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 1994.

ΥΠΕΧΩΔΕ, *Ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και αιεφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού*, Αθήνα, 2008.

Ξένες βιβλιογραφικές αναφορές:

Bailey, T., and R. Bass, *Hydroelectric Feasibility Study, An Assessment of the Feasibility of Generating Electric Power Using Urban Stormwater in Oregon City*, Renewable Energy Engineering, Oregon Institute of Technology, 2009.

Van Loan, C. F., and K. Y. D. Fan, *Insight Through Computing, A MATLAB Introduction to Computational Science and Engineering*, SIAM., 2010.

ESHA (European Small Hydropower Association), *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, 2004. (esha@arcadis.be).

Kaldellis, J.K., The contribution of small hydro power stations to the electricity generation in Greece: Technical and economic considerations, *Energy Policy*, 35 (2007), 2187-2196, 2007.

Paish, O., Small hydro power: technology and current status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 537–556, 2002.

Voros, N., C. Kiranoudis and Z. Maroulis, Short-cut design of small hydroelectric plants, *Renewable Energy*, 19 (2000), 545-563, 2000.

Διαδικτυακοί τόποι:

<http://www.renewablegreece.wikispaces.com> Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα

<http://www.mindev.gov.gr> Υπουργείο Οικονομίας, Ανάπτυξης & Τουρισμού

<http://www.ypeka.gr> Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας

<http://www.lagie.gr> Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρική Ενέργειας

<http://www.desmie.gr> Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

<http://www.admie.gr> Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

<http://www.ppcr.gr> ΔΕΗ Ανανεώσιμες

<http://thermorema-sa.egemi.gr> ΜΥΗΣ Θερμόρεμα Α.Ε.

<http://www.energotech.gr> Energotech ΑΕΒΕΕ

9. Παράρτημα

9.1 Κώδικας 1

```
clc;
clear;
Q=uigetfile('*.txt','Select net Q timeseries in cubic meters per
second (m^3/s)');
Q=load(Q);
l=length(Q);
Qmax=max(Q);
%%
while 1
    H = input('Select clear head H in meters (m) (for example 260):
');
    if H > 0 && H < 10000000
        break
    end
    fprintf('The clear head should be between 0 and 1000000. Try
again.\n');
end
while 1
    factor = input('Choose either stable total efficiency factor by
writing 0 or a typical type turbine \n by writing 1: ');
    if factor==0 || factor==1
        break
    end
    fprintf('You must choose either 0 or 1. Try again.\n');
end
if factor==0
    str=0;
    ne=0;
    while 1
        ntot = input('Select a number for the stable total efficiency
factor (for example 0.85): ');
        if ntot > 0 && ntot <= 1
            break
```

```
end
fprintf('The total efficiency factor should be between 0 and 1.
Try again.\n');
end
else
ntot=0;
while 1
str = input('Choose either a typical type turbine by writing 1
for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan \n or a specific turbine
which you have curve for by writing 4: ');
if str==1 || str==2 || str==3 || str==4
break
end
fprintf('You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.\n');
end
if str==4
Turbine=uigetfile('*.txt','Select the specific turbine curve
you want to use');
end
while 1
ne = input('Select efficiency factor due to electromechanical
equipment \n (the value 0.96 is suggested from the instructor): ');
if ne > 0 && ne<=1
break
end
fprintf('The efficiency factor due to electromechanical
equipment should be between 0 and 1. Try again.\n');
end
H=H*ne;
end
while 1
Qo = input('Select nominal water flow rate in cubic meters per
second (m^3/s) (for example 0.5): ');
if Qo > 0 && Qo <= Qmax
break
end
```

```
fprintf('The nominal water flow rate should be between 0 and
%.3f. Try again.\n', Qmax);
end
%%
Qsort=sort(Q, 'descend');
f=(1:length(Q))';
f=f.*100/length(Q);
figure(1);
plot(f, Qsort, 'Linewidth', 2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Duration Curve');
axis([0 100 0 max(Q)]);
xlabel('exceedance frequency (%)');
ylabel('water flow rate(m^3/s)');
figure(2);
Vq=Q*86400;
SVq=sum(Vq);
Vqsort=sort(Vq);
Vsum=zeros(1,1);
Vsum(1)=Vqsort(1);
for i=2:1
    Vsum(i)=Vqsort(i)+Vsum(i-1);
end
Qssort=sort(Qsort);
plot(Qssort, (Vsum/SVq*100), 'Linewidth', 2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Inflow Curve');
axis([0 max(Q) 0 100]);
xlabel('Inflow');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
figure(3);
plot(f, Vsum/SVq*100, 'Linewidth', 2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Percentage of Total Time');
axis([0 100 0 100]);
xlabel('Percentage of Total Time (%)');
```

```

ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
if str==0
    a1=(10:10:100)';
    a2= repmat(ntot,10,1);
    a=[a1 a2];
elseif str==1
    a=load('Francis.txt');
elseif str==2
    a=load('Pelton.txt');
elseif str==3
    a=load('Kaplan.txt');
else
    a=load(Turbine);
end
x=a(:,1);
y=a(:,2);
Nfit=fit(x,y,'linearinterp','Exclude',x<10);
pQ=Q./Qo;
dl=bsxfun(@ge,pQ,0.1);
pQ=pQ.*dl;
pQ=bsxfun(@min,pQ,1);
n=Nfit(pQ*100);
WQ=dl.*Q;
WQ=bsxfun(@min,WQ,Qo);
E=9.81*H*n.*WQ*24;
SE=sum(E);
k=bsxfun(@gt,E,0);
k=sum(k);
V=WQ*86400;
SV=sum(V);
PT=(k/l)*100;
PV=(SV/SVq)*100;
if factor==0
    nI=ntot;
else
    nI=1;

