



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

Μελέτη Βέλτιστης Μετατροπής Υδροηλεκτρικού Σταθμού σε  
Αναστρέψιμο, για τη Διαχείριση και Αποθήκευση Περίσσειας  
Ηλεκτρικής Ενέργειας



**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ Σ. ΓΙΑΝΝΟΥΛΑΚΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010)

## Πρόλογος

Τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο, οι αλλαγές στον ενεργειακό χάρτη προμηνύονται ιδιαίτερα σημαντικές για την ερχόμενη δεκαετία. Ιδιαίτερα η χώρα μας φιλοδοξεί να συμβαδίσει με τις επιταγές της Ε.Ε. και να έχει επιτύχει μέχρι το 2020, το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται αποκλειστικά από ΑΠΕ. Ο στόχος αυτός που έχει τεθεί, πρόκειται να αντιμετωπίσει σημαντικά εμπόδια σε διάφορα επίπεδα. Οι γραφειοκρατικές αγκυλώσεις και η σύγχρονη οικονομική κρίση είναι σίγουρα τα δύο πρώτα προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν για την ανάπτυξη των επενδύσεων στις ΑΠΕ. Όμως ακόμα και αν ξεπεράσουμε τα εμπόδια αυτά, θα πρέπει ήδη να είμαστε έτοιμοι να επιλύσουμε προβλήματα τεχνικής φύσεως, που σχετίζονται με τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο επίπεδο ολοκλήρωσης των σπουδών στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στόχο είχε να ασχοληθεί με την τεχνική φύση του προβλήματος που αναφέρθηκε. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η μετατροπή υπαρκτού ΥΗΣ σε αναστρέψιμο για την αποθήκευση και διαχείριση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας του ελληνικού δικτύου. Το θέμα αυτό πρόκειται να λάβει σημαντικές διαστάσεις κατά τα επόμενα χρόνια, καθώς θα μεγαλώνει η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών και ιδιαίτερα της αιολικής ενέργειας, στον ελλαδικό χώρο. Η τελευταία μάλιστα προγραμματίζεται να αποτελέσει την αιχμή του δόρατος στην ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα.

Πρωταρχικός στόχος της μελέτης που αναπτύχθηκε ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων μετατροπής που υπάρχουν σε δεδομένη εγκατάσταση. Μέσα από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη μεθοδολογία που δύναται να ακολουθηθεί, αλλά και τις βιώσιμες δυνατότητες που παρουσιάζει η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικά συστήματα. Δηλαδή σε συνολικό επίπεδο επιχειρήσαμε να δώσουμε μία λύση σε προβλήματα σταθερότητας, που θα παρουσιασθούν στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο, κατά την ανάπτυξη των ΑΠΕ, με επίσης πράσινες τεχνικές.

Καταλήγοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Δ. Παπαντώνη, αφού χωρίς την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια του, δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση αυτής της Διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστίες, επίσης, θα πρέπει να αποδοθούν στον Επίκ. Καθηγητή κ. Ι. Αναγνωστόπουλο για την ενημέρωση πάνω σε θέματα τιμολογιακής πολιτικής υδροηλεκτρικών έργων, καθώς και στον τομέα Θερμικών Στροβιλομηχανών (Καθηγητής κ. Κ. Γιαννάκογλου) για την παραχώρηση εμπορικού κώδικα εξελικτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης (Easy v2.0). Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη σημαντική συμβολή τους στην επιστημονική μου κατάρτιση.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Στυλιανός Σ. Γιαννουλάκης

# Περιεχόμενα

	Σελ.
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>4</b>
1.1 Παράθεση του προβλήματος	4
1.2 Τυπικός αναστρέψιμος Υδροηλεκτρικός σταθμός	7
1.3 Δημιουργία νέων αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών σταθμών στην ηπειρωτική Ελλάδα	9
1.4 Μελέτη μετατροπής συγκεκριμένου ΥΗΣ	10
1.5 Λογική αντιμετώπισης του προβλήματος	15
1.6 Συνολική επιδίωξη της μελέτης	17
<b>2 Ανάλυση λειτουργίας προγράμματος Fortran</b>	<b>18</b>
2.1 Βασικές λειτουργίες	18
2.2 Ανάγνωση αρχείων δεδομένων εισόδου	18
2.3 Υπολογισμός κυρίων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φυγόκεντρης αντλίας	19
2.4 Υπολογισμός βασικών στοιχείων αγωγού και χαρακτηριστική σωλήνωσης για κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους	25
2.5 Υπολογισμός σημείου λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα του έτους	35
2.6 Προσομοίωση της λειτουργίας με άντληση και κατανομή της αντλούμενης παροχής για κάθε ημέρα	37
2.7 Υπολογισμός τελικών αποτελεσμάτων και εγγραφή στα αρχεία εξόδου	47
<b>3 Αποτελέσματα όπως προέκυψαν από κώδικα Fortran</b>	<b>56</b>
3.1 Αντλία ονομαστικής ισχύος 10 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα	56
3.2 Αντλία ονομαστικής ισχύος 30 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα	61
3.3 Αντλία ονομαστικής ισχύος 50 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα	65
3.4 Αντλία ονομαστικής ισχύος 100 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα	70
3.5 Αντλία ονομαστικής ισχύος 200 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα	75
3.6 Συνολικός σχολιασμός αποτελεσμάτων	79

<b>4</b>	<b>Εξεύρεση βέλτιστης λύσης με εξελικτικό αλγόριθμο</b>	<b>82</b>
4.1	Αιτιολόγηση της χρήσης μεθόδων βελτιστοποίησης	82
4.2	Προαπαιτούμενα για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης	83
4.3	Βασικά γνωρίσματα ενός εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης	84
4.4	Ανάλυση λειτουργίας ενός εξελικτικού αλγορίθμου	86
4.4.1	Κωδικοποίηση ελεύθερων μεταβλητών	89
4.4.2	Τελεστές επιλογής γονέων	90
4.4.3	Τελεστές Διασταύρωσης	91
4.4.4	Τελεστές Μετάλλαξης	92
4.5	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε προβλήματα πολλών στόχων και η έννοια του μετώπου Pareto	92
4.6	Εκτέλεση του ΕΑ και παράθεση αποτελεσμάτων	94
4.6.1	Μεγιστοποίηση της ενεργειακής εκμεταλλευσιμότητας της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης	94
4.6.2	Μεγιστοποίηση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου αντλιοταμίευσης	101
4.6.3	Εξεύρεση βέλτιστης λύσης και για τους δύο στόχους του προβλήματος ταυτόχρονα	103
4.6.4	Διερεύνηση αποτελεσμάτων με ευνοϊκότερη τιμολογιακή πολιτική	108
<b>5</b>	<b>Συνολικά Συμπεράσματα</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>114</b>

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Παράθεση του προβλήματος

Σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο, άσχετα αν αυτό είναι διασυνδεδεμένο και μεγάλης κλίμακας ή μικρό και απομονωμένο (ηπειρωτική Ελλάδα – νησιά), είναι κρίσιμης σημασίας να ικανοποιείται κάθε στιγμή το ισοζύγιο της ισχύος. Δηλαδή πρέπει κάθε στιγμή ο διαχειριστής του ηλεκτρικού δικτύου να είναι σε θέση να ισοσταθμίζει με μικρές αποκλίσεις την ισχύ που απορροφάται από τους καταναλωτές (φορτίο) με την ισχύ που παράγεται από τους ηλεκτρικούς σταθμούς (θερμικούς, ΑΠΕ). Αυτό επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό προβλέποντας στατιστικά τη διακύμανση του φορτίου για κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους. Συγκεκριμένες όμως τεχνικές δυσκολίες παρουσιάζονται στο έργο του διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου, που σχετίζονται άμεσα με τη φύση της κάθε μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο αναλυτικά, όσο αφορά στις συμβατικές μονάδες, που με τη διαδικασία της καύσης πρώτης ύλης όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, επιβάλλουν κάποια ελάχιστα στη λειτουργία τους και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι συχνές εκκινήσεις και διακοπές λειτουργίας θεωρούνται άκρως ασύμφορες και χρονοβόρες διαδικασίες. Δηλαδή διαπιστώνουμε ότι σε περιόδους χαμηλής ζήτησης οι θερμικοί σταθμοί δεν είναι σε θέση να μειώσουν την παραγωγή τους κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο οπότε τις χρονικές αυτές περιόδους φαίνεται να περισσεύει ισχύς στο δίκτυο. Η περίσσεια αυτή ενέργειας αν δεν αποθηκευτεί με κάποιο τρόπο, θα απορριφθεί αναξιοποίητη με ιδιαίτερα αρνητικά αποτελέσματα τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο.

Επιπλέον όμως από το πρόβλημα των θερμικών σταθμών, σε λίγα χρόνια η χώρα μας θα κλιθεί να αντιμετωπίσει και την αύξηση της συμμετοχής της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από τα αιολικά πάρκα. Η αιολική ενέργεια προκαλεί νέα τεχνικά προβλήματα στην διαχείριση ενός ηλεκτρικού δικτύου, τα οποία οφείλονται στην έντονη χρονική διακύμανση που παρουσιάζει η παραγωγή των αιολικών πάρκων και στην αδυναμία πρόβλεψης της παραγωγής από τα αιολικά πάρκα. Δηλαδή εισάγονται στο ηλεκτρικό δίκτυο μονάδες που παρουσιάζουν χρονική δυναμικότητα ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ όσο οι μονάδες αυτές παραμένουν σε μικρή κλίμακα, ο διαχειριστής του ηλεκτρικού δικτύου είναι σε θέση να τις ελέγξει και να επιτύχει μεγάλη απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές. Στην περίπτωση όμως που οι μονάδες αυτές πληθαίνουν και μεγαλώνουν σε μέγεθος τότε προκαλούν σοβαρά προβλήματα αστάθειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Συνεπώς προκειμένου ο διαχειριστής του δικτύου να αντιμετωπίσει φαινόμενα αστάθειας αναγκάζεται να απορρίπτει όλο και μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχονται από τα αιολικά πάρκα. [4]

Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι στην ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας που υπήρχε παραδοσιακά λόγω των τεχνικών ελαχίστων των μεγάλων θερμικών σταθμών παραγωγής και την κάλυψη των αιχμών ενός δικτύου προστίθεται μία καινούργια που προέρχεται από την αύξηση της συμμετοχής των αιολικών πάρκων στο σύστημα παραγωγής.

Πρέπει να τονιστεί ότι, η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας που προέρχεται από την παραγωγή αιολικών πάρκων γίνεται απαραίτητη, ακόμη και σε ισχυρά διασυνδεδεμένα δίκτυα, όταν η συμμετοχή της αιολικής ενέργειας αρχίζει να πλησιάζει κάποια όρια πέρα από τα οποία η διείσδυση της αιολικής ενέργειας προκαλεί αστάθεια στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ήδη κάποιες χώρες έχουν φθάσει στο όριο αυτό οπότε η περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μπορεί να γίνει μόνο μέσω αποθήκευσης. Ως παράδειγμα αυτού του προβλήματος μπορούμε να αναφέρουμε τη Γερμανία, η οποία με συνολικά εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ περί τα 120.000 MW, τα αιολικά πάρκα πλησιάζουν τα 26.000 MW. [17]

Όσο αφορά τη χώρα μας με συνολική εγκατεστημένη ισχύς περίπου στις 14.000 MW, η ισχύς των αιολικών πάρκων είναι περί τα 1.200 MW (με συνολική εγκατεστημένη ισχύ από ΑΠΕ 1.522 MW). Δηλαδή παρατηρούμε πως η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα αιολικά πάρκα δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα σταθερότητας του δικτύου. Όμως, οι ρυθμοί ανάπτυξης των αιολικών πάρκων στη χώρα μας παρουσιάζουν σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια. Ενώ προκειμένου να προσεγγίσουμε τους ενεργειακούς στόχους που έχουμε θέσει συνολικά σα χώρα για το 2020, πρέπει να εγκατασταθούν έως τότε 5.000 ~ 8.000 MW αιολικών πάρκων. Συνεπώς, παρατηρούμε πως δε θα αργήσουμε να αποκτήσουμε αντίστοιχα προβλήματα σταθερότητας ηλεκτρικού δικτύου που ήδη αντιμετωπίζουν άλλες χώρες. [14]

Σύμφωνα με όσα ήδη αναφέρθηκαν, φαίνεται πως η εύρεση μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μονόδρομος, αν επιθυμούμε την μεγαλύτερη ανάπτυξη των ΑΠΕ στον ελλαδικό χώρο και την παράλληλη κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας για κάθε χρονική στιγμή. Δηλαδή αναζητούμε ένα σύστημα που θα είναι σε θέση να αποθηκεύει την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και να την προσδίδει άμεσα στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής του.

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τους δυνατούς τρόπους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να διαπιστώσουμε ποιος από αυτούς είναι κατάλληλος να συμβάλει στην εξομάλυνση του προβλήματος. Συγκεκριμένα η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με μία από τις παρακάτω μορφές:

- Σε ηλεκτρική μορφή συνεχούς ρεύματος με τη χρήση συστοιχίας ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταρίες)
- Σε μηχανική μορφή υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο
- Σε μορφή πεπιεσμένου αέρα ή αερίου γενικότερα σε αεροφυλάκιο
- Σε υδραυλική μορφή υπό την μορφή ποσότητας νερού που αντλείται από μία χαμηλότερη στάθμη σε μία υψηλότερη

Προκειμένου να συγκρίνουμε τις μεθόδους αποθήκευσης που αναφέραμε παραθέτουμε τον επόμενο συγκεντρωτικό Πίνακα που μας δίνει μία εικόνα της τάξης μεγέθους της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί με κάθε τρόπο:

Τεχνολογία αποθήκευσης	Μέγεθος (MWh)
Σφόνδυλος	0.1 ~ 20
Ηλεκτρικός Συσσωρευτής	17 ~ 40
Πεπιεσμένος Αέρας	250 ~ 2.200
Υδραυλικός Ταμιευτήρας	0 ~ 20.000

Πίνακας 1.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και αντίστοιχες δυνατότητες [8]  
 Αμέσως γίνεται κατανοητό, από τον προηγούμενο Πίνακα, ότι από τις μεθόδους αποθήκευσης που αναφέρθηκαν μόνο η αποθήκευση σε μορφή υδραυλικής ενέργειας και υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα μπορούν να καλύψουν την περιοχή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, ώστε να είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση ενός ηλεκτρικού δικτύου. Παράλληλα παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα που τις κάνουν ακόμα πιο ελκυστικές για τη δεδομένη εφαρμογή. Πιο αναλυτικά, είναι αναστρέψιμες μέθοδοι (αποθήκευση και τροφοδοσία του ηλεκτρικού δικτύου), έχουν γρήγορη απόκριση και έχουν σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης σε ένα πλήρη κύκλο.

Πρέπει να τονίσουμε ότι η μέθοδος της υδραυλικής αποθήκευσης ενέργειας έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό σε χώρες του εξωτερικού. Αυτό μπορεί να γίνει ακόμα πιο εμφανές παραθέτοντας τον επόμενο Πίνακα που περιλαμβάνει τις μεγαλύτερες αναστρέψιμες υδροηλεκτρικές μονάδες του κόσμου που ξεπερνούν τα 1.000 MW εγκατεστημένης ισχύος: [15]

Location	Plant Name	On-Line Date	Hydraulic Head (m)	Max Total Rating (MW)	Hours of Discharge	Plant Cost
Australia	Tumut 3	1973		1690		
China	Tianhuangping	2001	590	1800		\$1080 M
	Guangzhu	2000	554	2400		
France	Grand Maison	1987	955	1800		
Germany	Markersbach	1981		1050		
	Goldisthal	2002		1060		\$700 M
Iran	Siah Bisheh	1996		1140		
Italy	Piastra Edolo	1982	1260	1020		
	Chiotas	1981	1070	1184		
	Presezano	1992		1000		
	Lago Delio	1971		1040		
Japan	Imaichi	1991	524	1050	7.2	
	Okuyoshino	1978	505	1240		
	Kazunogowa	2001	714	1600	8.2	\$3200 M
	Mananogawa	1999	489	1200		
	Ohkawachi	1995	411	1280	6	
	Okukiyotsu	1982	470	1040		
	Okumino	1995	485	1036		
	Okutataragi	1998	387	1240		
	Shimogo	1991	387	1040		
	Shin Takesagawa	1981	229	1280	7	
	Shin Toyne	1973	203	1150		
	Tamahara	1986	518	1200	13	
Luxembourg	Vianden	1964	287	1096		
Russia	Zagorsk	1994	539	1200		
	Kaishador	1993		1600		
	Dneister	1996		2268		
South Africa	Drakensbergs	1983	473	1200		
Taiwan	Minghu	1985	310	1008		\$866 M
	Mingtán	1994	380	1620		\$1338 M
U.K./Wales	Dinorwig	1984	545	1890	5	\$310 M
U.S.A./CA	Castaic	1978	350	1566	10	
	Helms	1984	520	1212	153	\$416 M
USA/MA	Northfield Mt	1973	240	1080	10	\$685 M
USA/MI	Ludington	1973	110	1980	9	\$327 M
USA/NY	Blenheim-Gilboa	1973	340	1200	12	\$212 M
	Lewiston (Niagra)	1961	33	2880	20	
USA/SC	Bad Creek	1991	370	1065	24	\$652 M
USA/TN	Raccoon Mt	1979	310	1900	21	\$288 M
USA/VA	Bath County	1985	380	2700	11	\$1650 M

Πίνακας 1.2 Οι μεγαλύτεροι αναστρέψιμοι ΥΗΣ παγκοσμίως με πάνω από 1000 MW. Ενώ στην Ελλάδα υπάρχουν ήδη δύο αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα μεγάλου μεγέθους που είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο της ηπειρωτικής χώρας. Αυτά είναι της Σφηκιάς στον ποταμό Αλιάκμονα (1985) με 3 αναστρέψιμες μονάδες συνολικής ισχύος 315 MW και του Θησαυρού στον ποταμό Νέστο (1998) με 3 επίσης αναστρέψιμες μονάδες συνολικής ισχύος 381 MW. Συγκεντρωτικά εντοπίζουμε τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς που βρίσκονται στον ελλαδικό χώρο όπως φαίνονται στον επόμενο χάρτη: [2]



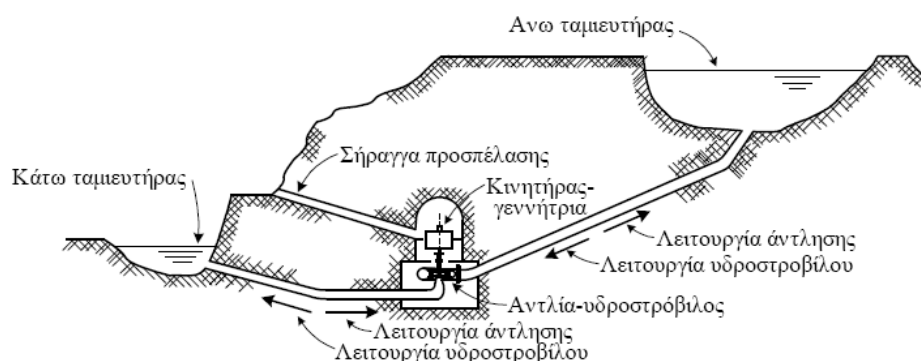
Σχήμα 1.1 Οι ΥΗΣ που έχουν κατασκευαστεί στον ελλαδικό χώρο και που εντοπίζονται

## 1.2 Τοπικός αναστρέψιμος Υδροηλεκτρικός σταθμός

Ένας πλήρης κύκλος αποθήκευσης ενέργειας, με τη λειτουργία ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού σταθμού, περιλαμβάνει άντληση νερού από έναν κάτω ταμιευτήρα σε ένα άνω ταμιευτήρα, των οποίων η υψομετρική διαφορά είναι ίση με  $h$ . Με αυτό

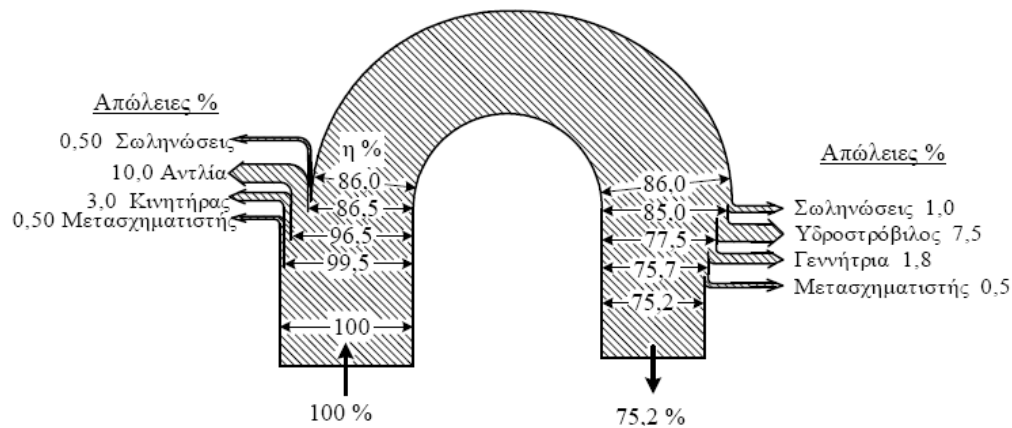


τον τρόπο απορροφάμε περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο για τη λειτουργία των αντλιών και την πρόσδοση δυναμικής ενέργειας σε συγκεκριμένο όγκο νερού. Ενώ στη συνέχεια όταν το ηλεκτρικό δίκτυο βρεθεί σε φάση υψηλής ζήτησης διακινούμε τον όγκο νερού που αντλήθηκε από τον άνω ταμιευτήρα στον κάτω, διαμέσου των υδροστροβίλων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και απόδοση της στο δίκτυο. Σχηματικά η εγκατάσταση που περιγράφηκε φαίνεται στο επόμενο Σχήμα:



Σχήμα 1.2 Τυπική εγκατάσταση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού σταθμού

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν είναι προφανές ότι σε έναν υδραυλικό κύκλο σαν και αυτόν που περιγράφηκε υπάρχουν σημαντικές ενεργειακές απώλειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της άντλησης μετατρέπουμε την ηλεκτρική ενέργεια σε υδραυλική και κατά τη διάρκεια της φάσης της παραγωγής μετατρέπουμε την υδραυλική σε ηλεκτρική. Δηλαδή κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης μεσολαβούν δύο μετατροπές ενέργειας και όπως υποβάλλει και ο 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός νόμος έχουμε απώλειες σε κάθε μετατροπή. Οι απώλειες αυτές είναι της τάξεως του 20 ~ 35 % και διακρίνονται σε υδραυλικές, μηχανικές και ηλεκτρικές. Συνεπώς, σε έναν πλήρη κύκλο σαν και αυτόν που περιγράφηκε αναμένεται συνολικός βαθμός απόδοσης της τάξεως του 65 ~ 80 %. Δηλαδή από το αρχικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέξαμε να αποθηκεύσουμε θα μείνει ένα μόνο μέρος του ανάλογα με το βαθμό απόδοσης του κύκλου. Φυσικά αυτό δεν πρέπει να θεωρηθεί μειονέκτημα της μεθόδου γιατί σε κάθε άλλη περίπτωση που δε θα αποθηκεύαμε την περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια αυτή θα απορριπτόταν από το ηλεκτρικό δίκτυο αναξιοποίητη. Επομένως έχουμε τη δυνατότητα να διατηρήσουμε ένα μεγάλο μέρος της περισσευούμενης ενέργειας και να την αξιοποιήσουμε όταν εμείς την έχουμε ανάγκη συμβάλλοντας και στη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Στη συνέχεια δίνεται το επόμενο Σχήμα που απεικονίζει εποπτικά τη ροή ενέργειας στον υδραυλικό κύκλο και τις αντίστοιχες μέσες απώλειες: [8]



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ροής ενέργειας για πλήρη κύκλο αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού σταθμού με μέσες τιμές απωλειών

### 1.3 Δημιουργία νέων αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών σταθμών στην ηπειρωτική Ελλάδα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, λόγω της αυξανόμενης εγκατάστασης αιολικών πάρκων στον ελλαδικό χώρο, προβλέπεται ότι πολύ σύντομα θα υπάρξει πρόβλημα διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Επομένως προκειμένου να διατηρήσουμε ένα σταθερό και αξιόπιστο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και να αυξήσουμε τη διείσδυση των ΑΠΕ στη χώρα μας, κρίνεται ουσιώδες να δημιουργηθούν περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες με αναστρέψιμη λειτουργία. Γιατί σε αντίθετη περίπτωση θα βρεθούμε στη δυσάρεστη θέση να ανακόψουμε την πράσινη ενεργειακή ανάπτυξη που έχει επιλέξει η χώρα σε Ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο.

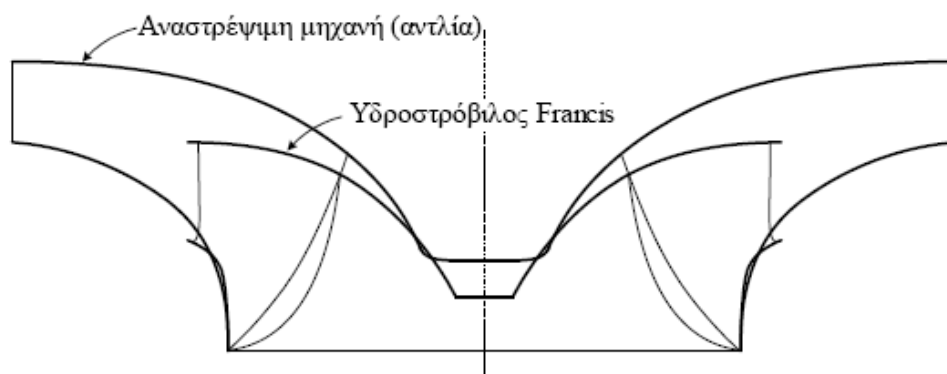
Είναι γνωστό ότι η πλειοψηφία των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων στην Ελλάδα έχουν ήδη κατασκευαστεί από τη ΔΕΗ Α.Ε. Επομένως, δεν υπάρχουν σημαντικά περιθώρια για τη δημιουργία νέων σταθμών που θα μπορούσαν να έχουν διπλή λειτουργία. Συνεπώς, η πιο λογική λύση που θα μπορούσε να δοθεί στο πρόβλημα αυτό είναι η μετατροπή των ήδη εγκατεστημένων μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών που διαθέτουν και τους απαραίτητους ανάντη και κατόντη ταμιευτήρες για τη διπλή λειτουργία. [2]

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως ο υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής επιλέγεται να παραμείνει ανεπηρέαστος. Δηλαδή η εγκατάσταση θα μετατραπεί σε αναστρέψιμη δημιουργώντας ένα νέο συγκρότημα άντλησης, το οποίο θα είναι τελείως ξεχωριστό από τον ΥΗΣ παραγωγής. Αυτή η επιλογή σχετίζεται με οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση που επιλέγαμε να μετατρέψουμε την αρχική εγκατάσταση θα είχε ως συνέπεια να θέσει εκτός παραγωγής και για μεγάλο χρονικό διάστημα μία παραγωγική μονάδα, η οποία είναι απαραίτητη για το ηλεκτρικό δίκτυο και δεν έχει αποσβεσθεί οικονομικά ακόμα. Παράλληλα θα απαιτούνταν μετατροπές πολύ μεγάλης κλίμακας, ακόμα για έργα που διαθέτουν έτοιμους τους δύο ταμιευτήρες.

Ενώ ακόμα και στην περίπτωση που επιλέγαμε να διατηρήσουμε την αρχική κτιριακή εγκατάσταση και να αντικαταστήσουμε μόνο τους υδροστροβίλους με αντίστοιχους αναστρέψιμους, αυτό κρίνεται απαγορευτικό για τους εξής λόγους:

- Στην περίπτωση που έχουμε υδροστροβίλους τύπου Francis, οι υδροστροβίλοι αυτοί έχουν πολύ μεγάλη διαφορά μεγέθους με τους αντίστοιχους αναστρέψιμους. Συνεπώς αυτή η μετατροπή κρίνεται αδύνατη από την άποψη αυτή, ενώ δημιουργούνται και προβλήματα σπληαίωσης γιατί η λειτουργία ως αντλία απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη βύθιση της μηχανής.
- Ενώ στη περίπτωση που έχουμε υδροστροβίλους τύπου Pelton, οι υδροστροβίλοι αυτοί δε μπορούν να λειτουργήσουν με διπλή λειτουργία, λόγω της φύσης του σχεδιασμού τους.

Για την επιβεβαίωση των όσων αναφέρθηκαν για τη μετατροπή ενός υδροστροβίλου τύπου Francis, δίνεται το επόμενο Σχήμα που παρουσιάζει τη μεσημβρινή τομή του δρομέα του υδροστροβίλου Francis και του ισοδύναμου αναστρέψιμου υδροστροβίλου, για την ίδια ονομαστική ισχύ (50 MW), την ίδια υδραυλική πτώση και την ίδια βύθιση:



Σχήμα 1.4 Διαφορά μεγέθους ανάμεσα στη μεσημβρινή τομή υδροστροβίλου Francis και ισοδύναμου αναστρέψιμου υδροστροβίλου (50 MW)

Δηλαδή παρατηρούμε ξεκάθαρα τη διαφορά μεγέθους ανάμεσα στις δύο μηχανές, που στο συγκεκριμένο παράδειγμα προκύπτει αύξηση των ολικών διαστάσεων της μηχανής κατά 67 %. Επομένως σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν, κρίνεται ως μονόδρομος η επιλογή της δημιουργίας ξεχωριστής αντλητικής εγκατάστασης, η οποία δε θα επηρεάσει καθόλου τη λειτουργία του ήδη υπάρχοντος ΥΗΣ κατά τη διάρκεια της κατασκευής της. [8]

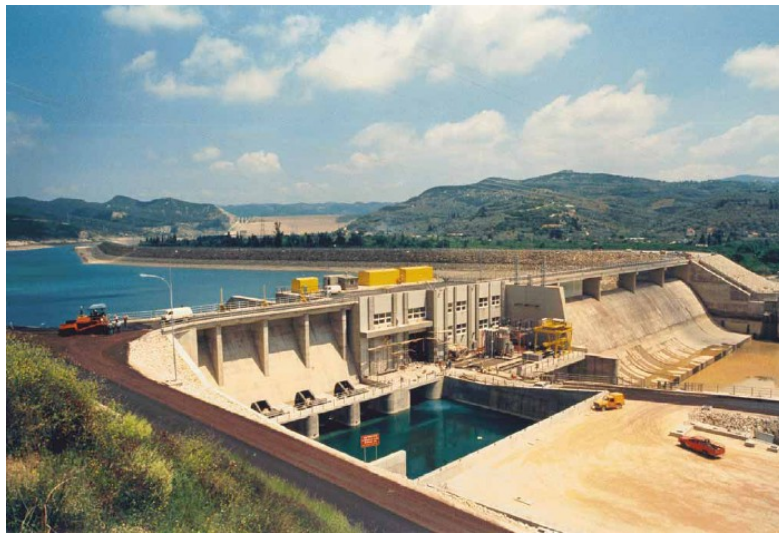
#### 1.4 Μελέτη μετατροπής συγκεκριμένου ΥΗΣ

Για τον υπολογισμό της αντλητικής εγκατάστασης που απαιτείται για τη μετατροπή ενός ΥΗΣ σε αναστρέψιμο, καθώς και τα ενεργειακά και οικονομικά οφέλη που θα αποκτούσαμε από ένα τέτοιο έργο, έπρεπε να επιλέξουμε συγκεκριμένο ήδη υπάρχον υδροηλεκτρικό σταθμό. Ο ΥΗΣ που επιλέχθηκε είναι το Πουρνάρι Ι, ο οποίος έχει 3 υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής (Υδροστροβίλοι Francis, ονομαστικής ισχύος 110 MW ο κάθε ένας) και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 330 MW. Ο σταθμός αυτός

εντάσσεται στο συγκρότημα του Αράχθου και ανήκει στη ΔΕΗ Α.Ε. Πιο αναλυτικά απέχει 4 km από την πόλη της Άρτας, εκμεταλλεύεται τα νερά του ποταμού Άραχθου και τέθηκε σε λειτουργία το 1981. Ενώ διαθέτει χωμάτινο φράγμα και ταμιευτήρα υπερετήσιας ρύθμισης με ωφέλιμη χωρητικότητα 303 εκ. m<sup>3</sup> ανάντη. Το έργο σε συνολικό επίπεδο ολοκληρώνεται από τον κατάντη ταμιευτήρα, με συνολική χωρητικότητα 4,1 εκ. m<sup>3</sup>, και το μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό Πουρνάρι Ι, που τέθηκε σε λειτουργία το 2000 και έχει εγκατεστημένη ισχύ 31,5 MW. Στις επόμενες δύο εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε τον κάθε ΥΗΣ ξεχωριστά με το αντίστοιχο φράγμα του: [2]



Σχήμα 1.5α Υδροηλεκτρικός σταθμός Πουρνάρι Ι με το αντίστοιχο χωμάτινο φράγμα



Σχήμα 1.5β Υδροηλεκτρικός σταθμός Πουρνάρι ΙΙ με το αντίστοιχο φράγμα

Ενώ στην επόμενη δορυφορική φωτογραφία μπορούμε να διακρίνουμε ξεκάθαρα ολόκληρη την εγκατάσταση και που αυτή τοποθετείται σε σχέση με την πόλη της Άρτας και τα γύρω χωριά: [18]

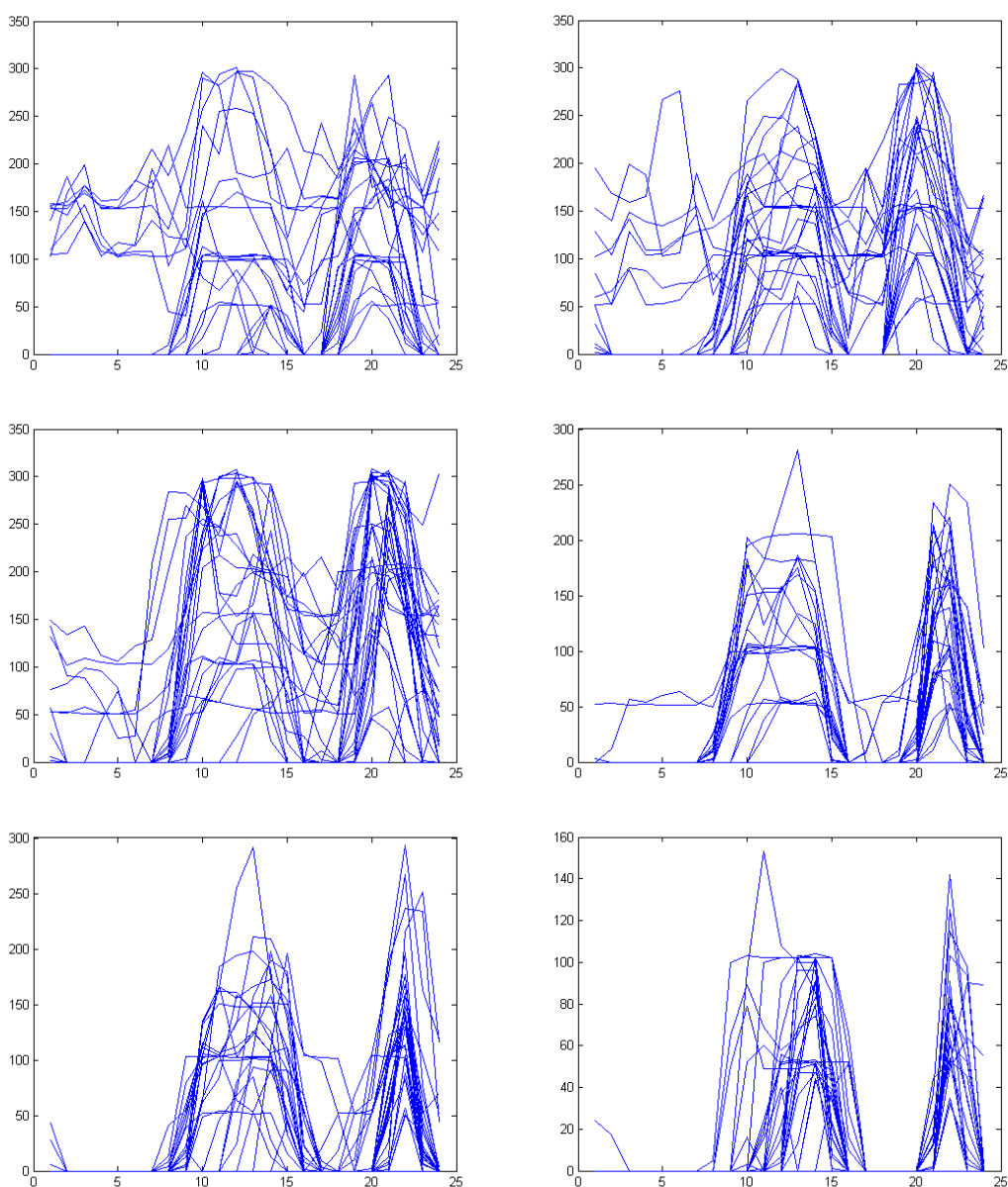


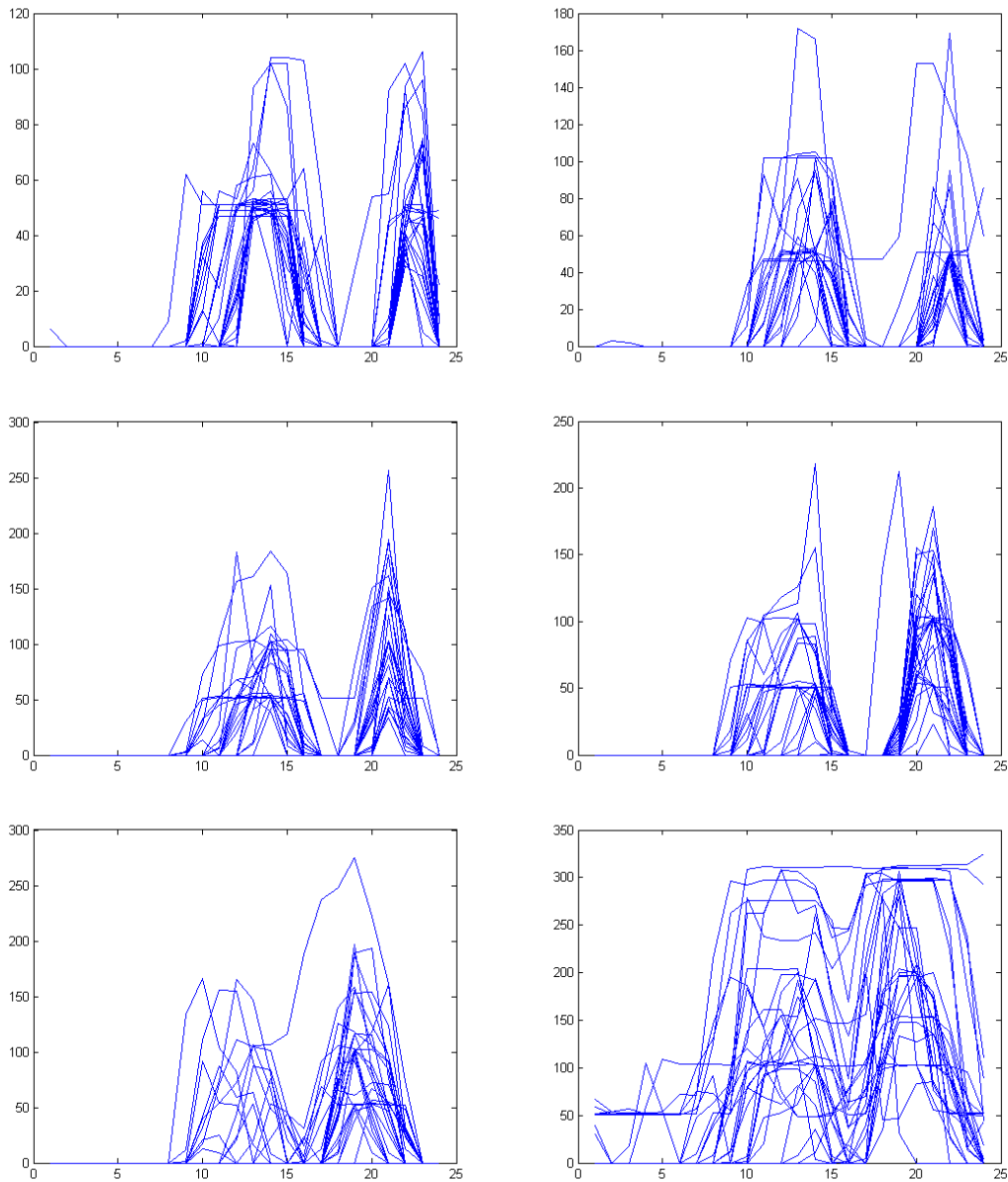
Σχήμα 1.5γ Δορυφορική φωτογραφία με τη συνολική υδροηλεκτρική εγκατάσταση

Προκειμένου να αναπτύξουμε υπολογιστικό κώδικα (σε γλώσσα Fortran), που θα μας επιτρέψει να μελετήσουμε τη μετατροπή του ΥΗΣ Πουρνάρι Ι, λήφθηκαν επαρκή δεδομένα από τη ΔΕΗ Α.Ε., για ένα ενδεικτικό υδρολογικό έτος (2005). Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν: [2]

- Ωριαία χρονοσειρά παραγόμενης ισχύος, για κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους
- Ημερήσια διακύμανση της στάθμης του ανάντη ταμιευτήρα
- Καμπύλες στάθμης – όγκου και για τους δύο ταμιευτήρες (ανάντη και κατάντη)

Οι χρονοσειρές παραγωγής των υδροστροβίλων στον ΥΗΣ Πουρνάρι Ι, κατά τη διάρκεια του 24ώρου, αποτυπώνονται στα επόμενα διαγράμματα. Όπου κάθε διάγραμμα αναφέρεται σε κάθε μήνα του έτους, περιλαμβάνοντας τις αντίστοιχες καμπύλες για τις ημέρες του μήνα. Έτσι έχουμε:





Σχήμα 1.6 Ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (σε MW ισχύος) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, ανά μήνα

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο υδροηλεκτρικός σταθμός χρησιμοποιείται σε πολύ μικρό βαθμό κατά τους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες (Ιούνιος ~ Οκτώβριος), ενώ ακόμη και τους χειμερινούς μήνες οι μέγιστες μέσες τιμές ισχύος είναι πολύ χαμηλές της εγκατεστημένης (330 MW). Αυτό το στοιχείο θα γίνει ακόμα πιο εμφανές όταν σε επόμενο κεφάλαιο θα υπολογίσουμε το συντελεστή φορτίου της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης. Αυτός, όπως θα δούμε, θα προκύψει ίσως με 12,61 % σε ετήσια βάση. Συνεπώς διαπιστώνουμε ότι στο συγκεκριμένο ΥΗΣ που έχουμε επιλέξει υπάρχουν ιδιαίτερα σημαντικά περιθώρια για περαιτέρω αξιοποίηση του με αντλιοταμίευση. Δηλαδή μπορούμε να αντλούμε νερό κάθε ημέρα για συγκεκριμένες ώρες και στη συνέχεια να το μοιράζουμε στις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων, ώστε να επιτύχουμε την αποθήκευση περισευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και διάθεση της στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής.

## 1.5 Λογική αντιμετώπισης του προβλήματος

Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο εντοπίσαμε τον ΥΗΣ Πουρνάρι Ι, τον οποίο θα μελετήσουμε προκειμένου να τον μετατρέψουμε σε αναστρέψιμο και να συμβάλουμε στους ενεργειακούς στόχους που θέσαμε στην αρχή του κεφαλαίου. Για το σταθμό αυτό αναφέραμε ότι διαθέτουμε τα βασικά ενεργειακά και υδραυλικά δεδομένα του σταθμού για ένα έτος (2005), τα οποία έχουμε θεωρήσει ως αντιπροσωπευτικά για την ανάλυση που θα ακολουθήσει. Ενώ κάθε επιπλέον τεχνικό χαρακτηριστικό του σταθμού που ίσως χρειαστούμε, θα το αναφέρουμε στη μεθοδολογία που ακολουθήσαμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Στόχος μας είναι να ανακαλύψουμε πως θα λειτουργούσε ο ΥΗΣ στην περίπτωση που είχαμε δημιουργήσει και ένα αντλιοστάσιο που θα αξιοποιούσε περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου. Για να επιτύχουμε αυτή την επιδίωξη θα πρέπει να προηγηθούν αρχικά υπολογισμοί σχετικοί με το αντλιοστάσιο που προτιθέμεθα να κατασκευάσουμε δίπλα από το σταθμό. Οι υπολογισμοί αυτοί θα περιλαμβάνουν βασικά τεχνικά στοιχεία της φυγοκεντρικής αντλίας που θα εγκαταστήσουμε και του αγωγού κατάθλιψης που θα μεταφέρει το νερό από τον κάτω στον άνω ταμιευτήρα.

Φαίνεται όμως ξεκάθαρα, ακόμα και στο αρχικό αυτό στάδιο της ανάλυσης μας, ότι όλοι οι υπολογισμοί του αντλιοστασίου θα εξαρτηθούν πλήρως από την ονομαστική ισχύ της αντλίας που θα εγκαταστήσουμε. Ενώ μία τέτοια απόφαση είναι αδύνατον να παρθεί αν δεν επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πειραματισμούς με διάφορα ονομαστικά μεγέθη της εγκατάστασης. Συνεπώς βλέπουμε ότι προκύπτει άμεσα η αναγκαιότητα δημιουργίας υπολογιστικού κώδικα Fortran, ο οποίος κατά την εκκίνηση του θα ζητάει ως είσοδο την ονομαστική ισχύ της αντλίας. Δηλαδή παρατηρούμε ότι με τον προγραμματισμό όλων των σχέσεων που θα υπολογίσουν τα τεχνικά, ενεργειακά και οικονομικά στοιχεία της εγκατάστασης, μπορούμε να έχουμε την πολυτέλεια να τον εκτελούμε κάθε φορά με διαφορετική ονομαστική ισχύ αντλίας και να λαμβάνουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Το επόμενο όμως εξίσου σημαντικό δεδομένο, με το οποίο πρέπει να τροφοδοτούμε τον κώδικα στην είσοδο, είναι το πλήθος των ωρών λειτουργίας που θα λειτουργεί το αντλιοστάσιο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για το μέγεθος αυτό όχι μόνο δεν είναι γνωστή όπως και πριν η βέλτιστη τιμή του, αλλά υπόκειται επίσης και σε λογικούς περιορισμούς. Αφού δε μπορούμε σε καμία περίπτωση να θεωρήσουμε πως διαθέτουμε απεριόριστη περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, προκειμένου να λειτουργούμε την αντλία όσες ώρες θέλουμε κάθε ημέρα. Έτσι σε γενικό επίπεδο θα αποφύγουμε να θεωρήσουμε πως η αντλία μπορεί να δουλεύει πάνω από 6 ώρες κάθε ημέρα, για άντληση νερού και αποθήκευση ενέργειας.

Τα μεγέθη αυτά που αναφέραμε είναι προφανές ότι θα επηρεάσουν όλη την ανάλυση που θα ακολουθήσει, σε κάθε στάδιο της. Όμως σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ενεργειακά και υδραυλικά δεδομένα του ΥΗΣ που παρουσιάσαμε και θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδο στο πρόγραμμα, αυτά δε μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως σταθερά και δεδομένα. Έτσι κάθε φορά που θα εκτελούμε τον κώδικα θα πρέπει να επιλέξουμε τα μεγέθη αυτά για να λάβουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



Επιστέφοντας στη δομή που πρέπει να ακολουθηθεί ο αλγόριθμός, αφού υπολογίσουμε τα βασικά μεγέθη της αντλίας που θα εγκαταστήσουμε, θα πρέπει να υπολογίσουμε και τα βασικά στοιχεία του αγωγού κατάθλιψης. Είναι προφανές ότι ο αγωγός θα εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της ισχύος της αντλία, προκειμένου να διακινείται μέσα από αυτόν η ονομαστική παροχή που θα έχει υπολογιστεί. Ενώ, αφού θα έχουμε υπολογίσει και τα δύο, θα είναι εφικτό να βρούμε το σημείο στο οποίο θα λειτουργεί η αντλία για κάθε ημέρα του έτους και αντίστοιχα τον όγκο του νερού που θα αντλείται.