```

```
end
I=nI*9.81*H*Qo;
SD=(SE/10)/(I*8760);
figure(4);
plot(E,'y','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Energy time series');
axis([0 1 0 max(E)]);
xlabel('time step');
ylabel('Energy (kWh)');
figure(5);
plot(V,'c','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Volume time series');
axis([0 1 0 max(V)]);
xlabel('time step');
ylabel('Volume (m^3)');
fprintf('The total produced energy is %.3f kWh. \n', SE);
fprintf('The power assigned to the nominal water flow rate is %.3f
kW. \n', I);
fprintf('The operating time percentage is %.3f percent. \n', PT);
fprintf('The used volume percentage is %.3f percent. \n', PV);
fprintf('The capacity utilization rate is %.3f. \n', SD);
if PT<30
    fprintf('Note that the operating time percentage is below %.f
percent as the regulations dictate \n so you must select different
nominal water flow rate. \n',30);
end
if PV<75
    fprintf('Note that the used volume percentage is below %.f
percent as the regulations dictate \n so you must select different
nominal water flow rate. \n',75);
end
```

9.2 Κώδικας 2

```
clc;
clear;
Q=uigetfile('*.txt','Select net Q timeseries in cubic meters per
second (m^3/s)');
Q=load(Q);
l=length(Q);
Qmax=max(Q);
%%
while 1
    H = input('Select clear head H in meters (m) (for example 260):
');
    if H > 0 && H < 10000000
        break
    end
    fprintf('The clear head should be between 0 and 1000000. Try
again.\n');
end
while 1
    factor = input('Choose either stable total efficiency factor by
writing 0 or typical type turbines \n by writing 1: ');
    if factor==0 || factor==1
        break
    end
    fprintf('You must choose either 0 or 1. Try again.\n');
end
if factor==0
    stra=0;
    strb=0;
    ne=0;
    while 1
        ntot = input('Select a number for the stable total efficiency
factor (for example 0.85): ');
        if ntot > 0 && ntot <= 1
            break
        end
    end
end
```

```
fprintf('The total efficiency factor should be between 0 and 1.
Try again.\n');
end
while 1
Qoa = input('Select nominal water flow rate in cubic meters per
second (m^3/s) for the first turbine \n (for example 0.5): ');
if Qoa > 0 && Qoa <= Qmax
    break
end
fprintf('The nominal water flow rate should be between 0 and
%.3f. Try again.\n', Qmax);
end
while 1
Qob = input('Select nominal water flow rate in cubic meters per
second (m^3/s) for the second turbine \n (for example 0.5): ');
if Qob > 0 && Qob <= Qmax
    break
end
fprintf('The nominal water flow rate should be between 0 and
%.3f. Try again.\n', Qmax);
end
else
ntot=0;
while 1
stra = input('Choose for the first turbine either a typical type
by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 \n for kaplan or a
specific turbine which you have curve for by writing 4: ');
if stra==1 || stra==2 || stra==3 || stra==4
    break
end
fprintf('You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.\n');
end
if stra==4
    Turbinea=uigetfile('*.txt','Select the specific turbine
curve you want to use for the first turbine');
end
```

```
while 1
    Qoa = input('Select nominal water flow rate in cubic meters per
second (m^3/s) for the first turbine \n (for example 0.5): ');
    if Qoa > 0 && Qoa <= Qmax
        break
    end
    fprintf('The nominal water flow rate should be between 0 and
%.3f. Try again.\n', Qmax);
end
while 1
    strb = input('Choose for the second turbine either a typical
type by writing 1 for francis, 2 for pelton and \n 3 for kaplan or a
specific turbine which you have curve for by writing 4: ');
    if strb==1 || strb==2 || strb==3 || strb==4
        break
    end
    fprintf('You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.\n');
end
    if strb==4
        Turbineb=uigetfile('*.txt','Select the specific turbine
curve you want to use for the second turbine');
    end
    while 1
        Qob = input('Select nominal water flow rate in cubic meters per
second (m^3/s) for the second turbine \n (for example 0.5): ');
        if Qob > 0 && Qob <= Qmax
            break
        end
        fprintf('The nominal water flow rate should be between 0 and
%.3f. Try again.\n', Qmax);
    end
    while 1
        ne = input('Select efficiency factor due to electromechanical
equipment \n (the value 0.96 is suggested from the instructor): ');
        if ne > 0 && ne<=1
            break
        end
    end
end
```

```

    end
    fprintf('The efficiency factor due to electromechanical
equipment should be between 0 and 1. Try again.\n');
    end
    H=H*ne;
end
%%
Qsort=sort(Q, 'descend');
f=(1:length(Q))';
f=f.*100/length(Q);
figure(1);
plot(f,Qsort, 'Linewidth',2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Duration Curve');
axis([0 100 0 max(Q)]);
xlabel('exceedance frequency (%)');
ylabel('water flow rate(m^3/s)');
figure(2);
Vq=Q*86400;
SVq=sum(Vq);
Vqsort=sort(Vq);
Vsum=zeros(1,1);
Vsum(1)=Vqsort(1);
for i=2:1
    Vsum(i)=Vqsort(i)+Vsum(i-1);
end
Qssort=sort(Qsort);
plot(Qssort, (Vsum/SVq*100), 'Linewidth',2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Inflow Curve');
axis([0 max(Q) 0 100]);
xlabel('Inflow');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
figure(3);
plot(f, Vsum/SVq*100, 'Linewidth',2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;

```

```
title('Percentage of Total Volume-Percentage of Total Time');
axis([0 100 0 100]);
xlabel('Percentage of Total Time (%)');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
if stra==0
    a1=(10:10:100)';
    a2=repmat(ntot,10,1);
    a=[a1 a2];
elseif stra==1
    a=load('Francis.txt');
elseif stra==2
    a=load('Pelton.txt');
elseif stra==3
    a=load('Kaplan.txt');
else
    a=load(Turbinea);
end
x=a(:,1);
y=a(:,2);
Nfita=fit(x,y,'linearinterp','Exclude',x<10);
if strb==0
    b1=(10:10:100)';
    b2=repmat(ntot,10,1);
    b=[b1 b2];
elseif strb==1
    b=load('Francis.txt');
elseif strb==2
    b=load('Pelton.txt');
elseif strb==3
    b=load('Kaplan.txt');
else
    b=load(Turbineb);
end
z=b(:,1);
w=b(:,2);
Nfitb=fit(z,w,'linearinterp','Exclude',x<10);
```



```

%%
pQa=Q./Qoa;
dla=bsxfun(@gt,pQa,0.1);
pQa=pQa.*dla;
pQa=bsxfun(@min,pQa,1);
na=Nfita(pQa*100);
WQa=dla.*Q;
trimer=bsxfun(@gt,WQa,Qoa);
WQup=WQa.*trimer-trimer*Qoa;
WQa=bsxfun(@min,WQa,Qoa);
Ea=9.81*H*na.*WQa*24;
%%
LWQ=Q.*not(trimer);
LWQ=not(dla).*LWQ;
LWQ=LWQ+WQup;
pQb=LWQ./Qob;
dlb=bsxfun(@ge,pQb,0.1);
pQb=pQb.*dlb;
WQb=dlb.*LWQ;
pQb=bsxfun(@min,pQb,1);
nb=Nfitb(pQb*100);
WQb=bsxfun(@min,WQb,Qob);
Eb=9.81*H*nb.*WQb*24;
%%
E=Ea+Eb;
SEA=sum(Ea);
SEB=sum(Eb);
SE=sum(E);
k=bsxfun(@gt,E,0);
k=sum(k);
WQ=WQa+WQb;
V=WQ.*86400;
SV=sum(V);
PT=(k/l)*100;
PV=(SV/SVq)*100;
MAXE=max(E);