Στη συνέχεια θα πρέπει να καταστρώσουμε το ημερήσιο σχέδιο, σύμφωνα με το οποίο θα κατανέμουμε τον αντλούμενο όγκο νερού μέσα στις ώρες της ημέρας. Στο σημείο αυτό τονίζουμε ότι δίνουμε προτεραιότητα στις ώρες που ήδη λειτουργούσαν οι υδροστροβίλοι μέσα στην ημέρα. Αυτή η επιλογή προκύπτει θεωρώντας ότι ο διαχειριστής του ηλεκτρικού δικτύου έχει επιλέξει τις συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας του ΥΗΣ, γνωρίζοντας ότι κατά τις ώρες αυτές το ηλεκτρικό δίκτυο παρουσιάζει αυξημένη ζήτηση. Συνεπώς είναι λογικό να επιθυμούμε σε πρώτη φάση να ενισχύσουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αυτές. Φυσικά αν καλύψουμε τις ώρες αυτές θα λειτουργήσουμε τους υδροστροβίλους και νέες ώρες που αυτοί δε λειτουργούσαν εκατέρωθεν των ήδη υπαρκτών.

Δηλαδή θα καταστρώσουμε το πρόγραμμα για τη λειτουργία των υδροστροβίλων για ένα ολόκληρο ημερολογιακό έτος. Έτσι θα έχουμε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε πως αυτό διαφοροποιείται από το αρχικό ανάλογα με το ονομαστικό μέγεθος του αντλιοστασίου που θα επιλέξουμε και τις ώρες λειτουργίας του κάθε ημέρα. Φυσικά αναμένουμε να έχουμε ως αποτέλεσμα ένα πρόγραμμα λειτουργίας αντίστοιχο με το αρχικό που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, αλλά μετατοπισμένο προς τα πάνω σε μεγαλύτερες τιμές ισχύος. Επιπλέον θα εξάγουμε και συνολικά ενεργειακά αποτελέσματα του κύκλου όπως αυτός περιγράφηκε σχηματικά από το Σχήμα 1.3. Έτσι θα έχουμε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε ακόμα πιο άμεσα την ενεργειακή αξιοποίηση του ΥΗΣ μετά τη λειτουργία του αντλιοστασίου.

Στο τελικό στάδιο ο κώδικας Fortran που θα αναπτύξουμε θα υπολογίζει συνολικά οικονομικά αποτελέσματα για το αντλιοστάσιο που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε. Πιο συγκεκριμένα θα υπολογίσουμε το συνολικό κόστος κατασκευής της αρχικής εγκατάστασης και τις επιπλέον εισροές και εκροές που θα προκύψουν από την ταυτόχρονη λειτουργία του ΥΗΣ και του νέου αντλιοστασίου. Όλα τα οικονομικά αποτελέσματα θα αναχθούν σε ποσά € παρούσας αξίας προκειμένου να καταλήξουμε σε συνολικά οφέλη της προτιθέμενης εγκατάστασης, για ένα 20ετές πλάνο λειτουργίας. Επομένως με αυτό τον τρόπο θα έχουμε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε εκτός από τα ενεργειακά αποτελέσματα, που θα προκύψουν με την μετατροπή του ΥΗΣ, και τα οικονομικά αποτελέσματα μίας τέτοιας επένδυσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει πλήρης ανάλυση του κώδικα που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό όλων των κρίσιμων στοιχείων μίας τέτοιας εγκατάστασης. Θα αναπτυχθεί αναλυτικά όλη η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και όλη η αντίστοιχη επιστημονική θεωρία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια προγραμματισμού του κώδικα. Το πρόγραμμα έχει γραφτεί σε γλώσσα Fortran 77 και δέχεται στην είσοδο του όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τους υπολογισμούς από αρχεία μορφής text. Επομένως γίνεται άμεσα κατανοητό ότι υπάρχει η δυνατότητα για εύκολη μετατροπή του προκειμένου να πραγματοποιήσει αντίστοιχους

υπολογισμούς για έναν άλλο ΥΗΣ από αυτόν που μελετήσαμε. Δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα αν διαθέτουμε τα αντίστοιχα ενεργειακά και υδρολογικά δεδομένα από έναν άλλο ΥΗΣ, να τα εισάγουμε στον κώδικα και να εξάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα για την δυνατότητα μετατροπής του σταθμού σε αναστρέψιμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την ανάπτυξη του κώδικα χρησιμοποιήθηκε γνωστή θεωρία ρευστοδυναμικής και υδροδυναμικών μηχανών, με καθολική ισχύ ανεξάρτητα από την εγκατάσταση που εξετάζεται.

## 1.6 Συνολική επιδίωξη της μελέτης

Όπως ήδη αναφέρθηκε και προηγουμένως, το κομμάτι προγραμματισμού των απαραίτητων υπολογισμών είναι άμεσα υλοποιήσιμο και θα αναπτυχθεί πλήρως στο επόμενο κεφάλαιο. Δε μπορεί όμως να γίνει και το ίδιο σχετικά με την επιλογή κρίσιμων μεγεθών της νέας εγκατάστασης που επιθυμούμε να σχεδιάσουμε. Δηλαδή δεν είναι προφανές ποιο ονομαστικό μέγεθος αντλίας και πόσες ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα θα οδηγήσουν στη βέλτιστη ενεργειακά αξιοποίηση της εγκατάστασης (σε σχέση πάντα με το ονομαστικό μέγεθος του ΥΗΣ) και στο μέγιστο οικονομικό όφελος του επενδυτή ενός αντίστοιχου έργου.

Συνεπώς, αφού θα έχουμε ολοκληρώσει τον προγραμματισμό του κώδικα στόχος μας είναι να διαπιστώσουμε ποια είναι η τάση των μεγεθών αυτών για την μελετώμενη υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Αυτό θα το επιχειρήσουμε αρχικά εξάγοντας αποτελέσματα από τον κώδικα για διάφορες τιμές της ονομαστικής ισχύος της αντλίας, ώστε να υπάρχουν ξεκάθαρα στοιχεία για την τάση των διαφόρων μεγεθών του έργου. Ενώ αφού ολοκληρώσουμε αυτό το κομμάτι της διερεύνησης θα αξιοποιήσουμε ένα εμπορικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης, βασιζόμενο σε μαθηματικές μεθόδους, για να εξετάσουμε το λογικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε από μία πιο μαθηματική σκοπιά. Δηλαδή θα συντάξουμε ένα καθαρά μαθηματικό πρόβλημα, το οποίο θα διαθέτει τις αντίστοιχες δεσμευμένες και ελεύθερες μεταβλητές του με ορισμένα τα απαραίτητα όρια του.

Ολοκληρώνοντας επιδιώκουμε να καταλήξουμε σε συγκεκριμένες εφαρμόσιμες λύσεις για την μετατροπή του ΥΗΣ Πουρνάρι Ι σε αναστρέψιμο. Όπου η μετατροπή αυτή θα έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στην ανάγκη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου και αξιοποίησης της σε χρονικές στιγμές που το δίκτυο βρίσκεται σε αιχμή. Φυσικά μία τέτοια μετατροπή θα μπορούσε να ενταχθεί στο γενικότερο ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδος. Αφού από τη μία θα συνέβαλλε στη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου και τη χρησιμοποίηση αναξιοποίητης ενέργειας, και από την άλλη θα προωθούσε τη μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ και ιδιαίτερα της αιολικής ενέργειας στον ελληνικό χώρο.

## 2 Ανάλυση λειτουργίας προγράμματος Fortran

### 2.1 Βασικές λειτουργίες

Συνοπτικά αναφέρουμε τις βασικές λειτουργίες που θα υλοποιηθούν από τον προγραμματιστικό κώδικα που αναπτύξαμε:

- Ανάγνωση αρχείων δεδομένων εισόδου
- Υπολογισμός κυρίων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φυγόκεντρης αντλίας
- Υπολογισμός βασικών στοιχείων αγωγού και χαρακτηριστική σωλήνωσης για κάθε μέρα του ημερολογιακού έτους
- Υπολογισμός σημείου λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα του έτους
- Προσομοίωση της λειτουργίας με άντληση και κατανομή της αντλούμενης παροχής για κάθε ημέρα
- Υπολογισμός τελικών αποτελεσμάτων και εγγραφή στα αρχεία εξόδου

Η κάθε λειτουργία θα αναπτυχθεί πλήρως και ξεχωριστά στις επόμενες ενότητες, οι οποίες θα περιλαμβάνουν και το αντίστοιχο μαθηματικό υπόβαθρο που αξιοποιήθηκε, για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων. [19]

### 2.2 Ανάγνωση αρχείων δεδομένων εισόδου

Το πρόγραμμα στην είσοδο του διαβάζει τα βασικά μεγέθη της εγκατάστασης, τα οποία είναι:

- Πλήθος υδροστροβίλων (Για την εγκατάσταση μας είναι 3)
- Ονομαστική ισχύ κάθε υδροστροβίλου (110 MW αντίστοιχα)
- Ονομαστική υδραυλική πτώση (79 mΣΥ)
- Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου (0,92)
- Πλήθος αντλιών (οι υπολογισμοί έχουν γίνει για μία αντλία, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα αλλάζοντας μόνο την ονομαστική ισχύ της αντλίας και τις ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα)
- Ονομαστική ισχύ αντλίας (μέγεθος το οποίο κρίνει ουσιαστικά ολόκληρη την εγκατάσταση και επιδέχεται δοκιμές)
- Αριθμός βαθμίδων (επίσης θεωρείται μονοβάθμια η αντλία αφού το ονομαστικό ύψος δεν κρίνεται πολύ μεγάλο)
- Ωρα έναρξης άντλησης (εξαρτάται ιδιαίτερα από την ώρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας στο δίκτυο από κάποια πηγή, τυπική ώρα θεωρούμε τις 10 π.μ.)
- Ωρα λήξης άντλησης (επίσης εξαρτάται από το πόσες ώρες υπάρχει σταθερή περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο μετά από την ώρα έναρξης και απλοποιητικά για λόγους συγκρίσιμων αποτελεσμάτων θεωρούμε ότι η εγκατάσταση λειτουργεί συγκεκριμένες ώρες κάθε μέρα, πχ. 1 ~ 6 ώρες

Στη συνέχεια από μετρήσεις που έχουν γίνει στους ταμιευτήρες ανάντη και κατόντη της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης υπάρχουν αντιστοιχίσεις της στάθμης του κάθε ταμιευτήρα με την επιφάνεια και τον όγκο του νερού που φιλοξενείται σ' αυτόν. Έτσι είναι δυνατόν έχοντας μόνο τη στάθμη του μέσω γραμμικής παρεμβολής να βρίσκουμε τα άλλα 2 μεγέθη για κάθε χρονική στιγμή, αλλά φυσικά και αντίστροφα. Επίσης, στο πρόγραμμα δίνονται και οι ακραίες τιμές της στάθμης του κάθε ταμιευτήρα, οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα: [2]

	Άνω Ταμιευτήρας	Κάτω Ταμιευτήρας
ZMIN (mΣΥ)	100	33,4
ZMAX (mΣΥ)	120	40

Πίνακας 2.1 Ακραίες επιτρεπόμενες τιμές στάθμης ανάντη και κατόντη ταμιευτήρα Πουρνάρι Ι

Από μετρήσεις που έγιναν το 2005 και θεωρούμε ως αντιπροσωπευτικές έχουμε τη στάθμη του άνω ταμιευτήρα για κάθε μία από τις 365 ημέρες του έτους. Τις οποίες και εισάγουμε στο πρόγραμμα προκειμένου να τις επεξεργαστούμε και να βγάλουμε αποτελέσματα για τις εισροές που έχουμε κάθε ημέρα.

Για το ίδιο έτος έχουμε επίσης στοιχεία για την παραγόμενη μηχανική ισχύ του υδροστροβίλου για κάθε ώρα και ημέρα, τα οποία επίσης εισάγονται στο πρόγραμμα.

### 2.3 Υπολογισμός κυρίων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φυγόκεντρης αντλίας

Δίνουμε μία αρχική τιμή ολικού βαθμού απόδοσης αντλίας ίση με 0,90 και θεωρούμε ότι το ονομαστικό ύψος της αντλίας είναι ίσο με αυτό του Υδροστροβίλου με μία προσαύξηση της τάξης του 10%, δηλαδή έχουμε: 86,9 mΣΥ. Άρα μία πρώτη εκτίμηση της ονομαστικής παροχής της αντλίας δίνεται από τη σχέση: [9]

$$Q = \frac{10^6 \cdot \eta \cdot P}{\rho \cdot g \cdot H} \quad (\text{Σχέση 1})$$

Όπου, Q: η παροχή σε m<sup>3</sup>/sec

P: η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε MW

η: ο β.α. της Αντλίας

ρ: η πυκνότητα του νερού (1.000 kg/m<sup>3</sup>)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

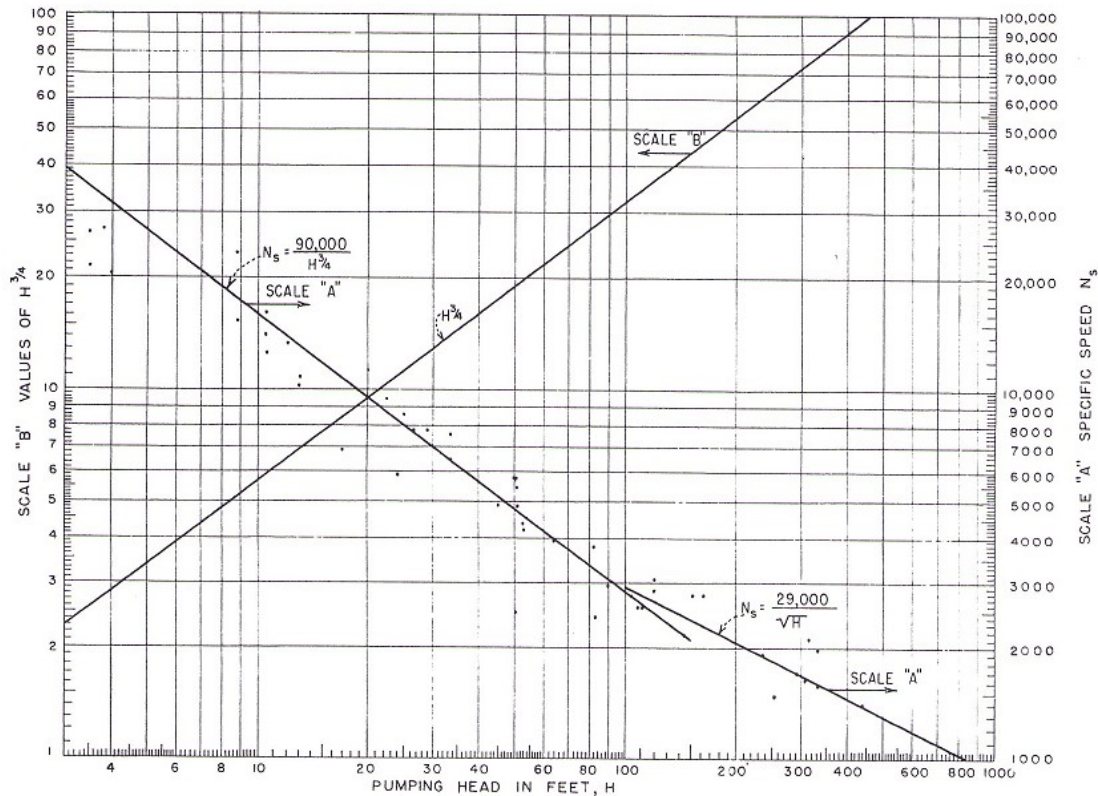
H: το ονομαστικό ύψος της Αντλίας

Μία αρχική εκτίμηση του ειδικού αριθμού στροφών δίνεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση που έχει αναπτυχθεί από τον κ. Παπαντώνη από επεξεργασία στατιστικών διαγραμμάτων αντλιών: [9]

$$n_q = \frac{428 \cdot 85}{\sqrt{H}} \quad (\text{Σχέση 2})$$

Όπου, H: το ονομαστικό ύψος της Αντλίας

Τέτοιες καμπύλες που συνδέουν τον ειδικό αριθμό στροφών και το ονομαστικό ύψος μιας αντλίας φαίνονται παρακάτω: [22]



Σχήμα 2.1 Καμπύλες συσχέτισης ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  και ονομαστικού ύψους  $H$  φυγόκεντρης αντλίας

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας από την παρακάτω σχέση: [9]

$$n = n_q \frac{H^{2/3}}{Q^{1/2}} \quad (\text{Σχέση 3})$$

Έτσι, υπολογίζουμε τα ζεύγη πόλων του σύγχρονου κινητήρα που στρέφει την αντλία: [7]

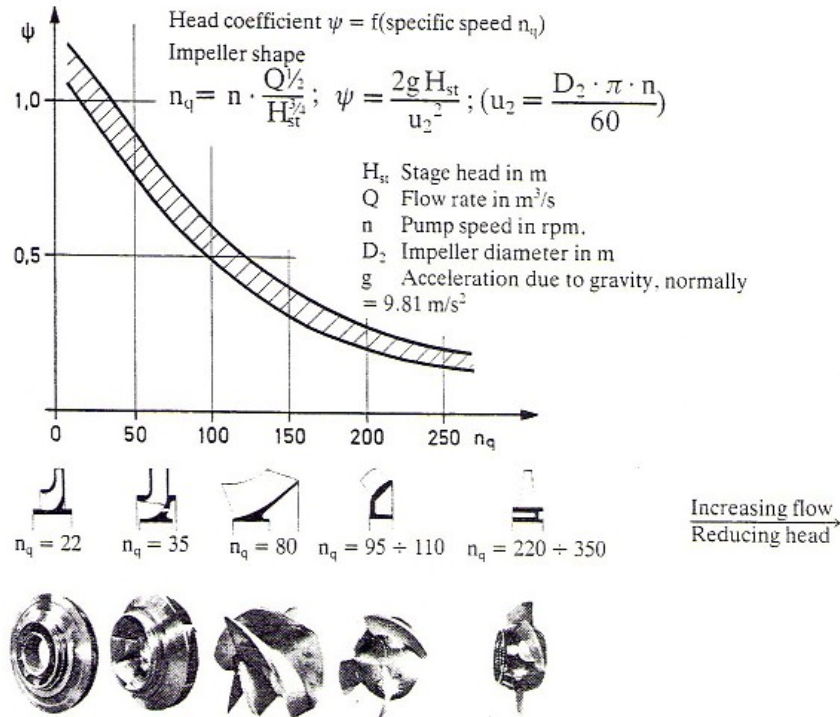
$$p = \frac{3000}{n} \quad (\text{Σχέση 4})$$

Τα στρογγυλοποιούμε σε ακέραιο αριθμό και λύνοντας τη Σχέση 4 ως προς  $n$  υπολογίζουμε την τυποποιημένη ταχύτητα περιστροφής. Ενώ λύνοντας ως προς  $n_q$  τη Σχέση 3 υπολογίζουμε το νέο ειδικό αριθμό στροφών.

Από την παρακάτω σχέση υπολογίζουμε τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής: [9]

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (\text{Σχέση 5})$$

Προκειμένου στη συνέχεια να υπολογίσουμε τη διάμετρο της περωτής  $D_2$ , πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε την περιφερειακή της ταχύτητα  $U_2$  αλλά και την αδιάστατη παράμετρο ύψους  $\Psi$ . Για να υπολογίσουμε την αδιάστατη παράμετρο ύψους θα χρησιμοποιήσουμε το παρακάτω διάγραμμα που συσχετίζει την παράμετρο ύψους  $\Psi$  και τον ειδικό αριθμό στροφών  $n_q$ : [21]



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα συσχέτισης παραμέτρου ύψους  $\Psi$  και ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  φυγόκεντρης αντλίας

Όπου στο πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί η άνω και η κάτω καμπύλη του διαγράμματος έχουν γραφτεί σε υποπρόγραμμα ως πεπερασμένοι αριθμός σημείων και με γραμμική παρεμβολή για το δεδομένο ειδικό αριθμό στροφών προκύπτουν 2 τιμές  $\Psi$  για κάθε καμπύλη, για να προκύψει μία τελική τιμή ως ο μέσος όρος των 2 αυτών.

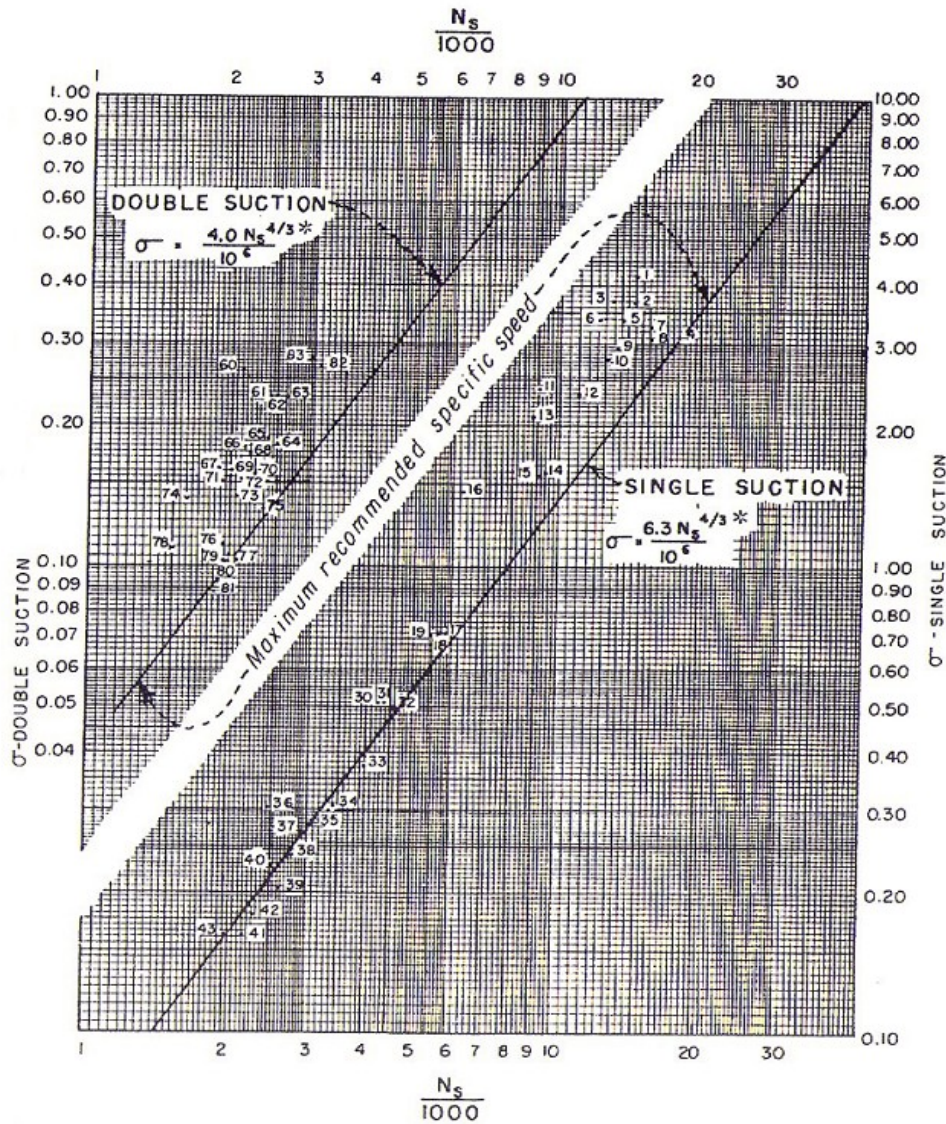
Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε την περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής  $U_2$  από τη σχέση: [9]

$$U_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{\Psi}} \quad (\text{Σχέση 6})$$

Ακολούθως υπολογίζουμε τη διάμετρο της πτερωτής  $D_2$  από τον τύπο: [9]

$$D_2 = \frac{2 \cdot U_2}{\omega} \quad (\text{Σχέση 7})$$

Στη συνέχεια εκτιμούμε την παράμετρο σπηλαίωσης  $\sigma_{kp}$  με τη βοήθεια του διαγράμματος που δίνεται παρακάτω και της σχέσης που προκύπτει για απλή αναρρόφηση που έχουν αναπτυχθεί από επεξεργασία στατιστικών διαγραμμάτων: [22]



Σχήμα 2.3 Στατιστικό διάγραμμα συσχέτισης παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma_{kp}$  και ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  φυγόκεντρης αντλίας

$$\sigma_{kp} = \frac{6,3 \cdot n_{qusa}^{4/3}}{10^6} \quad (\text{Σχέση 8})$$

Όπου,  $n_{qusa}$ : είναι ο ειδικός αριθμός στροφών σε αγγλοσαξονικές μονάδες συμβατές με τη βιβλιογραφία, δηλαδή έχουμε:  $n_{qusa} = \frac{n_q \cdot 60}{1,161775}$  (Σχέση 9)

Τέλος, εκτιμούμε το μέγιστο ύψος τοποθέτησης  $H_E$  της αντλίας το οποίο θα προκύψει από την απαίτηση το καθαρό θετικό ύψος  $H_\Theta$  να είναι μεγαλύτερο από το  $H_{kp}$ , το οποίο δίνεται από τη σχέση:  $H_{kp} = \sigma_{kp} \cdot H$  (Σχέση 10)

$$\begin{aligned} \text{Άρα θα έχουμε: } H_\Theta \geq H_{kp} &\Leftrightarrow H_\alpha - H_E - H_v \geq \sigma_{kp} \cdot H \\ &\Rightarrow H_E \leq (H_\alpha - H_v) - \sigma_{kp} \cdot H \quad (\text{Σχέση 11}) \end{aligned}$$

Όπου,  $H_E$ : το μέγιστο ύψος τοποθέτησης, το οποίο δεν πρέπει να είναι μικρότερο από -20m

$H_\alpha$ : η ατμοσφαιρική πίεση (10 mΣΥ)

$H_v$ : η τάση ατμών (0,2 mΣΥ)

$H_0$ : το καθαρό θετικό ύψος, το οποίο αναπτύσσεται όπως φαίνεται και παραπάνω εφαρμόζοντας τη γενικευμένη εξίσωση Bernoulli μεταξύ της διατομής εισόδου της αντλίας και της δεξαμενής αναρρόφησης, αμελώντας τις απώλειες στη σωλήνωση αναρρόφησης. [9]

Στο σημείο αυτό προκειμένου να αποφευχθούν υπερδιαστασιολογήσεις στα βασικά μεγέθη της αντλίας που υπολογίστηκαν εισάγεται ένας βρόγχος που θα ελέγχει αν το ύψος τοποθέτησης της αντλίας  $H_E$  δεν είναι μικρότερο από τα -20m και θα αυξάνει τα ζεύγη πόλων του σύγχρονου κινητήρα που στρέφει την αντλία. Η διαδικασία αυτή θα αυξήσει την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας αλλά και θα μειωθεί αισθητά το υπολογιζόμενο μέγεθος της πτερωτής της αντλίας, το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό για αντλίες μεγάλης ονομαστικής ισχύς όπως αυτές που εξετάζονται.

Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία και τα μεγέθη συγκλίνουν στις τελικές τους τιμές, το πρόγραμμα συνεχίζει με τον υπολογισμό του ολικού βαθμού απόδοσης της αντλίας στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται ανάλογα με το ονομαστικό μέγεθος της διακινούμενης παροχής, όπως έχει υπολογιστεί προηγουμένως από την ονομαστική ισχύ της αντλίας. Επομένως διακρίνουμε τις εξής 2 περιπτώσεις:

- Αν η ονομαστική παροχή είναι μικρότερη από 250 m<sup>3</sup>/h χρησιμοποιείται η εκτίμηση σύμφωνα με το European Guide, όπου: [16]

$$\eta + c = 0,64419 + 0,23785 \cdot 10^{-2} \cdot Q - 0,12836 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 + 0,272 \cdot 10^{-7} \cdot Q^3 \quad (\text{Σχέση 12})$$

$$c = 48 \cdot \left[ \log_{10} \left( \frac{2650}{n_q} \right) \right]^2 \quad (\text{Σχέση 13})$$

Όπου, η: ο ολικός βαθμός απόδοσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας

c: σταθερά που εξαρτάται από τον ειδικό αριθμό στροφών

Q: η ονομαστική παροχή της αντλίας σε m<sup>3</sup>/h

Συνεπώς ο ολικός β.α. προκύπτει με την αφαίρεση των δύο παραπάνω σχέσεων.

- Στην περίπτωση που η ονομαστική παροχή είναι μεγαλύτερη από 250 m<sup>3</sup>/h μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συσχέτιση που φαίνεται παρακάτω η οποία έχει προκύψει από την επεξεργασία 15000 αντλιών, 200 διαφορετικών τύπων: [10]

$$\eta = 0.94 - \delta\eta_Q - \delta\eta_O \quad (\text{Σχέση 14})$$

$$\log_{10}(\delta\eta_Q) = -0.3274237 \cdot \log_{10}(Q) - 0.1498048 \quad (\text{Σχέση 15})$$

$$\delta\eta_O = 0.29 \left[ 0.32 - \log_{10} \left( \frac{n_q}{1272.43} \right) \right]^2 \quad (\text{Σχέση 16})$$

Όπου, η: ο ολικός βαθμός απόδοσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας

$\delta\eta_Q$ : οι απώλειες που επηρεάζονται από το μέγεθος της αντλίας

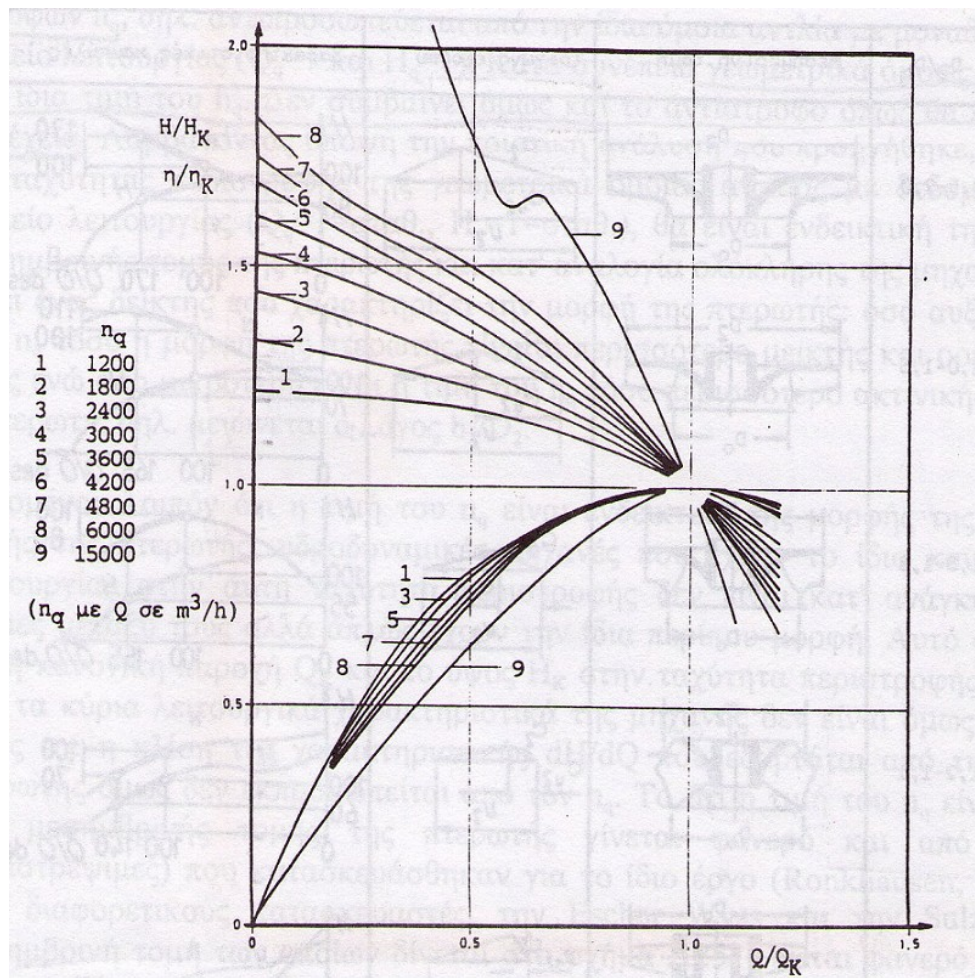
$\delta\eta_O$ : διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μορφή της πτερωτής μέσω της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών

Q: η ονομαστική παροχή της αντλίας σε m<sup>3</sup>/h

Τέλος πριν δημιουργήσουμε ένα αρχείο δεδομένων στο οποίο θα αποθηκεύονται να βασικά μεγέθη που υπολογίσαμε παραπάνω θα υπολογίσουμε τις χαρακτηριστικές



καμπύλες λειτουργίας της αντλίας που εκτιμήσαμε. Έτσι δημιουργούμε υπορουτίνα η οποία χρησιμοποιεί το παρακάτω διάγραμμα της αδιάστατης χαρακτηριστικής αντλίας ( $Q/Q_K$ ,  $H/H_K$  και  $\eta/\eta_K$ ): [9]



Σχήμα 2.4 Τυπικές αδιάστατες καμπύλες λειτουργίας φυγόκεντρων αντλιών για διάφορες τιμές του ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  ( $H$  σε mΣΥ,  $Q$  σε  $m^3/h$ )

Το διάγραμμα αυτό έχει προκύψει από την ορθή θεώρηση ότι η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών είναι ενδεικτική της μορφής της μεσημβρινής τομής της πτερωτής. Έτσι είναι λογικό, για σωστά σχεδιασμένες και οικονομοτεχνικά αποδεκτές αντλίες, με την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών να συσχετίζονται τόσο οι τυπικές αδιάστατες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας όσο και η τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας.

Όσων αφορά τους υπολογισμούς οι αδιάστατες καμπύλες του διαγράμματος μαθηματικοποιούνται, ανάλογα με τον ειδικό αριθμό στροφών που έχει υπολογιστεί για τη δεδομένη αντλία, σε εξισώσεις οι οποίες τροφοδοτούνται με διαδοχικά σημεία τα οποία ισαπέχουν κατά 0,05 προκειμένου να δημιουργηθούν 2 ζεύγη σημείων που θα αντιπροσωπεύουν τις αδιάστατες χαρακτηριστικές καμπύλες  $Q/Q_K - H/H_K$  και  $Q/Q_K - \eta/\eta_K$ . Στη συνέχεια ελέγχεται αν οι 2 καμπύλες αυτές περνάνε από το σημείο (1,1), όπως είναι εμφανές ότι πρέπει να περνάνε, και σε αντίθετη περίπτωση μετακινούνται (προσθέτοντας ή αφαιρώντας την απαιτούμενη τιμή) προκειμένου να συμπέσουν σε αυτό. Τέλος, προκειμένου να μετατραπούν από αδιάστατες σε διαστατοποιημένες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας πολλαπλασιάζεται κάθε σημείο

με την αντίστοιχη τιμή στο κανονικό σημείο λειτουργίας, για παράδειγμα κάθε σημείο  $Q/Q_k$  πολλαπλασιάζεται με την ονομαστική παροχή  $Q_k$  που έχει υπολογιστεί παραπάνω. Έτσι προκύπτουν οι απαιτούμενες χαρακτηριστικές καμπύλες που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω προκειμένου να βρεθεί το σημείο λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα του έτους.

Συνολικά το πρόγραμμα για το κομμάτι των υπολογισμών της αντλίας θα γράψει σε ένα αρχείο δεδομένων τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας καθώς και τα παρακάτω βασικά μεγέθη που τη χαρακτηρίζουν αντιπροσωπευτικά:

- Την ονομαστική της ισχύ:  $P$  (MW)
- Την ονομαστική της παροχή:  $Q$  ( $m^3/sec$ )
- Το ονομαστικό ύψος:  $H$  (mΣΥ)
- Τον ολικό β.α. στο κανονικό σημείο λειτουργίας:  $\eta$
- Την ταχύτητα περιστροφής:  $n$  (rpm)
- Τον ειδικό αριθμό στροφών:  $n_q$
- Την αδιάστατη παράμετρο ύψους:  $\Psi$
- Την περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής:  $U_2$  (m/sec)
- Την εξωτερική διάμετρο της πτερωτής:  $D_2$  (m)
- Την παράμετρο σπηλαίωσης:  $\sigma_{kp}$
- Το μέγιστο ύψος τοποθέτησης της αντλίας:  $H_E$  (m)

#### 2.4 Υπολογισμός βασικών στοιχείων αγωγού και χαρακτηριστική σωλήνωσης για κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους

Προκειμένου να υπολογίσουμε τα βασικά μεγέθη του αγωγού θα πρέπει αρχικά να γίνει εκτίμηση της διαμέτρου του. Η οποία προκειμένου να υπολογιστεί θα γίνει η εξής διάκριση ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης:

- Για μικρού μεγέθους αντλίες όπου η ονομαστική παροχή δεν ξεπερνά τα 2.050  $m^3/h$  ακολουθείται η παρακάτω ανάλυση:

Χρησιμοποιείται ο παρακάτω Πίνακας ως οδηγός, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως χαρακτηριστικός για τη συσχέτιση της μέσης ταχύτητας της ροής  $c$  (m/sec) με την παροχή της σωλήνωσης  $Q$  ( $m^3/h$ ) και θεωρείται βέλτιστος οικονομοτεχνικά για μικρές εγκαταστάσεις: [11]

DN (mm)	25	40	65	100	150	200	300	500
$c$ (m/sec)	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9
$Q$ ( $m^3/h$ )	2,5	7,0	21	56	140	270	660	2050

Πίνακας 2.2 Συνιστώμενες τιμές ταχύτητας, παροχής για σωληνώσεις μικρού μεγέθους

Η αύξηση της μέσης ταχύτητας της ροής με την αύξηση της διαμέτρου δικαιολογείται από το αυξημένο κόστος της σωλήνωσης δεδομένου ότι οι υδραυλικές απώλειες δεν αυξάνονται σημαντικά (όπως είναι γνωστό για την ίδια μέση ταχύτητα της ροής οι υδραυλικές απώλειες ανά μέτρο μήκους μεταβάλλονται αντίστροφα με τη διάμετρο  $D$  του αγωγού).

Συνεπώς από τον Πίνακα αυτό για τη δεδομένη ονομαστική παροχή προκύπτει με γραμμική παρεμβολή η αντίστοιχη προτεινόμενη μέση ταχύτητα της ροής  $c$  (m/sec). Στη συνέχεια έχοντας και το μέγεθος αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε μία πρώτη τιμή για την εσωτερική διάμετρο του αγωγού από τη Σχέση:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot c}} \quad (\text{Σχέση 17})$$

Όπου,  $D$ : η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης

$Q$ : η ονομαστική παροχή της αντλίας σε  $\text{m}^3/\text{sec}$

$c$ : η μέση ταχύτητα της ροής σε  $\text{m}/\text{sec}$

Αφού έχουμε υπολογίσει μία πρώτη εκτίμηση της εσωτερικής διαμέτρου του αγωγού είναι δυνατό να εκλέξουμε την αμέσως μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο από Πίνακα τυποποιημένων εξωτερικών διαμέτρων που δίνεται παρακάτω: [12]

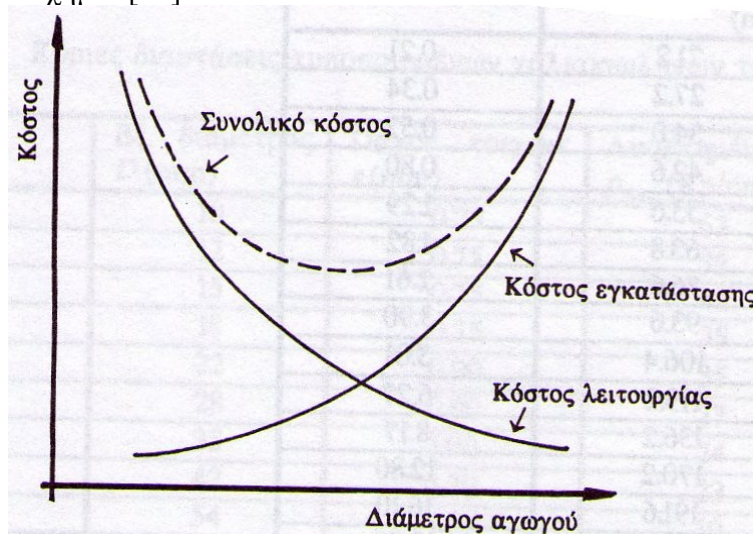
α.α	D (m)	$e_{\min}$ (mm)	α.α	D (m)	$e_{\min}$ (mm)
1	0,1143	3,6	21	0,9652	7,14
2	0,1397	3,6	22	1,016	7,14
3	0,1683	3,6	23	1,0668	7,14
4	0,19371	4	24	1,1176	7,14
5	0,2191	4	25	1,1684	7,14
6	0,2445	4	26	1,2192	7,92
7	0,273	4	27	1,3208	7,92
8	0,3239	4	28	1,4224	8,74
9	0,3556	4,5	29	1,524	8,74
10	0,4064	4,5	30	1,6256	10,31
11	0,457	5	31	1,7272	10,31
12	0,508	5	32	1,8288	11,13
13	0,559	6,35			
14	0,6096	6,35			
15	0,6604	6,35			
16	0,7112	6,35			
17	0,762	6,35			
18	0,8128	7,14			
19	0,8636	7,14			
20	0,9144	7,14			

Πίνακας 2.3 Τυποποιημένες εξωτερικές διαμέτροι σωληνώσεων και αντίστοιχα ελάχιστα πάχη

- Για μεγάλου μεγέθους αντλίες όπου η ονομαστική παροχή ξεπερνά τα  $2.050 \text{ m}^3/\text{h}$  ακολουθείται η παρακάτω ανάλυση:

Όπως είναι εμφανές για μία εγκατάσταση μεγάλου μεγέθους με αντίστοιχα σωλήνωσης κατάθλιξης μεγάλης διαμέτρου πρέπει να αναπτυχθεί διαφορετική συσχέτιση από την προηγούμενη που θα λαμβάνει υπόψη της διαφορετικά οικονομοτεχνικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά που πρέπει να ληφθούν υπόψη σχετίζονται από τη μία με τα λειτουργικά έξοδα της εγκατάστασης και από την άλλη με το κόστος εγκατάστασης. Σχετικά με τα λειτουργικά έξοδα πρέπει να τονιστεί ότι οι υδραυλικές απώλειες αυξάνουν το απαιτούμενο ολικό ύψος της αντλίας και οδηγούν σε απώλειες ισχύος, όπου στην περίπτωση της αντλητικής εγκατάστασης η

ισχύς αυτή δαπανάται από τον κινητήρα της αντλίας. Η απώλεια ισχύος αντιστοιχεί σε μία οικονομική δαπάνη που είναι ανάλογη του χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης. Στην περίπτωση του κόστους της σωλήνωσης (υλικά και εγκατάστασης) το οποίο είναι τόσο μικρότερο όσο μικρότερη είναι η ονομαστική διάμετρος της σωλήνωσης και αντίστροφα. Η δαπάνη αυτή καταβάλλεται κατά την κατασκευή της εγκατάστασης και η ετήσια επιβάρυνση του έργου σχετίζεται με το κόστος απόσβεσης για τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, στο οποίο σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή των επιτοκίων (μακροοικονομικό μέγεθος). Η συνολική δαπάνη είναι το άθροισμα των λειτουργικών δαπανών και της δαπάνης απόσβεσης, ανηγμένες στην περίοδο έναρξης της χρηματοδότησης (παρούσα αξία), οπότε η βέλτιστη τιμή της διαμέτρου θα αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της παρούσας αξίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα: [11]



Σχήμα 2.5 Επιλογή οικονομοτεχνικά βέλτιστης διαμέτρου

Προκειμένου να εκτιμήσουμε την εξωτερική διάμετρο του αγωγού θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω συσχέτιση που έχει αναπτυχθεί σε συμφωνία με την οικονομοτεχνική ανάλυση που προηγήθηκε: [11]

$$D = A \cdot \left( \frac{e}{f} \right)^{0,154} \cdot Q^{0,46} \quad (\text{Σχέση 18})$$

Όπου,

D: η εξωτερική διάμετρος του αγωγού σε m

Q: η ονομαστική παροχή της αντλίας σε m<sup>3</sup>/sec

e: το κόστος της κιλοβατώρας σε €/KWh και λαμβάνεται η τιμή βάσεως της κιλοβατώρας, δηλαδή 0,09 €/KWh, αφού θεωρούμε ότι η αντλία θα δουλεύει μόνο με απορριπτόμενα ρεύμα του δικτύου κατά της ώρες χαμηλής ζήτησης.

f: το κόστος του αγωγού ανά κιλό βάρους σε €/Kg, όπου λαμβάνουμε μία μέση τιμή ίση με 2,5 €/Kg χαλύβδινου σωλήνα (υπενθυμίζεται ότι η μετατροπή μονάδων είναι: 1 Kg = 2,2046 pounds)

A: συντελεστής λειτουργίας της εγκατάστασης ο οποίος εξαρτάται από τις ώρες λειτουργίας της αντλίας μέσα στην ημέρα και για τη συγκεκριμένη εφαρμογή λαμβάνεται ίσος με 1,35

Στη συνέχεια, αφού έχουμε υπολογίσει την εξωτερική διάμετρο του αγωγού για κάθε περίπτωση, υπολογίζουμε το μέγιστο ύψος που θα αναγκαστεί να αντιμετωπίσει ο αγωγός ως το 120% του ονομαστικού ύψους της αντλίας προκειμένου να είμαστε

στην ασφαλή πλευρά των υπολογισμών και να συμπεριλάβουμε φαινόμενα όπως το υδραυλικό πλήγμα στους υπολογισμούς του πάχους του αγωγού.

Όσων αφορά τον υπολογισμό του πάχους σε χαλυβδοσωλήνες (υλικό το οποίο και επιλέγεται για την κατασκευή του αγωγού κατάθλιψης της αντλίας) γίνεται ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη του υλικού. Υπολογίζεται έτσι το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος οπότε επιλέγεται στη συνέχεια το αμέσως μεγαλύτερο τυποποιημένο πάχος. Στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη η μειωμένη αντοχή κατά τη ραφή συγκόλλησης των σωλήνων (όπου στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται σωλήνες με ραφή, είτε διαμήκη είτε ελικοειδή) μέσω ενός συντελεστού. Τέλος η τιμή που προκύπτει προσαυξάνεται ώστε να ληφθεί υπόψη ενδεχόμενη διάβρωση του σωλήνα, ανάλογα με την εφαρμογή, τη φύση του διακινούμενου υγρού, τη διάρκεια ζωής και τη δυνατότητα προσπέλασης για επίσκεψη και συντήρηση. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη ιδιαίτερη καταπόνησή του κατά τη φάση της μεταφοράς και της εγκατάστασης.

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε εκτελούμε τους παρακάτω υπολογισμούς. Έτσι αρχικά υπολογίζουμε τη μέγιστη εσωτερική πίεση του αγωγού ως προς την εξωτερική, η οποία προκύπτει από τη Σχέση: [12]

$$P_{\max} = \frac{H_{\max}}{H_{\alpha}} \quad (\text{Σχέση 19})$$

Όπου,  $H_{\max}$ : το μέγιστο ύψος που θα αναγκαστεί να αντιμετωπίσει ο αγωγός  
 $H_{\alpha}$ : η ατμοσφαιρική πίεση που όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως  
Λαμβάνεται ίση με 10 mΣΥ

Η μηχανική αντοχή  $\sigma_{\text{επ}}$  του χαλύβδινου αγωγού για Χάλυβα St37-2 είναι 2.350 Kp/mm<sup>2</sup> όπως αυτή δίνεται από τους πίνακες αντοχής για το δεδομένο χάλυβα.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το απαιτούμενο πάχος του σωλήνα όταν υπόκειται σε εσωτερική στατική πίεση από τη Σχέση:

$$e = e_o + e_1 + e_2 \quad (\text{Σχέση 20})$$

Όπου,  $e_o$ : το ελάχιστο πάχος που απαιτείται ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση λόγω της εσωτερικής υπερπίεσης να μην υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση του υλικού του σωλήνα, το οποίο και υπολογίζεται από την αμέσως επόμενη Σχέση

$e_1$ : η ανοχή για την ανομοιομορφία του πάχους του ελάσματος από το οποίο κατασκευάζεται ο σωλήνας, όπου στη δεδομένη εφαρμογή λαμβάνεται ίσο με 0

$e_2$ : η ανοχή για ενδεχόμενη φθορά ή διάβρωση και λαμβάνει την τιμή 1mm.

$$e_o = \frac{D \cdot P_{\max}}{2 \cdot k_2 \cdot \frac{\sigma_{\text{επ}}}{k_1}} \quad (\text{Σχέση 21})$$

Όπου,  $D$ : η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα

$\sigma_{\text{επ}}$ : η επιτρεπόμενη μηχανική αντοχή του αγωγού όπως δόθηκε προηγουμένως

$k_1$ : συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει την τιμή 1,7

$k_2$ : συντελεστής ασφαλείας ο οποίος εκφράζει την αντοχή της ραφής (για συγκολλητούς σωλήνες  $k_2=0,7 \sim 0,9$ , ενώ για σωλήνες χωρίς ραφή είναι  $k_2=1$ ), για την εφαρμογή μας λαμβάνουμε την τιμή 0,8.

Από τον Πίνακα που δόθηκε προηγουμένως παρατηρούμε ότι ανάλογα με κάθε διάσταση αντιστοιχεί και συγκεκριμένος περιορισμός πάχους  $e_{\min}$ . Συνεπώς το πρόγραμμα ελέγχει αν το πάχος που έχει ήδη υπολογιστεί με την πιο πάνω ανάλυση δεν είναι μικρότερο από το συγκεκριμένο περιορισμό. Σε αντίθετη περίπτωση ως πάχος ορίζεται το ελάχιστο που επιβάλλει ο Πίνακας. Τέλος, το πάχος της σωλήνωσης τυποποιείται προς τα πάνω σύμφωνα με τα τυποποιημένα πάχη σωληνώσεων που δίνονται πιο κάτω. [12]

α.α	e (mm)
1	5,56
2	6,35
3	7,14
4	7,92
5	8,74
6	9,52
7	10,31
8	11,13
9	11,91
10	12,7
11	15,87
12	19,05
13	22,225
14	25,4
15	28,575

Πίνακας 2.4 Τυποποιημένα πάχη σωληνώσεων

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι για διάμετρο σωλήνωσης μεγαλύτερη από τις τυποποιημένες του Πίνακα λαμβάνεται ως περιορισμός πάχους  $e_{\min}$  η μέγιστη τιμή του προηγούμενου Πίνακα. Ενώ τα τυποποιημένα πάχη σωληνών καλύπτουν πλήρως το εύρος τιμών που χρησιμοποιούνται για τη δεδομένη μελέτη.

Έχοντας υπολογίσει την εξωτερική διάμετρο του αγωγού κατάθλιψης και το πάχος του είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη μάζα του ανά μονάδα μήκους, το οποίο και θα φανεί χρήσιμο στη συνέχεια της μελέτης. Η μάζα του υπολογίζεται από τη Σχέση:

$$\frac{m}{L} = \frac{V}{L} \cdot \rho \quad (\text{Σχέση 22})$$

Όπου, V: ο όγκος του αγωγού που θα αναπτυχθεί στην επόμενη Σχέση

$\rho$ : η πυκνότητα του χάλυβα, 7.800 kg/m<sup>3</sup>

L: το μήκος του αγωγού σε μέτρα

$$\begin{aligned}
 V &= V_{\text{εξωτ.}} - V_{\text{εσωτ.}} = \pi \cdot r_{\text{εξωτ.}}^2 \cdot L - \pi \cdot r_{\text{εσωτ.}}^2 \cdot L = \pi \cdot L (r_{\text{εξωτ.}}^2 - r_{\text{εσωτ.}}^2) = \pi \cdot L (r_{\text{εξωτ.}} + r_{\text{εσωτ.}}) (r_{\text{εξωτ.}} - r_{\text{εσωτ.}}) \\
 &= \pi \cdot L \left( \frac{D}{2} + \frac{D-2e}{2} \right) \left( \frac{D}{2} - \frac{D+2e}{2} \right) = \pi \cdot L \left( \frac{2D-2e}{2} \right) \left( \frac{D-D+2e}{2} \right) = \pi \cdot L \cdot (D-e) \cdot e
 \end{aligned}$$

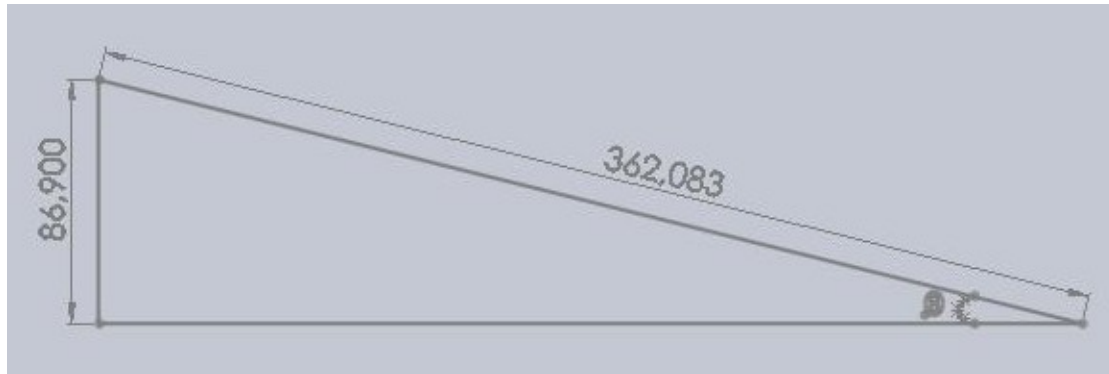
(Σχέση 23)

Άρα συνδυάζοντας τις Σχέσεις 22 και 23 έχουμε:

$$\frac{m}{L} = \pi \cdot (D - e) \cdot e \cdot \rho \quad (\text{Σχέση 24})$$

Όπου, D: η εξωτερική διάμετρος του αγωγού κατάθλιψης  
 e: το πάχος του αγωγού κατάθλιψης

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το μήκος της σωλήνωσης κατάθλιψης L. Το οποίο θα προκύψει γνωρίζοντας το ονομαστικό ύψος κατάθλιψης και την κλίση του αγωγού. Θεωρούμε ότι η κλίση του αγωγού θα είναι ίση με 25% και σχεδιάζουμε το παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 2.6 Διαμόρφωση αγωγού κατάθλιψης με κλίση εδάφους  $\tan\theta = 25\%$

Στο Σχήμα αυτό γνωρίζουμε το ονομαστικό ύψος κατάθλιψης της αντλίας που είναι ίσο με  $H=86,9$  m και την κλίση του αγωγού που είναι ίση με 25%, δηλαδή αυτό μεταφράζεται στο Σχήμα μας με:  $\tan \theta = \frac{1}{4}$  άρα,  $\theta=14^\circ$

Επομένως έχουμε:  $\sin \theta = \frac{H}{L} \Rightarrow L = \frac{H}{\sin \theta} \cong \frac{H}{0.24} \cong 362,083 \text{ m}$  (Σχέση 25)

Στο σημείο αυτό υπολογίζουμε τις υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης κατάθλιψης. Όπως είναι γνωστό οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται στις γραμμικές και τις εντοπισμένες. Οι μεν γραμμικές χαρακτηρίζονται έτσι γιατί είναι ανάλογες του μήκους L στο οποίο αναπτύσσονται και ισοκατανέμονται σε αυτό και οι δε εντοπισμένες προκαλούνται στις διάφορες διαμορφώσεις, εξαρτήματα και όργανα των σωληνώσεων.

Σχετικά με τις γραμμικές απώλειες, αυτές μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση των Darcy-Weisbach. Η οποία αναφέρεται για σωλήνα ευθύ, κυκλικής διατομής, ο οποίος πληρούται από το διακινούμενο υγρό και οι υδραυλικές απώλειες αναπτύσσονται κατά το μήκος του L. Η σχέση αυτή είναι: [9]

$$\delta h = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (\text{Σχέση 26})$$

Όπου,  $\delta h$ : η πτώση της πίεσης εκφρασμένη σε μέτρα στήλης του διακινούμενου υγρού

$\lambda$ : αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών

L: το μήκος του αγωγού

d: η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, η οποία υπολογίζεται από την εξωτερική μείων 2 φορές το πάχος του αγωγού που υπολογίστηκαν προηγουμένως  
c: η μέση ταχύτητα της ροής στον αγωγό σε m/sec  
g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

Η τιμή του αδιάστατου συντελεστή λ των γραμμικών απωλειών εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds και από τη σχετική τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα. Ο αριθμός Reynolds της ροής χαρακτηρίζει το δυναμικό χαρακτήρα της και ορίζεται ως: [13]

$$R_e = \frac{c \cdot d_H}{\nu} \quad (\text{Σχέση 27})$$

Όπου, ν: η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού (10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s)  
d<sub>H</sub>: η υδραυλική διάμετρος της διατομής του αγωγού, η οποία ορίζεται από τη σχέση:

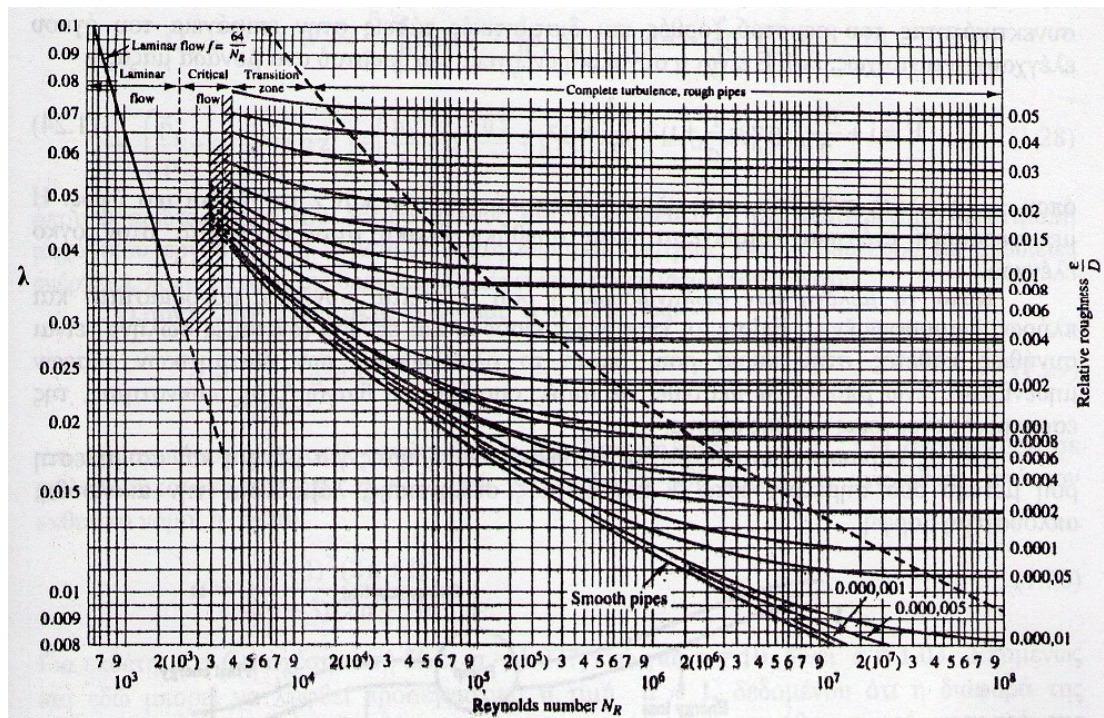
$$d_H = \frac{4A}{U} \quad (\text{Σχέση 28})$$

Όπου, A: η διατομή του αγωγού, U: η βρεχόμενη περίμετρος  
Στην περίπτωση βέβαια που εξετάζουμε του αγωγού κυκλικής διατομής είναι: d<sub>H</sub>=d

Η σχετική τραχύτητα ε<sub>s</sub> των διαβρεχόμενων επιφανειών του αγωγού ορίζεται ως ο λόγος της μέσης τραχύτητας ε των τοιχωμάτων του προς την εσωτερική διάμετρο d, δηλαδή:  $\epsilon_s = \frac{\epsilon}{d}$ . Ως μέση τιμή της μέσης τραχύτητας ε για το χαλύβδινο αγωγό που πραγματοποιούμε τους υπολογισμούς μπορούμε να δεχθούμε: ε = 0,2 mm.

Η τιμή του λ συναρτήσει του αριθμού Reynolds της ροής και με παράμετρο τη σχετική τραχύτητα ε<sub>s</sub> του αγωγού δίνεται στο διάγραμμα Moody. Το διάγραμμα όμως είναι εποπτικό και δε μας δίνει τη δυνατότητα να το εισάγουμε στο πρόγραμμα μας. Γι' αυτό το λόγο θα χρησιμοποιήσουμε για τους υπολογισμούς μας κάποιες από τις συσχετίσεις που έχουν προκύψει από την επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων. Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα Moody κυρίως για λόγους εποπτικών: [5]





Σχήμα 2.7 Διάγραμμα Moody για το συντελεστή τριβής  $\lambda$

Στο σημείο αυτό γίνεται ο παρακάτω διαχωρισμός στους υπολογισμούς μας:

- Για στρωτή περιοχή της ροής, δηλαδή για  $Re < 2.300$ , η τιμή του  $\lambda$  είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας των τοιχωμάτων και ισχύει ο νόμος των Hagen-Poiseuille: [11]

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad (\text{Σχέση 29})$$

- Για τυρβώδη περιοχή της ροής, δηλαδή για  $Re > 4.000$ , η τιμή του  $\lambda$  μπορεί να υπολογιστεί αρχικά με την προσεγγιστική σχέση του Moody που έχει ακρίβεια της τάξεως του 5%. Η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως μία αρχική τιμή για την εφαρμογή της πεπλεγμένης σχέσεως των Colebrook-White, που χαρακτηρίζεται ως ακριβής στα αποτελέσματα της. Δίνεται αρχικά η προσεγγιστική σχέση κατά Moody: [11]

$$\lambda = 0,0055 \left[ 1 + \left[ 20.000 \cdot \varepsilon_s + \left( \frac{10^6}{R_e} \right)^{0,33333} \right] \right] \quad (\text{Σχέση 30})$$

Στη συνέχεια για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούμε την τιμή του  $\lambda$  που βρήκαμε με την προηγούμενη σχέση ως αρχική τιμή για την επίλυση της πεπλεγμένης σχέσης των Colebrook-White με επαναληπτική διαδικασία. Η οποία σταματάει όταν η νέα τιμή του  $\lambda$  διαφέρει λιγότερο από 0.00001 από την προηγούμενη. Δίνεται η σχέση των Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{2,51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71} \right] \quad (\text{Σχέση 31})$$

Έχοντας υπολογίσει τον αδιάστατο συντελεστή γραμμικών απωλειών  $\lambda$ , ανάλογα με τη φύση της ροής, τον αντικαθιστούμε στη Σχέση 26 και υπολογίζουμε τις γραμμικές απώλειες της σωλήνωσης.

Όπου η ταχύτητα του ρευστού μέσα στο αγωγό  $c$  που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό στη Σχέση 26 δίνεται από τη σχέση:

$$c = \frac{Q}{A} \quad (\text{Σχέση 32})$$

Όπου,  $Q$ : η διακινούμενη παροχή του αγωγού κατάθλιψης και της αντλίας σε  $\text{m}^3/\text{sec}$  και

$A$ : η επιφάνεια της κυκλικής διατομής του αγωγού σε  $\text{m}^2$ , δηλαδή:  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

Στο επίπεδο που πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί της εγκατάστασης δεν είναι εφικτός ο ακριβής υπολογισμός των εντοπισμένων απωλειών, αφού δεν έχει καθοριστεί πλήρως η εγκατάσταση προκειμένου να γνωρίζουμε τις ακριβείς διαμορφώσεις του αγωγού, τα εξαρτήματα και τα όργανα του. Γι' αυτό το λόγο δεχόμαστε προσεγγιστικά ότι οι εντοπισμένες απώλειες είναι περίπου το 10% των γραμμικών που υπολογίστηκαν. Η προσέγγιση αυτή δεν αλλοιώνει σε καμία περίπτωση την ισχύ των αποτελεσμάτων, αφού η πράξη έχει δείξει ότι σε εγκαταστάσεις τέτοιου μεγέθους οι εντοπισμένες απώλειες είναι αντίστοιχες.

Έτσι, οι συνολικές υδραυλικές απώλειες θα δίνονται από την επόμενη σχέση:

$$\delta h = \delta h_L + \delta h_S = 1.1 \cdot \delta h_L \quad (\text{Σχέση 33α})$$

Όπου ως  $\delta h_L$  δηλώνονται οι γραμμικές απώλειες και ως  $\delta h_S$  οι εντοπισμένες.

Αφού υπολογίστηκαν οι υδραυλικές απώλειες του αγωγού κατάθλιψης το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική της σωλήνωσης για κάθε ημέρα του έτους. Η χαρακτηριστική της σωλήνωσης δίνεται από την παρακάτω σχέση και εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια  $H_\Sigma$  που πρέπει να προσδίνεται στο υγρό ώστε να μπορεί να διακινηθεί με παροχή  $Q$  μέσω της εξεταζόμενης σωλήνωσης (γι' αυτό ο δείκτης  $\Sigma$ ). Η ενέργεια αυτή είναι ίση προς την ενέργεια  $h$  κατά την οποία αυξάνεται η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του και την ενέργεια  $\delta h_{\text{FEA}}$  που δαπανάται στις υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης. [9]

$$H_\Sigma = h + \zeta \cdot Q^2 \quad (\text{Σχέση 33β})$$

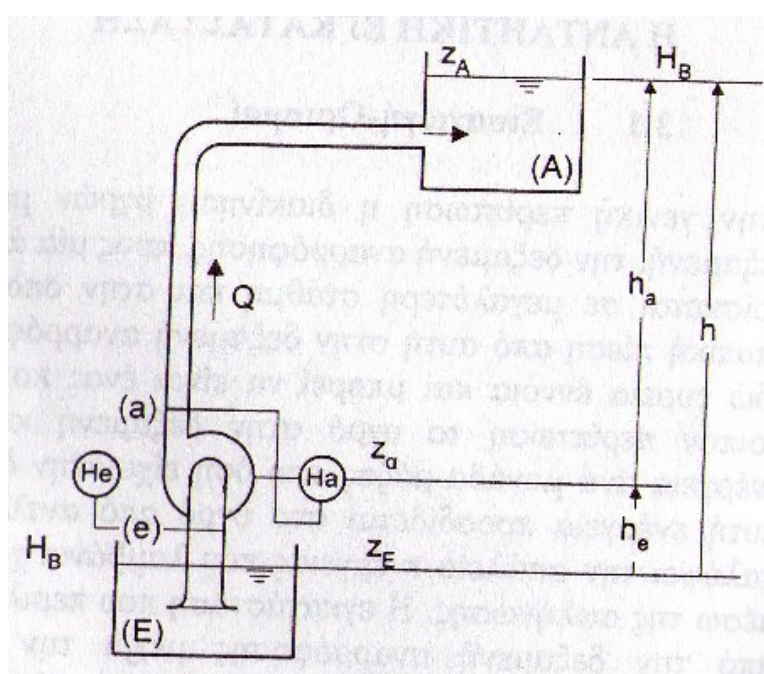
Όπου στην εξίσωση αυτή η παροχή  $Q$  είναι η ελεύθερη μεταβλητή και το ύψος  $H_\Sigma$  η εξαρτημένη. Συνεπώς δίνοντας τιμές για την παροχή σε  $\text{m}^3/\text{sec}$  λαμβάνουμε αντίστοιχες τιμές για το ύψος σε  $\text{mSY}$ , αφού πρώτα έχουμε καθορίσει τις σταθερές  $h$  και  $\zeta$ .

Συγκεκριμένα το  $h$  εκφράζει το γεωμετρικό ύψος ανύψωσης, το οποίο είναι η διαφορά της στάθμης μεταξύ της δεξαμενής κατάθλιψης και της δεξαμενής αναρρόφησης και το οποίο είναι φυσικά ανεξάρτητο της στάθμης τοποθέτησης της αντλίας. Άρα έχουμε την επόμενη σχέση:

$$h = z_A - z_E = h_e + h_a \quad (\text{Σχέση 33}\gamma)$$

Όπου ως  $z_E$  και  $z_A$  αναφέρονται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού στις δεξαμενές αναρρόφησης και κατάθλιψης αντίστοιχα μετρημένες από κοινή στάθμη αναφοράς που συνήθως είναι η στάθμη της θάλασσας για τις μεγάλες αντλητικές εγκαταστάσεις όπως η συγκεκριμένη.

Η παραπάνω σχέση γίνεται ακόμα πιο κατανοητή με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος που παρουσιάζει τη σχηματική διάταξη μίας απλής αντλητικής εγκατάστασης: [9]



Σχήμα 2.8 Σχηματική διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης

Όπως είναι αναμενόμενο οι στάθμες των 2 δεξαμενών μεταβάλλονται συνέχεια γι' αυτό το λόγο θα υπολογιστεί το  $h$  για κάθε ημέρα στη συνέχεια. Κρίνεται ικανοποιητικής ακρίβειας η θεώρηση της ημερήσιας μεταβολής της στάθμης για τους υπολογισμούς μας, αφού οι 2 δεξαμενές χαρακτηρίζονται από το μεγάλο μέγεθος τους. Προκειμένου να υπολογίσουμε για κάθε ημέρα τη διαφορά ανάμεσα στις 2 στάθμες γνωρίζουμε από τα δεδομένα που μας έχουν δοθεί για την εγκατάσταση για το έτος 2005, το οποίο έχουμε θεωρήσει ως αντιπροσωπευτικό για τη λειτουργία του σταθμού, τη στάθμη του άνω ταμιευτήρα για κάθε ημέρα του έτους. Οι μετρήσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς μας αφού θεωρούμε ότι δε θα μεταβληθούν ακόμα και αν η εγκατάσταση μετατραπεί σε αναστρέψιμη με τη χρήση αντλιοταμίευσης. Αυτό γίνεται κατανοητό από τη στιγμή που όσο νερό θα αντλείται κάθε ημέρα, αντίστοιχα και θα διατίθεται στους υδροστροβίλους για παραγωγή ενέργειας την ίδια ημέρα ή θα υπερχειλίζει από τους υπερχειλιστές του φράγματος του άνω ταμιευτήρα. Αυτή η πολιτική χρήσης του αντλούμενου νερού κρίνεται ορθή

όχι μόνο προς όφελος των υπολογισμών μας αλλά και για την αποφυγή καταστάσεων συσσώρευσης υδάτων στον άνω ταμιευτήρα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν επικίνδυνες καταστάσεις ως προς τις αντοχές του φράγματος του άνω ταμιευτήρα. Συνεπώς είναι εμφανές ότι γνωρίζουμε τη στάθμη του άνω ταμιευτήρα για κάθε ημέρα του έτους. Ενώ για τη στάθμη του κάτω ταμιευτήρα θεωρούμε ότι αυτή παραμένει σταθερή σε μία μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης, δηλαδή:  $z_E = \frac{z_{E \max} + z_{E \min}}{2} = \frac{33,4 + 40}{2} = 36,7m\Sigma Y$ . Η στάθμη του κάτω ταμιευτήρα παραμένει σταθερή γιατί από αυτόν τροφοδοτείται μία μικρότερη υδροηλεκτρική εγκατάσταση το Πουρνάρι II για την περαιτέρω ενεργειακή εκμετάλλευση των υδάτων. Ενώ οποιαδήποτε ποσότητα υδάτων περισσεύει υπερχειλίζει όπως και προηγουμένως για την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων. Άρα η θεώρηση της σταθερής στάθμης του κάτω ταμιευτήρα κρίνεται επίσης λογική.

Επιπλέον όπως είναι αναμενόμενο το  $\zeta$  αναφέρεται στις υδραυλικές απώλειες που υπολογίσαμε προηγουμένως και δίνεται από τη σχέση:

$$\zeta = \frac{\delta h}{Q^2} \quad (\text{Σχέση 34})$$

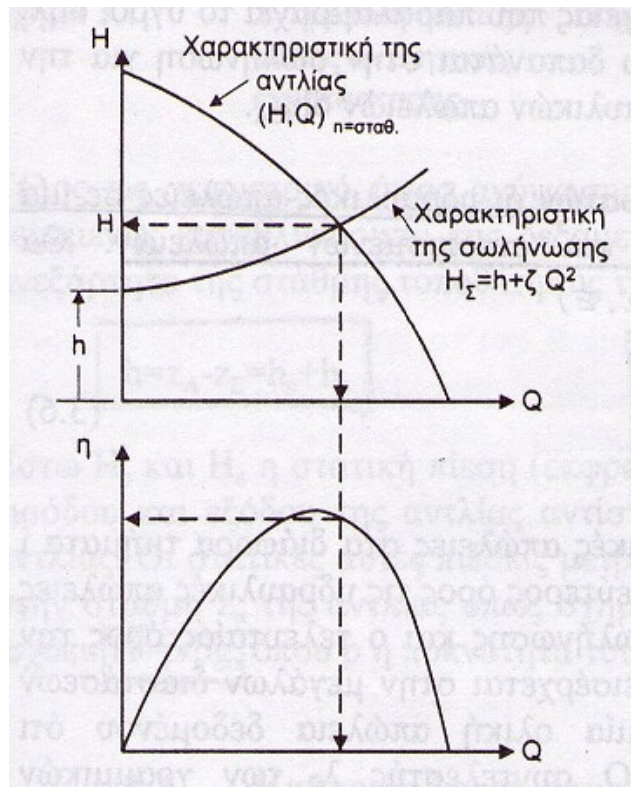
Όπου, Q: η ονομαστική παροχή της αντλίας σε  $m^3/sec$

Όπως είναι προφανές ο όρος αυτός παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια του έτους αφού σχετίζεται μόνο με τη μορφή της σωλήνωσης και όχι με τη στάθμη των 2 δεξαμενών.

Στη συνέχεια υπολογίζεται αριθμητικά η χαρακτηριστική της σωλήνωσης κατάθλιψης για κάθε ημέρα του έτους από το πρόγραμμα. Έτσι δημιουργούμε μία επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει και τις 365 ημέρες του έτους, στην οποία αρχικά υπολογίζουμε το γεωμετρικό ύψος ανύψωσης  $h$  για κάθε ημέρα. Έπειτα δίνουμε τιμές στην παροχή Q σε  $m^3/sec$  από το 0 μέχρι 2 φορές την ονομαστική παροχή της αντλίας με βήμα  $0,5 m^3/sec$ . Έτσι λαμβάνουμε για κάθε τιμή της παροχής μία τιμή για το ύψος  $H_2$  σε  $m\Sigma Y$  και δημιουργούμε ένα ζεύγος τιμών για κάθε ημέρα που παριστάνει τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης για τη δεδομένη ημέρα.

## 2.5 Υπολογισμός σημείου λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα του έτους

Το σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης, με δεδομένη την χαρακτηριστική  $(H,Q)$  της αντλίας, δηλαδή η διακινούμενη παροχή Q, θα είναι αυτή για την οποία η ενέργεια  $H=f(Q)$  που προσδίδει η αντλία είναι ίση με αυτή που απαιτείται για τη διακίνηση της παροχής στην αντλητική εγκατάσταση και η οποία περιγράφεται από τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης  $H_2=f(Q)$ . Άρα το σημείο λειτουργίας της δεδομένης αντλητικής εγκατάστασης, που περιγράφεται από τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης, με τη δεδομένη αντλία, που περιγράφεται από τη χαρακτηριστική της αντλίας, θα προκύπτει ως το σημείο τομής της χαρακτηριστικής  $(H,Q)$  της αντλίας με τη χαρακτηριστική  $(H_2,Q)$  της σωλήνωσης. Όλα όσα περιγράφηκαν για το σημείο τομής των 2 χαρακτηριστικών, που είναι το σημείο λειτουργίας της αντλίας, δίνονται εποπτικά από το παρακάτω σχήμα: [9]



Σχήμα 2.9 Σημείο λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουν ήδη αναλυθεί είναι εμφανές ότι ανάλογα με το μέγεθος της αντλίας που έχει επιλεγεί στην αρχή του προγράμματος έχουν προκύψει οι χαρακτηριστικές καμπύλες της δεδομένης αντλίας. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν 2 σύνολα τιμών που αναφέρονται στις καμπύλες  $(H, Q)$  και  $(\eta, Q)$ . Παράλληλα αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο η μεθοδολογία με την οποία έχει προκύψει το ζεύγος τιμών  $(H_\Sigma, Q)$  που αναφέρονται στη χαρακτηριστική της σωλήνωσης ξεχωριστά για κάθε ημέρα του έτους, αφού όπως έχει αναλυθεί αυτή δεν παραμένει κάθε ημέρα ίδια αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με τη στάθμη των 2 ταμιευτήρων της εγκατάστασης.

Συνεπώς είναι εμφανές ότι πρέπει να δημιουργηθεί μία επαναληπτική διαδικασία που στόχο θα έχει να βρει το σημείο τομής της χαρακτηριστικής της αντλίας  $(H, Q)$  και της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης  $(H_\Sigma, Q)$  για κάθε ημέρα του έτους, το οποίο θα μας δώσει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε το σημείο που θα λειτουργεί η αντλία κάθε ημέρα. Θα θεωρήσουμε ότι η αντλία θα δουλεύει μόνο τις δεδομένες ώρες κάθε ημέρα που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος με τη δεδομένη παροχή και στο δεδομένο ύψος που θα έχει προκύψει από την τομή των 2 καμπυλών.

Προκειμένου να επιτύχουμε την εύρεση της τομής των 2 χαρακτηριστικών, οι οποίες μας είναι δεδομένες ως ζεύγη τιμών, δημιουργούμε υπορουτίνα αριθμητικής ανάλυσης η οποία έχει ως στόχο να βρίσκει το σημείο τομής των 2 καμπυλών. Πιο αναλυτικά η υπορουτίνα περιέχει επαναληπτικό βρόγχο, που αναζητά το σημείο τομής των δύο καμπυλών, εξετάζοντας τα σημεία της κάθε καμπύλης σε ζεύγη. Έτσι λαμβάνει με τη σειρά ένα ζεύγος τιμών από τη μία καμπύλη και βρίσκει την αντίστοιχη ευθεία που αντιπροσωπεύουν. Η διαδικασία υλοποιείται και για τις τιμές της άλλης καμπύλης. Συνεπώς σε κάθε βήμα της επανάληψης έχουν προκύψει δύο

ευθείες από δύο σημεία για κάθε καμπύλη. Ενώ στη συνέχεια εντοπίζουμε σε ποιο σημείο τέμνονται οι δύο ευθείες που υπολογίσαμε. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουμε τελικά στο σημείο τομής των ευθειών που συμπίπτει με το σημείο τομής των δύο καμπυλών. Συνεπώς με την υπολογιστική μέθοδο αυτή εντοπίζουμε κάθε φορά σε ποιο σημείο τέμνονται οι δύο χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας και της σωλήνωσης. Φυσικά όπως έχει αναφερθεί αυτή η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί συνολικά 365 ημέρες, όσες είναι και οι ημέρες του έτους.

Αφού βρούμε το ζεύγος τιμών (H,Q) στο οποίο τέμνονται οι 2 καμπύλες και μπορεί να λειτουργήσει η αντλία κάθε ημέρα είναι εφικτό να βρούμε και το βαθμό απόδοσης με τον οποίο θα δουλεύει η αντλία στο συγκεκριμένο σημείο. Αυτό είναι εφικτό αφού έχουμε το ζεύγος τιμών που μας δίνει τη χαρακτηριστική της αντλίας που συσχετίζει το βαθμό απόδοσης με την παροχή (η,Q). Έτσι για κάθε ημέρα πραγματοποιώντας γραμμική παρεμβολή στο ζεύγος τιμών (η,Q) για τη δεδομένη παροχή Q που προέκυψε από την τομή των 2 χαρακτηριστικών προκύπτει και ο βαθμός απόδοσης της αντλίας η. Ο οποίος και θα μας χρησιμεύσει στη συνέχεια της μελέτης τόσο σε ενεργειακό όσο και σε οικονομικό επίπεδο.

## 2.6 Προσομοίωση της λειτουργίας με άντληση και κατανομή της αντλούμενης παροχής για κάθε ημέρα

Αρχικά είναι εφικτό να υπολογίσουμε τον όγκο του νερού που θα αποθηκεύεται κάθε ημέρα στον άνω ταμιευτήρα με τη λειτουργία της άντλησης. Έχοντας υπολογίσει στην προηγούμενη ενότητα το σημείο λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα και γνωρίζοντας τις ώρες που θα δουλεύει η αντλητική εγκατάσταση προκύπτει η επόμενη σχέση που υπολογίζει τον όγκο του νερού που αντλείται κάθε ημέρα σε m<sup>3</sup> και ο οποίος σημειωτέον δε θα είναι ο ίδιος κάθε ημέρα:

$$V_{\text{αντλούμενο}} = 3600 \cdot Q \cdot \text{HOURS} \quad (\text{Σχέση 35})$$

Όπου, Q: η παροχή της αντλίας σε m<sup>3</sup>/sec για κάθε ημέρα όπως αυτή υπολογίστηκε από το σημείο τομής των 2 χαρακτηριστικών.

HOURS: οι ώρες λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης κάθε ημέρα όπως αυτές έχουν οριστεί στην αρχή του προγράμματος από το χρήστη.

Ενώ η σταθερά 3600 μετατρέπει την παροχή από sec σε ώρες.

Πριν επιχειρήσουμε να κατανέμουμε τον αντλούμενο όγκο νερού ημερησίως θα ήταν χρήσιμο να υπολογίσουμε αρχικά τις εισροές του άνω ταμιευτήρα, τις ώρες που ήδη λειτουργεί ο υδροστρόβιλος κάθε ημέρα, καθώς και τις ώρες έναρξης και λήξης της λειτουργίας του κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί γνωρίζουμε την ημερήσια στάθμη του άνω ταμιευτήρα, συνεπώς η διαφορά της στάθμης της επόμενης με την προηγούμενη ημέρα μας δίνει το μέγεθος της μεταβολής της. Θεωρούμε ότι η μεταβολή αυτή πραγματοποιήθηκε ισόποσα κατά τη διάρκεια της ημέρας και τη διαιρούμε με τις 24 ώρες της ημέρας. Η ωριαία αυτή μεταβολή της στάθμης όπως είναι φυσικό αντιστοιχεί και σε μία μεταβολή του όγκου του νερού που είναι αποθηκευμένο στον άνω ταμιευτήρα. Στα δεδομένα μας υπάρχουν ζεύγη τιμών που αντιπροσωπεύουν τη συσχέτιση μεταξύ ύψους του άνω ταμιευτήρα και του αποθηκευμένου όγκου νερού σε αυτόν. Συνεπώς

πραγματοποιώντας γραμμική παρεμβολή με δεδομένο την ωριαία μεταβολή της στάθμης λαμβάνουμε και την αντίστοιχη ωριαία μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού. Άρα πραγματοποιώντας επαναληπτική διαδικασία για κάθε ώρα και ημέρα του ημερολογιακού έτους έχουμε τη μεταβολή της στάθμης και του όγκου του νερού στον άνω ταμιευτήρα.

Στη συνέχεια αφού γνωρίζουμε την ισχύ λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα είναι εφικτό να υπολογίσουμε και την παροχή που κατέρχεται από τον άνω ταμιευτήρα μέσω των υδροστροβίλων για την ήδη υπάρχουσα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την επόμενη σχέση δίνεται η παροχή των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα σε  $m^3/sec$ : [12]

$$Q = \frac{10^6 \cdot P}{\rho \cdot g \cdot H \cdot \eta} \quad (\text{Σχέση 36})$$

Όπου, P: η ισχύς λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα σε MW  
 $\rho$ : πυκνότητα νερού ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ )  
 $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ )  
H: το ύψος λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα σε mΣΥ  
 $\eta$ : ο βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων ( $0,92$ )

Σημειώνεται ότι το ύψος λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα προκύπτει από τη διαφορά της στάθμης μεταξύ άνω και κάτω ταμιευτήρα. Όπου τα δεδομένα για τη στάθμη του άνω ταμιευτήρα είναι γνωστά και η στάθμη του κάτω ταμιευτήρα θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή σε μία μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης, όπως και σε προηγούμενους υπολογισμούς,

δηλαδή:  $z_E = \frac{z_{E \max} + z_{E \min}}{2} = \frac{33,4 + 40}{2} = 36,7 \text{ mΣΥ}$ . Επιπλέον από το ύψος

λειτουργίας των υδροστροβίλων που υπολογίζεται με αυτό τον τρόπο αφαιρείται το 5% του ιδίου μεγέθους, προκειμένου να συνυπολογιστούν και οι υδραυλικές απώλειες των υδροστροβίλων. Το μέγεθος αυτό κρίνεται αντιπροσωπευτικό για την ανάλυση μας σύμφωνα με εμπειρικά αποτελέσματα.

Αφού έχουμε υπολογίσει την παροχή που κατέρχεται από τον άνω ταμιευτήρα κάθε ώρα και ημέρα μπορούμε να μετατρέψουμε αυτή την παροχή σε όγκο νερού για την αντίστοιχη ώρα και ημέρα. Έτσι πολλαπλασιάζουμε κάθε παροχή που υπολογίσαμε με 3600 sec προκειμένου να μετατρέψουμε την παροχή ( $m^3/sec$ ) σε όγκο νερού που διέρχεται σε μία ώρα.

Συνεπώς αφού γνωρίζουμε τόσο την ωριαία μεταβολή της στάθμης του άνω ταμιευτήρα αλλά και τον όγκο νερού που κατέρχεται από αυτόν μέσω των υδροστροβίλων μπορούμε να υπολογίσουμε τις εισροές νερού στον άνω ταμιευτήρα. Είναι εμφανές ότι οι εισροές νερού για κάθε ώρα και ημέρα θα είναι ίσες με το άθροισμα των 2 παραπάνω, αφού δεν έχουμε θεωρήσει κάποια άλλη διέξοδο του νερού. Άρα οι εισροές σε  $m^3/sec$  και σε  $m^3/h$  θα δίνονται από τις επόμενες αντίστοιχες σχέσεις:

$$Q_{\text{εισροές}}^{\text{άνω}} = Q_{\text{υδροστροβίλων}} + \frac{V_{\text{μεταβολή στάθμης}}}{3600} \quad (\text{Σχέση 37})$$

$$V_{\text{ανω ές}} = V_{\text{υποβ ίλω}} + V_{\text{μεθλ ήσάθις}} \quad (\text{Σχέση 38})$$

Αφού υπολογίσαμε τις εισροές του άνω ταμιευτήρα για κάθε ώρα και ημέρα του ημερολογιακού έτους, κάνουμε νέα επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να καταγράψουμε πόσες ώρες λειτουργούν οι υδροστροβίλοι κάθε ημέρα και ποιες ώρες ξεκινάνε και σταματάνε μέσα στην ημέρα, σύμφωνα με το ήδη υπάρχον πρόγραμμα λειτουργίας τους από τα δεδομένα του 2005. Συνεπώς το πρόγραμμα ελέγχει κάθε ώρα και ημέρα την ισχύ λειτουργίας των υδροστροβίλων που μας έχει δοθεί σα δεδομένο και δημιουργεί τις αντίστοιχες μεταβλητές που παρουσιάζουν τα διαστήματα λειτουργίας της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης.

Αφού έχουμε υπολογίσει τα βασικά στοιχεία για την εγκατάσταση που ήδη λειτουργεί μπορούμε να προχωρήσουμε στη μελέτη λειτουργίας της εγκατάστασης με τη χρήση της αντλιοταμίευσης. Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τη μέγιστη παροχή που μπορεί να περάσει από τους ήδη εγκατεστημένους υδροστροβίλους. Αυτό το στοιχείο θα μας χρησιμεύσει ως κριτήριο για τη μέγιστη παροχή νερού που δύναται να κατέρχεται από τον άνω ταμιευτήρα. Η μέγιστη αυτή παροχή σε m<sup>3</sup>/sec δίνεται από την επόμενη σχέση: [12]

$$Q_{\text{max}} = \frac{10^6 \cdot P_N}{\rho \cdot g \cdot H_N \cdot \eta} \quad (\text{Σχέση 39})$$

Όπου, P: η ονομαστική ισχύς λειτουργίας των υδροστροβίλων (330 MW)

ρ: πυκνότητα νερού (1.000 kg/m<sup>3</sup>)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

H: το ονομαστικό ύψος λειτουργίας των υδροστροβίλων (79 mΣΥ)

η: ο βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων (0,92)

Επόμενο βήμα της μελέτης μας είναι να μοιράσουμε τον όγκο νερού που αντλήθηκε από την αντλία μέσα στις ώρες της ίδιας ημέρας. Επομένως εκκινούμε επαναληπτική διαδικασία για κάθε ημέρα του έτους η οποία θα ελέγχει αρχικά αν τη δεδομένη ημέρα που εξετάζουμε λειτουργούν οι υδροστροβίλοι ή όχι. Άρα διακρίνουμε αρχικά τις επόμενους 2 δρόμους υπολογισμού:

- Στην περίπτωση όπου τη δεδομένη ημέρα οι υδροστροβίλοι δε λειτουργούσαν καθόλου

Στην περίπτωση αυτή αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε σε πόσες ώρες πρέπει να μοιράσουμε τον όγκο νερού που αντλήθηκε. Το κριτήριο μας για αυτή τη διαδικασία θα είναι προφανώς η μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από τους υδροστροβίλους. Συνεπώς οι ώρες που πρέπει να δουλέψουν οι υδροστροβίλοι αυτή την ημέρα θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$HOURS = \frac{V_{\text{αντλιο ύμενο}}}{Q_{\text{max}} \cdot 3600} \quad (\text{Σχέση 40})$$

Όπου, V<sub>αντλιο ύμενο</sub>: ο όγκος νερού που αντλήθηκε τη δεδομένη ημέρα κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αντλίας σε m<sup>3</sup>



$Q_{max}$ : η μέγιστη παροχή που δύναται να διέλθει από τους υδροστροβίλους σε  $m^3/sec$ , γι' αυτό πολλαπλασιάζεται με  $3600 sec/h$  προκειμένου να προκύψουν οι ζητούμενες ώρες.

Επειδή οι υπολογισμοί μας γίνονται μόνο με ακέραιες ώρες, ο κώδικας κόβει τα δεκαδικά στις ώρες που υπολογίστηκαν και θα μοιράσει τον αντλούμενο όγκο νερού σε  $HOURS + 1$  ώρες. Συνεπώς η παροχή νερού σε  $m^3/sec$  που θα κατέρχεται από τους υδροστροβίλους τελικά θα είναι:

$$Q = \frac{V_{αντλο\ υμενο}}{(HOURS + 1) \cdot 3600} \quad (\text{Σχέση 41})$$

Όπου η παροχή αυτή θα είναι σίγουρα μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη και η μεταβλητή  $HOURS$  αναφέρεται στις ώρες που υπολογίστηκαν από τη Σχέση 40 έχοντας αφαιρέσει τα δεκαδικά που προέκυψαν από τις πράξεις.

Στη συνέχεια των υπολογισμών θέτουμε ως ώρα έναρξης λειτουργίας των υδροστροβίλων την ώρα έναρξης λειτουργίας των αντλιών. Η θεώρηση αυτή δεν είναι δεσμευτική και μπορεί να αλλάξει σύμφωνα με τις επιθυμίες παραγωγής ενέργειας του διαχειριστή του δικτύου. Ενώ όσον αφορά το ύψος της στάθμης του άνω ταμιευτήρα αυτό στο τέλος της ημέρας θα είναι ίδιο χωρίς να είχε παρεμβληθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας η αντλιοταμίευση, αφού το ισοζύγιο αποθήκευσης και κατανάλωσης νερού παραμένει σταθερό κατά το τέλος της ημέρας.

Αρα στη συνέχεια δημιουργούμε επαναληπτική διαδικασία από την ώρα έναρξης λειτουργίας των υδροστροβίλων μέχρι  $HOURS + 1$  ώρες. Κατά την επαναληπτική διαδικασία αποθηκεύουμε σε ένα νέο πίνακα τις νέες παροχές των υδροστροβίλων για τις ώρες που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Είναι εμφανές ότι με τη διαδικασία αυτή επιτύχαμε τη λειτουργία των υδροστροβίλων ακόμα και τις ημέρες που αυτοί δεν λειτουργούσαν και προσφέρεται μία σίγουρη παραγωγή ενέργειας για δεδομένες ώρες που θα μπορούσε να επιλέξει ο διαχειριστής του δικτύου, χρησιμοποιώντας την εγκατάσταση σε μία έμμεση αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ το μέγεθος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά σταθερό μιας και οι διακυμάνσεις από μέρα σε μέρα δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες.

- Στην περίπτωση όπου τη δεδομένη ημέρα οι υδροστροβίλοι ήδη λειτουργούσαν σε κάποιο βαθμό

#### 1<sup>η</sup> Κατανομή του αντλούμενου όγκου νερού

Στην περίπτωση αυτή θα φροντίσουμε να μοιράσουμε την παροχή στις ώρες που ήδη λειτουργούσαν οι υδροστροβίλοι και να προσεγγίσουμε την ονομαστική ισχύ λειτουργίας τους, χωρίς βέβαια να ξεπεράσουμε αυτό το μέγεθος, αφού κάτι τέτοιο προφανώς και θα ήταν άτοπο. Η επιλογή αυτή για ενίσχυση της λειτουργίας των υδροστροβίλων τις ώρες που ήδη αυτοί λειτουργούσαν σχετίζεται με τις ηλεκτρικές ανάγκες του δικτύου. Είναι προφανές ότι για να επέλεξε ο διαχειριστής του δικτύου να λειτουργήσει την εγκατάσταση τις δεδομένες ώρες σημαίνει πως αυτές είναι και οι ώρες υψηλής ζήτησης του ηλεκτρικού δικτύου. Συνεπώς η ενίσχυση της ηλεκτρικής ισχύς που παράγεται από τους υδροστροβίλους τις δεδομένες ώρες θα οδηγούσε στην

ενίσχυση της σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου. Είναι προφανές ότι οποιαδήποτε αλλαγή είναι εφικτή στη διαμοίραση του όγκου νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας και είναι θέμα ηλεκτρικής διαχείρισης του δικτύου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί πρέπει φυσικά ο όγκος νερού που αντλήθηκε τη δεδομένη ημέρα να καταναλωθεί και την ίδια ημέρα για την αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων στον άνω ταμιευτήρων.

Εκκινούμε επαναληπτική διαδικασία για κάθε μία από τις ημέρες που ήδη λειτουργούσαν οι υδροστροβίλοι. Για κάθε μία από τις ημέρες αυτές υπολογίζουμε την παροχή που πρέπει να προστεθεί στην ήδη υπάρχουσα παροχή των υδροστροβίλων προκειμένου να μοιράσουμε τον όγκο νερού που αντλήθηκε με τη χρήση της αντλιοταμίευσης τη μέρα αυτή. Η προστιθέμενη παροχή αυτή θα προκύψει διαιρώντας τον όγκο του νερού που αντλήθηκε με τις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων. Έτσι θα έχουμε την επόμενη σχέση που μας δίνει την προστιθέμενη παροχή νερού σε  $m^3/sec$ :

$$\delta Q = \frac{V_{\text{αντλούμενο}}}{(HOURS) \cdot 3600} \quad (\text{Σχέση 42})$$

Όπου,  $V_{\text{αντλούμενο}}$ : ο όγκος νερού που αντλήθηκε τη δεδομένη ημέρα κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αντλίας σε  $m^3$

HOURS: οι ώρες της ήδη λειτουργίας των υδροστροβίλων τη δεδομένη ημέρα, όπως αυτές προέκυψαν από την ήδη παραγόμενη ισχύ των υδροστροβίλων για την ίδια ημέρα.

Στη συνέχεια εισάγουμε δεύτερο βρόγχο επανάληψης μέσα στον πρώτο, ο οποίος θα αναφέρεται στις 24 ώρες της ημέρας σε αντίθεση με τον πρώτο που αφορούσε τις 365 ημέρες του έτους. Έτσι για τη δεδομένη ημέρα αφού υπολογίσουμε την προστιθέμενη παροχή των υδροστροβίλων όπως αυτή δίνεται από τη Σχέση 42, θα φροντίσουμε να την προσθέσουμε στις ώρες που ήδη λειτουργούσε η υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Άρα για κάθε ώρα της ημέρας ο δεύτερος βρόγχος ελέγχει αν λειτουργούν οι υδροστροβίλοι και στην περίπτωση που αυτοί λειτουργούν προσθέτει την επιπλέον παροχή.

Όμως προκειμένου να αποφύγουμε στα αποτελέσματα μας να εμφανιστούν ώρες τις ημέρας με παροχές μεγαλύτερες από τη μέγιστη επιτρεπόμενη όπως αυτή έχει οριστεί από τη Σχέση 39 εισάγουμε ένα κριτήριο ελέγχου μέσα στην επαναληπτική διαδικασία για τις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων. Το κριτήριο ελέγχου θα υπολογίζει τη διαφορά ανάμεσα στην παροχή που προέκυψε για κάθε ώρα μετά την προσαύξηση της και τη μέγιστη παροχή. Στην περίπτωση όπου η διαφορά αυτή προκύψει θετική τότε θέτουμε την παροχή του υδροστροβίλου για τη δεδομένη ώρα ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη γιατί είναι αδύνατο οι υδροστροβίλοι να δουλέψουν με την παροχή που έχει υπολογιστεί γιατί αυτή ξεπερνά την μέγιστη επιτρεπτή. Ενώ η διαφορά που προέκυψε προστίθεται σε μία νέα μεταβλητή που θα περιέχει το άθροισμα όλων των περισσευόμενων παροχών που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη ημέρα και οι οποίες θα μοιραστούν εκ νέου στις ώρες που είναι δυνατόν στο επόμενο βήμα των υπολογισμών μας.

Επομένως ο όγκος νερού που θα περισσέψει από την πρώτη κατανομή που πραγματοποιήσαμε με την παραπάνω μεθοδολογία θα δίνεται από την επόμενη σχέση σε  $m^3$  νερού:

$$V_{\text{περισσευόμενος}} = \sum_1^n \delta Q_n \cdot 3600 \quad (\text{Σχέση 43})$$

Όπου,  $\delta Q_n$ : η διαφορά ανάμεσα στην παροχή που προέκυψε για την ώρα  $n$  μετά την προσαύξηση της και τη μέγιστη παροχή, στην περίπτωση που αυτή είναι θετική, δηλαδή ξεπερνά η προσαυξημένη παροχή τη μέγιστη επιτρεπόμενη.