```

```

MAXV=max(V);
if factor==0
    nI=ntot;
else
    nI=1;
end
I=nI*9.81*H*(Qoa+Qob);
SD=(SE/10)/(I*8760);
figure(4);
plot(E,'y','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Energy time series');
axis([0 1 0 max(E)]);
xlabel('time step');
ylabel('Energy (kWh)');
figure(5);
plot(V,'c','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Volume time series');
axis([0 1 0 max(V)]);
xlabel('time step');
ylabel('Volume (m^3)');
fprintf('The total produced energy is %.3f kWh. \n', SE);
fprintf('The power assigned to the nominal water flow rate is %.3f
kW. \n', I);
fprintf('The operating time percentage is %.3f percent. \n', PT);
fprintf('The used volume percentage is %.3f percent. \n', PV);
fprintf('The capacity utilization rate is %.3f. \n', SD);
if PT<30
    fprintf('Note that the operating time percentage is below %.f
percent as the regulations dictate \n so you must select different
nominal water flow rate. \n',30);
end
if PV<75

```

```
fprintf('Note that the used volume percentage is below %.f
percent as the regulations dictate \n so you must select different
nominal water flow rate. \n',75);
end
```

9.3 Κώδικας 3

```
clc;
clear;
Q=uigetfile('*.txt','Select net Q timeseries in cubic meters per
second (m^3/s)');
Q=load(Q);
l=length(Q);
Qmax=max(Q);
%%
while 1
    H = input('Select clear head H in meters (m) (for example 260):
');
    if H > 0 && H < 10000000
        break
    end
    fprintf('The clear head should be between 0 and 1000000. Try
again.\n');
end
while 1
    factor = input('Choose either stable total efficiency factor by
writing 0 or a typical type turbine \n by writing 1: ');
    if factor==0 || factor==1
        break
    end
    fprintf('You must choose either 0 or 1. Try again.\n');
end
if factor==0
    str=0;
    ne=0;
    while 1
```

```
ntot = input('Select a number for the stable total efficiency
factor (for example 0.85): ');
if ntot > 0 && ntot <= 1
    break
end
fprintf('The total efficiency factor should be between 0 and 1.
Try again.\n');
end
else
ntot=0;
while 1
str = input('Choose either a typical type turbine by writing 1
for francis, 2 for pelton and 3 for kaplan \n or a specific turbine
which you have curve for by writing 4: ');
if str==1 || str==2 || str==3 || str==4
    break
end
fprintf('You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.\n');
end
if str==4
    Turbine=uigetfile('*.txt','Select the specific turbine curve
you want to use');
end
while 1
ne = input('Select efficiency factor due to electromechanical
equipment \n (the value 0.96 is suggested from the instructor): ');
if ne > 0 && ne<=1
    break
end
fprintf('The efficiency factor due to electromechanical
equipment should be between 0 and 1. Try again.\n');
end
H=H*ne;
end
%%
Qsort=sort(Q, 'descend');
```

```

f=(1:length(Q))';
f=f.*100/length(Q);
figure(1);
plot(f,Qsort,'Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Duration Curve');
axis([0 100 0 max(Q)]);
xlabel('exceedance frequency (%)');
ylabel('water flow rate(m^3/s)');
figure(2);
Vq=Q*86400;
SVq=sum(Vq);
Vqsort=sort(Vq);
Vsum=zeros(1,1);
Vsum(1)=Vqsort(1);
for i=2:1
    Vsum(i)=Vqsort(i)+Vsum(i-1);
end
Qssort=sort(Qsort);
plot(Qssort, (Vsum/SVq*100),'Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Inflow Curve');
axis([0 max(Q) 0 100]);
xlabel('Inflow');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
figure(3);
plot(f, Vsum/SVq*100,'Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Percentage of Total Time');
axis([0 100 0 100]);
xlabel('Percentage of Total Time (%)');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
if str==0
    a1=(10:10:100)';
    a2= repmat(ntot,10,1);
    a=[a1 a2];