Υποχρεούμαστε να τον μοιράσουμε εκ νέου στις υπόλοιπες ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων που δεν έχουν ακόμα φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή, η οποία είναι και ο στόχος μας. Αφού όπως ήδη έχει αναφερθεί από τη μία επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε την παροχή των υδροστροβίλων για τις ώρες που αυτοί ήδη λειτουργούσαν και από την άλλη να επιτύχουμε πλήρη αξιοποίηση της αντλούμενης παροχής αφού όπως είναι εμφανές έχουμε ξοδέψει ηλεκτρική ενέργεια κατά τη λειτουργία της αντλιοσταμείωσης και πρέπει να την αποσβέσουμε.

## 2<sup>η</sup> Κατανομή του αντλούμενου όγκου νερού

Όπως έγινε κατανοητό από την 1<sup>η</sup> κατανομή του όγκου του νερού που αντλήθηκε είναι ιδιαίτερα πιθανό να υπάρχει περισσευόμενος όγκος μετά την 1<sup>η</sup> κατανομή. Ο περισσευόμενος όγκος αυτός όπως αναφέρθηκε αλλά και είναι εμφανές προέρχεται από τα μέγιστα που επιβάλλουν οι ήδη εγκατεστημένοι υδροστροβίλοι της εγκατάστασης. Η 2<sup>η</sup> κατανομή θα επικεντρωθεί στην κατανομή του περισσευόμενου όγκου νερού στις υπόλοιπες ώρες που ήδη λειτουργούσαν οι υδροστροβίλοι και οι οποίες έχουν ακόμα περιθώρια προσαύξησης της παροχής των υδροστροβίλων.

Από την 1<sup>η</sup> κατανομή έχουμε μετρήσει τον αριθμό των ωρών λειτουργίας των υδροστροβίλων που έχουν προσεγγίσει τη μέγιστη δυνατή παροχή για κάθε ημέρα. Ενώ από την αρχή της μελέτης γνωρίζουμε το συνολικό αριθμό ωρών που λειτουργούν οι υδροστροβίλοι κάθε ημέρα. Συνεπώς εκκινώντας επαναληπτική διαδικασία για τις 365 ημέρες του έτους υπολογίζουμε πόσες ώρες οι υδροστροβίλοι δε λειτουργούν στο μέγιστο δυνατό της παροχής τους για κάθε ημέρα.

Αφού γνωρίζουμε τον αριθμό των ωρών που μπορούμε να μοιράσουμε την περισσευόμενη παροχή υπολογίζουμε τη νέα προσαύξηση της παροχής σε  $\text{m}^3/\text{sec}$  για τις ώρες αυτές από την επόμενη σχέση:

$$\delta Q^{\text{new}} = \frac{V_{\text{περισσευόμενος}}}{(\text{HOURS}) \cdot 3600} \quad (\text{Σχέση 44})$$

Όπου,  $V_{\text{περισσευόμενος}}$ : ο περισσευόμενος όγκος νερού σε  $\text{m}^3$  που πρέπει να διανεμηθεί εκ νέου μετά την 1<sup>η</sup> κατανομή στις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων  
HOURS: ο αριθμός των ωρών λειτουργίας των υδροστροβίλων που δε λειτουργούν στη μέγιστη δυνατή παροχή

Στη συνέχεια εισάγουμε δεύτερο βρόγχο επανάληψης μέσα στον πρώτο, ο οποίος θα αναφέρεται στις 24 ώρες της ημέρας σε αντίθεση με τον πρώτο που αφορούσε τις 365 ημέρες του έτους. Έτσι για τη δεδομένη ημέρα αφού υπολογίσουμε τη νέα

προστιθέμενη παροχή των υδροστροβίλων όπως αυτή δίνεται από τη Σχέση 44, θα φροντίσουμε να την προσθέσουμε στις ώρες που ήδη λειτουργούσε η υδροηλεκτρική εγκατάσταση και στις οποίες δεν έχουμε προσεγγίσει τη μέγιστη παροχή. Άρα για κάθε ώρα της ημέρας ο δεύτερος βρόγχος ελέγχει αν λειτουργούν οι υδροστροβίλοι και στην περίπτωση που αυτοί λειτουργούν προσθέτει την επιπλέον παροχή στις ώρες που αναφέραμε.

Αφού ολοκληρώσουμε την επανάληψη με την προσαύξηση της παροχής στις ώρες που πληρούσαν τα πιο πάνω κριτήρια, για τη δεδομένη ημέρα, πρέπει να φροντίσουμε εκ νέου να ελέγξουμε αν δημιουργήθηκαν ώρες λειτουργίας της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με παροχή μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη. Συνεπώς κάθε ώρα λειτουργίας της ημέρας αυτής ελέγχεται με ένα κριτήριο ελέγχου αντίστοιχο με αυτό που περιγράφηκε στην 1<sup>η</sup> κατανομή του αντλούμενου όγκου νερού. Έτσι πιο αναλυτικά, το κριτήριο ελέγχου θα υπολογίζει τη διαφορά ανάμεσα στην παροχή που προέκυψε για κάθε ώρα μετά τη νέα προσαύξηση της και τη μέγιστη παροχή. Στην περίπτωση όπου η διαφορά αυτή προκύψει θετική τότε θέτουμε την παροχή του υδροστροβίλου για τη δεδομένη ώρα ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη γιατί είναι αδύνατο οι υδροστροβίλοι να δουλέψουν με την παροχή που έχει υπολογιστεί γιατί αυτή ξεπερνά την μέγιστη επιτρεπτή. Ενώ η διαφορά που προέκυψε προστίθεται σε μία νέα μεταβλητή που θα περιέχει το άθροισμα όλων των περισσευόμενων παροχών που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη ημέρα και οι οποίες θα μοιραστούν εκ νέου στο επόμενο βήμα των υπολογισμών μας.

Επομένως ο νέος όγκος νερού που θα περισσέψει από τη δεύτερη κατανομή που πραγματοποιήσαμε με την παραπάνω μεθοδολογία θα δίνεται από την επόμενη σχέση σε m<sup>3</sup> νερού:

$$V_{\text{περισσευόμενος}}^{\text{new}} = \sum_1^n \delta Q_n^{\text{new}} \cdot 3600 \quad (\text{Σχέση 45})$$

Όπου,  $\delta Q_n^{\text{new}}$ : η διαφορά ανάμεσα στην παροχή που προέκυψε για την ώρα n μετά τη νέα προσαύξηση της και τη μέγιστη παροχή, στην περίπτωση που αυτή είναι θετική, δηλαδή ξεπερνά η προσαυξημένη παροχή τη μέγιστη επιτρεπόμενη.

Ο νέος περισσευόμενος όγκος νερού πρέπει να κατανεμηθεί εκ νέου στη λειτουργία των υδροστροβίλων κατά τη διάρκεια της ημέρας προκειμένου να μην έχουμε καμία απώλεια στον αντλούμενο όγκο νερού. Η κατανομή αυτή θα μπορούσε να ακολουθήσει το ίδιο μοτίβο με τις 2 προηγούμενες προκειμένου να προωθήσει τη μεγιστοποίηση της λειτουργίας των ήδη παραγωγικών ωρών λειτουργίας των υδροστροβίλων. Όμως είναι λογικό πως μία νέα κατανομή για τις ήδη υπάρχουσες ώρες λειτουργίας δε θα επέφερε μεγάλες αλλαγές πια αφού είναι εμφανές ότι μετά από τις 2 προηγούμενες κατανομές οι υδροστροβίλοι έχουν προσεγγίσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη μέγιστη παροχή και κατ' επέκταση και τη μέγιστη ισχύ τους για τις ώρες αυτές. Συνεπώς κρίνεται αναγκαίο να κατανεμηθεί ο νέος περισσευόμενος όγκος νερού σε ώρες που οι υδροστροβίλοι δε λειτουργούσαν πιο πριν. Στόχος είναι με την 3<sup>η</sup> κατανομή ο όγκος αυτός να διοχετευθεί στις αμέσως προηγούμενες και στις αμέσως επόμενες ώρες από τις ώρες που ήδη λειτουργούν οι υδροστροβίλοι. Αυτό κρίνεται λογικό από τη στιγμή που έχουμε θεωρήσει ότι οι ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου συμπίπτουν με τις αρχικές ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων.

### 3<sup>η</sup> Κατανομή του αντλούμενου όγκου νερού

Όπως έχει αναφερθεί στην 3<sup>η</sup> κατανομή δε θα ασχοληθούμε με τις ήδη υπάρχουσες ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων αλλά θα τους λειτουργήσουμε νέες ώρες που πριν δε λειτουργούσαν. Όπου οι ώρες αυτές θα είναι οι αμέσως προηγούμενες και οι αμέσως επόμενες από τις ήδη υπάρχουσες ώρες λειτουργίας.

Αρχικά θα υπολογίσουμε τον αριθμό των ωρών που απαιτούνται προκειμένου να επιτύχουμε την 3<sup>η</sup> και τελική κατανομή. Ο αριθμός των νέων ωρών λειτουργίας θα υπολογιστεί από την επόμενη σχέση:

$$HOURS = \frac{V_{\text{περισσευο υμενος}}^{new}}{Q_{\text{max}} \cdot 3600} \quad (\text{Σχέση 46})$$

Όπου,  $V_{\text{περισσευο υμενος}}^{new}$ : ο περισσευούμενος όγκος νερού σε  $m^3$  που πρέπει να διανεμηθεί εκ νέου μετά την 2<sup>η</sup> κατανομή στις νέες ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων

$Q_{\text{max}}$ : η μέγιστη παροχή που δύναται να διέλθει από τους υδροστροβίλους σε  $m^3/sec$  όπως αυτή υπολογίστηκε από τη Σχέση 39

Από τον αριθμό των νέων ωρών λειτουργίας διατηρούμε μόνο το ακέραιο μέρος του αποκόβοντας τα δεκαδικά του, επειδή οι υπολογισμοί μας γίνονται μόνο με ακέραιες ώρες. Έτσι θα μοιράσουμε τον περισσευούμενο όγκο νερού σε  $HOURS + 1$  ώρες. Συνεπώς η παροχή νερού σε  $m^3/sec$  που θα κατέρχεται από τους υδροστροβίλους τελικά θα είναι:

$$Q = \frac{V_{\text{περισσευο υμενος}}^{new}}{(HOURS + 1) \cdot 3600} \quad (\text{Σχέση 47})$$

Όπου η παροχή αυτή θα είναι σίγουρα μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη και η μεταβλητή  $HOURS$  αναφέρεται στις ώρες που υπολογίστηκαν από τη Σχέση 46 έχοντας αφαιρέσει τα δεκαδικά που προέκυψαν από τις πράξεις.

Αυθαίρετα επιλέγουμε οι υδροστροβίλοι να δουλέψουν τις  $HOURS + 1$  νέες ώρες μοιρασμένα πριν και μετά από τις ήδη υπάρχουσες ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων. Δηλαδή εισάγοντας μία νέα επανάληψη ο κώδικας θα μοιράζει από μία ώρα λειτουργίας πριν από τις ήδη υπάρχουσες και μία ώρα λειτουργίας μετά από τις ήδη υπάρχουσες μέχρι να εξαντληθούν οι διαθέσιμες επιπλέον ώρες που υπολογίσαμε από τη Σχέση 46. Για κάθε νέα ώρα λειτουργίας οι υδροστροβίλοι θα διαρρέονται από την παροχή που υπολογίστηκε από τη Σχέση 47. Αυτό υλοποιείται προγραμματιστικά με την επανάληψη που αναφέρθηκε θέτοντας ένα μετρητή για τις 24 ώρες της ημέρας. Όπου σε κάθε επανάληψη η πιθανή ώρα λειτουργίας πριν από τις ήδη υπάρχουσες θα προκύπτει από την ώρα έναρξης των υδροστροβίλων μείων το μετρητή. Ενώ η πιθανή ώρα λειτουργίας μετά από τη λήξη λειτουργίας των υδροστροβίλων με πρόσθεση του μετρητή στην ώρα λήξης της λειτουργίας των υδροστροβίλων. Δηλαδή αναλυτικά εκφρασμένα θα έχουμε:

1<sup>η</sup> Πιθανή Ώρα Λειτουργίας = Ώρα έναρξης λειτουργίας Υδροστροβίλων –  
Μετρητής Επανάλληψης

2<sup>η</sup> Πιθανή Ώρα Λειτουργίας = Ώρα λήξης λειτουργίας Υδροστροβίλων + Μετρητής  
Επανάλληψης

Με αυτό τον τρόπο εξαντλείται κάθε περιθώριο στη λειτουργία των υδροστροβίλων και εξασφαλίζουμε ότι δε θα μείνει κάποια ώρα αναξιοποίητη μέσα στην ημέρα. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί γιατί τα κριτήρια ελέγχου που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα προκειμένου να ελέγξει αν θα λειτουργήσουν οι υδροστροβίλοι τη δεδομένη ώρα είναι τα εξής:

- Για τις ώρες που βρίσκονται πριν από τις ήδη υπάρχουσες ώρες λειτουργίας:

1. Αν η πιθανή ώρα λειτουργίας που προέκυψε αφαιρώντας από την ώρα έναρξης λειτουργίας των υδροστροβίλων το μετρητή της επανάληψης αντιστοιχεί σε υπαρκτή ώρα του 24ώρου, δηλαδή εκφρασμένο μαθηματικά το κριτήριο είναι:

Πιθανή Ώρα Λειτουργίας = Ώρα έναρξης λειτουργίας Υδροστροβίλων – Μετρητής  
Επανάλληψης

1<sup>ο</sup> Κριτήριο Ελέγχου: Πιθανή Ώρα Λειτουργίας > 0

2. Αν υπάρχουν ακόμα διαθέσιμες ώρες λειτουργίας από τις HOURS + 1 ώρες που υπολογίσαμε. Γιατί μετά από κάποιον αριθμό επαναλήψεων θα έχουμε καλύψει τις ώρες αυτές και αν δεν υπήρχε το συγκεκριμένο κριτήριο θα προσθέταμε ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων με όγκο νερού που στην πραγματικότητα αυτός δε θα ήταν διαθέσιμος.

- Για τις ώρες που βρίσκονται μετά από τις ήδη υπάρχουσες ώρες λειτουργίας:

1. Αν η πιθανή ώρα λειτουργίας που προέκυψε προσθέτοντας από την ώρα έναρξης λειτουργίας των υδροστροβίλων το μετρητή της επανάληψης αντιστοιχεί σε υπαρκτή ώρα του 24ώρου, δηλαδή εκφρασμένο μαθηματικά το κριτήριο είναι:

Πιθανή Ώρα Λειτουργίας = Ώρα λήξης λειτουργίας Υδροστροβίλων + Μετρητής  
Επανάλληψης

1<sup>ο</sup> Κριτήριο Ελέγχου: Πιθανή Ώρα Λειτουργίας < 25

2. Το ίδιο κριτήριο με πριν δηλαδή αν υπάρχουν ακόμα διαθέσιμες ώρες λειτουργίας από τις HOURS + 1 ώρες που υπολογίσαμε. Γιατί όπως αναφέρθηκε μετά από κάποιον αριθμό επαναλήψεων θα έχουμε καλύψει τις ώρες αυτές και αν δεν υπήρχε το συγκεκριμένο κριτήριο θα προσθέταμε ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων με όγκο νερού που στην πραγματικότητα αυτός δε θα ήταν διαθέσιμος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που οι HOURS + 1 είναι μονός αριθμός τότε δεν είναι εφικτό να τις μοιράσουμε ισάξια εκατέρωθεν των ήδη

υπαρχόντων ωρών λειτουργίας των υδροστροβίλων. Έτσι έχει επιλεχθεί η επιπλέον αυτή ώρα που προκύπτει να δίνεται στις ώρες πριν του καθιερωμένου προγράμματος λειτουργίας των υδροστροβίλων. Στην περίπτωση που όμως αυτό δεν είναι εφικτό γιατί δεν τηρείται το 1<sup>ο</sup> κριτήριο που αναφέραμε αυτή θα δοθεί στις ώρες που αντιστοιχούν μετά το καθιερωμένο πρόγραμμα λειτουργίας της ημέρας. Δηλαδή παρατηρείται μία προτεραιότητα ως προς το θέμα αυτό για τις ώρες πριν έναντι των ωρών μετά. Αυτή επιλογή είναι καθαρά τυχαία και προφανώς μπορεί να αλλαχθεί σύμφωνα με την επιθυμία του διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου.

Επιπλέον πρέπει να γίνει κατανοητό ότι στην περίπτωση που το 1<sup>ο</sup> κριτήριο δεν καλύπτεται για τις ώρες πριν τότε οι διαθέσιμες ώρες θα διατεθούν μετά το καθιερωμένο πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστροβίλων και αντιστρόφως. Δηλαδή σε κάθε περίπτωση ο κώδικας μέσα από την επανάληψη αυτή θα διερευνήσει τις διαθέσιμες δυνατές ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων προκειμένου να μην μείνει κάποιο ποσό του αντλούμενου νερού ανεκμετάλλευτο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό θα μπορούσε να γίνει μόνο στην περίπτωση που οι υδροστροβίλοι δουλεύουν καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου και πολύ κοντά στη μέγιστη ισχύ. Στην περίπτωση αυτή είναι κατανοητό πως έχουμε προσεγγίσει τα όρια της εγκατάστασης για τη δεδομένη ημέρα και κάποια περαιτέρω διαρθρωτική αλλαγή στο ημερήσιο πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστροβίλων κρίνεται αδύνατο. Η μόνη αλλαγή που θα ήταν πια εφικτή είναι η μεταφορά ποσοτήτων νερού από την μία μέρα στην επόμενη και αποθήκευση τους στον άνω ταμιευτήρα. Βέβαια αυτή η αλλαγή κρίνεται μάλλον αδύνατη και επικίνδυνη αφού όπως έχουμε αναφέρει η περαιτέρω αποθήκευση νερού στον άνω ταμιευτήρα ία μπορούσε να προκαλέσει επικίνδυνες καταστάσεις σχετικά με την αντοχή του και την γενικότερη ασφάλεια της εγκατάστασης. Επιπλέον λόγος που δυσχεραίνει μία τέτοια λογική είναι ότι συνήθως οι μέρες που έχουμε περίσσια όγκου νερού στον άνω ταμιευτήρα δεν παρουσιάζονται ως μεμονωμένες περιπτώσεις αλλά ως συνεχόμενες ημέρες κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Επομένως μάλλον θα ήταν άτοπο να αποθηκεύσουμε ποσότητα νερού που περισσεύει κάποια χειμερινή ημέρα για να την αξιοποιήσουμε την επόμενη που πιθανότατα θα έχουμε πάλι περίσσια νερού.

Συνεπώς με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η κατανομή του αντλούμενου νερού για τις ημέρες που ήδη λειτουργούσαν οι υδροστροβίλοι σταματάει στο σημείο αυτό. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια από τα αποτελέσματα στη συντριπτική πλειοψηφία των ημερών του έτους ο αντλούμενος όγκος μοιράζεται ολόκληρος και αξιοποιείται εξ' ολοκλήρου από την υδροηλεκτρική εγκατάσταση, πράγμα που θα συμβάλει στους οικονομοτεχνικούς στόχους της εγκατάστασης. Ενώ για τις ημέρες που λειτουργούν οι υδροστροβίλοι σχεδόν στο 100% της ονομαστικής λειτουργίας του καθ' όλο το 24ώρο και κάποιο μέρος της αντλούμενης παροχής μένει ανεκμετάλλευτο πρέπει να διαφύγει από τους υπερχειλιστές για να μην δημιουργηθούν επικίνδυνες καταστάσεις για τον άνω ταμιευτήρα.

Φυσικά το θέμα της ανεκμετάλλευτης αντλούμενης παροχής σχετίζεται ευθέως με το μέγεθος της αντλίας που προτίθεται να εγκατασταθεί για το σκοπό αυτό αλλά και τις ώρες λειτουργίας της για κάθε ημέρα. Το θέμα αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα πολύπλοκο και θα εξεταστεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο σε συσχέτιση πάντα με τους οικονομικούς στόχους της συγκεκριμένης εγκατάστασης, κριτήριο ιδιαίτερα σημαντικό προκειμένου να εξασφαλιστεί η οικονομική βιωσιμότητα μίας τέτοιας επένδυσης με πολλαπλά οφέλη.

## 2.7 Υπολογισμός τελικών αποτελεσμάτων και εγγραφή στα αρχεία εξόδου

Στο τελευταίο τμήμα του προγράμματος θα υπολογίσουμε το συντελεστή φορτίου που σχετίζεται με την ενεργειακή αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μας με την ενεργειακά αξιοποίηση που θα έχουμε με τη χρήση της αντλιοσταμείωσης. Ενώ στη συνέχεια θα υπολογίσουμε με μία πρώτη προσέγγιση τα οικονομικά αποτελέσματα της αντλητικής εγκατάστασης που υπολογιστικέ προηγουμένως.

Ο συντελεστής φορτίου ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια ενός έτους από την υδροηλεκτρική εγκατάσταση προς την ενέργεια που θα παραγόταν αν αυτός λειτουργούσε στην ονομαστική του ισχύ επί ένα έτος συνεχώς. Δηλαδή έχουμε την επόμενη σχέση: [12]

$$\Sigma\Phi = \frac{E}{N \cdot 8760} \quad (\text{Σχέση 48})$$

Όπου, E: η συνολική ενέργεια που παράγεται από την υδροηλεκτρική εγκατάσταση κατά τη διάρκεια ενός έτους σε MWh

N: η ονομαστική ισχύ της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης (330 MW)

Και  $365 \text{ days / year} \cdot 24 \text{ h/day} = 8760 \text{ h/year}$

Ο συντελεστής φορτίου είναι μία έννοια που σχετίζεται με το πρόβλημα της επιλογής της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Στην περίπτωση της δικιάς μας ανάλυσης η ονομαστική ισχύ της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης έχει ήδη επιλεγεί και είναι στα 330 MW. Συνεπώς ο υπολογισμός του συντελεστή φορτίου αποκτά άλλο νόημα στη μελέτη μας. Θα χρησιμοποιήσουμε το συγκεκριμένο συντελεστή προκειμένου να προσδιορίσουμε σε πιο βαθμό αξιοποιείται ενεργειακά η ήδη εγκατεστημένη υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Ενώ θα υπολογιστεί εκ νέου μετά τη χρήση της αντλιοσταμείωσης με το μέγεθος της αντλίας που θα έχει επιλεγεί από το χρήστη του προγράμματος. Συνεπώς θα έχουμε ένα ενεργειακό κριτήριο για το βαθμό εκμετάλλευσης της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης ανάλογα με το ονομαστικό μέγεθος της αντλίας που επιλέγουμε. Είναι προφανές ότι επιδιώκουμε τη μέγιστη ενεργειακή αξιοποίηση της εγκατάστασης αλλά αυτό εξαρτάται άμεσα από την ονομαστική ισχύ της αντλίας και φυσικά όσο αυξάνει το μέγεθος της αυξάνει και το οικονομικό επίπεδο της επένδυσης που πρέπει να πραγματοποιηθεί.

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται ότι στα μικρά ΥΗΕ ο ετήσιος συντελεστής φορτίου είναι υψηλός, της τάξεως του 0,70-0,80, αντίθετα με τα μεγάλα ΥΗΕ στα οποία ο συντελεστής φορτίου είναι της τάξεως του 0,35 (συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,25-0,50), δηλαδή η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από τη μέση ισχύ έτσι ώστε να εξυπηρετούνται κυρίως οι αιχμές φορτίου του δικτύου. Από την υπερδιαστασιολόγηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού επιβαρύνεται το κόστος του έργου ( κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, έργων υδροληψίας, των αγωγών προσαγωγής, θυροφράγματος, κτίριο ΥΗΣ και βοηθητικών συστημάτων) όμως, για τα μεγάλα ΥΗΕ η επιλογή αυτή είναι οικονομικά συμφέρουσα λόγω του ότι η αξία της παραγόμενης ενέργειας αιχμής είναι πολύ υψηλή. Τα μικρά ΥΗΕ λόγω του μεγέθους τους δεν έχουν τη δυνατότητα ανακούφισης των αιχμών φορτίου του



δικτύου και για το λόγο αυτό σχεδιάζονται ως μονάδες βάσης λειτουργώντας με υψηλό ετήσιο συντελεστή φορτίου.

Από όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι προφανές ότι για ένα τόσο μεγάλο ΥΗΣ σαν και αυτόν που εξετάζουμε (ονομαστική ισχύ 330 MW) αναμένουμε να υπολογίσουμε ένα αρκετά χαμηλό συντελεστή φορτίου, πράγμα που θα επιβεβαιώσει τον ενεργειακό χαρακτήρα του έργου του όταν αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε. Δηλαδή όπως αναφέρθηκε ο στόχος της εγκατάστασης ήταν να ανακουφίζει τα φορτία αιχμής για συγκεκριμένες και μόνο ώρες. Συνεπώς αυτό δείχνει τα περιθώρια που υπάρχουν με τη χρήση της αντλιοταμίευσης για αύξηση του συντελεστή φορτίου και αλλαγή του χαρακτήρα της εγκατάστασης ως ένα βαθμό. Δηλαδή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μονάδα βάσης, προσφέροντας αυξημένα ποσά ενέργειας πιο εγγυημένα από πριν, αλλά και να παραμείνει μονάδα ανακούφισης αιχμών αφού θα επιλέγεται να τα προσφέρει τις ώρες που το ηλεκτρικό δίκτυο θα είναι υπερφορτωμένο όπως συνέβαινε μέχρι τώρα.

Όσων αφορά το υπολογιστικό μέρος για το συντελεστή φορτίου αρχικά ασχολούμαστε με το συντελεστή της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης. Ο μόνος άγνωστος που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι η συνολική ενέργεια που παράγεται από τη λειτουργία του ΥΗΣ κατά τη διάρκεια του έτους. Στα δεδομένα μας ήταν, όπως έχει αναφερθεί, η ισχύς λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα του έτους. Η ισχύς αυτή μετατρέπεται πολύ απλά από MW σε ενέργεια και MWh. Αυτό γίνεται αν αναλογιστούμε ότι για την ισχύ λειτουργίας του ΥΗΣ που γνωρίζουμε για κάθε ώρα της ημέρας, αυτός δουλεύει σταθερά στην ισχύ αυτή για μία ώρα. Συνεπώς έχουμε:

$$\text{Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για μία ώρα} = N \text{ MW} * 1 \text{ h}$$

Δηλαδή αυτό πολύ απλά μεταφράζεται ότι προκειμένου να υπολογίσουμε τη συνολική παραγόμενη ενέργεια για ένα έτος αρκεί να προσθέσουμε όλες τις ωριαίες ισχύς για τις 8760 ώρες του έτους.

Τρέχοντας τον κώδικα υπολογίζουμε το συντελεστή φορτίου για την ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση. Ο οποίος είναι: 12,61%

Δηλαδή παρατηρούμε ότι είναι ιδιαίτερα χαμηλός όπως και αναμέναμε και μάλιστα πιο χαμηλός από τα συνήθη μεγέθη που παρατηρούμε σε μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Αυτό φυσικά επιβεβαιώνει όλα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετικά με την κατεύθυνση του αρχικού σχεδιασμού της εγκατάστασης αλλά και δείχνει τα μεγάλα περιθώρια για περαιτέρω εκμετάλλευση της εγκατάστασης με τη χρήση της αντλιοταμίευσης.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το συντελεστή φορτίου μετά τη χρήση της αντλιοταμίευσης για το ίδιο έτος. Όπως και προηγουμένως ο μόνος άγνωστος για τον υπολογισμό του είναι η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από τους υδροστροβίλους κατά τη διάρκεια του έτους. Στην περίπτωση αυτή γνωρίζουμε την παροχή των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα, όπως αυτή έχει διαμορφωθεί μετά την κατανομή του αντλούμενου όγκου νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε για κάθε ώρα και ημέρα την ωριαία ισχύ λειτουργίας των υδροστροβίλων και στη συνέχεια να τις προσθέσουμε ακριβώς όπως

αναλύθηκε και προηγουμένως. Η ωριαία ισχύς λειτουργίας των υδροστροβίλων σε MW θα δίνεται από την επόμενη σχέση η οποία αντιστοιχεί στη Σχέση 36 λυμένη όμως ως προς την ισχύ: [12]

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta}{10^6} \quad (\text{Σχέση 49})$$

Όπου,

Q: η παροχή λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα σε m<sup>3</sup>/sec

ρ: πυκνότητα νερού (1.000 kg/m<sup>3</sup>)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>)

H: το ύψος λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα σε mΣΥ

η: ο βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων (0,92)

Επομένως είναι προφανές ότι με δύο επαναληπτικούς βρόγχους έναν για τις 365 ημέρες του έτους και έναν για τις 24 ώρες της ημέρας υπολογίζουμε τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσα σε ένα έτος με τη χρήση της αντλιοσταμείωσης. Στη συνέχεια αφού γνωρίζουμε το μέγεθος αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε και το συντελεστή φορτίου. Συγκεκριμένα αποτελέσματα θα δοθούν σε επόμενη ενότητα προκειμένου να φανεί ξεκάθαρα η αύξηση του συντελεστή φορτίου και κατ' επέκταση της ενεργειακής αξιοποίησης της εγκατάστασης καθώς μεγαλώνει το μέγεθος της προτιθέμενης για εγκατάσταση αντλίας.

Πριν ολοκληρώσουμε τους υπολογισμούς μας θα ασχοληθούμε με τα οικονομικά στοιχεία της νέας αντλιοσταμειωτικής εγκατάστασης. Το κομμάτι αυτό των υπολογισμών μας αποκλίνει από το τεχνικό μέρος των υπολογισμών που προηγήθηκαν. Όμως κρίνεται άκρως σημαντικό και ενδιαφέρον αφού άσχετα με τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη που θα είχε μία τέτοια εγκατάσταση δε μπορούμε να αμελήσουμε και την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Συνεπώς με την ανάλυση που θα ακολουθήσει θα κριθεί σε μεγάλο βαθμό αν μία τέτοια επένδυση είναι οικονομικά εφικτή και αν ναι σε ποιο βαθμό. Συγκεκριμένα αποτελέσματα δε θα δοθούν στο κεφάλαιο αυτό αλλά θα γίνει πλήρης περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.

Προκειμένου να υπολογίσουμε το οικονομικό αποτέλεσμα της δεδομένης επένδυσης θα εντοπίσουμε και θα υπολογίσουμε τα έσοδα ή εισροές της επένδυσης αλλά και τα έξοδα ή εκροές της για τη διάρκεια ζωής του έργου. Όπου ως διάρκεια ζωής του έργου θα θέσουμε τα 20 χρόνια. Συνεπώς τελικά το οικονομικό αποτέλεσμα της επένδυσης θα κριθεί ως θετικό ή αρνητικό και σε πιο βαθμό ανάλογα με το αποτέλεσμα της διαφοράς αυτών των δύο. Δηλαδή θα έχουμε:

$$\text{Κέρδος ή Ζημίες} = \text{Έσοδα} - \text{Έξοδα} \quad (\text{Σχέση 50})$$

Προφανώς προκειμένου να έχουμε ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα θα πρέπει να ανάγουμε όλα τα ποσά στην Παρούσα Αξία τους. Γιατί μόνο έτσι θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα ποσά που προέρχονται από διαφορετικές χρονολογικές περιόδους.

Σε πρώτη φάση της οικονομικής ανάλυσης πρέπει να εντοπίσουμε τις εκροές που υποχρεούται ο επενδυτής να καταβάλει σε δεδομένες χρονικές στιγμές αλλά και τα

έσοδα που θα έχει κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης μέσα στα 20 χρόνια που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Συνοπτικά τα κόστη για τη δεδομένη επένδυση είναι:

- Κόστος αρχικής εγκατάστασης
- Κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας

Ενώ τα έσοδα θα προέρχονται από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Σημειώνεται ότι όσων αφορά το κόστος συντήρησης και λειτουργίας δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς μας μιας και αυτό θα είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση. Γιατί τα άτομα που απασχολούνται ήδη με τον υδροηλεκτρικό σταθμό θα εντάξουν στις υποχρεώσεις τους και την αντλητική εγκατάσταση αφού θα λειτουργούν παράλληλα αυτές οι δύο εγκαταστάσεις. Ενώ στα έξοδα λειτουργίας της προφανώς και λαμβάνεται υπόψη το κόστος χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας όπως αναφέρθηκε.

Πιο αναλυτικά διακρίνουμε το κόστος της αρχικής εγκατάστασης στα επόμενα διακριτά μέρη:

- Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (Αντλίας-Κινητήρας κτλ.)
- Κόστος αγωγού
- Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού

Το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού υπολογίζεται ως συνάρτηση της ονομαστικής ισχύς της αντλίας που προτιθέμεθα να εγκαταστήσουμε. Δηλαδή θεωρούμε ότι το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι 450 € για κάθε kW εγκατεστημένης ισχύς της αντλίας. Αυτή η προσέγγιση κρίνεται ικανοποιητική για το βαθμό της οικονομικής ανάλυσης που πραγματοποιούμε και έχει προκύψει στατιστικά από την οικονομική μελέτη άλλων αντλιοστασίων. Συνεπώς προσφέρει μία τάξη μεγέθους για την επένδυση που μελετάμε. Άρα το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε € θα δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$K1 = 450 \text{ €/kW} * 1.000 \text{ kW/MW} * P_{\text{αντλίας}} \text{ (Σχέση 51)}$$

Όπου,  $P_{\text{αντλίας}}$ : η ονομαστική ισχύ της αντλίας σε MW

Το κόστος του αγωγού κατάθλιψης υπολογίζεται ως συνάρτηση της μάζας του αγωγού. Από τη Σχέση 24 έχουμε ήδη υπολογίσει τη μάζα του αγωγού ανά μονάδα μήκους του m/L σε kg/m. Υπενθυμίζεται επίσης ότι στο σημείο που υπολογίσαμε τη διάμετρο του αγωγού δόθηκε και μία μέση τιμή κόστους ανά kg του χαλύβδινου σωλήνα ίση με 2.5 €/Kg. Τέλος από τη Σχέση 25 υπολογίσαμε το συνολικό μήκος L σε m που πρέπει να έχει ο αγωγός κατάθλιψης. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει και το συνολικό κόστος του αγωγού κατάθλιψης από την επόμενη σχέση σε €:

$$K2 = 2,5 \text{ €/Kg} * m/L * L \text{ (Σχέση 52)}$$

Τέλος το κόστος για τα έργα του πολιτικού μηχανικού υπολογίζονται ως μία ποσόστωση του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού όπως συνηθίζεται

σε αντίστοιχες οικονομικές αναλύσεις. Για το συγκεκριμένο έργο, όπου τα έργα πολιτικού μηχανικού δεν εκτίνονται σε ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό και περιορίζονται κυρίως στη στέγαση του αντλιοστασίου, θεωρούμε ότι το συγκεκριμένο κόστος είναι περίπου στο 20% του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Άρα το κόστος για τα έργα του πολιτικού μηχανικού σε € δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$K3 = 0,2 * K1 \text{ (Σχέση 53)}$$

Συνεπώς με όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω το συνολικό κόστος της αρχικής εγκατάστασης σε € δίνεται ως το άθροισμα των πιο πάνω, δηλαδή:

$$\Sigma\text{Καρχικό} = K1 + K2 + K3 \text{ (Σχέση 54)}$$

Αφού υπολογίσαμε το κόστος της αρχική εγκατάστασης θα συνεχίσουμε με τον υπολογισμό του κόστους χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται για τη λειτουργία της αντλίας κάθε ημέρα τις ώρες που έχουμε ορίσει από την αρχή του προγράμματος. Το σημαντικότερο στοιχείο αυτού του υπολογισμού πρέπει να θεωρηθεί η τιμή αγοράς της kWh ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως έχουμε αναφέρει ο στρατηγικός σχεδιασμός του έργου είναι η αγορά περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες χαμηλής ζήτησης και η πώληση ενός μέρους της αργότερα σε ώρες υψηλής ζήτησης σε φυσικά υψηλότερη τιμή προκειμένου να επιτύχουμε οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Η διαφορά στην τιμή αγοράς και στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι λογική και απολύτως θεμιτή προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές απώλειες που έχουμε να αντιμετωπίσουμε από τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε δυναμική και πάλι από δυναμική και σε ηλεκτρική. Υπολογίζεται μάλιστα ότι αναφερόμαστε σε απώλειες 30% περίπου. Φυσικά ο ενεργειακός αυτός κύκλος μας προσφέρει όλα τα οφέλη που έχουν ήδη αναφερθεί παρά το σημαντικό ποσό των απωλειών.

Συνεπώς από πραγματικά στοιχεία που προέρχονται από αντίστοιχες εγκαταστάσεις ορίζουμε ως τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας τα 0,08 €/kWh και ως τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας τα 0,15 €/kWh. Οι τιμές αυτές προκύπτουν μόνο μετά από συμφωνία με τη ΔΕΗ Α.Ε., αλλά μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές προκειμένου να καταλήξουμε σε χρήσιμα αποτελέσματα μετά το τέλος της ανάλυσης μας.

Αφού έχουμε ορίσει τις τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας μπορούμε να συνεχίσουμε με τον υπολογισμό του κόστους της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για ένα έτος. Το κόστος της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για ένα έτος αποτελείται από το άθροισμα του κόστους χρήσης για κάθε μία από τις 365 ημέρες του έτους. Συνεπώς προκειμένου να το υπολογίσουμε προγραμματιστικά δημιουργούμε έναν επαναληπτικό βρόγχο για τις 365 ημέρες του έτους και αφού υπολογίσουμε για κάθε ημέρα το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας τα αθροίζουμε όλα μαζί. Όπου το κόστος χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ημέρα δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$K4_n = \frac{0,08 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1000 \frac{\text{kWh}}{\text{MWh}} \cdot P_n^{\text{αντλίας}} \cdot \text{HOURS}}{\eta_m} \text{ (Σχέση 55)}$$

Όπου,  $P_n^{αντλίας}$ : η ισχύς λειτουργίας της αντλίας για τη δεδομένη ημέρα n σε MW, η οποία δίνεται πιο αναλυτικά από την επόμενη σχέση

HOURS: οι ώρες λειτουργίας της αντλίας κάθε ημέρα όπως αυτές ορίζονται από τον χρήστη του προγράμματος στην αρχή του

$\eta_m$ : ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα που κινεί την αντλία. Επειδή θέλουμε να εξετάσουμε ένα εύρος τιμών για το μέγεθος της αντλίας και κατ' επέκταση ένα εύρος τιμών για το μέγεθος του κινητήρα θα θεωρήσουμε μία μέση τιμή για το β.α. του κινητήρα ίση με 0,95

Στη συνέχεια δίνουμε τη σχέση που υπολογίζει την ισχύ λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα n σε MW: [9]

$$P_n^{αντλίας} = \frac{Q_n \cdot H_n \cdot g \cdot \rho}{10^6 \cdot \eta_n} \quad (\text{Σχέση 56})$$

Όπου,  $Q_n$ : η παροχή της αντλίας σε  $m^3/sec$  για τη δεδομένη ημέρα όπως αυτή έχει υπολογιστεί από την τομή της καμπύλης λειτουργίας της αντλίας με την αντίστοιχη της σωλήνωσης

$H_n$ : το ύψος λειτουργίας της αντλίας σε mΣΥ αντίστοιχα για τη δεδομένη ημέρα όπως αυτό έχει υπολογιστεί από την τομή της καμπύλης λειτουργίας της αντλίας με την αντίστοιχη της σωλήνωσης

$\eta_n$ : ο β.α. της αντλίας αντίστοιχα για τη δεδομένη ημέρα όπως αυτός έχει υπολογιστεί από την τομή της καμπύλης λειτουργίας της αντλίας με την αντίστοιχη της σωλήνωσης

$\rho$ : η πυκνότητα του νερού ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ )

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ )

Όπως είναι προφανές με όσα ήδη έχουν αναφερθεί το συνολικό κόστος χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για ένα έτος προκύπτει με το άθροισμα όλων των ποσών που υπολογίστηκαν από τη Σχέση 55 για κάθε μία από τις 365 ημέρες του έτους. Άρα θα έχουμε για το συνολικό κόστος λειτουργίας της αντλίας για ένα έτος σε €:

$$K4 = \sum_{n=1}^{365} K4_n \quad (\text{Σχέση 57})$$

Αφού υπολογίσαμε πιο πριν όλες τις εκροές της εγκατάστασης θα υπολογίσουμε και τις ετήσιες εισροές που θα έχουμε από αυτήν από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Με την ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση είχαμε παραγωγή ενός δεδομένου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, όμως με τη χρήση της αντλιοταμίευσης, αυτή θα αυξηθεί και θα υπολογίσουμε το κέρδος που θα έχουμε με την πώληση αυτής της επιπλέον ποσότητας που προφανώς οφείλεται στη παράλληλη λειτουργίας της αντλίας με τους υδροστροβίλους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ορίσαμε την υψηλή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης ίση με  $0,015 \text{ €/kWh}$ . Θεωρούμε ότι όλη την επιπλέον ενέργεια που θα παράγουμε από τους υδροστροβίλους λόγω της αντλιοταμίευσης θα την πωλούμε στην τιμή αυτή προκειμένου να ισοσταθμίζουμε τις ενεργειακές απώλειες που έχουμε με τη λειτουργία της αντλιοταμίευσης.

Συνεπώς στόχος μας είναι να υπολογίσουμε για κάθε ώρα και ημέρα την επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από τους υδροστροβίλους σε kWh και στη συνέχεια να τις αθροίσουμε και να τις πολλαπλασιάσουμε με την αντίστοιχη τιμή πώλησης που ορίσαμε. Άρα αρχικά υπολογίζουμε για κάθε ώρα και ημέρα την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε με τη χρήση της αντλιοσταμείωσης και το αντίστοιχο κέρδος από την πώληση του ηλεκτρικού ρεύματος. Άρα προκύπτει η επόμενη μαθηματική έκφραση που μας δίνει το κέρδος σε € για κάθε ώρα και ημέρα:

$$K5_{i,n} = 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1000 \frac{\text{kWh}}{\text{MWh}} \cdot (P_{i,n}^{\text{new}} - P_{i,n}) \cdot \eta_G \quad (\text{Σχέση 58})$$

Όπου,  $P_{i,n}^{\text{new}}$ : η νέα ηλεκτρική ισχύς σε MW που παράγεται κάθε ώρα  $i$  και ημέρα  $n$  μετά τη λειτουργία της αντλίας και την κατανομή του όγκου νερού που αντλήθηκε στις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων

$P_{i,n}$ : η ηλεκτρική ισχύς σε MW που παραγόταν ήδη κάθε ώρα  $i$  και ημέρα  $n$  χωρίς τη λειτουργία της αντλίας

$\eta_G$ : ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας που είναι διασυνδεδεμένη με τους υδροστροβίλους. Η γεννήτρια αυτή προϋπάρχει όπως είναι φυσικό στον υδροηλεκτρικό σταθμό, επομένως ο β.α. της είναι δεδομένος και ίσος με 0,97

Επομένως αρκεί να δημιουργήσουμε δύο επαναληπτικούς βρόγχους τον ένα μέσα στον άλλο, όπου ο ένας θα αναφέρεται στις 24 ώρες της ημέρας και ο άλλος στις 365 ημέρες του έτους προκειμένου να υπολογίσουμε τις εκροές από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα και ημέρα όπως αυτές ορίστηκαν από τη Σχέση 58. Έτσι σε κάθε επανάληψη απλά θα προσθέτουμε κάθε εκροή με τις προηγούμενες ώστε να προκύψουν τα συνολικά οφέλη της επένδυσης σε € για κάθε χρόνο. Μαθηματικά εκφρασμένο το παραπάνω θα είναι:

$$K5 = \sum_{i,n}^{24,365} K5_{i,n} \quad (\text{Σχέση 59})$$

Ολοκληρώνοντας την οικονομική ανάλυση της επένδυσης αυτής θα πρέπει να εξάγουμε ένα συνολικό αποτέλεσμα το οποίο θα δείχνει αν το έργο αυτό θα είναι κερδοφόρο ή ζημιολόγο και αν ναι σε πιο βαθμό γίνεται αυτό. Προκειμένου να εξάγουμε αξιόπιστα αποτελέσματα είναι απαραίτητο να μετατρέψουμε όλες τις παραπάνω εκροές και εισροές σε ποσά ισοδύναμης παρούσας αξίας.

Σχετικά με τις εκροές που αναφέρθηκαν, το συνολικό κόστος της αρχικής εγκατάστασης  $\Sigma K_{\text{αρχικό}}$  πρέπει να δαπανηθεί στην έναρξη της δημιουργίας της εγκατάστασης, άρα είναι προφανές ότι αναφέρεται σε σημερινή αξία χρημάτων και δε χρειάζεται να μετατραπεί. Το ετήσιο συνολικό κόστος χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας  $K4$  θα καταβάλλεται περιοδικά κάθε χρόνο το ίδιο και πρέπει να αναχθεί σε παρούσα αξία. Το πρόβλημα αυτό ανάγεται στην περίπτωση όπου στο τέλος κάθε χρόνου πρέπει να αποδοθεί ένα συγκεκριμένο περιοδικό ποσό και όλα αυτά τα ποσά που θα κατατεθούν στο τέλος της χρονικής περιόδου που εξετάζουμε πρέπει να αναχθούν σε σημερινή αξία χρημάτων προκειμένου να είναι συγκρίσιμα με τα υπόλοιπα ποσά της ανάλυσης μας. Αντίστοιχα πρέπει να αντιμετωπιστεί και το ετήσιο κέρδος  $K5$  που παραλαμβάνουμε από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το πρόβλημα της αναγωγής σε παρούσα αξία είναι ακριβώς το ίδιο με πριν

μόνο που στην περίπτωση αυτή τα ποσά προστίθενται στο συνολικό ισοζύγιο αντί να αφαιρούνται.

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η αναγωγή των περιοδικών ποσών που προστίθενται ή αφαιρούνται στο τέλος κάθε έτους δίνεται η μαθηματική σχέση που δίνει την παρούσα αξία  $\Pi$  μιας ακολουθίας  $N$  περιοδικών ποσών μεγέθους  $E$ , που εμφανίζονται, ανά ένα, στο τέλος κάθε περιόδου: [6]

$$\Pi = E \cdot \left[ \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \right] \quad (\text{Σχέση 60})$$

Όπου,  $r$ : ο συντελεστής επικαιροποίησης ή απλό επιτόκιο, το οποίο θεωρείται σταθερό και ίσο με 8% σύμφωνα με τα σύγχρονα τραπεζικά δεδομένα

$N$ : ο αριθμός των περιόδων που επαναλαμβάνονται τα περιοδικά ποσά, στη δεδομένη εφαρμογή ως περίοδο θεωρούμε κάθε έτος και η συνολική χρονική περίοδος που εξετάζεται το δεδομένο έργο είναι τα 20 χρόνια

Αφού ορίσαμε και με μαθηματικό τρόπο την αναγωγή των περιοδικών ποσών σε αξία χρημάτων παρούσας αξίας μπορούμε να συνθέσουμε και την τελική μαθηματική σχέση που θα μας δώσει και το τελικό οικονομικό αποτέλεσμα της εγκατάστασης. Άρα θα έχουμε την επόμενη σχέση η οποία θα μας δίνει το συνολικό κέρδος ή ζημία της επένδυσης για μία περίοδο 20 ετών λειτουργίας του έργου της αντλιοταμίευσης σε € παρούσας αξίας:

$$\text{Κέρδος ή Ζημία} = (K5 - K4) \cdot \left[ \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \right] - \Sigma K_{\text{αρχικό}} \quad (\text{Σχέση 61})$$

Όπου, όπως ήδη έχουμε αναφέρει  $r = 8\%$  και  $N = 20$  έτη

Συνοψίζοντας ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί υπολογίζει τα σημαντικότερα τεχνικά δεδομένα της εγκατάστασης που πρέπει να κατασκευαστεί. Όπως έχει ειπωθεί τα δύο βασικότερα στοιχεία που παρέχει ο χρήστης του προγράμματος στην είσοδο του είναι η ονομαστική ισχύς της αντλίας προς εγκατάσταση και ο αριθμός των ωρών που θα λειτουργεί αυτή κάθε ημέρα. Έτσι στη συνέχεια υπολογίζονται τα βασικά στοιχεία της αντλίας προς εγκατάσταση και του αγωγού κατάθλιψης της αντλίας. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν και οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των δύο αυτών μερών της εγκατάστασης προκειμένου να βρούμε το σημείο λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα. Επομένως μετά μπορούμε να υπολογίσουμε τον αντλούμενο όγκο νερού για κάθε ημέρα και μετέπειτα να τον μοιράσουμε στο ήδη υπάρχον πρόγραμμα λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού. Αφού συντάξουμε το νέο πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστροβίλων για κάθε ώρα και ημέρα μπορούμε να κοιτάξουμε τα συνολικά αποτελέσματα της εγκατάστασης τόσο σε ενεργειακό επίπεδο (συντελεστής φορτίου – αύξηση συνολικής παραγόμενης ενέργειας) όσο και σε οικονομικό επίπεδο (κέρδος ή ζημία της επένδυσης).