```

```
elseif str==1
    a=load('Francis.txt');
elseif str==2
    a=load('Pelton.txt');
elseif str==3
    a=load('Kaplan.txt');
else
    a=load(Turbine);
end
x=a(:,1);
y=a(:,2);
Nfit=fit(x,y,'linearinterp','Exclude',x<10);
Qomax=floor(max(Q));
Qomin=0.1;
Qom=Qomin:0.1:Qomax;
m=length(Qom);
SE=zeros(1,m);
SV=zeros(1,m);
Sk=zeros(1,m);
I=zeros(1,m);
SD=zeros(1,m);
for i=1:m
    Qo=Qom(i);
    pQ=Q./Qo;
    dl=bsxfun(@ge,pQ,0.1);
    pQ=pQ.*dl;
    pQ=bsxfun(@min,pQ,1);
    n=Nfit(pQ*100);
    WQ=dl.*Q;
    WQ=bsxfun(@min,WQ,Qo);
    E=9.81*H*n.*WQ*24;
    SE(i)=sum(E);
    k=bsxfun(@gt,E,0);
    Sk(i)=sum(k);
    V=WQ.*86400;
    SV(i)=sum(V);
end
```

```

I(i)=9.81*H*Qo;
SD(i)=(SE(i)/10)/(I(i)*8760);
end
PT=(Sk./l)*100;
PV=(SV./SVq)*100;
MAXE=max(SE);
MAXV=max(SV);
%%
[SEsort,p]=sort(SE,'descend');
PTsort=PT(p);
PVsort=PV(p);
pacV=find(PVsort>75);
PTac=PTsort(pacV);
pacT=find(PTac>30);
SEac=SEsort(pacT);
Qomsort=Qom(p);
Qomac=Qomsort(pacT);
SDsort=SD(p);
SDac=SDsort(pacT);
finaltable=[Qomac',SEac'];
%%
lfinal=length(finaltable);
temp = cell(lfinal+1, 1);
temp{1} = 'Q (m^3/s)          SE (kWh)';
for i=2:length(temp)
    temp{i} = sprintf('%10.3f%15.2f', finaltable(i-1, :));
end
f = figure('menu','none','toolbar','none','name','Table of
discharges');
ph = uipanel(f,'Units','normalized','position',[0 0 1 1],'title',...
'Discharges');
lbh =
uicontrol(ph,'style','listbox','Units','normalized','position',...
[0 0 1 1], 'FontName', 'Courier new', 'FontSize',12, 'string',
temp);
%%

```

```
figure(5);
plot(Qom,SE,'y','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Energy vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qomin Qomax 0 MAXE]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Energy (kWh)');
figure(6);
plot(Qom,SV,'c','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Energy Volume vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qomin Qomax 0 MAXV]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Volume (m^3)');
figure(7);
plot(Qom,PT,'m','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Operating Time Percentage vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qomin Qomax 0 100]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Operating Time percentage PT(%)');
figure(8);
plot(Qom,PV,'g','Linewidth',2,'LineSmoothing','on');
grid on;
title('Used Volume Percentage vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qomin Qomax 0 100]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Used Volume Percentage PV(%)');
```

9.4 Κώδικας 4

```
clc;
clear;
Q=uigetfile('*.txt','Select net Q timeseries in cubic meters per
second (m^3/s)');
Q=load(Q);
l=length(Q);
```

```
Qmax=max(Q);  
%%  
while 1  
    H = input('Select clear head H in meters (m) (for example 260):  
' );  
    if H > 0 && H < 10000000  
        break  
    end  
    fprintf('The clear head should be between 0 and 1000000. Try  
again.\n');  
end  
while 1  
    factor = input('Choose either stable total efficiency factor by  
writing 0 or typical type turbines \n by writing 1: ');  
    if factor==0 || factor==1  
        break  
    end  
    fprintf('You must choose either 0 or 1. Try again.\n');  
end  
if factor==0  
    stra=0;  
    strb=0;  
    ne=0;  
    while 1  
        ntot = input('Select a number for the stable total efficiency  
factor (for example 0.85): ');  
        if ntot > 0 && ntot <= 1  
            break  
        end  
        fprintf('The total efficiency factor should be between 0 and 1.  
Try again.\n');  
    end  
else  
    ntot=0;  
    while 1
```

```
stra = input('Choose for the first turbine either a typical type
by writing 1 for francis, 2 for pelton and 3 \n for kaplan or a
specific turbine which you have curve for by writing 4: ');
if stra==1 || stra==2 || stra==3 || stra==4
    break
end
fprintf('You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.\n');
end
while 1
    strb = input('Choose for the second turbine either a typical
type by writing 1 for francis, 2 for pelton and \n 3 for kaplan or a
specific turbine which you have curve for by writing 4: ');
    if strb==1 || strb==2 || strb==3 || strb==4
        break
    end
    fprintf('You must choose between 1, 2, 3 and 4. Try again.\n');
    end
    while 1
        ne = input('Select efficiency factor due to electromechanical
equipment \n (the value 0.96 is suggested from the instructor): ');
        if ne > 0 && ne<=1
            break
        end
        fprintf('The efficiency factor due to electromechanical
equipment should be between 0 and 1. Try again.\n');
        end
        H=H*ne;
    end
end
%%
Qsort=sort(Q, 'descend');
f=(1:length(Q))';
f=f.*100/length(Q);
figure(1);
plot(f,Qsort, 'Linewidth',2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Duration Curve');
```

```

axis([0 100 0 max(Q)]);
xlabel('exceedance frequency (%)');
ylabel('water flow rate(m^3/s)');
figure(2);
Vq=Q*86400;
SVq=sum(Vq);
Vqsort=sort(Vq);
Vsum=zeros(1,1);
Vsum(1)=Vqsort(1);
for i=2:1
    Vsum(i)=Vqsort(i)+Vsum(i-1);
end
Qsort=sort(Qsort);
plot(Qsort, (Vsum/SVq*100), 'Linewidth',2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Inflow Curve');
axis([0 max(Q) 0 100]);
xlabel('Inflow');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
figure(3);
plot(f, Vsum/SVq*100, 'Linewidth',2, 'LineSmoothing', 'on');
grid on;
title('Percentage of Total Volume-Percentage of Total Time');
axis([0 100 0 100]);
xlabel('Percentage of Total Time (%)');
ylabel('Percentage of Total Volume (%)');
if stra==0
    a1=(10:10:100)';
    a2= repmat(ntot,10,1);
    a=[a1 a2];
elseif stra==1
    a=load('Francis.txt');
elseif stra==2
    a=load('Pelton.txt');
elseif stra==3
    a=load('Kaplan.txt');

```

```

else
    a=load('Turbine.txt');
end
x=a(:,1);
y=a(:,2);
Nfita=fit(x,y,'linearinterp','Exclude',x<10);
if strb==0
    b1=(10:10:100)';
    b2= repmat(ntot,10,1);
    b=[b1 b2];
elseif strb==1
    b=load('Francis.txt');
elseif strb==2
    b=load('Pelton.txt');
elseif strb==3
    b=load('Kaplan.txt');
else
    b=load('Turbine.txt');
end
z=b(:,1);
w=b(:,2);
Nfitb=fit(z,w,'linearinterp','Exclude',x<10);
%%
Qomax=floor(max(Q));
Qomin=0.1;
Qom1=nchoosek(Qomin:0.1:Qomax,2);
Qom11=Qom1(:,1);
Qom12=Qom1(:,2);
Qom2=[Qom12,Qom11];
Qom=[Qom1
      Qom2];
m=length(Qom);
Qcomb=sum(Qom,2);
Qcombmin=min(Qcomb);
Qcombmax=max(Qcomb);
SEA=zeros(1,m);