Είναι εμφανές ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα που μπορεί να δώσει ο κώδικας μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, Από τη μία έχουμε τεχνικά αποτελέσματα για τη μελέτη και την κατασκευή της εγκατάστασης και από την άλλη συνολικά αποτελέσματα που μπορούν να επιτρέψουν στο χρήστη να έχει μία

γενικότερη εποπτεία της επίδρασης του έργου ανάλογα με τις επιλογές του μεγέθους και των ωρών λειτουργίας της αντλίας όπως αυτός τα επέλεξε στην αρχή του προγράμματος. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα θα δοθούν και από τις δύο κατηγορίες σε επόμενο κεφάλαιο αποτελεσμάτων για διάφορες επιλογές των αρχικών δεδομένων. Έτσι θα δοθεί η δυνατότητα στον αναγνώστη να μελετήσει τις αλλαγές που πραγματοποιούνται στα διάφορα μεγέθη ανάλογα με τις αρχικές επιλογές του χρήστη του προγράμματος.



### 3 Αποτελέσματα όπως προέκυψαν από κώδικα Fortran

Στο κεφάλαιο αυτό θα παραθέσουμε αποτελέσματα όπως αυτά προκύπτουν από τον κώδικα Fortran ανάλογα με την ονομαστική ισχύ της αντλίας και τις ώρες λειτουργίας της για κάθε ημέρα. Πιο συγκεκριμένα θα επιλέξουμε 6 ώρες λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα και θα πειραματιστούμε με την ονομαστική ισχύ της αντλίας ώστε να είναι δυνατή μία σύγκριση σε όλα τα επίπεδα των αποτελεσμάτων. Έτσι θα έχουμε τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε τη συμπεριφορά των διαφόρων μεγεθών σε τεχνικό, ενεργειακό και οικονομικό επίπεδο.

Φυσικά αυτή η ανάλυση δεν είναι δυνατόν να μας βοηθήσει να επιλέξουμε το κατάλληλο μέγεθος ονομαστικής ισχύος για την αντλία, αλλά θα μας προσφέρει μία ιδέα για την διαμόρφωση των μεγεθών της εγκατάστασης. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης για την επένδυση ενός τέτοιου έργου θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο, στο οποίο θα επιχειρήσουμε να συμβιβάσουμε τις διάφορες επιδιώξεις που θα είχε ο κατασκευαστής ενός έργου με τον αντίστοιχο χαρακτήρα.

Συνεπώς επιλέγουμε συγκεκριμένες τιμές για την ονομαστική ισχύ της αντλίας που θεωρούμε ότι κρίνονται αντιπροσωπευτικές για κάθε τάξη μεγέθους της εγκατάστασης. Τα μεγέθη αυτά είναι: 10, 30, 50, 100 και 200 MW και θα αναλυθούν ξεχωριστά σε κάθε μία από τις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου.

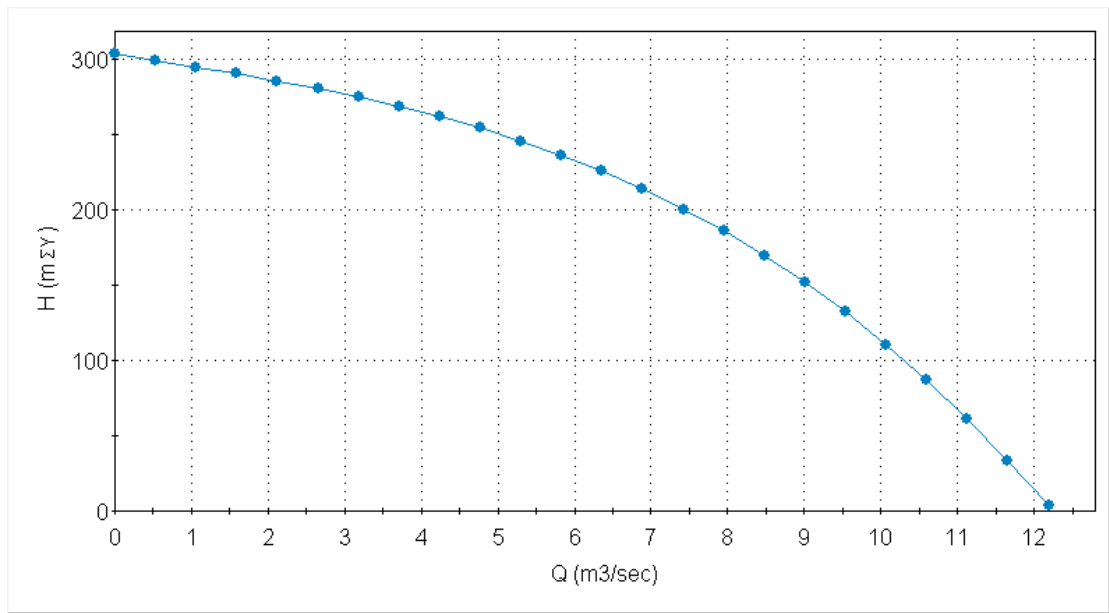
#### 3.1 Αντλία ονομαστικής ισχύος 10 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα

Βασικά στοιχεία αντλίας:

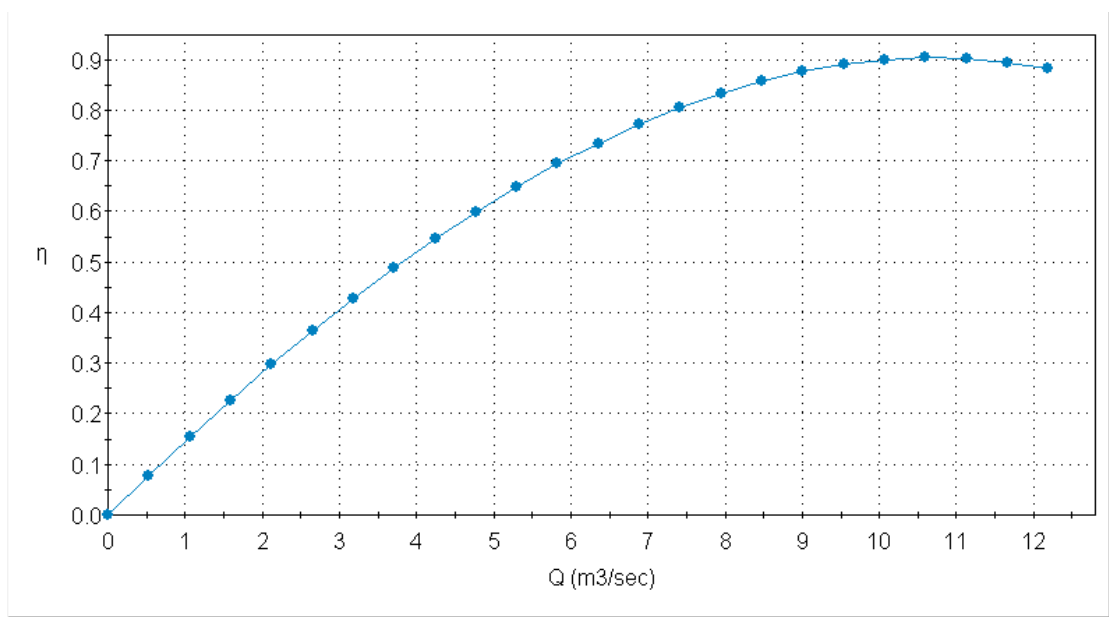
Ονομαστική Ισχύς P (MW)	10
Ονομαστική Παροχή Q (m <sup>3</sup> /sec)	10,6
Ονομαστικό Ύψος H (mΣΥ)	86,9
Ολικός βαθμός απόδοσης η	0,904
Ταχύτητα Περιστροφής n (rpm)	600
Ειδικός αριθμός στροφών n <sub>q</sub>	68,633
Περιφερειακή Ταχύτητα U <sub>2</sub> (m/sec)	38,284
Εξωτερική Διάμετρος Πτερωτής D <sub>2</sub> (m)	1,219
Αδιάστατη Παράμετρος ύψους Ψ	1,163
Παράμετρος Σπηλαίωσης σ <sub>κρ</sub>	0,34
Μέγιστο ύψος τοποθέτησης της Αντλίας H <sub>E</sub> (m)	- 19,8

Πίνακας 3.1 Βασικά στοιχεία αντλίας 10 MW

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας συσχετίζοντας το ύψος λειτουργίας H (mΣΥ) και το βαθμό απόδοσης η για διάφορες τιμές της παροχής Q (m<sup>3</sup>/sec):



Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 10 MW (Q,H)



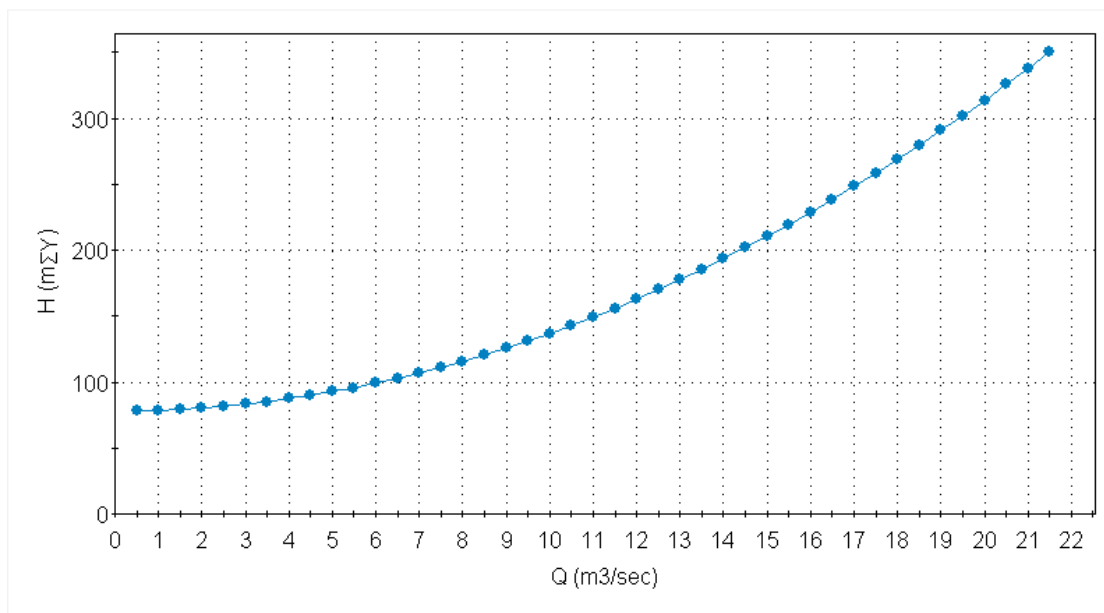
Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 10 MW (Q,η)

Βασικά στοιχεία σωλήνωσης:

Εξωτερική Διάμετρος D (m)	0,951
Πάχος αγωγού e (mm)	7,14
Μήκος Αγωγού L (m)	362,083
Βάρος αγωγού ανά μονάδα μήκους m/L (kg/m)	167,624
Αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών λ	0,01394
Γραμμικές απώλειες σωλήνωσης δh <sub>l</sub> (mΣY)	60,3
Συνολικές υδραυλικές απώλειες δh (mΣY)	66,3

Πίνακας 3.2 Βασικά στοιχεία σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 10 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Ενώ για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης υπολογίζουμε το συντελεστή  $\zeta$  από τη Σχέση 34 και έχουμε:  $\zeta = 0,59$ . Όπως έχουμε εξηγήσει η χαρακτηριστική της σωλήνωσης δεν είναι ίδια για κάθε ημέρα, προκειμένου όμως να τη σχεδιάσουμε για να έχουμε εποπτικά μία τάξη μεγέθους θα επιλέξουμε μία ημέρα στην τύχη. Έτσι επιλέξαμε την 100<sup>η</sup> ημέρα του έτους για να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης για τον αγωγό με τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι έχουμε:

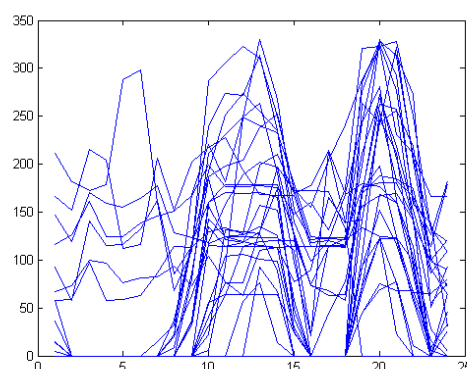
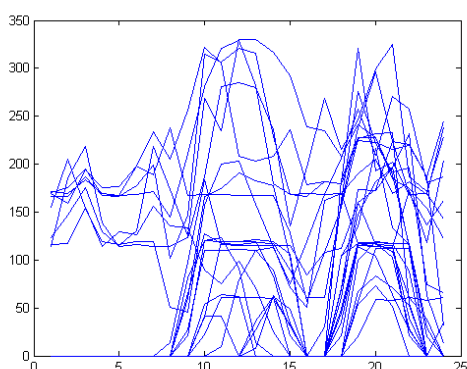


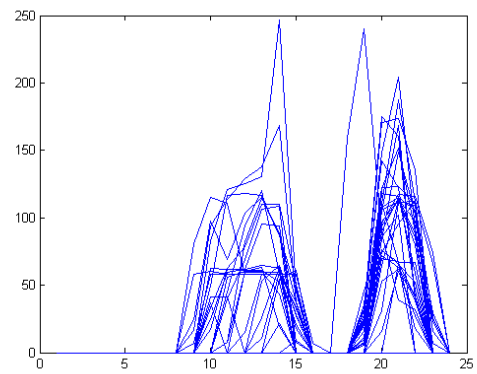
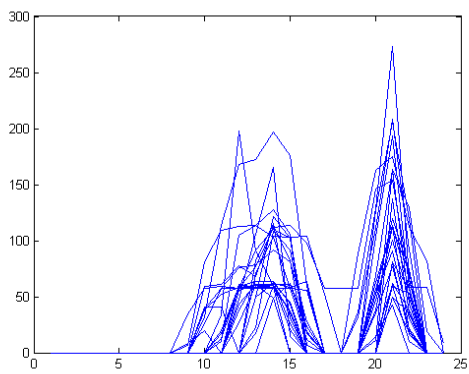
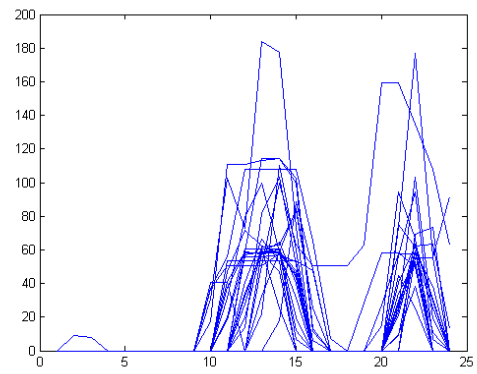
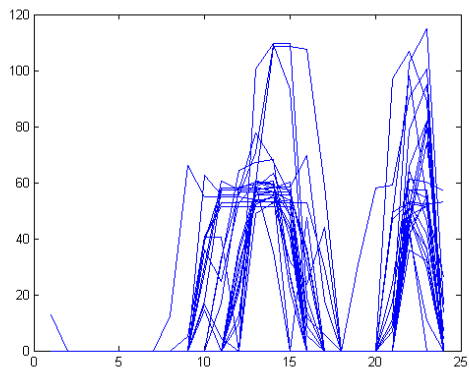
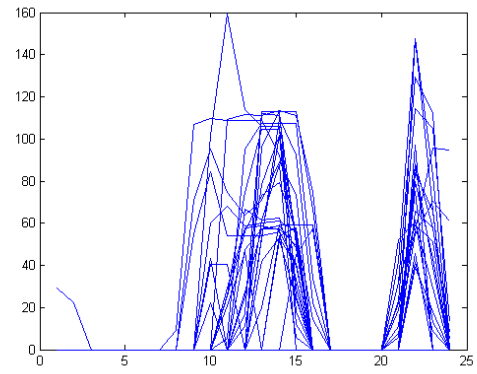
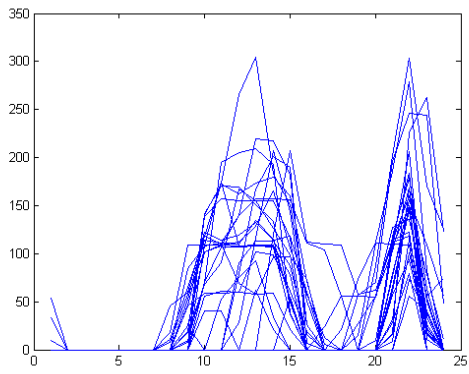
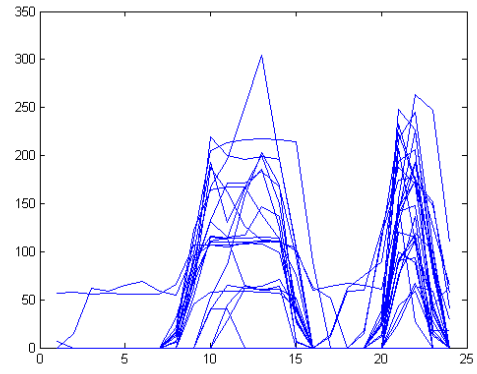
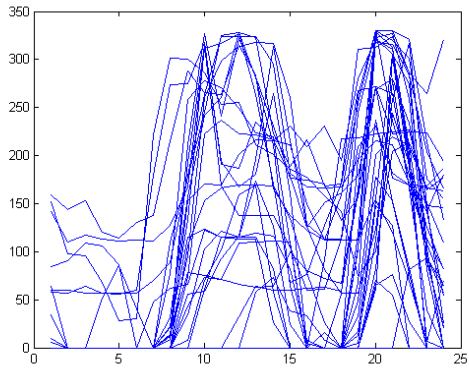
Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστική σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 10 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας (Q,H)

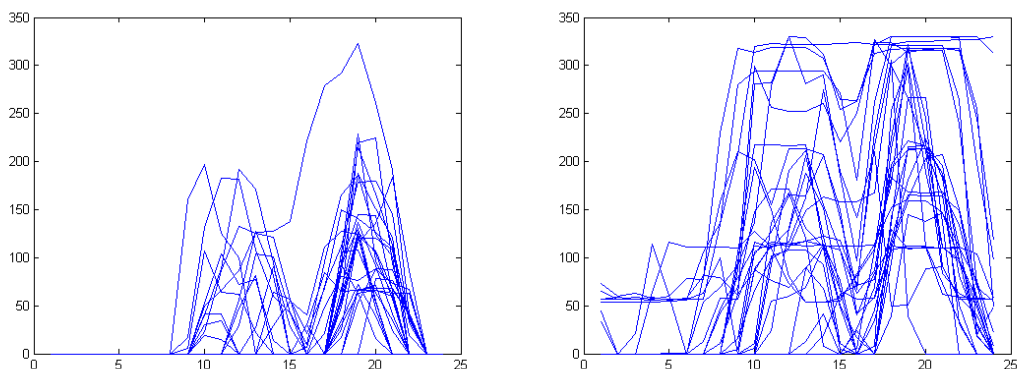
Ενεργειακά αποτελέσματα:

Νέος συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ: 13,499 %

Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (MW) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, για κάθε μήνα του έτους:







Σχήμα 3.4 Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (σε MW ισχύος) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, ανά μήνα, με τη λειτουργία αντλίας 10 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Συνολικά οικονομικά οφέλη ή απώλειες κάθε χρόνο σε €	1.201.560,8
Συνολική ενέργεια που αγοράζεται για τη λειτουργία των αντλιών κάθε χρόνο σε MWh	31.733,7
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους χωρίς τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	364.526
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους με τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	390232,1
Ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας %	7,052
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης σε MWh	6.798,7
Συνολικός όγκος νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε m <sup>3</sup>	71,6
Συνολική ενέργεια νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε MWh	0,0137
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης χωρίς τις υπερχειλίσεις σε MWh	6.798,6
Ποσοστό ενεργειακών απωλειών (χωρίς υπερχειλίσεις) σε σχέση με την προσδιδόμενη ενέργεια	21,42

Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτικά ενεργειακά αποτελέσματα από τη λειτουργία αντλίας 10 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Οικονομικά αποτελέσματα:

Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε €	4.500.000
Κόστος αγωγού σε €	151.734,4
Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού σε €	900.000
Συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης σε €	5.551.734,5
Συνολικό κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση για ένα χρόνο σε €	2.538.697
Συνολικό κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρόνο σε €	3.740.257,8
Τελικό κέρδος ή ζημία σε παρούσα αξία για 20 χρόνια λειτουργίας σε €	6.245.368,5

Πίνακας 3.4 Οικονομικά αποτελέσματα από την εγκατάσταση και λειτουργία αντλίας 10 MW με 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

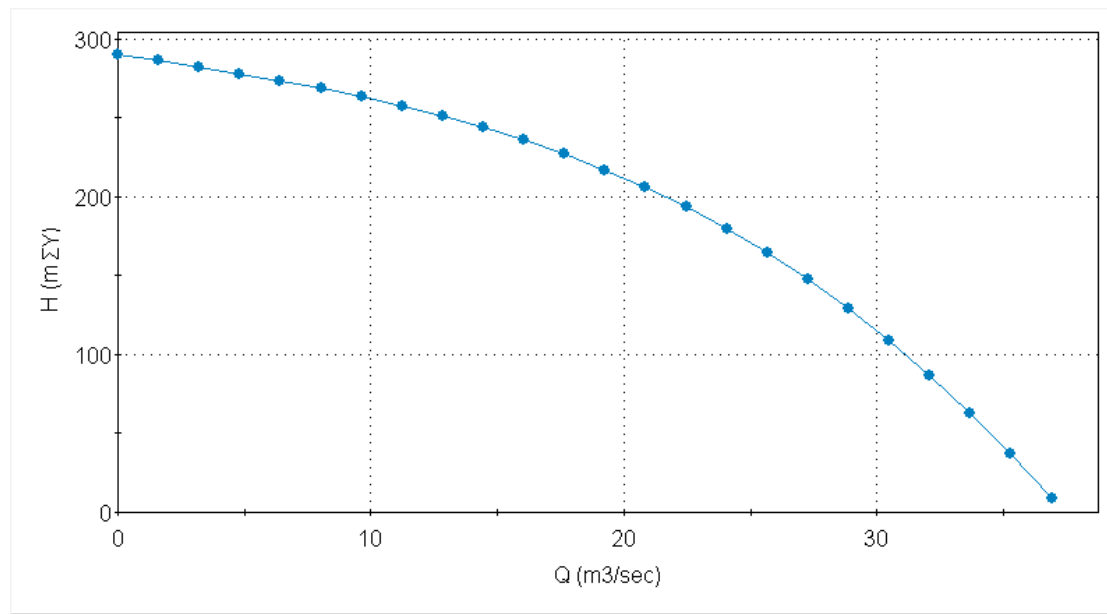
### 3.2 Αντλία ονομαστικής ισχύος 30 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα

Βασικά στοιχεία αντλίας:

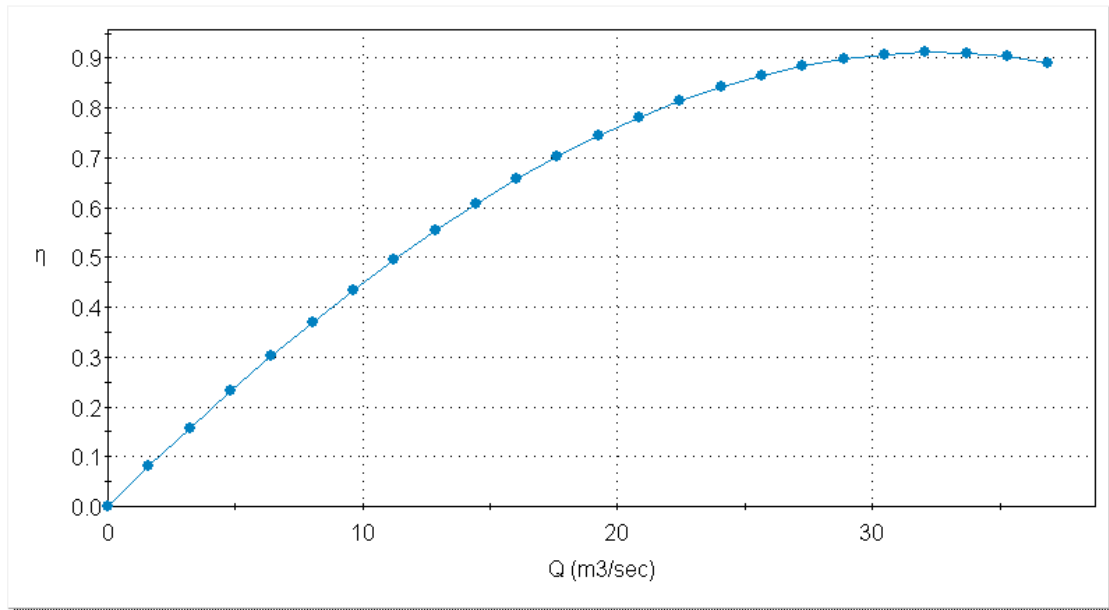
Όνομαστική Ισχύς P (MW)	30
Όνομαστική Παροχή Q (m <sup>3</sup> /sec)	32,085
Όνομαστικό Ύψος H (mΣΥ)	86,9
Ολικός βαθμός απόδοσης $\eta$	0,912
Ταχύτητα Περιστροφής n (rpm)	333,333
Ειδικός αριθμός στροφών $n_s$	66,338
Περιφερειακή Ταχύτητα U <sub>2</sub> (m/sec)	38,280
Εξωτερική Διάμετρος Πτερωτής D <sub>2</sub> (m)	2,193
Αδιάστατη Παράμετρος ύψους $\Psi$	1,164
Παράμετρος Σπηλαίωσης $\sigma_{kp}$	0,325
Μέγιστο ύψος τοποθέτησης της Αντλίας H <sub>E</sub> (m)	- 18,5

Πίνακας 3.5 Βασικά στοιχεία αντλίας 30 MW

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας συσχετίζοντας το ύψος λειτουργίας H (mΣΥ) και το βαθμό απόδοσης  $\eta$  για διάφορες τιμές της παροχής Q (m<sup>3</sup>/sec):



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 30 MW (Q,H)



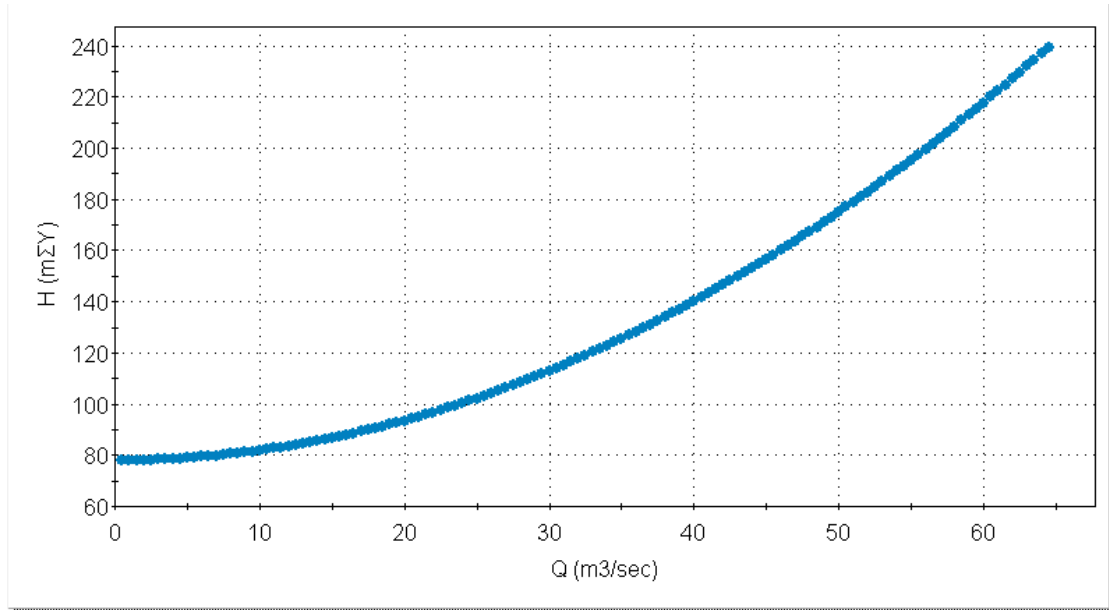
Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 30 MW (Q,η)

Βασικά στοιχεία σωλήνωσης:

Εξωτερική Διάμετρος D (m)	1,605
Πάχος αγωγού e (mm)	10,31
Μήκος Αγωγού L (m)	362,083
Βάρος αγωγού ανά μονάδα μήκους m/L (kg/m)	408,088
Αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών λ	0,01255
Γραμμικές απώλειες σωλήνωσης δh <sub>L</sub> (mΣΥ)	36,3
Συνολικές υδραυλικές απώλειες δh (mΣΥ)	39,9

Πίνακας 3.6 Βασικά στοιχεία σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 30 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Ενώ για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης υπολογίζουμε το συντελεστή ζ από τη Σχέση 34 και έχουμε:  $\zeta = 0,039$ . Όπως έχουμε εξηγήσει η χαρακτηριστική της σωλήνωσης δεν είναι ίδια για κάθε ημέρα, προκειμένου όμως να τη σχεδιάσουμε για να έχουμε εποπτικά μία τάξη μεγέθους θα επιλέξουμε μία ημέρα στην τύχη. Έτσι επιλέξαμε την 100<sup>η</sup> ημέρα του έτους για να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης για τον αγωγό με τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι έχουμε:

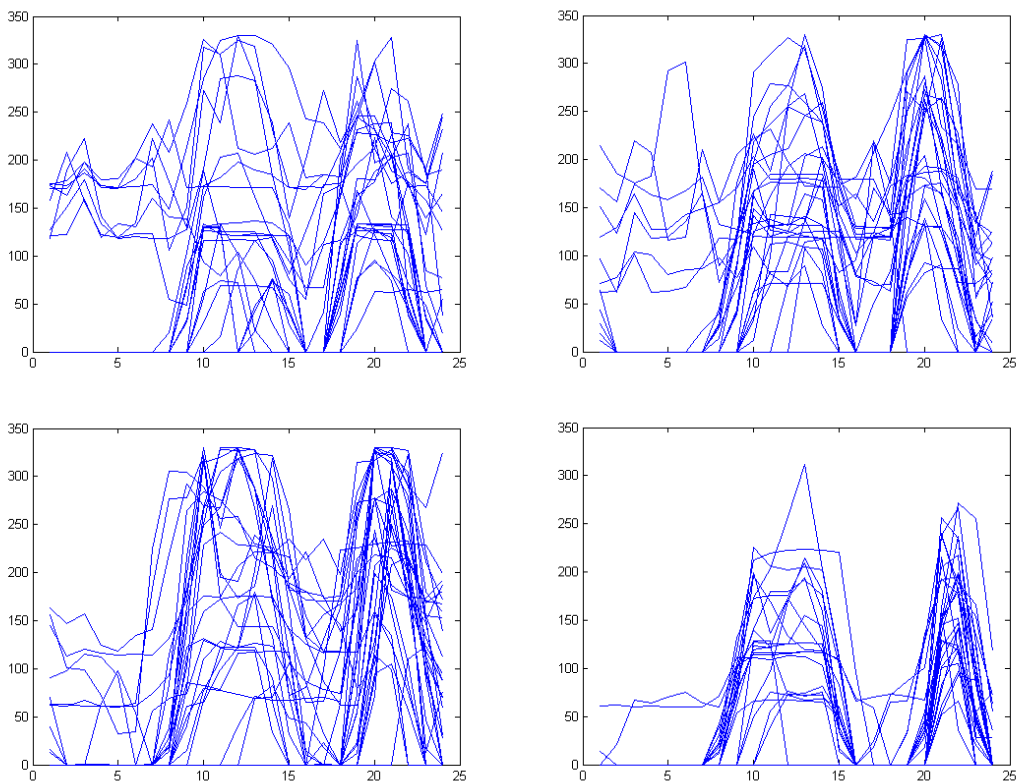


Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστική σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 30 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας (Q,H)

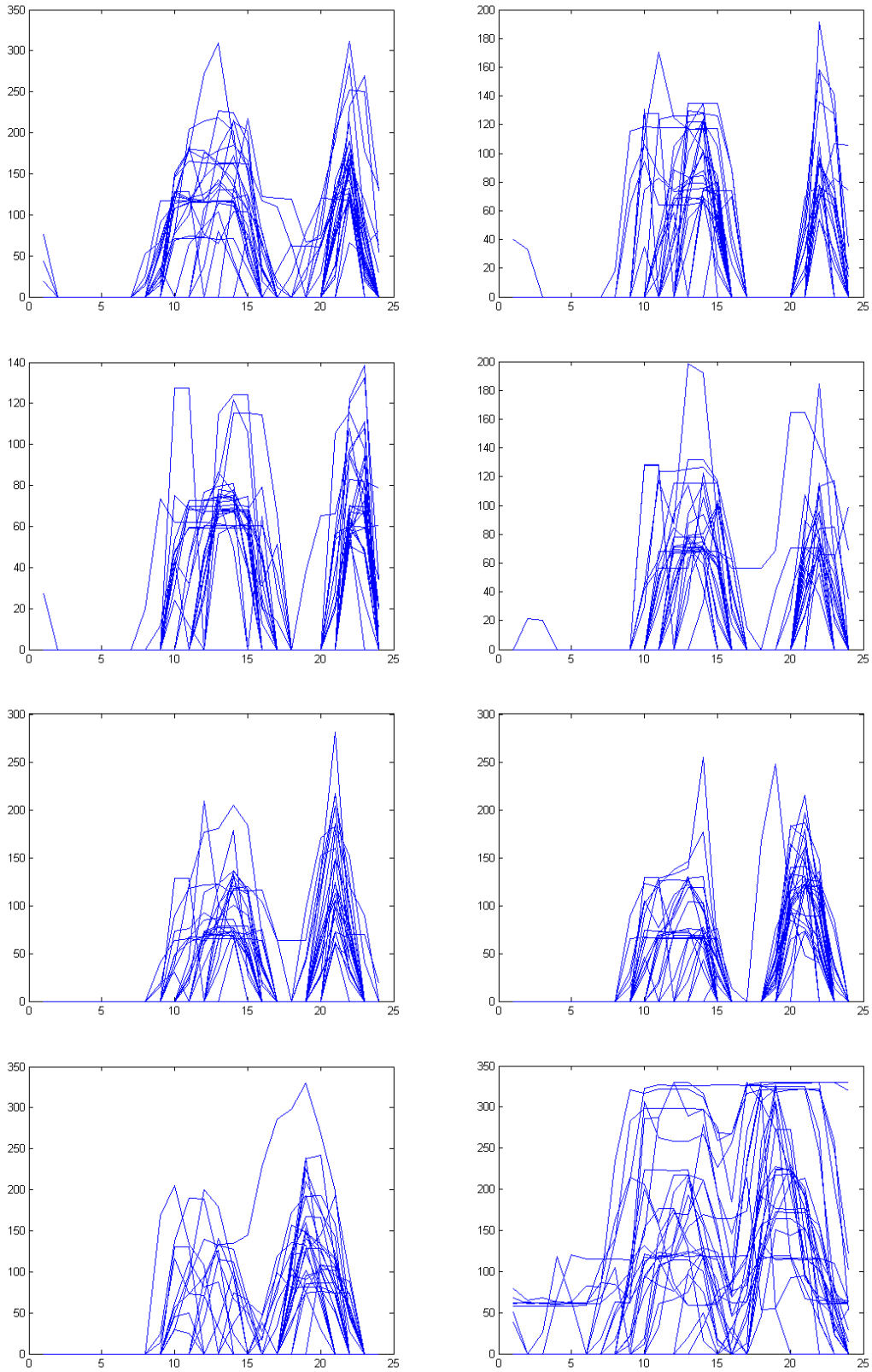
Ενεργειακά αποτελέσματα:

Νέος συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ: 14,571%

Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (MW) υδροστροβίλων Πουρνάρι I, για κάθε μήνα του έτους:







Σχήμα 3.8 Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (σε MW ισχύος) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, ανά μήνα, με τη λειτουργία αντλίας 30 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Συνολικά οικονομικά οφέλη ή απώλειες κάθε χρόνο σε €	1.471.329,5
Συνολική ενέργεια που αγοράζεται για τη λειτουργία των αντλιών κάθε χρόνο σε MWh	84.723,5
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους χωρίς τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	364.526
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους με τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	421.221,2
Ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας %	15,55
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης σε MWh	29.728,8
Συνολικός όγκος νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε m <sup>3</sup>	85,3
Συνολική ενέργεια νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε MWh	0,0145
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης χωρίς τις υπερχειλίσεις σε MWh	29.728,7
Ποσοστό ενεργειακών απωλειών (χωρίς υπερχειλίσεις) σε σχέση με την προσδιδόμενη ενέργεια	35,09

Πίνακας 3.7 Συγκεντρωτικά ενεργειακά αποτελέσματα από τη λειτουργία αντλίας 30 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Οικονομικά αποτελέσματα:

Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε €	13.500.000
Κόστος αγωγού σε €	369.404,5
Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού σε €	2.700.000
Συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης σε €	16.569.405
Συνολικό κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση για ένα χρόνο σε €	6.777.882
Συνολικό κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρόνο σε €	8.249.211,5
Τελικό κέρδος ή ζημία σε παρούσα αξία για 20 χρόνια λειτουργίας σε €	-2.123.672,3

Πίνακας 3.8 Οικονομικά αποτελέσματα από την εγκατάσταση και λειτουργία αντλίας 30 MW με 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

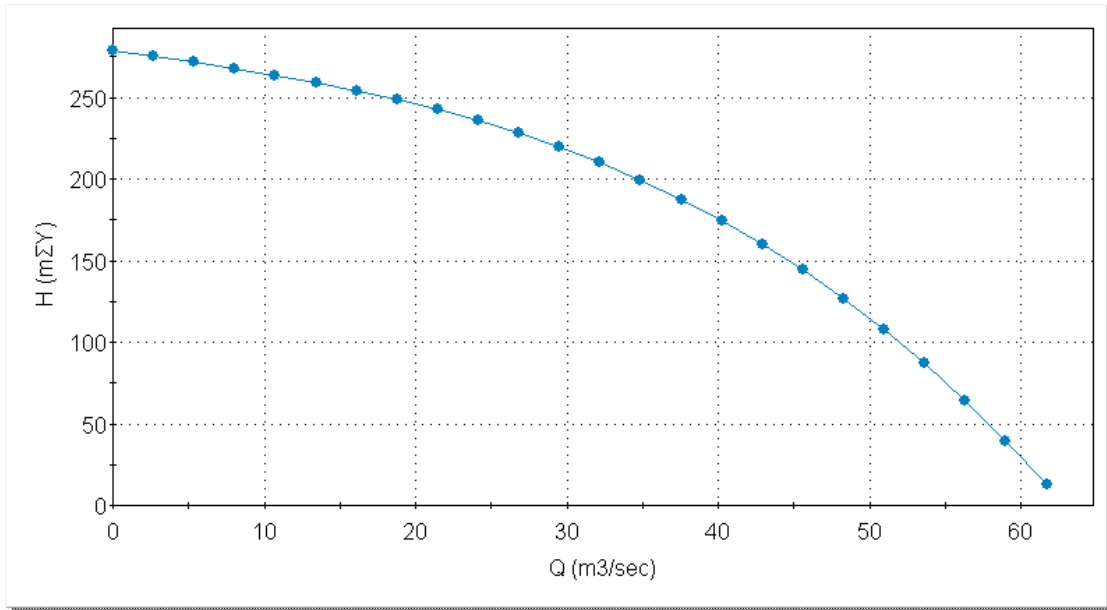
### 3.3 Αντλία ονομαστικής ισχύος 50 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα

Βασικά στοιχεία αντλίας:

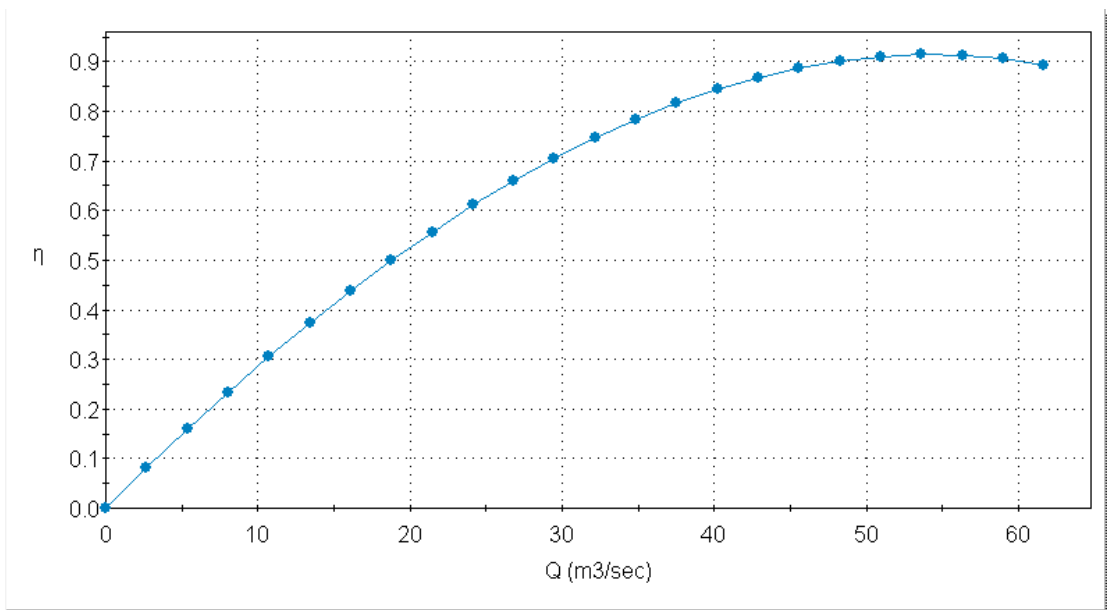
Ονομαστική Ισχύς P (MW)	50
Ονομαστική Παροχή Q (m <sup>3</sup> /sec)	53,639
Ονομαστικό Ύψος H (mΣΥ)	86,9
Ολικός βαθμός απόδοσης η	0,915
Ταχύτητα Περιστροφής n (rpm)	250
Ειδικός αριθμός στροφών n <sub>q</sub>	64,33
Περιφερειακή Ταχύτητα U <sub>2</sub> (m/sec)	38,276
Εξωτερική Διάμετρος Πτερωτής D <sub>2</sub> (m)	2,924
Αδιάστατη Παράμετρος ύψους Ψ	1,164
Παράμετρος Σπηλαίωσης σ <sub>κρ</sub>	0,312
Μέγιστο ύψος τοποθέτησης της Αντλίας H <sub>E</sub> (m)	- 17,3

Πίνακας 3.9 Βασικά στοιχεία αντλίας 50 MW

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας συσχετίζοντας το ύψος λειτουργίας H (mΣΥ) και το βαθμό απόδοσης η για διάφορες τιμές της παροχής Q (m<sup>3</sup>/sec):



Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 50 MW (Q,H)



Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 50 MW (Q,η)

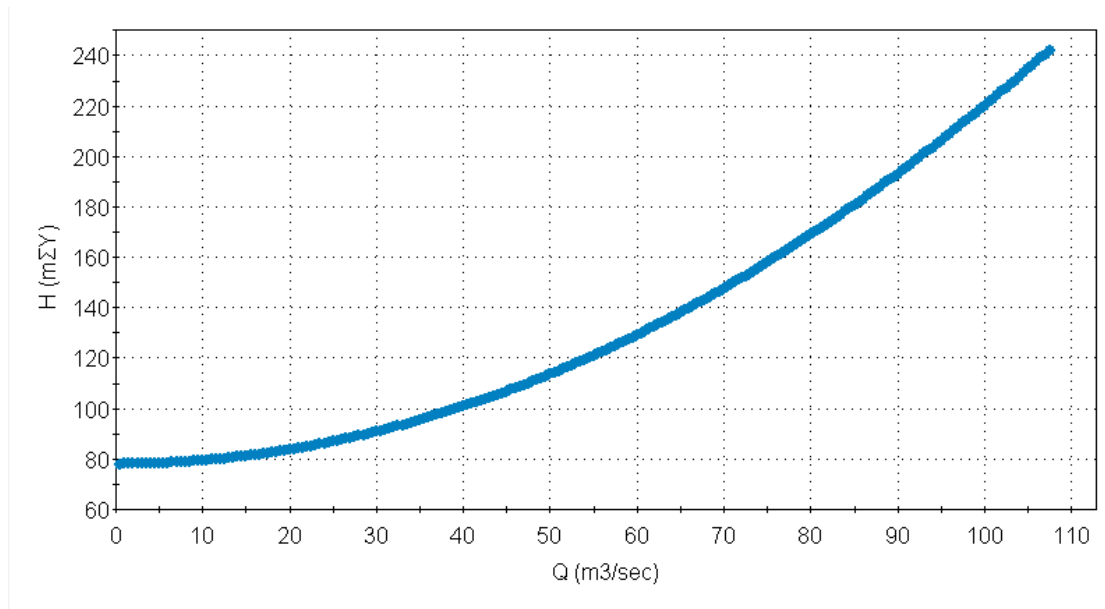
Βασικά στοιχεία σωλήνωσης:

Εξωτερική Διάμετρος D (m)	1,948
---------------------------	-------

Πάχος αγωγού e (mm)	11,13
Μήκος Αγωγού L (m)	362,083
Βάρος αγωγού ανά μονάδα μήκους m/L (kg/m)	534,216
Αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών λ	0,01209
Γραμμικές απώλειες σωλήνωσης δ <sub>hL</sub> (mΣΥ)	37,1
Συνολικές υδραυλικές απώλειες δ <sub>h</sub> (mΣΥ)	40,8

Πίνακας 3.10 Βασικά στοιχεία σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 50 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Ενώ για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης υπολογίζουμε το συντελεστή ζ από τη Σχέση 34 και έχουμε:  $\zeta = 0,014$ . Όπως έχουμε εξηγήσει η χαρακτηριστική της σωλήνωσης δεν είναι ίδια για κάθε ημέρα, προκειμένου όμως να τη σχεδιάσουμε για να έχουμε εποπτικά μία τάξη μεγέθους θα επιλέξουμε μία ημέρα στην τύχη. Έτσι επιλέξαμε την 100<sup>η</sup> ημέρα του έτους για να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης για τον αγωγό με τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι έχουμε:

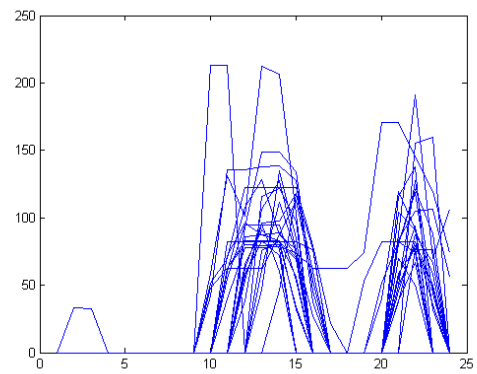
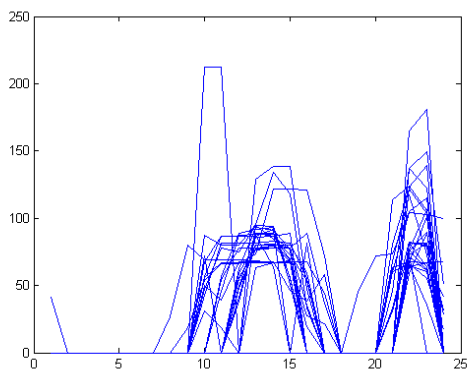
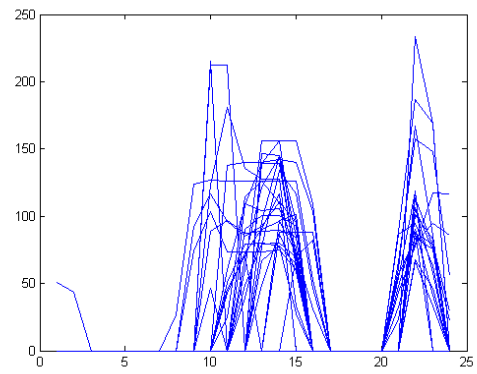
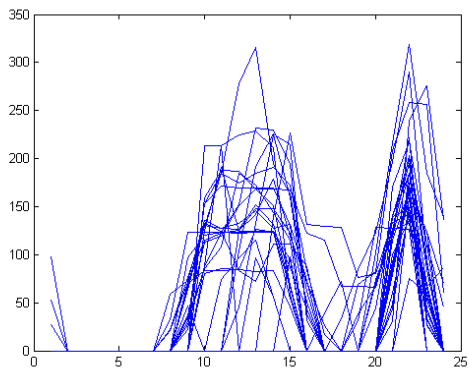
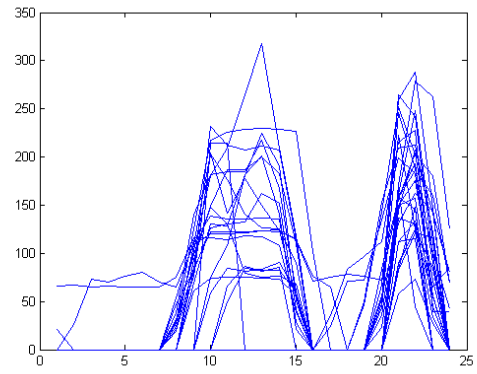
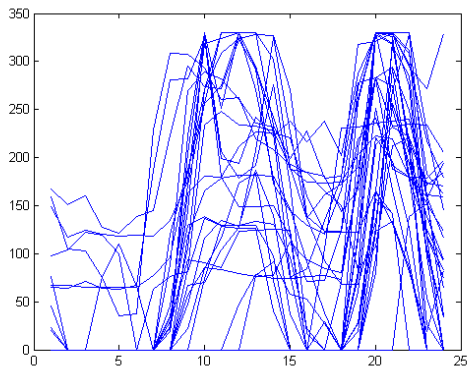
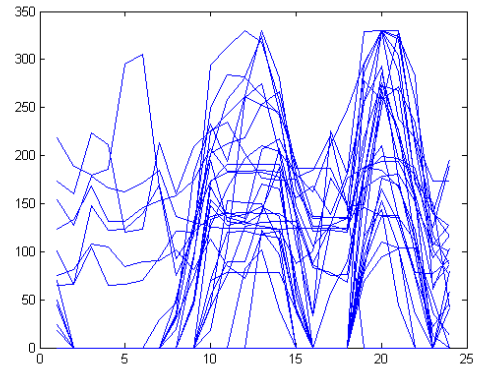
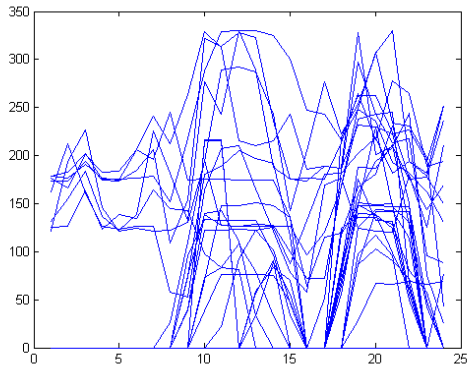


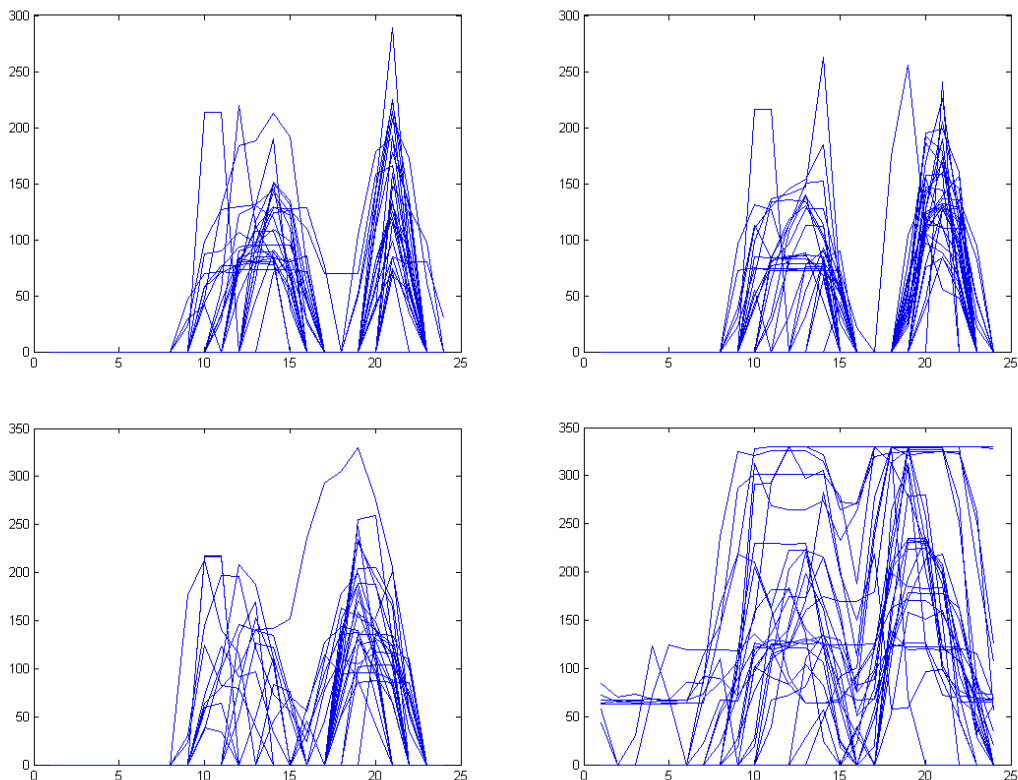
Σχήμα 3.11 Χαρακτηριστική σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 50 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας (Q,H)

Ενεργειακά αποτελέσματα:

Νέος συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ: 15,610 %

Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (MW) υδροστροβίλων Πουρνάρι I, για κάθε μήνα του έτους:





Σχήμα 3.12 Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (σε MW ισχύος) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, ανά μήνα, με τη λειτουργία αντλίας 50 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Συνολικά οικονομικά οφέλη ή απώλειες κάθε χρόνο σε €	1.328.783
Συνολική ενέργεια που αγοράζεται για τη λειτουργία των αντλιών κάθε χρόνο σε MWh	141.122,2
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους χωρίς τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	364.526
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους με τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	451.251,6
Ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας %	23,79
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης σε MWh	56.998,4
Συνολικός όγκος νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε m <sup>3</sup>	187.711,3
Συνολική ενέργεια νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε MWh	35,9
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης χωρίς τις υπερχειλίσεις σε MWh	56.962,6
Ποσοστό ενεργειακών απωλειών (χωρίς υπερχειλίσεις) σε σχέση με την προσδιδόμενη ενέργεια	40,36

Πίνακας 3.11 Συγκεντρωτικά ενεργειακά αποτελέσματα από τη λειτουργία αντλίας 50 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Οικονομικά αποτελέσματα:

Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε €	22.500.000
Κόστος αγωγού σε €	483.576,5
Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού σε €	4.500.000
Συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης σε €	27.483.576
Συνολικό κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση για ένα χρόνο σε €	11.289.768
Συνολικό κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρόνο σε €	12.618.551
Τελικό κέρδος ή ζημία σε παρούσα αξία για 20 χρόνια λειτουργίας σε €	-14.437.386

Πίνακας 3.12 Οικονομικά αποτελέσματα από την εγκατάσταση και λειτουργία αντλίας 50 MW με 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

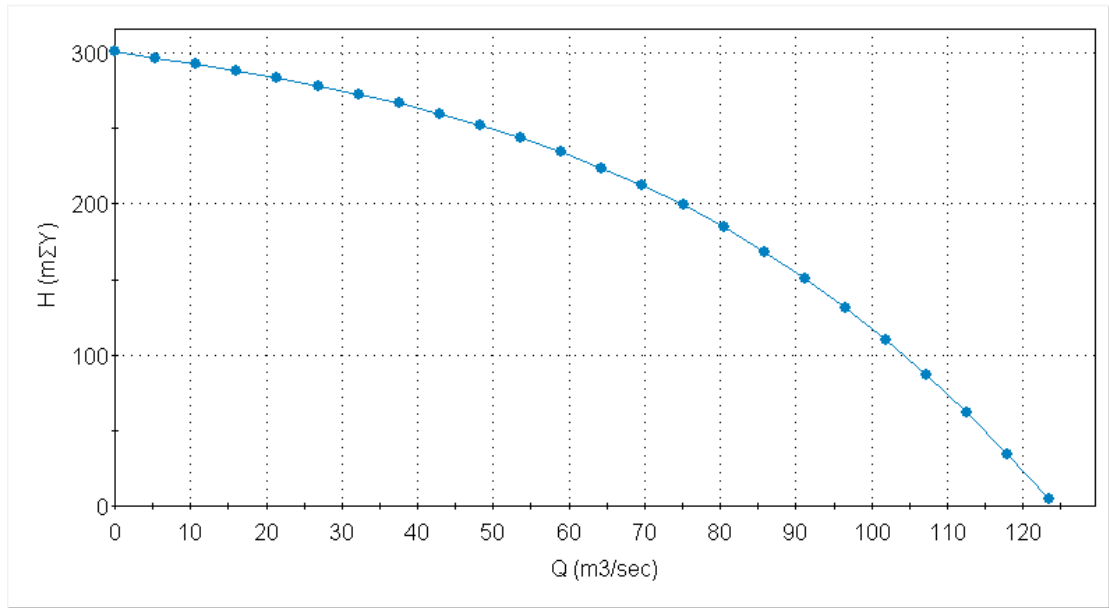
### 3.4 Αντλία ονομαστικής ισχύος 100 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα

Βασικά στοιχεία αντλίας:

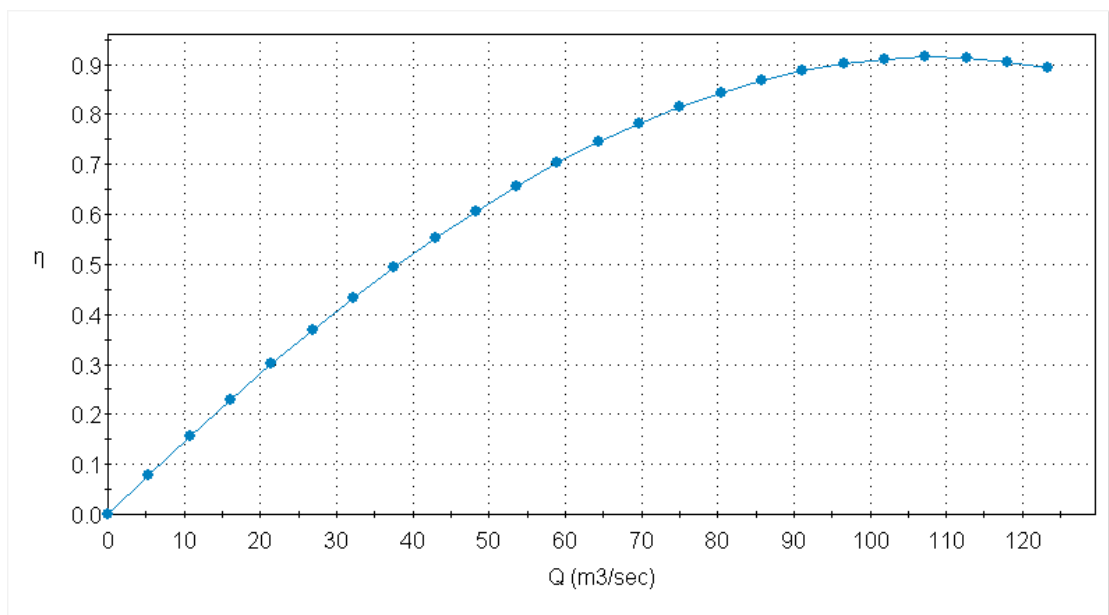
Ονομαστική Ισχύς P (MW)	100
Ονομαστική Παροχή Q (m <sup>3</sup> /sec)	107,288
Ονομαστικό Ύψος H (mΣΥ)	86,9
Ολικός βαθμός απόδοσης η	0,915
Ταχύτητα Περιστροφής n (rpm)	187,5
Ειδικός αριθμός στροφών n <sub>q</sub>	68,236
Περιφερειακή Ταχύτητα U <sub>2</sub> (m/sec)	38,284
Εξωτερική Διάμετρος Πτερωτής D <sub>2</sub> (m)	3,9
Αδιάστατη Παράμετρος ύψους Ψ	1,163
Παράμετρος Σπηλαίωσης σ <sub>κρ</sub>	0,338
Μέγιστο ύψος τοποθέτησης της Αντλίας H <sub>E</sub> (m)	- 19,6

Πίνακας 3.13 Βασικά στοιχεία αντλίας 100 MW

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας συσχετίζοντας το ύψος λειτουργίας H (mΣΥ) και το βαθμό απόδοσης η για διάφορες τιμές της παροχής Q (m<sup>3</sup>/sec):



Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 100 MW (Q,H)



Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 100 MW (Q,η)

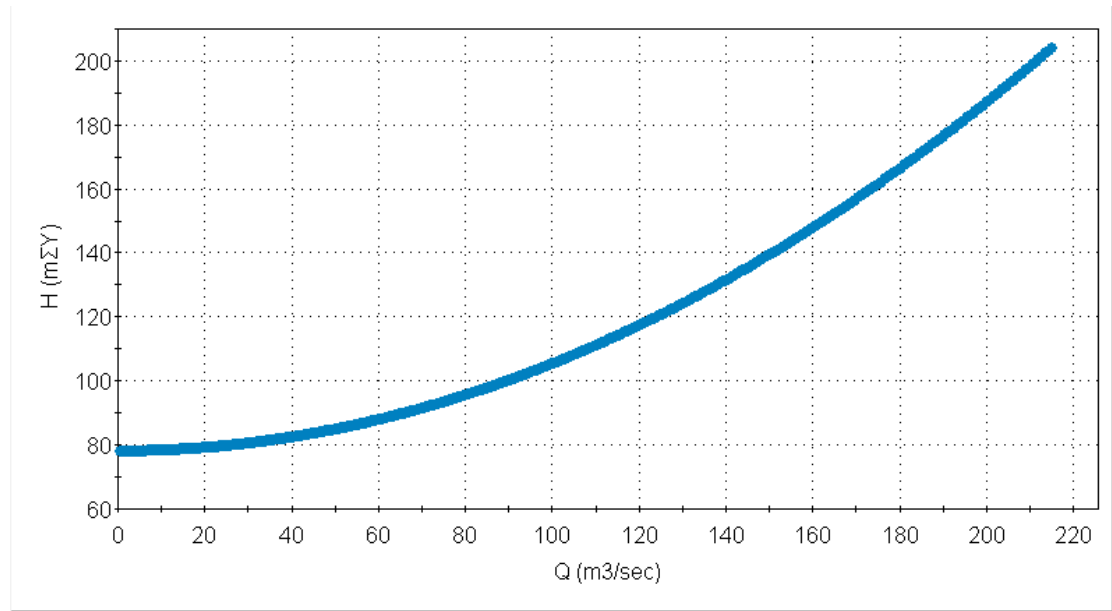
Βασικά στοιχεία σωλήνωσης:

Εξωτερική Διάμετρος D (m)	2,678
Πάχος αγωγού e (mm)	15,87
Μήκος Αγωγού L (m)	362,083
Βάρος αγωγού ανά μονάδα μήκους m/L (kg/m)	1047,614
Αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών λ	0,01138
Γραμμικές απώλειες σωλήνωσης δ <sub>h</sub> (mΣY)	28,5
Συνολικές υδραυλικές απώλειες δ <sub>h</sub> (mΣY)	31,3

Πίνακας 3.14 Βασικά στοιχεία σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 100 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας



Ενώ για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης υπολογίζουμε το συντελεστή  $\zeta$  από τη Σχέση 34 και έχουμε:  $\zeta = 0,0027$ . Όπως έχουμε εξηγήσει η χαρακτηριστική της σωλήνωσης δεν είναι ίδια για κάθε ημέρα, προκειμένου όμως να τη σχεδιάσουμε για να έχουμε εποπτικά μία τάξη μεγέθους θα επιλέξουμε μία ημέρα στην τύχη. Έτσι επιλέξαμε την 100<sup>η</sup> ημέρα του έτους για να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης για τον αγωγό με τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι έχουμε:

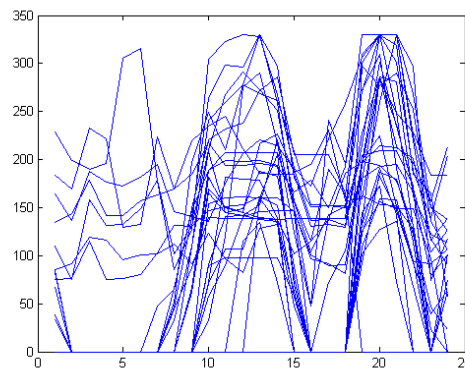
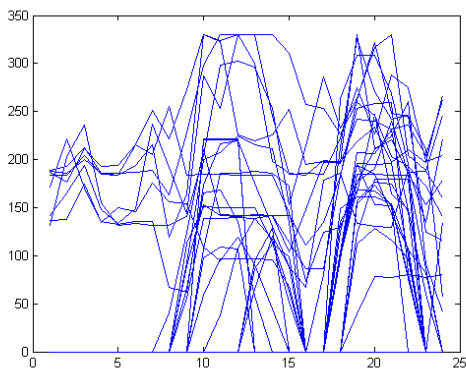


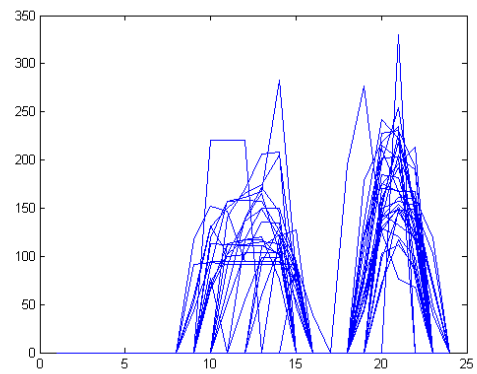
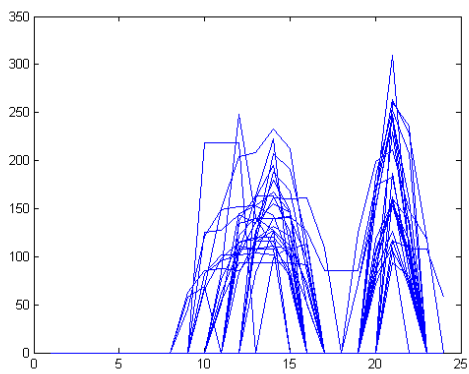
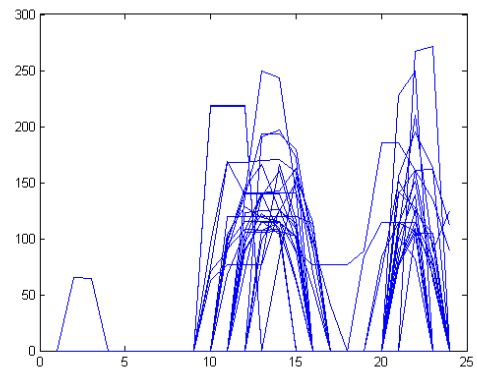
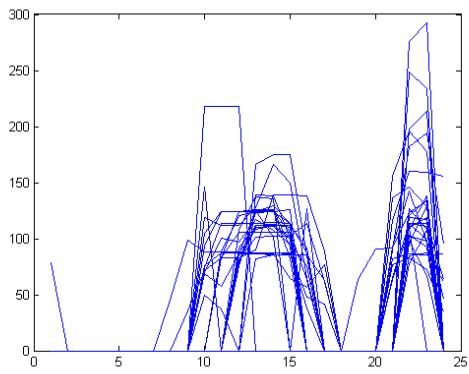
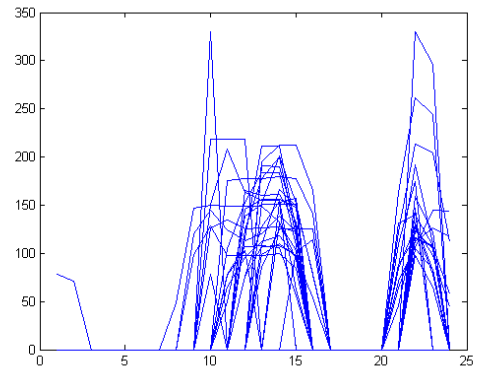
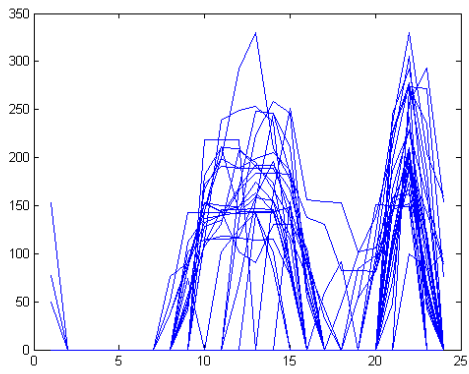
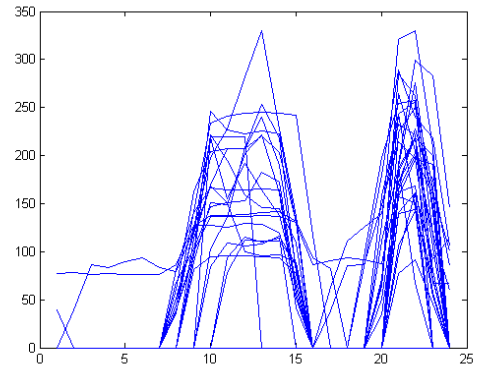
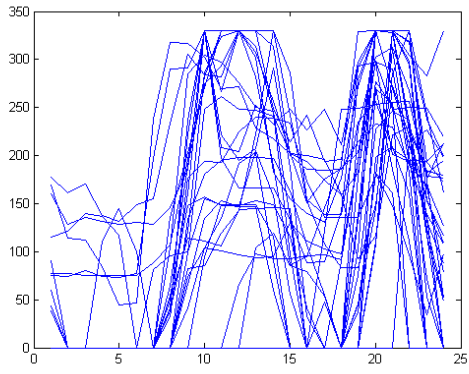
Σχήμα 3.15 Χαρακτηριστική σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 100 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας (Q,H)

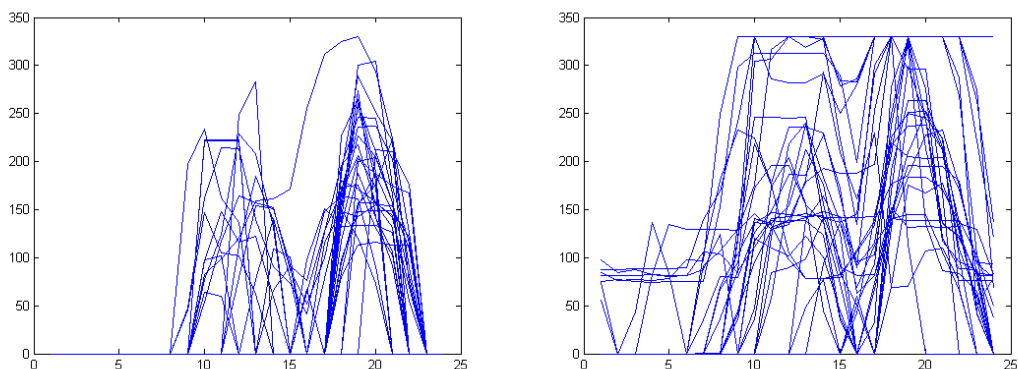
Ενεργειακά αποτελέσματα:

Νέος συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ: 18,325 %

Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (MW) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, για κάθε μήνα του έτους:







Σχήμα 3.16 Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (σε MW ισχύος) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, ανά μήνα, με τη λειτουργία αντλίας 100 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Συνολικά οικονομικά οφέλη ή απώλειες κάθε χρόνο σε €	2.396.052
Συνολική ενέργεια που αγοράζεται για τη λειτουργία των αντλιών κάθε χρόνο σε MWh	270.549,4
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους χωρίς τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	364.526
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους με τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	529.749,7
Ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας %	45,33
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης σε MWh	110.282,7
Συνολικός όγκος νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε m <sup>3</sup>	3.676.631
Συνολική ενέργεια νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε MWh	702,4
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης χωρίς τις υπερχειλίσεις σε MWh	109.580,3
Ποσοστό ενεργειακών απωλειών (χωρίς υπερχειλίσεις) σε σχέση με την προσδιδόμενη ενέργεια	40,50

Πίνακας 3.15 Συγκεντρωτικά ενεργειακά αποτελέσματα από τη λειτουργία αντλίας 100 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Οικονομικά αποτελέσματα:

Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε €	45.000.000
Κόστος αγωγού σε €	948.308,5
Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού σε €	9.000.000
Συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης σε €	54.948.308
Συνολικό κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση για ένα χρόνο σε €	21.643.948
Συνολικό κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρόνο σε €	24.040.000
Τελικό κέρδος ή ζημία σε παρούσα αξία για 20 χρόνια λειτουργίας σε €	-31.423.512

Πίνακας 3.16 Οικονομικά αποτελέσματα από την εγκατάσταση και λειτουργία αντλίας 100 MW με 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

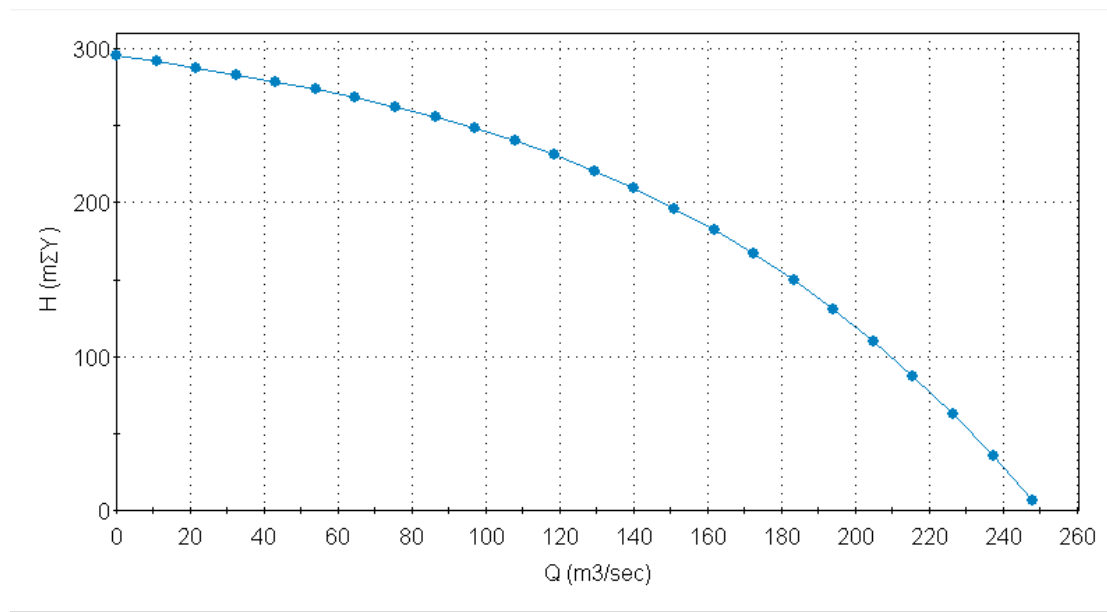
### 3.5 Αντλία ονομαστικής ισχύος 200 MW και 6 ώρες λειτουργίας κάθε ημέρα

Βασικά στοιχεία αντλίας:

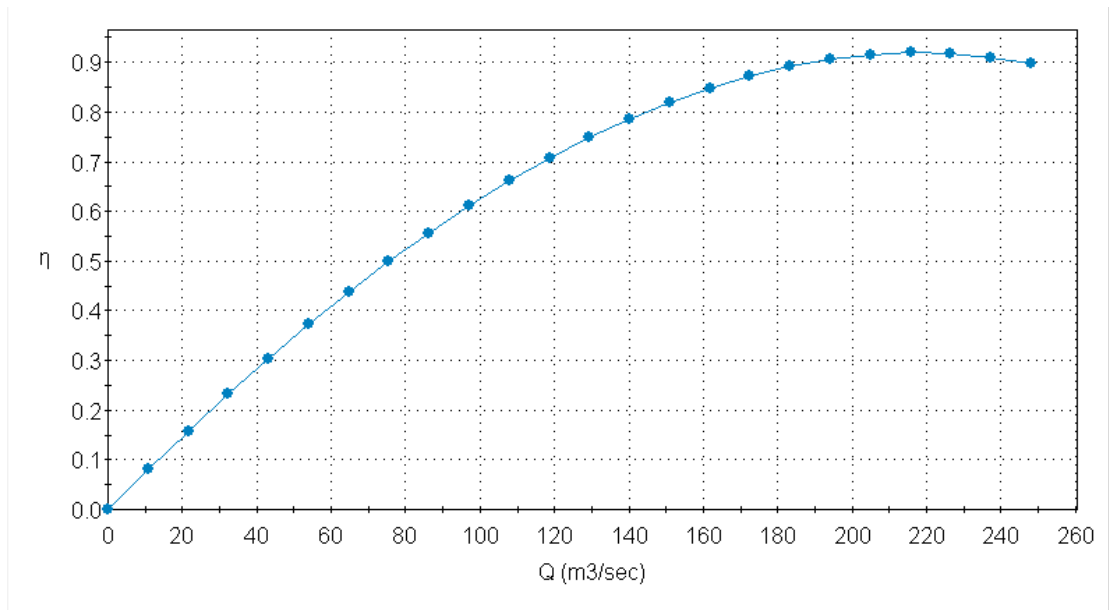
Όνομαστική Ισχύς P (MW)	200
Όνομαστική Παροχή Q (m <sup>3</sup> /sec)	215,711
Όνομαστικό Ύψος H (mΣΥ)	86,9
Ολικός βαθμός απόδοσης $\eta$	0,919
Ταχύτητα Περιστροφής n (rpm)	130,4
Ειδικός αριθμός στροφών $n_s$	67,308
Περιφερειακή Ταχύτητα U <sub>2</sub> (m/sec)	38,282
Εξωτερική Διάμετρος Πτερωτής D <sub>2</sub> (m)	5,605
Αδιάστατη Παράμετρος ύψους $\Psi$	1,163
Παράμετρος Σπηλαίωσης $\sigma_{kp}$	0,332
Μέγιστο ύψος τοποθέτησης της Αντλίας H <sub>E</sub> (m)	- 19,02

Πίνακας 3.17 Βασικά στοιχεία αντλίας 200 MW

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας συσχετίζοντας το ύψος λειτουργίας H (mΣΥ) και το βαθμό απόδοσης  $\eta$  για διάφορες τιμές της παροχής Q (m<sup>3</sup>/sec):



Σχήμα 3.17 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 200 MW (Q,H)



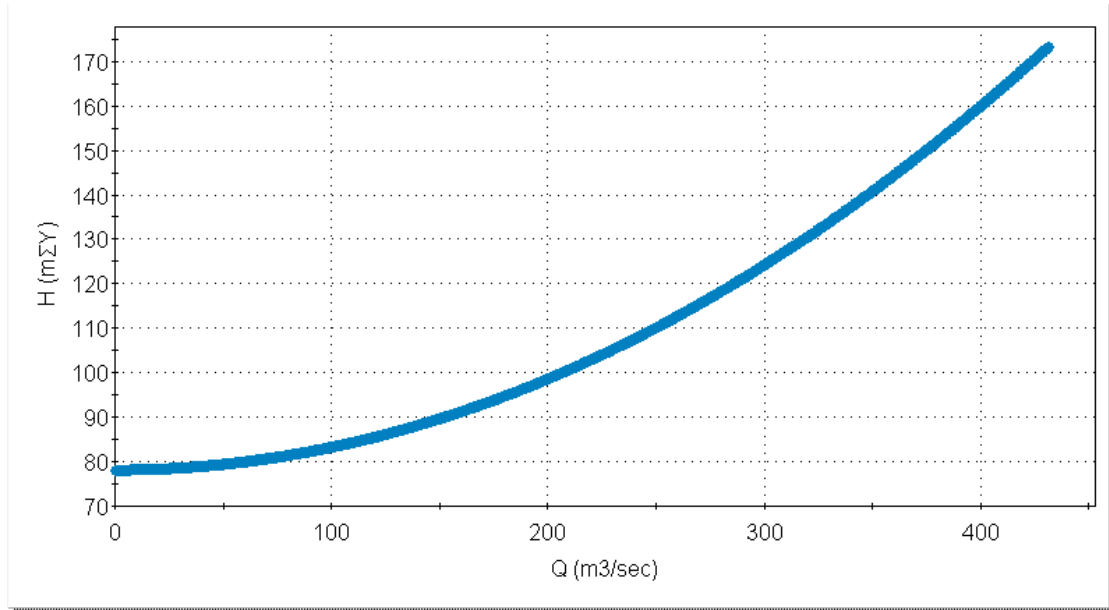
Σχήμα 3.18 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας 200 MW (Q,η)

Βασικά στοιχεία σωλήνωσης:

Εξωτερική Διάμετρος D (m)	3,7
Πάχος αγωγού e (mm)	19,05
Μήκος Αγωγού L (m)	362,083
Βάρος αγωγού ανά μονάδα μήκους m/L (kg/m)	1735,317
Αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών λ	0,01073
Γραμμικές απώλειες σωλήνωσης δ <sub>hL</sub> (mΣΥ)	21,6
Συνολικές υδραυλικές απώλειες δ <sub>h</sub> (mΣΥ)	23,7

Πίνακας 3.18 Βασικά στοιχεία σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 200 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Ενώ για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης υπολογίζουμε το συντελεστή ζ από τη Σχέση 34 και έχουμε:  $\zeta = 0,00051$ . Όπως έχουμε εξηγήσει η χαρακτηριστική της σωλήνωσης δεν είναι ίδια για κάθε ημέρα, προκειμένου όμως να τη σχεδιάσουμε για να έχουμε εποπτικά μία τάξη μεγέθους θα επιλέξουμε μία ημέρα στην τύχη. Έτσι επιλέξαμε την 100<sup>η</sup> ημέρα του έτους για να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης για τον αγωγό με τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι έχουμε:

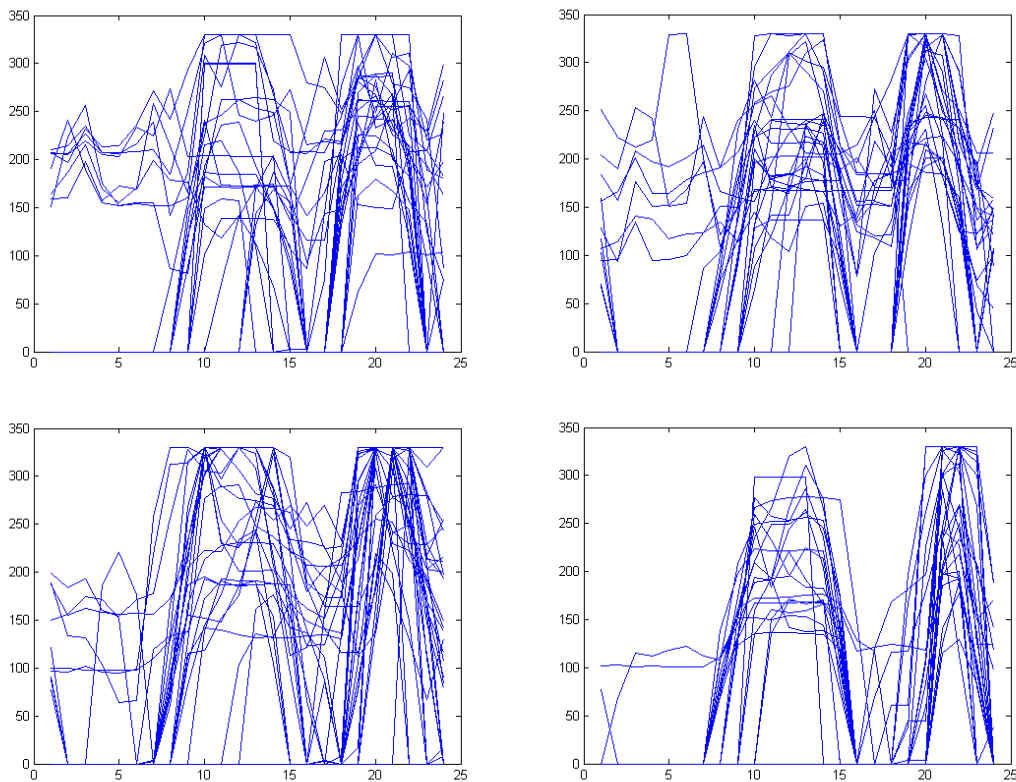


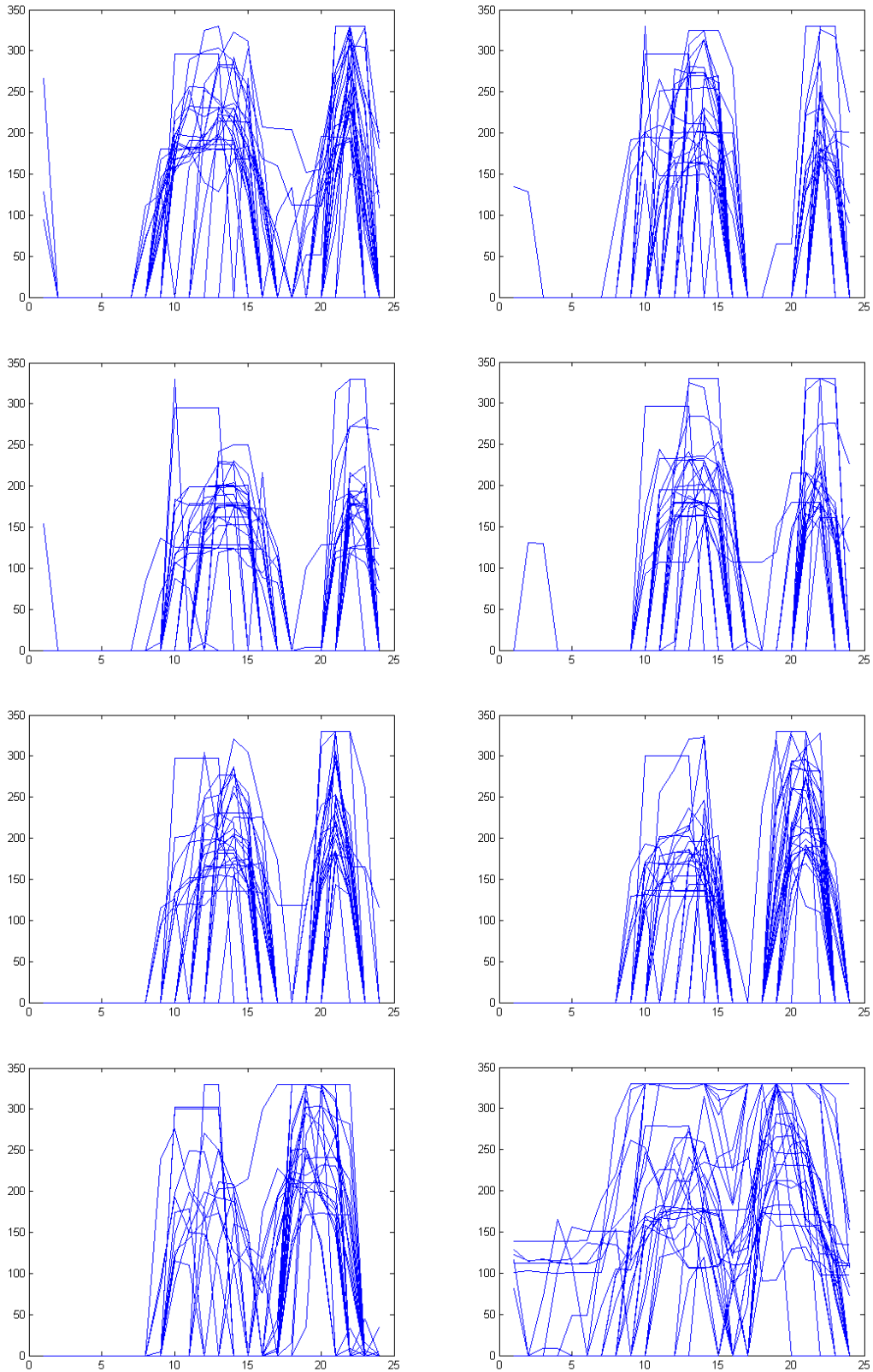
Σχήμα 3.19 Χαρακτηριστική σωλήνωσης κατάθλιψης για αντλία 200 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας (Q,H)

Ενεργειακά αποτελέσματα:

Νέος συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ: 23,693 %

Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (MW) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, για κάθε μήνα του έτους:





Σχήμα 3.20 Νέες ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής (σε MW ισχύος) υδροστροβίλων Πουρνάρι Ι, ανά μήνα, με τη λειτουργία αντλίας 200 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Συνολικά οικονομικά οφέλη ή απώλειες κάθε χρόνο σε €	5.389.424
Συνολική ενέργεια που αγοράζεται για τη λειτουργία των αντλιών κάθε χρόνο σε MWh	515.333,7
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους χωρίς τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	364.526
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους με τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	684.910,4
Ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας %	87,89
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης σε MWh	204.559,5
Συνολικός όγκος νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε m <sup>3</sup>	31.000.918
Συνολική ενέργεια νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε MWh	5.922,8
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης χωρίς τις υπερχειλίσεις σε MWh	198.636,7
Ποσοστό ενεργειακών απωλειών (χωρίς υπερχειλίσεις) σε σχέση με την προσδιόδμενη ενέργεια	38,55

Πίνακας 3.19 Συγκεντρωτικά ενεργειακά αποτελέσματα από τη λειτουργία αντλίας 200 MW, 6 ώρες κάθε μέρα

Οικονομικά αποτελέσματα:

Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε €	90.000.000
Κόστος αγωγού σε €	1.570.823
Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού σε €	18.000.000
Συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης σε €	109.570.824
Συνολικό κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση για ένα χρόνο σε €	41.226.676
Συνολικό κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρόνο σε €	46.616.100
Τελικό κέρδος ή ζημία σε παρούσα αξία για 20 χρόνια λειτουργίας σε €	-56.656.656

Πίνακας 3.20 Οικονομικά αποτελέσματα από την εγκατάσταση και λειτουργία αντλίας 200 MW με 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

### 3.6 Συνολικός σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων μεταβάλλονται καθώς αυξάνει η ονομαστική ισχύ της αντλίας. Στην ενότητα αυτή θα επισημάνουμε τις μεταβολές αυτές για κάθε μέρος της εγκατάστασης, προκειμένου να εντοπίσουμε την τάση που παρουσιάζουν τα διάφορα μεγέθη καθώς μεταβάλλεται το ονομαστικό μέγεθος της αντλίας.

Αρχικά, παρατηρώντας τα βασικά μεγέθη της αντλίας, μπορούμε να εντοπίσουμε την αναλογική σχέση μεταξύ της ονομαστικής παροχής με την ονομαστική ισχύ, καθώς το ονομαστικό ύψος παραμένει σταθερό. Αυτό είναι λογικό και θεμιτό, αφού ο στόχος μας, καθώς αυξάνουμε το μέγεθος της αντλίας, είναι να αντλούμε και μεγαλύτερο όγκο νερού στο σταθερό ύψος που επιβάλλει η ήδη υπάρχουσα ΥΗΕ. Επίσης όπως είναι αναμενόμενο με την αύξηση της παροχής έχουμε και παράλληλη αύξηση της διαμέτρου της περωτής της αντλίας. Ενώ αντίστοιχα αυτό οδηγεί στη μείωση της ταχύτητας περιστροφής της περωτής, όπως και επιβάλλει η αντοχή των υλικών. Τέλος, πρέπει να τονίσουμε και την ταυτόχρονη αύξηση του συνολικού



βαθμού απόδοσης της αντλίας, όπως και επιβάλλεται να συμβαίνει, καθώς αυξάνει το μέγεθος της αντλίας.

Όσο αφορά τη σωλήνωση κατάθλιψη είναι λογικό να παρατηρούμε μία αυξητική τάση στην εξωτερική διάμετρο της και στο πάχος της, καθώς μεγαλώνει το μέγεθος της ονομαστικής παροχής. Αυτό είναι θεμιτό προκειμένου η ταχύτητα της ροής μέσα στον αγωγό να παραμένει σε λογικά όρια σε συμφωνία πάντα με το κόστος του αγωγού. Παράλληλα παρατηρούμε μια λογική μείωση των υδραυλικών απωλειών, καθώς αυξάνει η ονομαστική διάμετρος της σωλήνωσης, αφού οι απώλειες στα τοιχώματα περιορίζονται με την αύξηση των μεγεθών.

Εξετάζοντας τα ενεργειακά αποτελέσματα της εγκατάστασης, επιβεβαιώνουμε την αναμενόμενη αύξηση του συντελεστή φορτίου του ΥΗΣ, καθώς αυξάνει η ονομαστική ισχύς της αντλίας. Αυτό φυσικά μπορεί να επιβεβαιωθεί περαιτέρω και από τις ημερήσιες χρονοσειρές παραγωγής των υδροστροβίλων, οι οποίες καθώς αυξάνει το μέγεθος της αντλίας, παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις και τείνουν να πλησιάσουν την ονομαστική ισχύ λειτουργίας των υδροστροβίλων (330 MW). Επιπλέον τονίζουμε ότι το πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστροβίλων δεν διαταράσσεται σε σύγκριση με το αρχικό. Αλλά αντιθέτως ενισχύεται με μεγαλύτερη ισχύς λειτουργίας των υδροστροβίλων για τις ώρες που ήδη αυτοί λειτουργούσαν. Ενώ μόνο στην περίπτωση που έχουμε περίσσεια αντλούμενου όγκου νερού εισάγουμε νέες ώρες λειτουργίας εκατέρωθεν των ήδη υπαρκτών. Τέλος, για τις ημέρες που αυτοί δε λειτουργούσαν καθόλου εντάσσουμε νέες ώρες λειτουργίας, όπως ακριβώς έχουμε επεξηγήσει στην ανάλυση του προγράμματος Fortran.

Καταλήγοντας στα οικονομικά αποτελέσματα ενός τέτοιου έργου παρατηρούμε ότι μόνο η αντλία με ονομαστική ισχύ 10 MW παρουσιάζεται οικονομικά βιώσιμη σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μεγέθη που παρουσιάζουν ζημίες στο 20χρονο πλάνο λειτουργίας τους. Εξετάζοντας και τα υπόλοιπα οικονομικά μεγέθη της εγκατάστασης, παρατηρούμε ότι και οι υπόλοιπες αντλίες με ονομαστικά μεγέθη από 30 έως 200 MW αντίστοιχα φαίνεται να παρουσιάζουν κέρδη κάθε χρόνο συγκρίνοντας τα έσοδα από την ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται σε σχέση με τα έξοδα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας. Όμως, τα ετήσια κέρδη αυτά δε φαίνονται ικανά να καλύψουν και τα χρήματα που θα δοθούν για την αρχική επένδυση της εγκατάστασης. Γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε παθητικό στη συνολική οικονομική ανάλυση των υπόλοιπων μεγεθών.

Όσο αφορά τον πίνακα των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων παρατηρούμε αρχικά, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς αυξάνει η ονομαστική ισχύς της αντλίας, αυξάνουν παράλληλα η συνολική ενέργεια που αγοράζεται, η συνολική ενέργεια που παράγεται καθώς και το ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας. Παράλληλα παρατηρούμε πως αυξάνουν και οι συνολικές απώλειες, είτε αυτές περιέχουν το ποσοστό υπερχειλίσεως είτε όχι, καθώς και ο όγκος νερού που συνολικά υπερχειλίζει κάθε χρόνο. Τέλος, παρατηρούμε ότι και το ποσοστό των απωλειών που δεν περιέχουν τις υπερχειλίσεις, ως προς την προσδιδόμενη ενέργεια, αυξάνει καθώς αυξάνει η συνολική ισχύς της αντλίας. Μάλιστα αυτό κυμαίνεται περίπου από 20% (για μικρές ονομαστικές αντλίες) μέχρι 40% (για τις μεγαλύτερες αντλίες), στοιχείο που είχε αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2 σχετικά με τον τυπικό αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σταθμό. Βέβαια όπως είχε αναφερθεί οι αναμενόμενες απώλειες ήταν από 20 ~ 35 %, δηλαδή παρατηρούμε ότι στις μεγαλύτερες αντλίες έχουμε ένα

αυξημένο ποσοστό απωλειών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε επιχειρήσει στο σχεδιασμό των αντλιών να περιορίσουμε το μεγάλο μέγεθος της διαμέτρου της πτερωτής αλλά και του αγωγού κατάθλιψης. Έτσι οδηγηθήκαμε σε πιο αυξημένες απώλειες στα μεγαλύτερα μεγέθη αντλιών και σωληνώσεων.

Όπως έχουμε αναφέρει σε διάφορα σημεία, το πρόγραμμα που έχουμε δημιουργήσει λειτουργεί με γραμμικό τρόπο. Δηλαδή ανάλογα με την ονομαστική ισχύ της αντλίας που επιλέγουμε και τις ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα, λαμβάνουμε τα παραπάνω αποτελέσματα. Επομένως δεν είναι δυνατόν να καταλήξουμε στην επιλογή που θα μας προσέφερε τα μέγιστα δυνατά αποτελέσματα σύμφωνα πάντα με τους ενεργειακούς και οικονομικούς στόχους μας. Γι' αυτό το λόγο στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας μία μέθοδο βελτιστοποίησης θα επιχειρήσουμε να διερευνήσουμε με ποία λύση θα προσεγγίσουμε τους στόχους μας.