```

```

SEB=zeros(1,m);
SE=zeros(1,m);
SV=zeros(1,m);
Sk=zeros(1,m);
for i=1:m
pQa=Q./Qom(i,1);
dla=bsxfun(@ge,pQa,0.1);
pQa=pQa.*dla;
pQa=bsxfun(@min,pQa,1);
na=Nfita(pQa*100);
WQa=dla.*Q;
trimer=bsxfun(@gt,WQa,Qom(i,1));
WQup=WQa.*trimer-trimer*Qom(i,1);
WQa=bsxfun(@min,WQa,Qom(i,1));
Ea=9.81*H*na.*WQa*24;
%%
LWQ=Q.*not(trimer);
LWQ=not(dla).*LWQ;
LWQ=LWQ+WQup;
pQb=LWQ./Qom(i,2);
dlb=bsxfun(@ge,pQb,0.1);
pQb=pQb.*dlb;
WQb=dlb.*LWQ;
pQb=bsxfun(@min,pQb,1);
nb=Nfitb(pQb*100);
WQb=bsxfun(@min,WQb,Qom(i,2));
Eb=9.81*H*nb.*WQb*24;
%%
E=Ea+Eb;
SEA(i)=sum(Ea);
SEB(i)=sum(Eb);
SE(i)=sum(E);
k=bsxfun(@gt,E,0);
Sk(i)=sum(k);
WQ=WQa+WQb;
V=WQ.*86400;

```

```
SV(i)=sum(V);
end
PT=(Sk./l)*100;
PV=(SV./SVq)*100;
MAXE=max(SE);
MAXV=max(SV);
%%
[SEsort,p]=sort(SE,'descend');
PTsort=PT(p);
PVsort=PV(p);
pacV=find(PVsort>75);
PTac=PTsort(pacV);
pacT=find(PTac>30);
SEac=SEsort(pacT);
Qomsort=Qom(p,1:2);
Qomac=Qomsort(pacT,1:2);
%%
SEacc=SEac';
finaltable=[Qomac,SEacc];
%%
figure(4);
plot(Qcomb,SE,'.y','markersize',6);
grid on;
title('Energy vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qcombmin Qcombmax 0 MAXE]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Energy (kWh)');
figure(5);
plot(Qcomb,SV,'.c','markersize',6);
grid on;
title('Energy Volume vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qcombmin Qcombmax 0 MAXV]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Volume (m^3)');
figure(6);
plot(Qcomb,PT,'.m','markersize',6);
```

```

grid on;
title('Operating Time Percentage vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qcombmin Qcombmax 0 100]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Operating Time percentage PT(%)');
figure(7);
plot(Qcomb,PV,'.g','markersize',6);
grid on;
title('Used Volume Percentage vs Nominal Water Flow Rate');
axis([Qcombmin Qcombmax 0 100]);
xlabel('Nominal Water Flow Rate (m^3/s)');
ylabel('Used Volume Percentage PV(%)');
%%
lfinal=length(finaltable);
temp = cell(lfinal+1, 1);
temp{1} = 'Qa (m^3/s)    Qb (m^3/s)    SE (kWh)';
for i=2:length(temp)
    temp{i} = sprintf('%10.3f%12.3f%15.2f', finaltable(i-1, :));
end
f = figure('menu','none','toolbar','none','name','Table of
discharges');
ph = uipanel(f,'Units','normalized','position',[0 0 1 1],'title',...
'Discharges');
lbh =
uicontrol(ph,'style','listbox','Units','normalized','position',...
[0 0 1 1], 'FontName', 'Courier new', 'FontSize',12, 'string',
temp);
%%
xmin = min(finaltable(:, 1));
xmax = max(finaltable(:, 1));
ymin = min(finaltable(:, 2));
ymax = max(finaltable(:, 2));
[x, y] = meshgrid(xmin:0.1:xmax, ymin:0.1:ymax); %Make a grid
z = griddata(finaltable(:,1), finaltable(:,2), finaltable(:,3), x,
y); %Interpolate SE at grid points
figure(9);

```



```
surf(x, y, z);  
xlabel('Qa (m3/s)');  
ylabel('Qb (m3/s)');  
zlabel('SE (kWh)');
```