## 4 Εξεύρεση βέλτιστης λύσης με εξελικτικό αλγόριθμο

### 4.1 Αιτιολόγηση της χρήσης μεθόδων βελτιστοποίησης

Ο κώδικας Fortran που αναπτύχθηκε είχε ως στόχο να υπολογίσει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλιοταμιευτικής εγκατάστασης καθώς και τα συνολικά ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα που θα επέφερε ένα τέτοιο έργο. Αυτή η μελέτη θα μπορούσε να υλοποιηθεί μόνο με γραμμικό τρόπο από το χρήστη του προγράμματος. Δηλαδή όπως έχει αναφερθεί σε πολλά σημεία της εργασίας ο χρήστης επιλέγει στην εκκίνηση του προγράμματος δύο βασικά μεγέθη που κρίνουν όλα τα υπόλοιπα αποτελέσματα του προγράμματος. Έτσι από τη μία επιλέγει το ονομαστικό μέγεθος της ισχύος της αντλίας, το οποίο και είναι ο πιο προφανής τρόπος για το χρήστη να ορίσει το μέγεθος της εγκατάστασης που επιθυμεί να υλοποιήσει. Ενώ από την άλλη επιλέγει και τον αριθμό των ωρών που επιθυμεί η αντλία να λειτουργεί κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους. Αυτό το μέγεθος θα κρίνει το πρόγραμμα λειτουργίας της αντλιοταμίευσης και κατ' επέκταση τον όγκο νερού που θα αποθηκεύεται κάθε ημέρα, ο οποίος και στη συνέχεια θα μοιράζεται στις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων.

Επομένως τα δύο αυτά μεγέθη που αναφέρθηκαν και τα οποία βρίσκονται στην ευχέρεια του χρήστη του προγράμματος να τα επιλέξει ουσιαστικά κρίνουν και ολόκληρο το έργο αφού έτσι κρίνεται το μέγεθος του και ο τρόπος λειτουργίας του κάθε ημέρα. Ενώ εκτός από τα τεχνικά αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις επιλογές του χρήστη, θα προκύψουν και τα αντίστοιχα συνολικά ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα του έργου. Όπως είναι εύκολα κατανοητό όχι μόνο η βιωσιμότητα ενός τέτοιου έργου αλλά και η πρωταρχική επιλογή για τη δημιουργία του θα κριθεί από τα συνολικά του αποτελέσματα. Αφού ανάλογα με το φορέα που θα επέλεγε να υλοποιήσει ένα τέτοιο έργο θα είχε και συγκεκριμένες επιδιώξεις από το έργο αυτό. Έτσι αν για παράδειγμα επέλεγε να το υλοποιήσει ένας φορέας όπως η ΔΕΗ Α.Ε. με δημόσιο και κοινωνικό χαρακτήρα θα επιθυμούσε κυρίως να επιτύχει την καλύτερη ενεργειακή εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και τη μέγιστη δυνατότητα για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Όστε να προσφέρει τη μέγιστη δυνατή ευελιξία στη διαχείριση του ηλεκτρικού δικτύου και την αντιμετώπιση των αιχμών του καθώς και τη μέγιστη αξιοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία σε κάθε άλλη περίπτωση θα παρέμενε αναξιοποίητη. Στην περίπτωση βέβαια που η επένδυση για την υλοποίηση ενός τέτοιου έργου γινόταν από έναν ιδιωτικό φορέα κύριος στόχος του θα ήταν η μέγιστη κερδοφορία της επένδυσης.

Όπως θα φανεί και στη συνέχεια οι δύο διαφορετικοί στόχοι που αναφέρθηκαν για τους δύο διαφορετικούς φορείς, που θα μπορούσαν να υλοποιήσουν την επένδυση, είναι ξεκάθαρα αντικρουόμενοι από τη φύση του προβλήματος που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Φυσικά σε καμία περίπτωση δε μπορούμε να υλοποιήσουμε μία επένδυση που καλύπτει μόνο τον ένα στόχο εις βάρος του άλλου. Συνεπώς είμαστε υποχρεωμένοι να ανακαλύψουμε μία χρυσή τομή ανάμεσα στους δύο. Δυστυχώς κάτι τέτοιο δεν είναι προφανές και τόσο εύκολο να βρεθεί λόγω του μεγάλου αριθμού των λύσεων που μπορούν να δοθούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Σύμφωνα λοιπόν με όσα αναφέρθηκαν και προηγουμένως το δύσκολο αυτό έργο της εξεύρεσης μίας λύσης αναλαμβάνει να φέρει εις πέρας μία μέθοδος βελτιστοποίησης. Στόχος της θα είναι να ανακαλύψει ποια είναι η βέλτιστη λύση που θα μπορούσε να συμβιβάσει τους αντικρουόμενους στόχους μίας τέτοιας επένδυσης. Φυσικά αυτό θα γίνει στα πλαίσια των περιορισμών που περιβάλλουν το πρόβλημα μας, ενώ θα προσπαθήσουμε να περιορίσουμε τις δυνατές λύσεις μέσα στις οποίες θα αναζητηθεί η βέλτιστη λύση στο ελάχιστο δυνατό.

#### 4.2 Προαπαιτούμενα για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης

Κάθε σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως αυτό που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε, απαιτεί συγκεκριμένα προαπαιτούμενα από το μηχανικό που θα κλιθεί να το αντιμετωπίσει. Τα προαπαιτούμενα αυτά συνοπτικά είναι:

1. Η παραμετροποίηση του προβλήματος
2. Οι στόχοι του προβλήματος
3. Το λογισμικό αξιολόγησης
4. Το λογισμικό βελτιστοποίησης

Προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω θα αναλύσουμε κάθε προαπαιτούμενο και θα το συνδέσουμε με το δεδομένο πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε στην εργασία αυτή. Έτσι έχουμε:

1. Κάθε κώδικας βελτιστοποίησης έχει στη διάθεση του κάποιες ελεύθερες παραμέτρους προκειμένου να τους αποδώσει τιμές που να εξασφαλίζουν τη βέλτιστη λύση του προβλήματος σύμφωνα με τους στόχους που έχουμε θέσει εξ' αρχής. Συνεπώς ο κώδικας βελτιστοποίησης τροφοδοτεί με τιμές τις ελεύθερες παραμέτρους και αξιολογώντας κάθε φορά τη λύση που προκύπτει αναζητά τη βέλτιστη. Όμως προκειμένου να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η παραμετροποίηση του προβλήματος. Δηλαδή με απλά λόγια απαιτείται η σύνδεση του προβλήματος με τις ελεύθερες μεταβλητές που ελέγχει ο κώδικας βελτιστοποίησης. Επομένως οι τιμές που δίνονται στις μεταβλητές αυτές από τον κώδικα πρέπει να μοντελοποιούν μία δυνατή λύση του προβλήματος. Όσων αφορά το πρόβλημα που καλούμαστε εμείς να αντιμετωπίσουμε ως ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος μας θέτουμε, όπως έχουμε επισημάνει, την ονομαστική ισχύ της αντλίας και τον αριθμό των ωρών λειτουργίας της για κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους. Αυτές οι δύο ελεύθερες μεταβλητές στη συνέχεια μοντελοποιούν μία δεδομένη λύση κάθε φορά για συγκεκριμένες τιμές από τον κώδικα Fortran που έχουμε αναπτύξει. Δηλαδή το τμήμα της παραμετροποίησης του προβλήματος εκτελείται από τον κώδικα Fortran όπως αυτό έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο ανάλυσης της λειτουργίας του κώδικα.

2. Οι στόχοι του προβλήματος όπως είναι εμφανές συνδέονται με την εξεύρεση ακρότατου, δηλαδή τον εντοπισμό της μέγιστης ή της ελάχιστης τιμής κατά περίπτωση που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση. Για κάθε στόχο του προβλήματος δηλαδή αναζητούμε τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή αντίστοιχα που μπορεί να λάβει σύμφωνα πάντα με τους περιορισμούς το πρόβλημα. Ο στόχος σε ένα πρόβλημα μπορεί να είναι ένας ή περισσότεροι, ενώ συχνά μπορεί να είναι και αντικρουόμενοι, όπως στο πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε εδώ.

Έτσι στη βελτιστοποίηση που θα επιχειρήσουμε στο κεφάλαιο αυτό οι στόχοι είναι οι εξής δύο:

- Η εύρεση της μέγιστης τιμής που μπορεί να λάβει ο συντελεστής φορτίου για τον ήδη υπάρχον υδροηλεκτρικό σταθμό με τη δημιουργία του σταθμού αντλιοταμίευσης
- Η εύρεση της μέγιστης τιμής που μπορεί να λάβει η συνάρτηση κέρδους από τη δημιουργία και λειτουργία του σταθμού αντλιοταμίευσης

Οι δύο στόχοι αυτοί θα μελετηθούν αρχικά ξεχωριστά ο καθένας και στη συνέχεια σε συνδυασμό προκειμένου να διερευνήσουμε σε πιο βαθμό είναι δυνατό να συμβιβαστούν. Ενώ όπως θα γίνει κατανοητό και στη συνέχεια της ανάλυσης μας η βέλτιστη λύση που μπορεί να καλύψει και τους δύο στόχους βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα με αμοιβαίες υποχωρήσεις και από τους δύο.

3. Το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης σχετίζεται με την απόδοση μίας τιμής καταλληλότητας ανάλογα με το βαθμό που ικανοποιεί τους στόχους που προηγούμενα τέθηκαν. Όπως είναι κατανοητό η διαδικασία της αξιολόγησης πραγματοποιείται από τον κώδικα Fortran που έχουμε αναπτύξει και αναλύσει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι πιο αναλυτικά αφού υπολογιστούν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και της λειτουργίας του έργου της αντλιοταμίευσης στη συνέχεια αξιολογείται η υποψήφια λύση, όπως αυτή διαμορφώθηκε από τις ελεύθερες μεταβλητές, με κατάλληλες τιμές στους δύο στόχους που έχουμε θέσει. Δηλαδή από τη μία αξιολογείται η ενεργειακή αξιοποίηση της εγκατάστασης με την απόδοση τιμής στο συντελεστή φορτίου και από την άλλη αξιολογείται η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης με την απόδοση τιμής στη συνάρτηση κέρδους ή ζημίας.

4. Το λογισμικό βελτιστοποίησης είναι το εργαλείο – αλγόριθμος – πρόγραμμα με το οποίο θα σαρωθεί ο χώρος δυνατών λύσεων προκειμένου να βρούμε τη βέλτιστη λύση που συνάδει με τους στόχους που έχουμε θέσει. Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία προγραμμάτων βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζουν τα προβλήματα με διάφορους τρόπους μαθηματικής ανάλυσης. Πολλά από αυτά είναι εμπορικά και διατίθενται στο εμπόριο προκειμένου να αγοραστούν και να χρησιμοποιηθούν από τους ενδιαφερόμενους. Στο δεδομένο πρόβλημα που κλιθήκαμε να αντιμετωπίσουμε χρησιμοποιήσαμε ένα πρόγραμμα Εξελικτικών αλγορίθμων που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (Easy v2.0). Η λειτουργία του προγράμματος βελτιστοποίησης εξελικτικών αλγορίθμων θα αναλυθεί στη συνέχεια καθώς και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιστοποίησης. [23]

### 4.3 Βασικά γνωρίσματα ενός εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Από τη δεκαετία του 1990 και έκτοτε, η γεωμετρική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και το προσιτό κόστος των μεγάλων και γρήγορων υπολογιστών συνετέλεσαν στην ευρεία αποδοχή και χρήση στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης με έναν από τους βασικότερους εκπροσώπους τους εξελικτικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης (evolutionary algorithms, EA). Βασικό στοιχείο που οδήγησε στη γρήγορη και ευρεία επικράτησή τους ήταν αφενός το ενδιαφέρον, μη-μαθηματικό υπόβαθρο τους, η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει

προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψηφίας λύσης και, κυρίως, η δυνατότητά τους (ως στοχαστική μέθοδος) να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των ΕΑ είναι ότι, πρακτικά, σε ένα νέο πρόβλημα η χρήση τους είναι γενικά άμεση χωρίς τις παρεμβάσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης που απαιτούν οι αιτιοκρατικές μέθοδοι, αν και αναμφισβήτητα η γνώση του προβλήματος και η χρήση πληροφορίας από αυτό μέσω ειδικών τελεστών επιταχύνει το ρυθμό σύγκλισης. Παρόλα αυτά, βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων, γεγονός που φαίνεται κυρίως όταν κάθε αξιολόγηση γίνεται με χρονοβόρο λογισμικό όπως είναι κώδικες αεροδυναμικής όπως οι κώδικες Navier – Stokes. Φυσικά για το πρόβλημα που καλούμαστε εμείς να αντιμετωπίσουμε αυτό το μειονέκτημα δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα αφού το λογισμικό αξιολόγησης που έχουμε αναπτύξει εκτελεί κάθε αξιολόγηση σε ελάχιστο χρόνο, έχοντας χρησιμοποιήσει τις απαραίτητες παραδοχές στα σημεία που ήταν απαραίτητο, χωρίς να κάνουμε σημαντικές θυσίες στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας.

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

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

Ολοκληρώνοντας, μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ώστε να χαρακτηριστεί εξελικτικός:

- Να χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων τα οποία εξελίσσονται συγχρόνως, αντί μεμονωμένων ατόμων.
- Η εξέλιξη του πληθυσμού από γενιά σε γενιά (δηλαδή από επανάληψη σε επανάληψη αξιολόγησης) να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας

(μεγιστοποίησης) ή τιμή κόστους ατόμων (ελαχιστοποίησης), με βάση κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση.

- Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με τη δημιουργία νέων ατόμων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή καταλληλότητας τους.
- Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών. [20]

#### 4.4 Ανάλυση λειτουργίας ενός εξελικτικού αλγορίθμου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι ΕΑ χειρίζονται πληθυσμούς λύσεων. Κατά την εξέλιξη, που είναι η βασική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός μ υποψηφίων λύσεων (γονείς, κατά τη γενετική ορολογία) εξελίσσεται στον πληθυσμό των λ απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις, που προκύπτουν από τους μ γονείς, έχοντας ενδεχομένως καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους λ απογόνους, με κριτήριο την καταλληλότητά τους, επιλέγονται οι μ γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται, γενιά με γενιά, μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου σύγκλισης. Τέτοια κριτήρια υπάρχουν αρκετά και ένας ΕΑ μπορεί να έχει σε ισχύ περισσότερα του ενός από αυτά. Μεταξύ αυτών είναι: (α) το να μην βελτιώνεται περαιτέρω η λύση για έναν αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών, (β) τα να έχει ομογενοποιηθεί ο πληθυσμός ή/και (γ) η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επέτρεπε ο χρήστης.

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

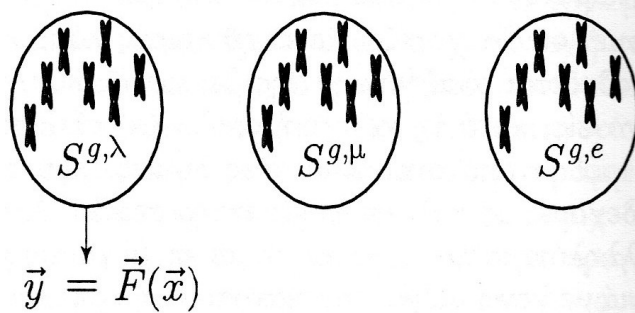
Στη συνέχεια θα αναπτύξουμε τι συμβαίνει σε κάθε γενιά ενός ΕΑ, βήμα – βήμα. Ουσιαστικά, η απλή εισαγωγική περιγραφή ενός ΕΑ που προηγήθηκε, εδώ θα αποκτήσει μορφή διακριτών βημάτων, εμπλέκοντας επιπλέον και το σύνολο των επίλεκτων ατόμων. Υποθέτουμε ένα πρόβλημα ενός στόχου και έχουμε τα εξής στάδια: [1]

1. Επιλέγονται βασικές παράμετροι της μεθόδου, όπως το μέγεθος των δύο βασικών πληθυσμών  $S^{g,\mu}$  και  $S^{g,\lambda}$ , δηλαδή οι τιμές των  $\mu$  και  $\lambda$ . Θέτουμε  $g = 0$  συμβολίζοντας έτσι την αρχικοποίηση, τη λεγόμενη και μηδενική γενιά. Επιλέγονται τυχαία τα μέλη του αρχικού πληθυσμού  $S^{0,\lambda}$ .

2. Αξιολογούνται τα  $\lambda$  άτομα του συνόλου  $S^{g,\lambda}$ . Εκφρασμένο μαθηματικά, το βήμα αυτό περιγράφεται από τη διαδικασία:

$$y(x) = F(x), \quad \forall x \in S^{g,\lambda} \quad (\text{Σχέση 62})$$

Ενώ σχηματικά έχουμε:



Σχήμα 4.1 Αξιολόγηση των μελών του  $S^{g,\lambda}$

Είναι κατανοητό ότι στο σημείο αυτό καλείται το λογισμικό αξιολόγησης του προβλήματος και ουσιαστικά είναι το τμήμα του αλγορίθμου που φέρει το μεγαλύτερο (πρακτικά, ολόκληρο) το υπολογιστικό κόστος.

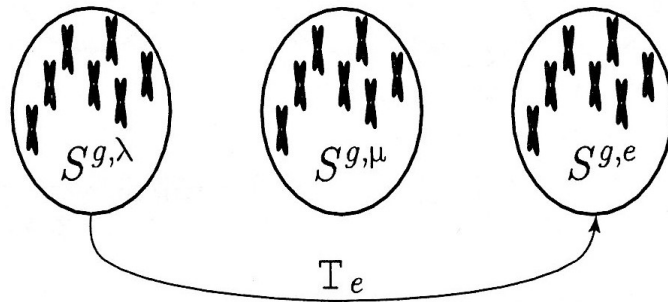
3. Ανανεώνεται το σύνολο των επίλεκτων  $S^{g,e}$  με όσα μέλη του  $S^{g,\lambda}$  αξίζουν, με κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, να ενταχθούν σε αυτό. Κατά την παρούσα φάση, είναι εξίσου πιθανό να διαγραφούν κάποια μέλη του  $S^{g,e}$ , αν προκύψουν άτομα του  $S^{g,\lambda}$  με καλύτερη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

$$S^{g+1,e} = T_e(S^{g,\lambda} \cup S^{g,e}) \quad (\text{Σχέση 63})$$

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



Ενώ σχηματικά έχουμε:



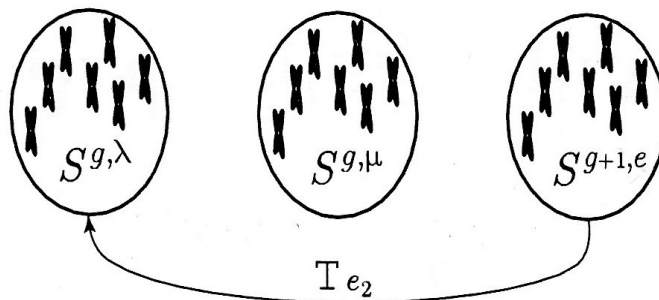
Σχήμα 4.2 Ανανέωση των μελών του  $S^{g,e}$

4. Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλεκτικότητας ή ελιτισμού, με τον οποίο (συνήθως τυχαία επιλεγόμενα) άτομα από το σύνολο των επίλεκτων  $S^{g,e}$  αντικαθιστούν άτομα του  $S^{g,\lambda}$ . Το ποια θα αντικατασταθούν εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως τα χειρότερα) αν και μέρος αυτών μπορεί να επιλέγεται τυχαία. Εκφρασμένο μαθηματικά:

$$S^{g,\lambda} = T_{e_2}(S^{g,\lambda} \cup S^{g+1,e}) \quad (\text{Σχέση 64})$$

Όπου με  $T_{e_2}$  συμβολίζεται ο τελεστής ελιτισμού. Με τον ελιτισμό αποφεύγεται μία νέα γενιά να δώσει βέλτιστη λύση χειρότερη από αυτήν της προηγούμενης γενιάς (θα έχει τουλάχιστον ίδια τιμή αντικειμενικής συνάρτησης) αν και τα οφέλη είναι αρκετά περισσότερα και πιο σύνθετα από αυτό που μόλις αναφέρθηκε.

Ενώ σχηματικά έχουμε:

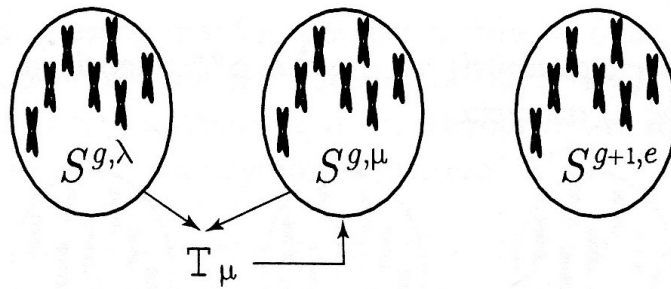


Σχήμα 4.3 Ανανέωση των μελών του  $S^{g,e}$

5. Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων  $T_\mu$  με τη βοήθεια του οποίου επιλέγεται το σύνολο των μελών του νέου πληθυσμού γονέων  $S^{g+1,\mu}$ . Για το σχηματισμό του, χρησιμοποιούνται οι τρέχοντες πληθυσμοί γονέων  $S^{g,\mu}$  και απογόνων  $S^{g,\lambda}$ , αν και υπάρχουν ορισμένες κλασσικές διατυπώσεις όπου οι μ γονείς επιλέγονται μόνο από τους πρόσφατους λ απογόνους. Εκφρασμένο μαθηματικά:

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu(S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda}) \quad (\text{Σχέση 65})$$

Όπου με  $T_\mu$  συμβολίζεται ο τελεστής επιλογής γονέων. Ενώ σχηματικά έχουμε:



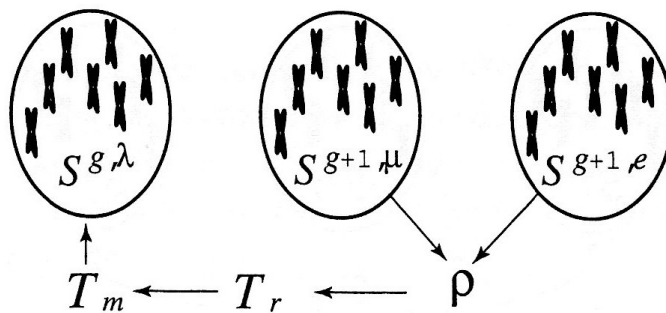
Σχήμα 4.4 Επιλογή μελών του νέου συνόλου γονέων  $S^{g+1,μ}$

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

Εκφρασμένο μαθηματικά:

$$S^{g+1,λ} = T_m \left( T_r \left( S^{g+1,μ} \cup S^{g+1,e} \right) \right) \quad (\text{Σχέση 66})$$

Ενώ σχηματικά έχουμε:



Σχήμα 4.5 Επιλογή μελών του νέου συνόλου γονέων  $S^{g+1,μ}$

7. Εφαρμόζεται το κριτήριο σύγκλισης και αν η μέθοδος θεωρείται ότι δεν έχει συγκλίνει αρχίζει μία νέα γενιά, δηλαδή επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 7 θέτοντας  $g \leftarrow g + 1$ .

#### 4.4.1 Κωδικοποίηση ελεύθερων μεταβλητών

Για την κωδικοποίηση των ελεύθερων μεταβλητών του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε δυαδική είτε πραγματική κωδικοποίηση. Στο σημείο αυτό θα

αναφερθούμε στα βασικά χαρακτηριστικά της δυαδική κωδικοποίηση που συνήθως χρησιμοποιείται.

Αν  $x$  το διάνυσμα των ελεύθερων μεταβλητών με  $N$  συνιστώσες  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , η δυαδική κωδικοποίηση απαιτεί τον καθορισμό ενός κατώτατου ορίου  $x_{i,L}$  ( $L = \text{Lower}$ ), ενός ανώτατου ορίου  $x_{i,U}$  ( $U = \text{Upper}$ ) αλλά και του πλήθους  $n_i$  δυαδικών ψηφίων ανά μεταβλητή  $i$ ,  $i \in N$ . Το πλήθος  $n_i$  καθορίζει την ακρίβεια διακριτοποίησης της  $i$ -οστής μεταβλητής, που δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i,U} - x_{i,L}}{2^{n_i} - 1} \quad (\text{Σχέση 67})$$

Η συνένωση των δυαδικών συστοιχιών όλων των μεταβλητών δημιουργεί την ενιαία δυαδική συστοιχία (χρωμόσωμα) που περιγράφει συνολικά κάθε υποψήφια λύση. Για παράδειγμα, αν  $N = 3$ ,  $n_1 = 5$ ,  $n_2 = 7$ ,  $n_3 = 6$ , ένα χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι το:

$$\underbrace{10010}_{x_1} \underbrace{1100111}_{x_2} \underbrace{010010}_{x_3}$$

Όπου λ.χ. η τιμή που αντιστοιχεί στο  $x_1$  είναι η

$$x_1 = x_{1,L} + \frac{x_{1,U} - x_{1,L}}{2^{n_1} - 1} \text{int}(10010) \quad (\text{Σχέση 68})$$

Όπου  $\text{int}(10010)$  είναι ο ακέραιος που αντιστοιχεί στη δυαδική συστοιχία 10010. [1]

#### 4.4.2 Τελεστές επιλογής γονέων

Αναφέρθηκε ήδη ότι ο τελεστής επιλογής γονέων  $T_\mu$  δημιουργεί το σύνολο γονέων  $S^{g+1,\mu}$  της επόμενης γενιάς επιλέγοντας άτομα από τα σύνολα απογόνων  $S^{g,\lambda}$  και γονέων  $S^{g,\mu}$  της τρέχουσας γενιάς. Αναφέρθηκε επίσης ότι η συμμετοχή του  $S^{g,\mu}$  στην επιλογή γονέων δεν είναι υποχρεωτική και για το λόγο αυτό, στη σύντομη ανάλυση που ακολουθεί θα θεωρήσουμε ότι:

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu(S^{g,\lambda}) \quad (\text{Σχέση 69})$$

Η διαδικασία επιλογής γονέων αναλαμβάνει να δώσει μεγαλύτερες πιθανότητες στα άτομα του  $S^{g,\lambda}$  με καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης να συμμετάσχουν στη δημιουργία απογόνων. Αντίθετα, οι χειρότερες από τις τρέχουσες λύσεις έχουν μικρότερες πιθανότητες να συμμετάσχουν στο σύνολο  $S^{g+1,\mu}$ . Άρα, η επιλογή βασίζεται στις (σχετικές, κυρίως) τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη βιβλιογραφία προτείνονται σχήματα όπως η αναλογική επιλογή (proportional selection), η γραμμική κατάταξη (linear ranking), η πιθανολογική επιλογή με διαγωνισμό (probabilistic tournament selection), κ.α.

Στην αναλογική επιλογή, στο  $j$ -οστό από τα  $\lambda$  άτομα αντιστοιχεί πιθανότητα ίση με  $F(\vec{x}_j) / \sum_{i=1}^{\lambda} F(\vec{x}_i)$  (αναφερόμαστε σε προβλήματα μεγιστοποίησης). Οι γονείς επιλέγονται με τη βοήθεια μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω πιθανότητες. Έτσι, καλύτερα άτομα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγούν. Παρόλα αυτά, εγκυμονεί ο κίνδυνος, η παρουσία μιας συγκριτικά καλής λύσης στις αρχικές γενιές να οδηγήσει στην πρόωρη επικράτηση της και άρα στην παγίδευση σε ένα τοπικό ακρότατο. Στη γραμμική κατάταξη, τα  $\lambda$  άτομα κατατάσσονται ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και επιλέγονται μ από αυτά, όπου τα καλύτερα εμφανίζονται με περισσότερα αντίτυπα στο  $S^{g+1,\mu}$ , ενώ απουσιάζουν τα χειρότερα. Στην πιθανολογική επιλογή με διαγωνισμό, επιλέγονται τυχαία  $k$  άτομα τη φορά, συμμετέχουν σε διαγωνισμό μεταξύ τους με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και επιλέγεται ο καλύτερος ως ένα ακόμη μέλος του  $S^{g+1,\mu}$ . Πολλές φορές, ο διαγωνισμός αποκτά και στοιχεία στοχαστικότητας, επιτρέποντας και στο χειρότερο διαγωνιζόμενο να επιλεγεί με μικρή πιθανότητα. [1]

#### 4.4.3 Τελεστές Διασταύρωσης

Για τη δυαδική κωδικοποίηση, η διασταύρωση συνδυάζει δύο τυχαία επιλεγμένους γονείς για να δημιουργήσει ισόποσους απογόνους. Στη βιβλιογραφία μπορούμε να συναντήσουμε και διασταύρωση στην οποία συμμετέχουν περισσότεροι από δύο γονείς.

Στη δυαδική κωδικοποίηση, η λεγόμενη διασταύρωση απλού σημείου (single-point crossover) αρχικά επιλέγει τυχαία μια θέση μεταξύ δύο διαδοχικών δυαδικών ψηφίων του χρωμοσώματος. Στη συνέχεια, επιλέγει τυχαία δύο γονείς από τη δεξαμενή των επιλαχόντων γονέων με χρήση των τελεστών επιλογής που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τους δύο αυτούς γονείς διασταυρώνει, δηλαδή εναλλάσσει τα δύο μέρη εκατέρωθεν της θέσης διασταύρωσης, παράγοντας έτσι δύο απογόνους.

Ως παράδειγμα, παρουσιάζεται η διασταύρωση ενός σημείου για δύο επιλαχόντες γονείς, τους:

```
10110001011001
00101101110101
```

Όπου έστω ότι έτυχε ως θέση διασταύρωσης το τέλος του πέμπτου δυαδικού ψηφίου, δηλαδή:

```
10110 | 001011001
00101 | 101110101
```

Άρα, οι δύο απόγονοι που θα προκύψουν από τη διασταύρωση είναι οι:

```
10110101110101
00101001011001
```

Στη βιβλιογραφία θα συναντήσουμε ποικιλία σχημάτων διασταύρωσης. Εύκολα, με βάση τα παραπάνω, κατανοούμε τη διασταύρωση δύο σημείων (δύο τυχαίες θέσεις

διασταύρωσης, ο πρώτος απόγονος σχηματίζεται από το πρώτο και το τρίτο τμήμα του πρώτου γονέα και το δεύτερο τμήμα του δεύτερου γονέα, κοκ) ή τη διασταύρωση ενός σημείου ανά μεταβλητή (επιλέγεται τυχαία ένα σημείο διασταύρωσης ανά μεταβλητή, η υπόλοιπη διαδικασία είναι όμοια). Η περιγραφή άλλων σχημάτων διασταύρωσης, όπως είναι η διακριτή και η ομοιόμορφη διασταύρωση ξεφεύγουν από το πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι, στο πλαίσιο ενός στοχαστικού αλγορίθμου, όπως είναι ο εξελικτικός αλγόριθμος, η διασταύρωση πραγματοποιείται με πιθανότητα  $P_r$  (συνήθως, κοντά στη μονάδα, λ.χ.  $P_r = 0,90$ ). Ο ρόλος της μη-μοναδιαίας πιθανότητας διασταύρωσης είναι να επιτρέπει με μικρή πιθανότητα ( ίση με  $1 - P_r$ ) τη μεταφορά αναλλοίωτων χαρακτηριστικών των γονέων στους απογόνους. Ενεργοποιείται δηλαδή, έμμεσα μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών: με πιθανότητα  $P_r$  γίνεται κανονικά η διασταύρωση ενώ με πιθανότητα  $1 - P_r$  οι απόγονοι ταυτίζονται με τους γονείς. [1]

#### 4.4.4 Τελεστές Μετάλλαξης

Ο τελεστής μετάλλαξης εφαρμόζεται σε κάθε νέο απόγονο που προέκυψε από την εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης. Η μετάλλαξη στοχεύει στην εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον πληθυσμό των απογόνων, με πιθανότητα  $P_m$  (συνήθως πολύ μικρή, ενδεικτικά  $P_m = 0,01$ ).

Στη δυαδική κωδικοποίηση, η μετάλλαξη επιτρέπει (με την παραπάνω μικρή πιθανότητα) να αντιστραφεί το δυαδικό ψηφίο που θα επιλεγεί (αν ήταν 0 να γίνει 1 και αντιστρόφως). Πρακτικά, για όλα τα δυαδικά ψηφία κάθε απογόνου που προήλθε από τη διασταύρωση γεννάται ένας τυχαίος αριθμός (στο διάστημα  $[0,1]$ ) και η μετάλλαξη γίνεται μόνο αν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος του  $P_m$ . Ενδεικτικά, αν το κριτήριο για τη μετάλλαξη ενεργοποιηθεί για το έβδομο ψηφίο του πρώτου από τους δύο απογόνους που σχηματίστηκαν στο παράδειγμα της διασταύρωσης, δηλαδή του:

10110101110101

Ο μεταλλαγμένος απόγονος γίνεται:

10110111110101

[1]

#### 4.5 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε προβλήματα πολλών στόχων και η έννοια του μετώπου Pareto

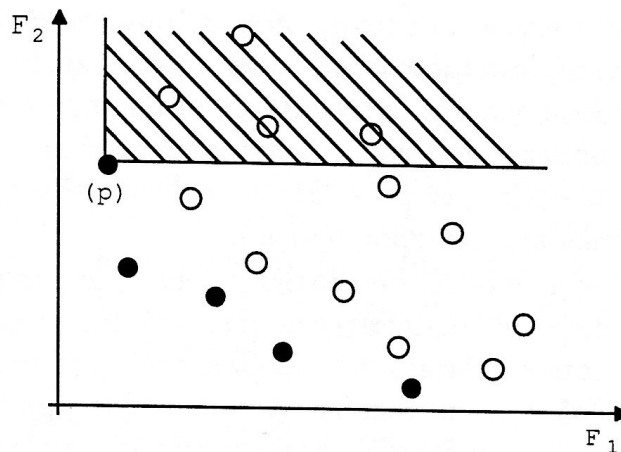
Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης με περισσότερους από ένα στόχους. Στη συνέχεια, θα παραθέσουμε τη βασική αρχή με βάση την οποία μπορεί εύκολα να μετασχηματισθεί υπάρχουν ΕΑ που λειτουργεί με ένα στόχο ( $\min F(x)$ ,  $F: \mathcal{R}^N \rightarrow \mathcal{R}$ ), ώστε να επιλύει προβλήματα της μορφής: ( $\min F(x)$ ,  $F: \mathcal{R}^N \rightarrow \mathcal{R}^M$ ). Όπου,  $M$  ας είναι το πλήθος των στόχων.

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

Ο μαθηματικός ορισμός της κατά Pareto βέλτιστης λύσης και η συναφής έννοια της κυριαρχίας δίνεται ως εξής:

Η λύση  $x \in \Omega$  ( $\Omega \subset \mathfrak{R}^N$ ) κυριαρχεί της λύσης  $y \in \Omega$  και αυτό θα συμβολίζεται με:  $x \sqsupseteq y$ , όταν και μόνο όταν ισχύει ότι  $F_m(x) \leq F_m(y)$  για όλους τους στόχους ( $m = 1, \dots, M$ ) και συγχρόνως υπάρχει ένας τουλάχιστον στόχος από αυτούς (έστω ο  $k$ ) για τον οποίο η τελευταία σχέση ισχύει ως ανισότητα μόνο ( $F_k(x) \sqsupseteq F_k(y)$ ).

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



Σχήμα 4.6 Μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Παράδειγμα κυριαρχίας λύσεων σε έναν πληθυσμό εξελικτικού αλγορίθμου. Πρόβλημα δύο στόχων.

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

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

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, όταν θα εξετάσουμε και τους δύο στόχους του προβλήματος ταυτόχρονα, θα παραθέσουμε και το αντίστοιχο μέτωπο Pareto που θα περιέχει τις λύσεις που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη. Φυσικά, όπως και αναφέρθηκε, οι λύσεις αυτές δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους αφού η κάθε λύση υπερτερεί της άλλης ως προς τον ένα στόχο αλλά υστερεί ως προς τον άλλο. Δηλαδή δε θα προκύψει μία μονοσήμαντη λύση όπως είναι προφανές αλλά ένα σύνολο λύσεων, από το οποίο είναι δυνατό να επιλεγεί η λύση που είναι πιο κοντά στην αναλογία επίτευξης των στόχων, για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση, που θα επιθυμεί ο επενδυτής του έργου. [1]

#### **4.6 Εκτέλεση του ΕΑ και παράθεση αποτελεσμάτων**

Προκειμένου να επιτύχουμε μια ολοκληρωμένη ανάλυση του προβλήματος θα επιχειρήσουμε αρχικά να βρούμε τη βέλτιστη λύση κάθε στόχου ξεχωριστά. Αυτό θα μας δώσει τη δυνατότητα να διερευνήσουμε προς ποία κατεύθυνση οδεύει η κάθε λύση και φυσικά να αποδείξουμε όλα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως περί αντικρουόμενων στόχων. Στη συνέχεια, αφού ολοκληρώσουμε την ξεχωριστή διερεύνηση των στόχων, θα αναζητήσουμε το σύνολο των βέλτιστων λύσεων που ικανοποιούν και τους δύο στόχους ταυτόχρονα. Έτσι θα προκύψει και το αντίστοιχο μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, το οποίο και θα μελετήσουμε με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα.

##### **4.6.1 Μεγιστοποίηση της ενεργειακής εκμεταλλευσιμότητας της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης**

Αρχικά θα εξετάσουμε ποια λύση του προβλήματος μας προσφέρει τη μέγιστη ενεργειακή εκμεταλλευσιμότητα της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Ίσως η λύση που θα προκύψει να φανεί προφανής μόνο με την απλή λογική, αλλά σίγουρα θα συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη ανάλυση του προβλήματος και θα μας επιτρέψει να τη συνδυάσουμε με τον επόμενο στόχο.

Αφού θέσαμε το στόχο της βελτιστοποίησης, το επόμενο βήμα μας είναι να θέσουμε τις ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος. Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου ως ελεύθερες μεταβλητές έχουμε θέσει το ονομαστικό μέγεθος της αντλίας, το οποίο και θα κρίνει τα βασικά μεγέθη της αντλιοσταμειυτικής εγκατάστασης, και τις ώρες λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα του έτους, οι οποίες θα κρίνουν το πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστροβίλων και αντίστοιχα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά πρέπει να επιλέξουμε τα όρια μέσα στα οποία μπορούν να κυμανθούν οι μεταβλητές, ώστε να μην προκύψουν λύσεις οι οποίες είναι ανέφικτες. Τα όρια των μεταβλητών που έχουν επιλεγεί είναι:

Ονομαστική ισχύς αντλίας: 1 ~ 200 MW  
Ωρες λειτουργίας κάθε ημέρα: 1 ~ 6 ώρες

Η ονομαστική ισχύς της αντλίας τοποθετήθηκε μέσα στα όρια αυτά προκειμένου να συμβαδίσει με την ονομαστική ισχύ των ήδη εγκατεστημένων υδροστροβίλων του σταθμού (330 MW) καθώς και με τα σύγχρονα τεχνολογικά δεδομένα. Ενώ το πλήθος των ωρών λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα περιορίστηκε μέχρι τις 6 ώρες, αφού όπως είναι λογικό δε μπορούμε να θεωρούμε πως η περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια που θα απορροφούμε κάθε ημέρα θα είναι απεριόριστη. Τέλος, πρέπει να τονίσουμε πως έχουμε οι ελεύθερες μεταβλητές μπορούν να λάβουν μόνο ακέραιες τιμές αφού δεν έχει καμία λογική να αναζητούμε λύσεις με δεκαδικά ψηφία ούτε για την ονομαστική ισχύ της αντλίας ούτε και φυσικά για τις ώρες λειτουργίας της. Στο σημείο αυτό πρέπει να επεξηγηθεί πως υλοποιείται η ακέραια διακριτοποίηση των δύο μεταβλητών. Πρέπει να αναφέρουμε ότι ο εξελικτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε παράγει πραγματικές τιμές και για τις δύο μεταβλητές με ακέραιο και δεκαδικό μέρος. Ο κώδικας Fortran που έχουμε αναπτύξει και έχει επωμιστεί τη διαδικασία της παραμετροποίησης αλλά και της αξιολόγησης, κάθε φορά που διαβάσει στην είσοδο του τις τιμές που έχει δώσει ο ΕΑ για τις δύο μεταβλητές αποκόβει το δεκαδικό μέρος των τιμών και κρατάει μόνο το ακέραιο. Έτσι, πρέπει να γνωρίζουμε πως όταν εξετάζουμε τις βέλτιστες λύσεις που έχει βρει ο ΕΑ για τις δύο μεταβλητές πρέπει να αγνοούμε το δεκαδικό κομμάτι των τιμών αυτών.

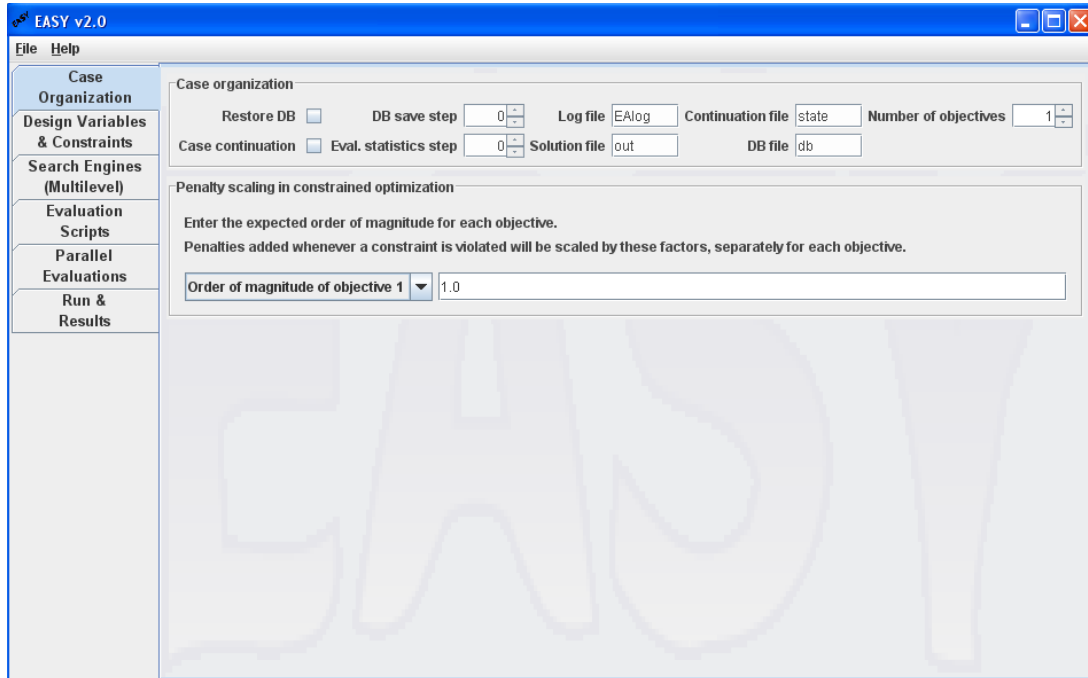
Αφού έχουμε ορίσει και τις ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης, θα συνεχίσουμε με τον συνδυασμό του ΕΑ και του κώδικα της Fortran που έχουμε αναπτύξει προκειμένου να υλοποιήσουμε την επίλυση του προβλήματος. Συνοπτικά αναφέρουμε σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου ότι, ο ΕΑ δίνει τιμές στις ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος, ο κώδικας Fortran παραμετροποιεί τις τιμές αυτές και αξιολογεί τη δεδομένη λύση δίνοντας τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση του στόχου που έχει τεθεί (δηλαδή στην ανάλυση αυτή που ως στόχο έχουμε θέσει την ενεργειακή εκμεταλλευσιμότητα του ΥΗΣ, δίνει μία τιμή για το συντελεστή φορτίου). Η τιμή του στόχου του προβλήματος στη συνέχεια αξιολογείται από τον ΕΑ και αυτός με τη σειρά του τροφοδοτεί εκ νέου τον κώδικα Fortran με νέα λύση προς αξιολόγηση μέχρι συγκλίσεως της μεθόδου στη βέλτιστη λύση.

Τεχνικά η σύνδεση των δύο προγραμμάτων υλοποιείται δημιουργώντας ένα αρχείο κειμένου εισόδου που θα περιέχει τις ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος και ένα αρχείο κειμένου εξόδου που θα περιέχει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το συγκεκριμένο στόχο που έχουμε θέσει. Φυσικά απαιτείται και ένα αρχείο συστήματος που θα οδηγεί τον ΕΑ στο εκτελέσιμο αρχείο του κώδικα που εμείς έχουμε δημιουργήσει.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε μία πολύ σημαντική παρατήρηση που θα αποτρέψει τον αναγνώστη από παρανοήσεις. Ο κώδικας βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε είναι προγραμματισμένος με στόχο να ελαχιστοποιεί κάθε στόχο που του θέτουμε και όχι να τον μεγιστοποιεί όπως εμείς επιθυμούμε σε κάθε περίπτωση που θα εξετάσουμε. Φυσικά αυτό το πρόβλημα μπορεί πολύ εύκολα να αντιμετωπιστεί τυπώνοντας την τιμή αξιολόγησης του συγκεκριμένου στόχου που εξετάζουμε με αρνητικό πρόσημο στο αρχείο εξόδου που θα διαβάσει ο ΕΑ. Έτσι, με το μικρό αυτό τρικ θα επιτύχουμε μεγιστοποίηση του στόχου μας, έχοντας απλά υπόψη μας ότι όπου διαβάζουμε τιμή με αρνητικό πρόσημο αυτή είναι θετική και το αντίστροφο.

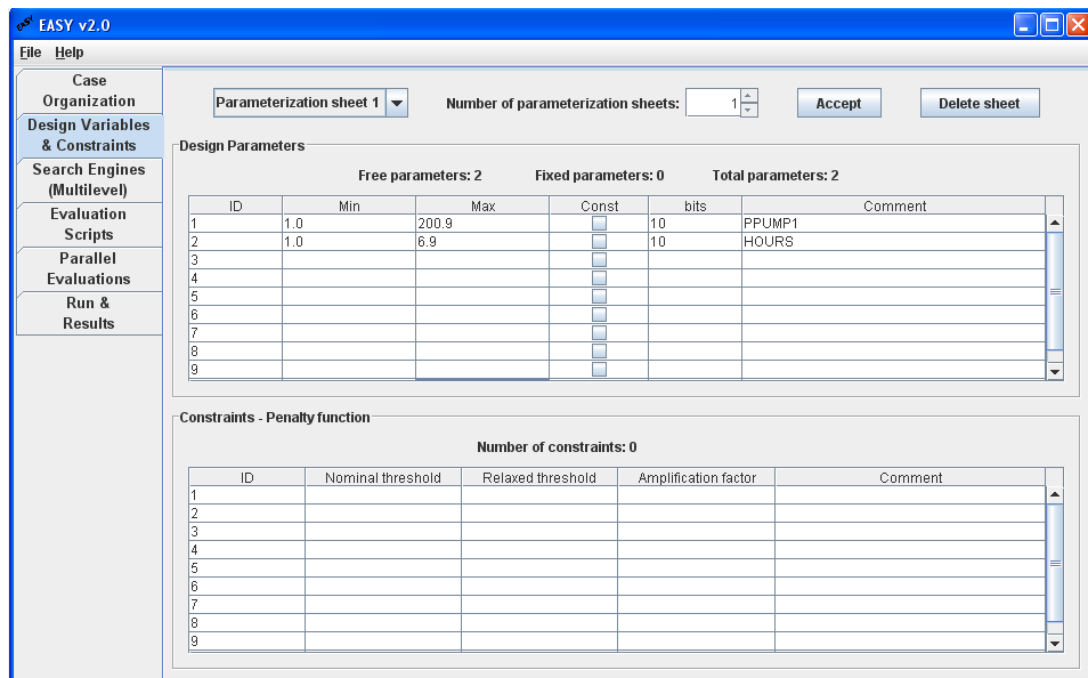


Αφού έχουμε δημιουργήσει και τα αρχεία αυτά μπορούμε να συνεχίσουμε με τη ρύθμιση των παραμέτρων του ΕΑ. Αρχικά θα ορίσουμε τον αριθμό των στόχων του προβλήματος (number of objectives), που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένας. Έτσι θα προκύψει το επόμενο φύλο ρυθμίσεων του κώδικα βελτιστοποίησης:



Σχήμα 4.7 Φύλο ρυθμίσεων ΕΑ (Easy v2.0) Case Organization

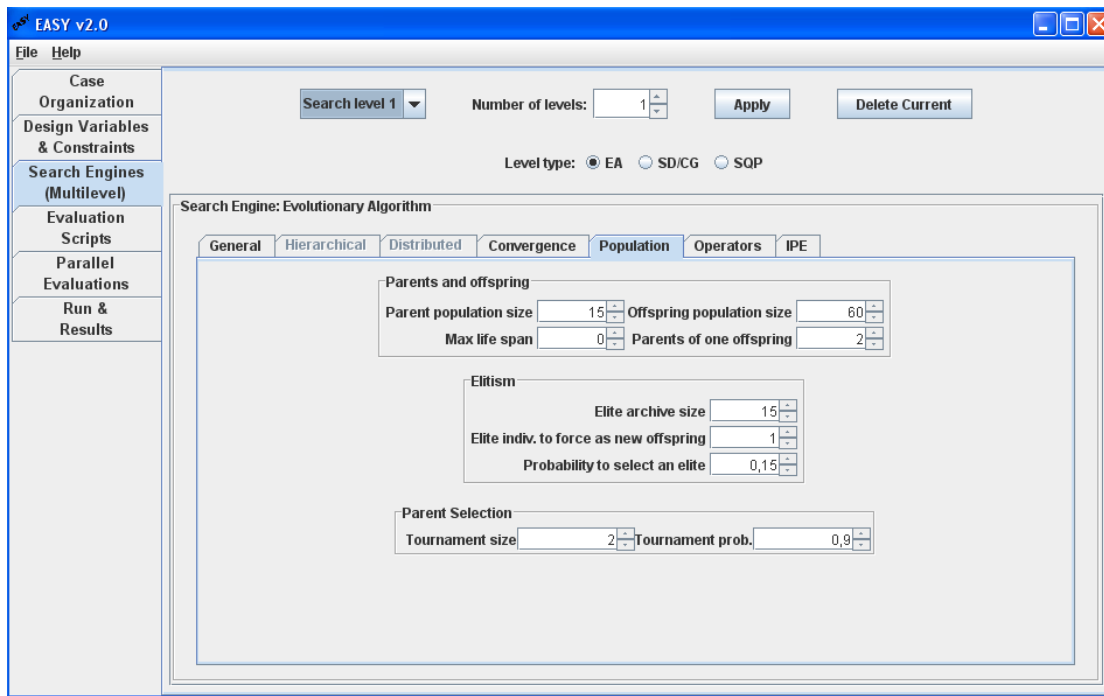
Το επόμενο βήμα είναι να θέσουμε τα όρια των ελεύθερων μεταβλητών (design parameters) στον ΕΑ όπως αυτά ορίστηκαν προηγουμένως, για τους λόγους που παραθέσαμε. Έτσι θα προκύψει το επόμενο φύλο ρυθμίσεων του κώδικα βελτιστοποίησης:



Σχήμα 4.8 Φύλο ρυθμίσεων ΕΑ (Easy v2.0) Design Variables & Constraints

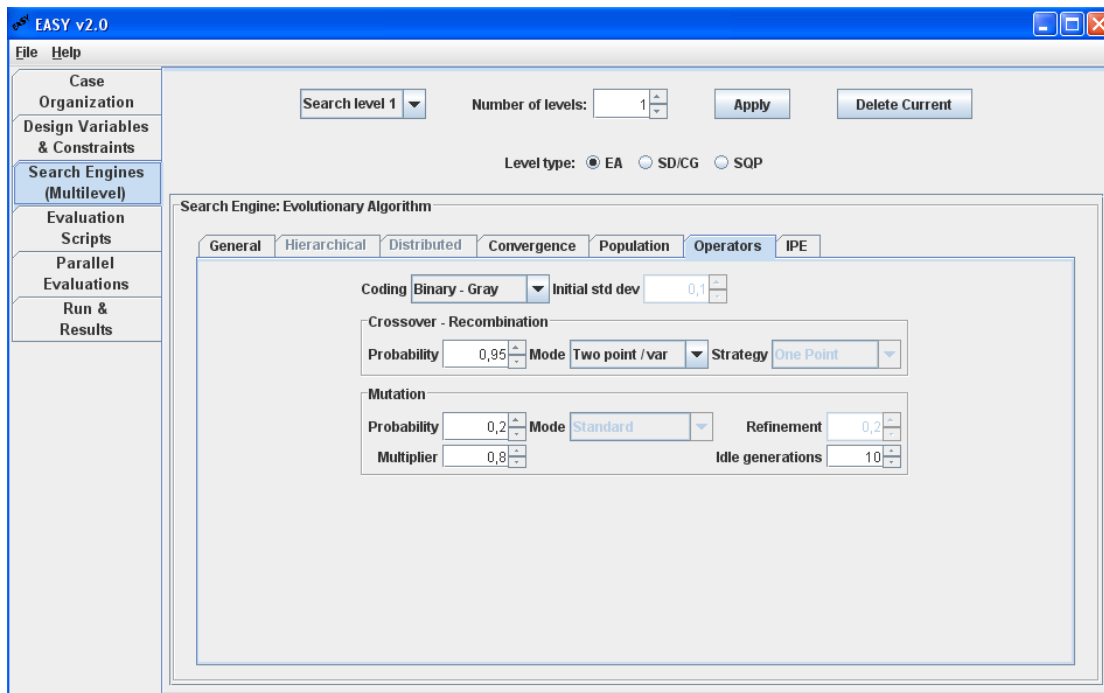
Τονίζουμε ότι το δεύτερο τμήμα του πιο πάνω φίλου ρυθμίσεων που αναφέρεται σε περιορισμούς (constraints) παραμένει άδειο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχουμε θέσει περαιτέρω περιορισμούς για τις λύσεις που θα προκύψουν. Τέτοιοι περιορισμοί δε χρειάστηκαν γιατί οι λύσεις που προκύπτουν από τα όρια των ελεύθερων μεταβλητών που έχουμε θέσει είναι όλες πραγματικές και υλοποιήσιμες.

Το επόμενο τμήμα των ρυθμίσεων που πρέπει να υλοποιήσουμε αφορά την κάθε γενιά βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα τους πληθυσμούς (population). Έτσι, αρχικά θέτουμε το μέγεθος του πληθυσμού των γονέων (parent population size) ίσο με 15 και το μέγεθος του πληθυσμού των παιδιών που θα προκύψουν από τους γονείς αυτούς (offspring population size) ίσο με 60. Από τον κατασκευαστή του προγράμματος προτείνεται η αναλογία αυτών των δύο πληθυσμών να είναι ανάμεσα σε  $1/3$  με  $1/7$ , είναι προφανές ότι σεβόμαστε τα όρια αυτά με αναλογία ίση με  $1/4$ . Για κάθε νέο απόγονο θέτουμε τον αριθμό των γονέων που θα συμβάλουν για τη δημιουργία του (parents of one offspring) ίσο με 2 γονείς. Όσο αφορά το κομμάτι των ελίτ λύσεων (elitism) θέτουμε τον αριθμό των ελίτ λύσεων που θα εμφανίζονται σε κάθε γενιά (elite archive set) ίσο με 15. Ορίζουμε επίσης τον αριθμό των ελίτ λύσεων που απ' ευθείας αντιγράφονται στον πληθυσμό των νέων παιδιών της επόμενης γενιάς (elite indiv. to force as new offspring) ίσο με 1. Αυτό γίνεται προκειμένου να διαφυλάξουμε ότι στην επόμενη γενιά θα διατηρηθεί τουλάχιστον μία βέλτιστη λύση. Επίσης, επιλέγουμε την πιθανότητα να επιλεγεί μία ελίτ λύση ως γονέας για έναν απόγονο (probability to select an elite) ίση με 0,15. Τέλος επιλέγουμε τον αριθμό των γονέων που θα ανταγωνιστούν μεταξύ τους προκειμένου να επιλεγεί ένας από τους δύο για να δώσει απόγονο (parent selection – tournament size) ίσο με 2 γονείς. Από τους δύο θα επιλεγεί ο γονέας με τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει λάβει ο καθένας. Αυτό όπως έχει αναφερθεί γίνεται προκειμένου να οδηγηθούμε σε απογόνους με βέλτιστα χαρακτηριστικά και να αποκλείσουμε αυτούς που μας οδηγούν σε μη βέλτιστες λύσεις. Όμως προκειμένου να δώσουμε και την πιθανότητα σε γενετικό υλικό που δίνει χειρότερες λύσεις να εξελιχθεί, ώστε να αποκλείσουμε και το φαινόμενο να παγιδευτούμε σε τοπικό ακρότατο, μπορεί με μικρή πιθανότητα να επιλεγεί και ο γονέας με τη μικρότερη τιμή. Έτσι, ορίζουμε στο πρόγραμμα και την πιθανότητα με την οποία επιλέγεται ο καλύτερος από τους δύο γονείς που συγκρίνονται κάθε φορά (tournament probability) ίση με 0,9. Δηλαδή αφήνουμε και μία μικρή πιθανότητα ίση με 0,1 να επιλεγεί και ο χειρότερος. Εποπτικά όλα όσα αναφέραμε φαίνονται στο επόμενο φύλο ρυθμίσεων του κώδικα βελτιστοποίησης:



Σχήμα 4.9 Φύλο ρυθμίσεων EA (Easy v2.0) Search Engines (Multilevel) - Population

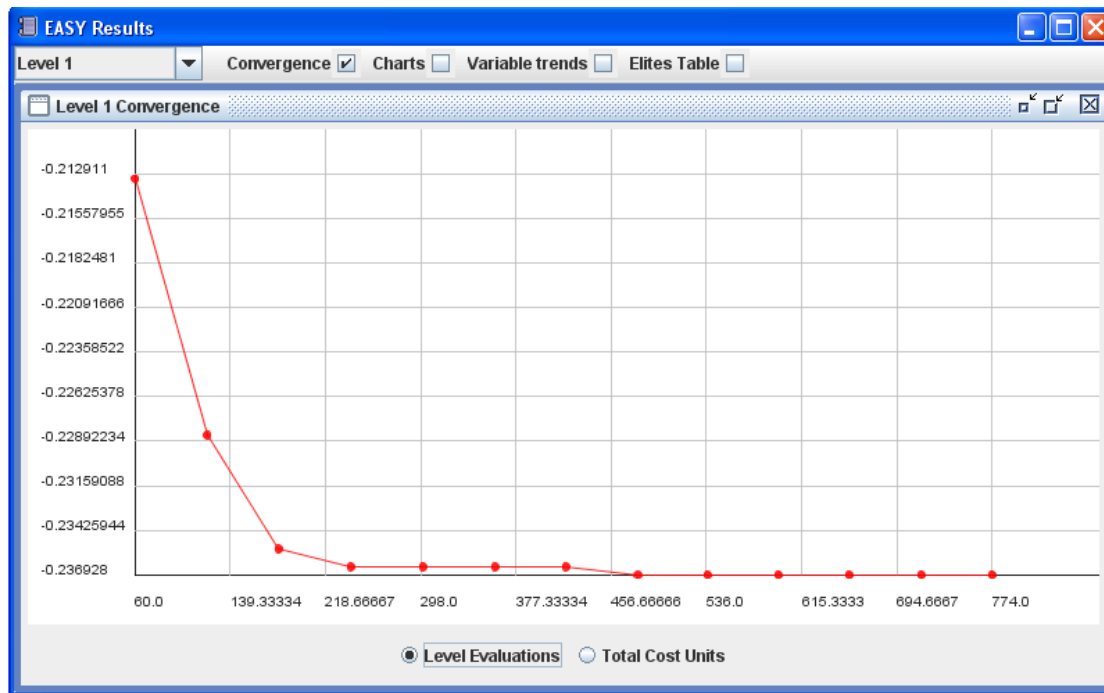
Τέλος, πρέπει να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους που αφορούν την κωδικοποίηση των μεταβλητών (coding), τον τελεστή διασταύρωσης (crossover) και τον τελεστή μετάλλαξης (mutation), όπως αυτά έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε δυαδική κωδικοποίηση (binary) όπως συνηθίζεται και διασταύρωση δύο σημείων (two point crossover) ως σχήμα διασταύρωσης. Ενώ ως πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability) επιλέγουμε ίση με 0,95, κοντά στη μονάδα όπως είναι λογικό. Σχετικά με τον τελεστή μετάλλαξης, για την εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον πληθυσμό των απογόνων, θέτουμε πιθανότητα (mutation probability) ίση με 0,2 και σε περίπτωση που δεν έχει βρεθεί καλύτερη λύση μετά από 10 γενιές (idle generations) αυτή πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 0,8 (multiplier) που εμείς έχουμε θέσει. Εποπτικά όλα όσα αναφέραμε παραπάνω φαίνονται στο επόμενο φύλο ρυθμίσεων του κώδικα βελτιστοποίησης: [3]



Σχήμα 4.10 Φύλο ρυθμίσεων EA (Easy v2.0) Search Engines (Multilevel) - Operators

Συνεπώς αφού έχουμε ρυθμίσει όλες τις βασικές παραμέτρους του EA μπορούμε να εκκινήσουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Θέτουμε ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων προκειμένου να έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε τη διαδικασία και να τη διακόψουμε εμείς όταν θεωρήσουμε πως αυτή έχει συγκλίνει ύστερα από ένα σημείο και μετά.

Μετά από περίπου 480 αξιολογήσεις ο EA έχει συγκλίνει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Όπως ήταν αναμενόμενο η βέλτιστη λύση για την ενεργειακή αξιοποίηση του ΥΗΣ υλοποιείται όταν δημιουργούμε τη αντλιοσταμειυτική μονάδα με τη μέγιστη ονομαστική ισχύ αντλίας και αυτή λειτουργεί τις περισσότερες δυνατές ώρες κάθε ημέρα του έτους. Δηλαδή σύμφωνα με τα όρια που είχαμε θέσει, οι ελεύθερες μεταβλητές παίρνουν τις τιμές 200 MW και 6 ώρες αντίστοιχα. Ενώ ο στόχος που είχαμε θέσει, δηλαδή η μεγιστοποίηση του συντελεστή φορτίου της εγκατάστασης, λαμβάνει την τιμή 23,69% υλοποιώντας τη λύση αυτή. Συνοπτικά τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να φανούν από τις επόμενες εικόνες:



Σχήμα 4.11 Διάγραμμα μεταξύ του ενεργειακού στόχου και των συνολικών αξιολογήσεων

Level 1 Elites								
ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable 1	200.50919...	200.70449...	200.9	200.50919...	200.70449...	200.50919...	200.70449...	200.9
Variable 2	6.2079182	6.1848492	6.202148	6.1848492	6.1848492	6.6347006	6.2079182	6.4443784...
Objective 1	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928
9	10	11	12	13	14	15		
200.70449...	200.118391	200.31369...	200.118391	200.50919...	200.31369...	200.70449...		
6.1848492	6.2944299	6.0925732	6.4270796	6.0868030...	6.5135854	6.1848492		
-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928	-0.236928		

Πίνακας 4.1 Οι 15 ελίτ λύσεις που έχουν βρεθεί από τον EA μέχρι τη στιγμή που σταματάμε την εκτέλεση του

Η πρώτη εικόνα παρουσιάζει το διάγραμμα μεταξύ του στόχου (συντελεστής φορτίου) και τον αριθμό των αξιολογήσεων. Ενώ η δεύτερη παρουσιάζει τον πίνακα με τις ελίτ λύσεις κατά την τελευταία αξιολόγηση που σταματήσαμε την επαναληπτική διαδικασία στον EA. Στον πίνακα αυτό βλέπουμε δηλαδή την κάθε λύση από τις 15 που αποτελείται από τις τιμές που έχουν λάβει οι δύο ελεύθερες μεταβλητές καθώς και ο στόχος του προβλήματος, δηλαδή ο συντελεστής φορτίου. Φυσικά και οι 15 λύσεις έχουν ταυτιστεί με το καθολικό μέγιστο σύμφωνα πάντα με τους περιορισμούς που έχουμε θέσει. Δηλαδή βρήκαμε ότι ο μέγιστος συντελεστής φορτίου εμφανίζεται όταν έχουμε αντλία με ονομαστική ισχύ 200 MW και αυτή λειτουργεί για 6 ώρες κάθε ημέρα. Ενώ αν αφήναμε ακόμα περισσότερο τον EA να τρέξει, αυτός θα επιχειρούσε να βρει ακόμα καλύτερη λύση, η οποία φυσικά και δεν υπάρχει.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η επίτευξη του στόχου της μεγιστοποίησης της ενεργειακής εκμεταλλευσιμότητας ταυτίζεται με την τάση για τη δημιουργία όσο γίνεται μεγαλύτερης αντλίας και λειτουργία της όσο πιο πολλές ώρες αυτό είναι εφικτό. Το συμπέρασμα αυτό κρίνεται απολύτως λογικό και προφανές, αφού όσο μεγαλύτερη αντλία εγκαταστήσουμε και

όσο περισσότερες ώρες τη λειτουργήσουμε, τόσο περισσότερο όγκο νερού θα αντλήσουμε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως, αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερο όγκο νερού αντλήσουμε τόσο πιο πολύ θα προσεγγίσουμε τη λειτουργία των υδροτροβίλων στην ονομαστική τους ισχύ κατά τη διάρκεια του έτους. Αποτέλεσμα το οποίο άμεσα συνδέεται με το συντελεστή φορτίου του ΥΗΣ. Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την πορεία της μελέτης μας και θα αντιπαραβληθεί με την τάση του επόμενου στόχου μας.

#### 4.6.2 Μεγιστοποίηση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου αντλιοσταμείωσης

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε την τάση που παρουσιάζει η βέλτιστη λύση για τη δημιουργία της αντλιοσταμειωτικής εγκατάστασης με μοναδικό στόχο τα οικονομικά μεγέθη της εν λόγω επένδυσης. Πιο συγκεκριμένα επιθυμούμε να βρούμε ποια λύση προσφέρει το μέγιστο κέρδος σε € σε παρούσα αξία. Δηλαδή θα μεγιστοποιήσουμε τη συνάρτηση κέρδους ή ζημίας όπως αυτή είχε οριστεί στο κεφάλαιο σχετικά με την ανάλυση του προγράμματος Fortran.

Προκειμένου να λάβουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά του προηγούμενου στόχου δε θα αλλάξουμε τα όρια των δύο ελεύθερων μεταβλητών. Έτσι θα έχουμε και σε αυτήν την ανάλυση τα ακόλουθα όρια:

Ονομαστική ισχύς αντλίας: 1 ~ 200 MW  
Ωρες λειτουργίας κάθε ημέρα: 1 ~ 6 ώρες

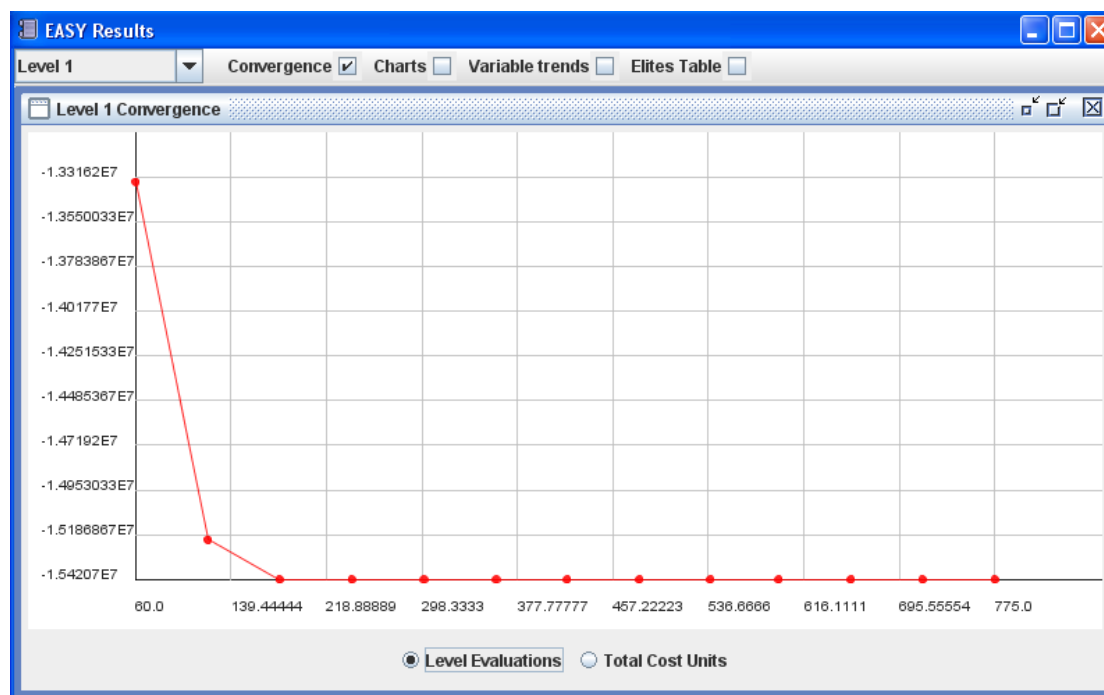
Επίσης θα χρησιμοποιήσουμε μόνο ακέραια διακριτοποίηση των μεταβλητών όπως και προηγουμένως για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί. Ενώ στο τεχνικό κομμάτι της σύνδεσης των δύο προγραμμάτων (κώδικας Fortran και ΕΑ βελτιστοποίησης) το μόνο σημείο που θα αλλάξει είναι το αρχείο εξόδου. Στο οποίο πλέον θα γράφεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κέρδους ή ζημίας. Αυτό φυσικά θα γίνεται πάλι με αρνητικό πρόσημο προκειμένου να επιτύχουμε τη βελτιστοποίηση της για τους λόγους που έχουν αναφερθεί.

Στη συνέχεια παρόμοια με πριν θα ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του ΕΑ. Πρέπει να τονιστεί ότι δε θα προβούμε σε κάποια αλλαγή αφού οι ρυθμίσεις που είχαν γίνει και προηγουμένως εκφράζουν μία χρυσή τιμή ανάμεσα στο σύνολο των παραμέτρων. Έτσι για να αποφύγουμε άσκοπες επαναλήψεις δε θα εμφανίσουμε ξανά τα φύλα ρυθμίσεων του κώδικα βελτιστοποίησης.

Συνεπώς αφού έχουμε ρυθμίσει όλες τις βασικές παραμέτρους του ΕΑ μπορούμε να εκκινήσουμε, όπως και πριν, τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ενώ παρόμοια θέτουμε ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων προκειμένου να έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε τη διαδικασία και να τη διακόψουμε εμείς όταν θεωρήσουμε πως αυτή έχει συγκλίνει ύστερα από ένα σημείο και μετά.

Μετά από περίπου 180 αξιολογήσεις ο ΕΑ έχει συγκλίνει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Διαπιστώνουμε δηλαδή πως η βέλτιστη λύση που μας προσφέρει το μέγιστο οικονομικό κέρδος σχετίζεται με τη δημιουργία της μικρότερης δυνατής αντλίας και τη λειτουργία της τις λιγότερες δυνατές ώρες. Δηλαδή σύμφωνα με τα όρια που είχαμε θέσει στις ελεύθερες μεταβλητές αυτό μεταφράζεται σε αντλία ονομαστικής

ισχύος 1 MW και λειτουργίας 1 ώρας κάθε ημέρα. Ενώ ο στόχος που είχαμε θέσει, δηλαδή η μεγιστοποίηση της συνάρτησης κέρδους λαμβάνει την τιμή 15.420.650 €, για την υλοποίηση αυτής της λύσης. Συνοπτικά τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να φανούν από τις επόμενες εικόνες:



Σχήμα 4.12 Διάγραμμα μεταξύ του οικονομικού στόχου και των συνολικών αξιολογήσεων

ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable 1	1.9770292...	1.5862167...	1.0	1.0	1.7816229...	1.3908104...	1.7816229...	1.9770292...
Variable 2	1.7036163...	1.10957952	1.8478005	1.0403714...	1.6747830...	1.6401736	1.8247315	1.6978520...
Objective 1	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7
9	10	11	12	13	14	15		
1.7816229...	1.0	1.1954056...	1.0	1.0	1.3908104...	1.7816229...		
1.38641224	1.6920818	1.0403714...	1.7266853...	1.7901280...	1.56520053	1.8997087...		
-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7	-1.54207E7		

Πίνακας 4.2 Οι 15 ελίτ λύσεις που έχουν βρεθεί από τον ΕΑ μέχρι τη στιγμή που σταματάμε την εκτέλεση του

Η τάση των αποτελεσμάτων να οδηγούνται στις μικρότερες δυνατές λύσεις της αντλιοσταμειντικής εγκατάστασης πρέπει να επεξηγηθεί περαιτέρω, γιατί σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του προηγούμενου στόχου, αυτά δεν είναι τόσο προφανή. Όπως γνωρίζουμε από το πρόγραμμα λειτουργίας των υδροστροβίλων υπάρχουν κάποιες μέρες που αυτοί λειτουργούν κοντά στην ονομαστική ισχύ λειτουργίας τους. Αυτό μεταφράζεται στο γεγονός ότι κάποιες ημέρες ο αντλούμενος όγκος νερού δεν καταφέρνει να απορροφηθεί εξ' ολοκλήρου και κάποια ποσότητα του υπερχειλίζει αναξιοποίητη. Αυτό το φαινόμενο γίνεται όλο και πιο έντονο όσο μεγαλώνει ο όγκος νερού που αντλείται κάθε ημέρα από την αντλία. Όπως έχει εξηγηθεί η ποσότητα του νερού που αντλείται κάθε ημέρα εξαρτάται από τις δύο ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος μας, δηλαδή την ονομαστική ισχύ της αντλίας και τις ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα. Συνεπώς αφού η σχέση είναι ευθέως ανάλογη είναι προφανές ότι όσο μεγαλώνουν αυτά τα δύο μεγέθη τόσο μεγαλώνει και ο αντλούμενος όγκος νερού και

αντίστοιχα τόσο περισσότερο αυξάνει και η ποσότητα του νερού που υπερχειλίζει αναξιοποίητη κάθε χρόνο. Επομένως είναι απολύτως λογικό η βέλτιστη οικονομικά λύση να οδηγείται σε όσο το δυνατόν μικρότερη ονομαστική ισχύ αντλίας και λιγότερες ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα του έτους.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε αποδείξαμε ότι οι δύο στόχοι που έχουν τεθεί για το συγκεκριμένο έργο είναι ξεκάθαρα αντικρουόμενοι. Δηλαδή συμπεραίνουμε ότι αν επιθυμούμε να βρούμε μία λύση που να καλύπτει και τους δύο στόχους σε κάποιο βαθμό πρέπει η λύση αυτή να είναι συμβιβαστική. Αυτό φυσικά θα γίνει ακόμα πιο ξεκάθαρο στην επόμενη ενότητα που θα επιχειρήσουμε να βρούμε τη βέλτιστη δυνατή λύση με τη βοήθεια του EA και για τους δύο στόχους ταυτόχρονα.

#### **4.6.3 Εξεύρεση βέλτιστης λύσης και για τους δύο στόχους του προβλήματος ταυτόχρονα**

Μέσα από τις δύο προηγούμενες ενότητες είχαμε την ευκαιρία να διαπιστώσουμε ότι κάθε στόχος που έχουμε θέσει οδεύει προς αντίθετη κατεύθυνση ο καθένας από τον άλλο. Αυτό φυσικά μεταφράζεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει μία βέλτιστη λύση που να καλύπτει ταυτόχρονα και τις δύο επιδιώξεις μας. Επομένως από την ανάλυση που θα ακολουθήσει περιμένουμε να λάβουμε ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων που η μία λύση να υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο και να υστερεί ως προς τον άλλο, συγκριτικά με μία άλλη που συμπεριφέρεται αντιστρόφως. Δηλαδή με λίγα λόγια θα αναζητήσουμε στην ενότητα αυτή το μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, όπως αυτό έχει οριστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

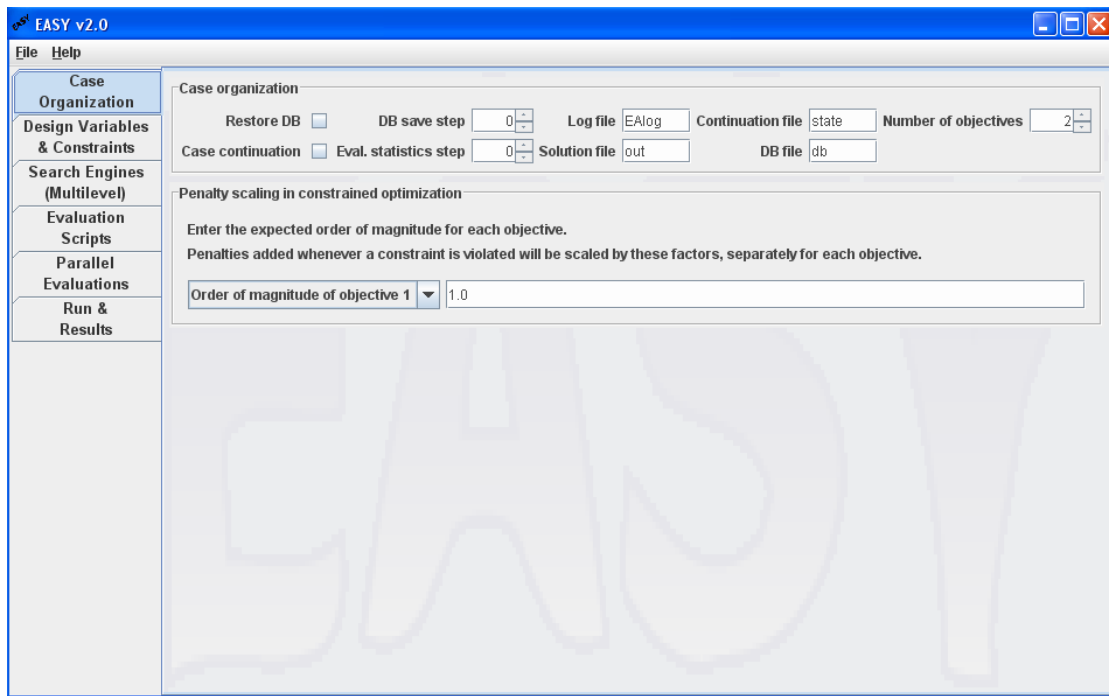
Ανάλογα με προηγουμένως δε θα αλλάξουμε τα όρια των δύο ελεύθερων μεταβλητών. Έτσι θα έχουμε και σε αυτήν την ανάλυση τα ακόλουθα όρια:

Ονομαστική ισχύς αντλίας: 1 ~ 200 MW  
Ωρες λειτουργίας κάθε ημέρα: 1 ~ 6 ώρες

Επίσης θα χρησιμοποιήσουμε μόνο ακέραια διακριτοποίηση των μεταβλητών όπως και προηγουμένως για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί. Ενώ στο τεχνικό κομμάτι της σύνδεσης των δύο προγραμμάτων (κώδικας Fortran και EA βελτιστοποίησης) το μόνο σημείο που θα αλλάξει για άλλη μία φορά είναι το αρχείο εξόδου. Στο οποίο πλέον θα γράφονται δύο τιμές, από τη μία ο συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ και από την άλλη η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κέρδους ή ζημίας. Αυτό φυσικά θα γίνεται πάλι με αρνητικό πρόσημο και για τις δύο τιμές προκειμένου να επιτύχουμε τη βελτιστοποίηση των δύο στόχων και όχι την ελαχιστοποίηση τους.

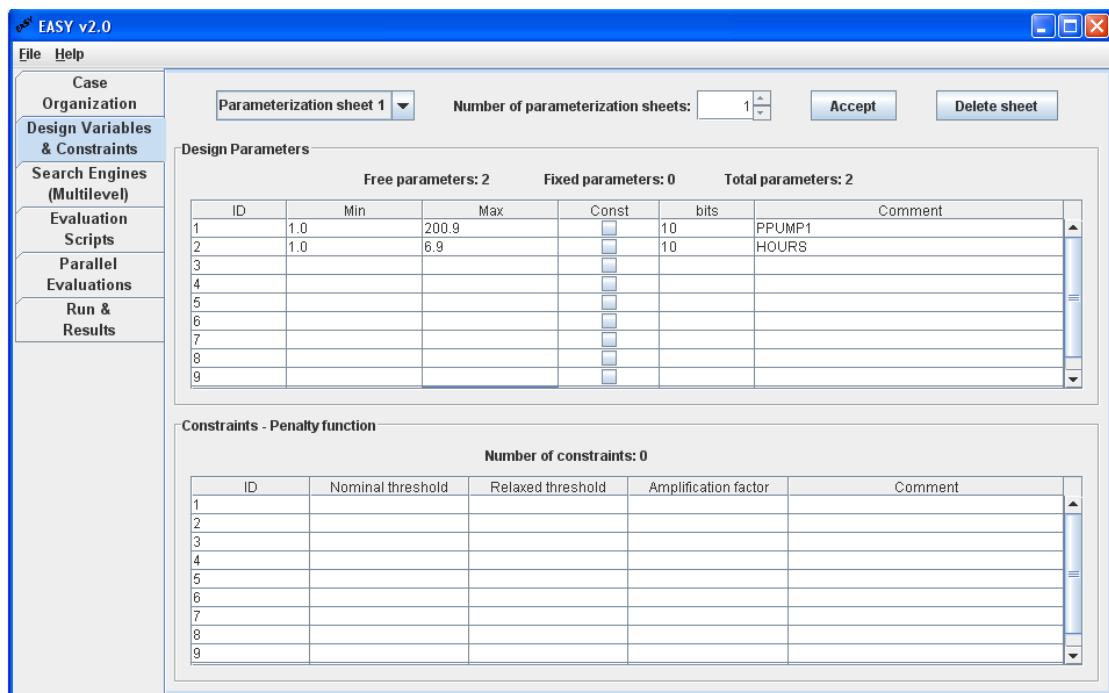
Στη συνέχεια παρόμοια με πριν θα ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του EA. Το μοναδικό σημείο που θα αλλάξει στις ρυθμίσεις αυτές είναι ο αριθμός των στόχων που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, οι οποίοι είναι πια δύο. Έτσι θα προκύψει το επόμενο φύλο ρυθμίσεων του κώδικα βελτιστοποίησης: [3]



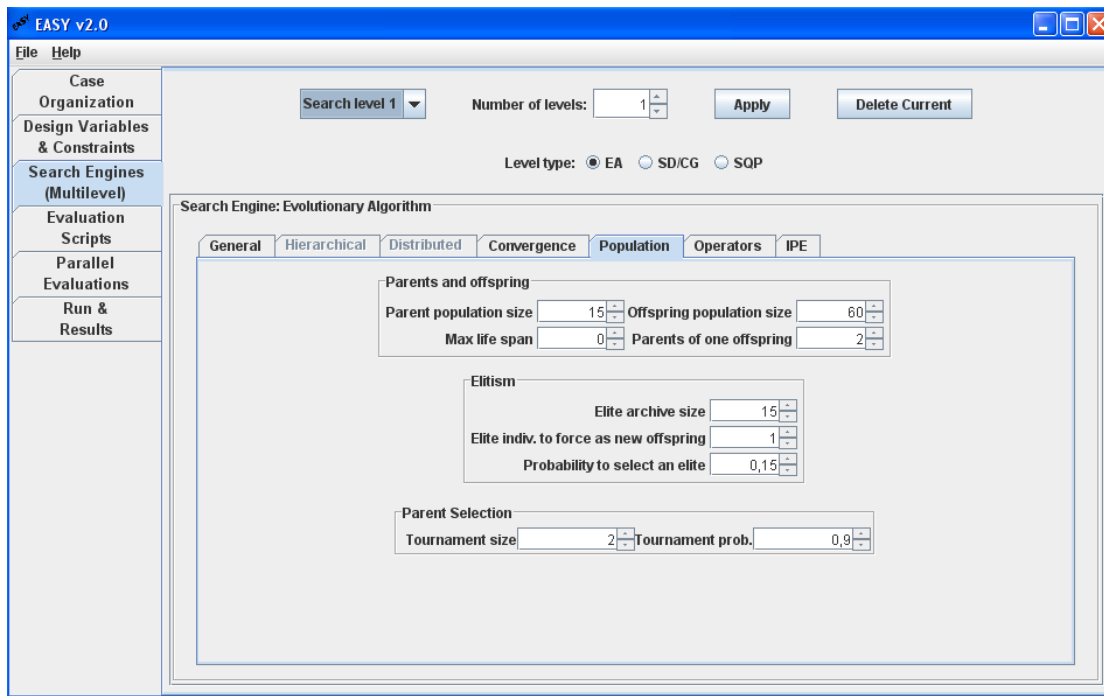


Σχήμα 4.13 Φύλο ρυθμίσεων EA (Easy v2.0) Case Organization

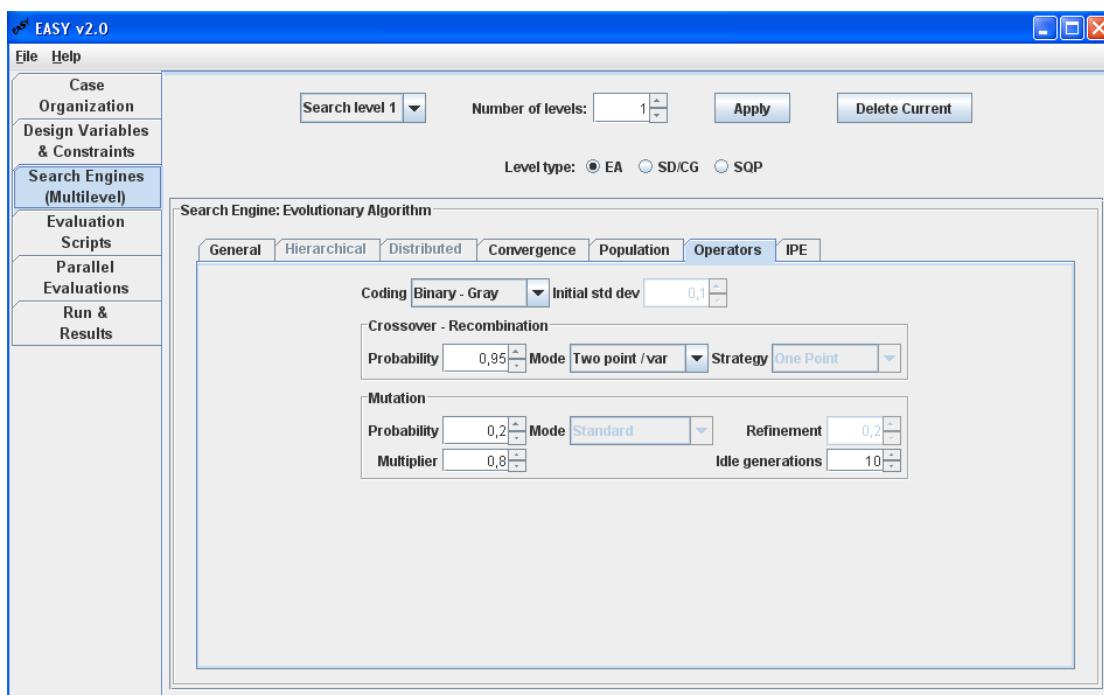
Στη συνέχεια για λόγους πληρότητας παραθέτουμε και τις υπόλοιπες ρυθμίσεις στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης οι οποίες τονίζεται ότι δεν έχουν μεταβληθεί, για λόγους που ειπώθηκαν προηγουμένως. Έτσι έχουμε τα επόμενα φύλα ρυθμίσεων: [3]



Σχήμα 4.14 Φύλο ρυθμίσεων EA (Easy v2.0) Design Variables & Constraints



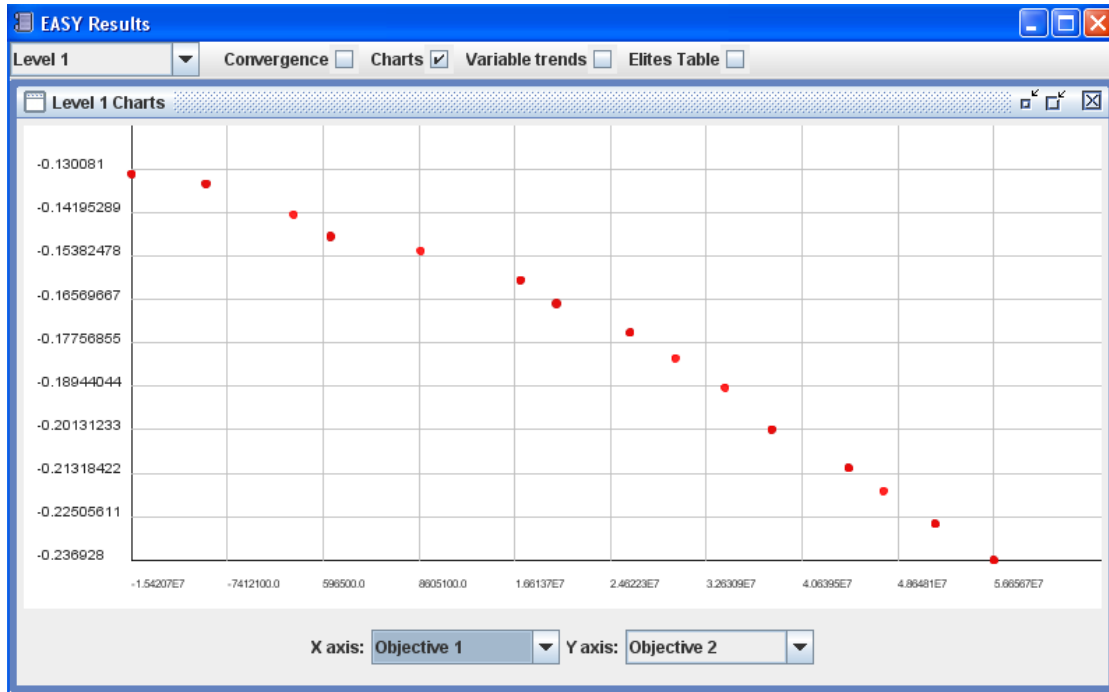
Σχήμα 4.15 Φύλο ρυθμίσεων EA (Easy v2.0) Search Engines (Multilevel) - Population



Σχήμα 4.16 Φύλο ρυθμίσεων EA (Easy v2.0) Search Engines (Multilevel) - Operators

Αφού έχουμε ρυθμίσει όλες τις βασικές παραμέτρους του EA μπορούμε να εκκινήσουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης και να παρακολουθήσουμε το σύνολο των βέλτιστων λύσεων που διαμορφώνονται. Ενώ παρόμοια θέτουμε ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων προκειμένου να έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε τη διαδικασία και να τη διακόψουμε εμείς όταν θεωρήσουμε πως αυτή έχει συγκλίνει ύστερα από ένα σημείο και μετά.

Μετά από περίπου 1700 αξιολογήσεις θεωρούμε ότι ο ΕΑ έχει συγκλίνει στη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Έχει βρει δηλαδή το σύνολο των βέλτιστων λύσεων που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη. Στις επόμενες εικόνες δίνεται σχηματικά και σε πίνακα το μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, όπως αυτές προέκυψαν από τον ΕΑ:



Σχήμα 4.17 Μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων για τους 2 στόχους του προβλήματος

ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable 1	200.50919...	1.0	83.0703443	33.828177...	6.6667652	132.89881...	152.24394...	181.16407...
Variable 2	6.5251199	1.8651052...	6.6231661...	6.7385170...	6.6693041	6.761586	6.5251199	6.5712638
Objective 1	5.66567E7	-1.54207E7	2.62587E7	1244790.0	-9206950.0	3.80774E7	4.45336E7	5.17471E7
Objective 2	-0.236928	-0.130081	-0.173984	-0.147382	-0.132893	-0.200726	-0.211422	-0.226848
9	10	11	12	13	14	15		
56.299736...	68.0240712	41.2536631	164.35907...	96.357897...	22.1038428	111.20886...		
6.4616831	6.3924702	6.4847521...	6.3694012	6.4847521...	6.2598264	6.2482919...		
1.70949E7	2.00974E7	8733350.0	4.74438E7	3.00254E7	-1894420.0	3.41739E7		
-0.15946	-0.165929	-0.15139	-0.217786	-0.181044	-0.14141	-0.189197		

Πίνακας 4.3 Οι 15 ελίτ λύσεις που έχουν βρεθεί από τον ΕΑ μέχρι τη στιγμή που σταματάμε την εκτέλεση του

Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto των βέλτιστων λύσεων, όπου στον άξονα των x δίνεται η αντικειμενική συνάρτηση κέρδους ή ζημίας και στον άξονα των y ο συντελεστής φορτίου του ΥΗΣ. Ενώ στην δεύτερη εικόνα δίνεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις τιμές των μεταβλητών που δίνουν τις συγκεκριμένες λύσεις.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα προκύπτουν κάποια σημαντικά συμπεράσματα που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από τον επενδυτή ενός τέτοιου έργου. Το πιο σημαντικό στοιχείο αναφέρεται στις ώρες λειτουργίας της αντλίας κάθε ημέρα. Είναι εμφανές ότι οι λύσεις που προέκυψαν αναφέρονται σε 6 ώρες λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα. Δηλαδή παρατηρούμε ότι η χρυσή τομή που αναζητούσαμε ανάμεσα στους

δύο στόχους φαίνεται να βρίσκεται στις μεγαλύτερες δυνατές ώρες λειτουργίας της αντλίας για κάθε ημέρα. Αυτό φαίνεται να είναι λογικό αφού στόχος μας είναι να αποσβέσουμε την αρχική επένδυση που προτιθέμεθα να κάνουμε κατά τη δημιουργία του αντλιοστασίου. Συνεπώς για να αποσβεστεί η επένδυση αλλά και παράλληλα να επιτύχουμε και αύξηση του συντελεστή φορτίου του ΥΗΣ απαιτείται η αντλία να δουλεύει 6 ώρες κάθε μέρα. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, άσχετα από το μέγεθος της αντλίας που θα επιλέξουμε τελικά να τοποθετήσουμε, η πιο ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική λειτουργία της αντλίας είναι οι 6 ώρες την ημέρα.

Μπορούμε εύκολα επίσης να παρατηρήσουμε ότι μέσα στις 15 καλύτερες λύσεις που προέκυψαν στη συγκεκριμένη επανάληψη που έχουμε σταματήσει τον ΕΑ βρίσκονται και οι δύο ακραίες λύσεις του προβλήματος. Δηλαδή η λύση του 1 MW αντλίας και 1 ώρας λειτουργίας της κάθε ημέρα, που μας προσφέρει το μέγιστο οικονομικό όφελος αλλά και το μικρότερο συντελεστή φορτίου. Αλλά και η λύση των 200 MW αντλίας και 6 ώρες λειτουργίας της, η οποία προσφέρει το χειρότερο οικονομικό αποτέλεσμα αλλά τον μεγαλύτερο συντελεστή φορτίου. Στο σημείο αυτό φαίνεται πια ξεκάθαρα όσο ποτέ ότι η κάθε βέλτιστη λύση που δίνεται υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο αλλά υστερεί ως προς τον άλλο. Συνεπώς η αναλογία που επιθυμούμε να επιτύχουμε ανάμεσα στα δύο αποτελέσματα είναι ξεκάθαρα μία επιλογή που πρέπει να λάβει ο επενδυτής του έργου.

Επομένως αν θεωρήσουμε πως επιθυμούμε μία λύση που προφανώς θα είναι επικερδής αλλά θα συνεισφέρει και στο μεγαλύτερο βαθμό στην ενεργειακή αξιοποίηση του ΥΗΣ εντοπίζουμε από τις 15 ελίτ λύσεις που έχουν προκύψει από τον ΕΑ τη λύση με 22 MW αντλία και 6 ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα. Όπως φαίνεται από τον πίνακα αυτή η λύση μας προσφέρει κέρδος 1.894.418 € παρούσας αξίας και συντελεστή φορτίου της τάξεως του 14,14 %. Δηλαδή συγκρίνοντας τον με τον υπάρχον συντελεστή φορτίου που είναι 12,61 % έχουμε μία αύξηση της τάξης του 1,5 %, αύξηση η οποία κρίνεται σημαντική αν αναλογιστούμε το μεγάλο μέγεθος ισχύος των υδροστροβίλων.

Η πιο πάνω λύση μάλιστα είναι η πιο ακραία οικονομικά λύση που προσφέρει οικονομική βιωσιμότητα στο έργο. Για να το αποδείξουμε θα μπορούσαμε να επιλέξουμε μία ακόμα πιο μεγάλη αντλία για 6 ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα, προκειμένου να υπολογίσουμε το συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα της επένδυσης Έτσι, αν πειραματιστούμε με την ονομαστική ισχύ της αντλίας διατηρώντας σταθερές τις ώρες λειτουργίας της αντλίας στις 6 θα προκύψει ο επόμενος πίνακας:

Ονομαστική Ισχύς Αντλίας	Κέρδος ή Ζημία σε €	Συντελεστής Φορτίου ΥΗΣ %
22	1.894.420	14,14
23	-131.833	14,18
24	-2.309.814	14,23

Πίνακας 4.4 Εύρεση της πιο οριακά οικονομικά βιώσιμης λύσης, για 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Μελετώντας τον πίνακα αυτό παρατηρούμε ότι η πιο ακραία οικονομικά βιώσιμη λύση που μπορούμε να επιλέξουμε προκειμένου να επιτύχουμε τον μεγαλύτερο συντελεστή φορτίου του ΥΗΣ είναι είναι όντως τα 22 MW ονομαστική ισχύς. Αυτό

φυσικά δεν είναι έκπληξη αφού η λύση αυτή βρισκόταν μέσα στις 15 καλύτερες που είχε βρει ο ΕΑ.

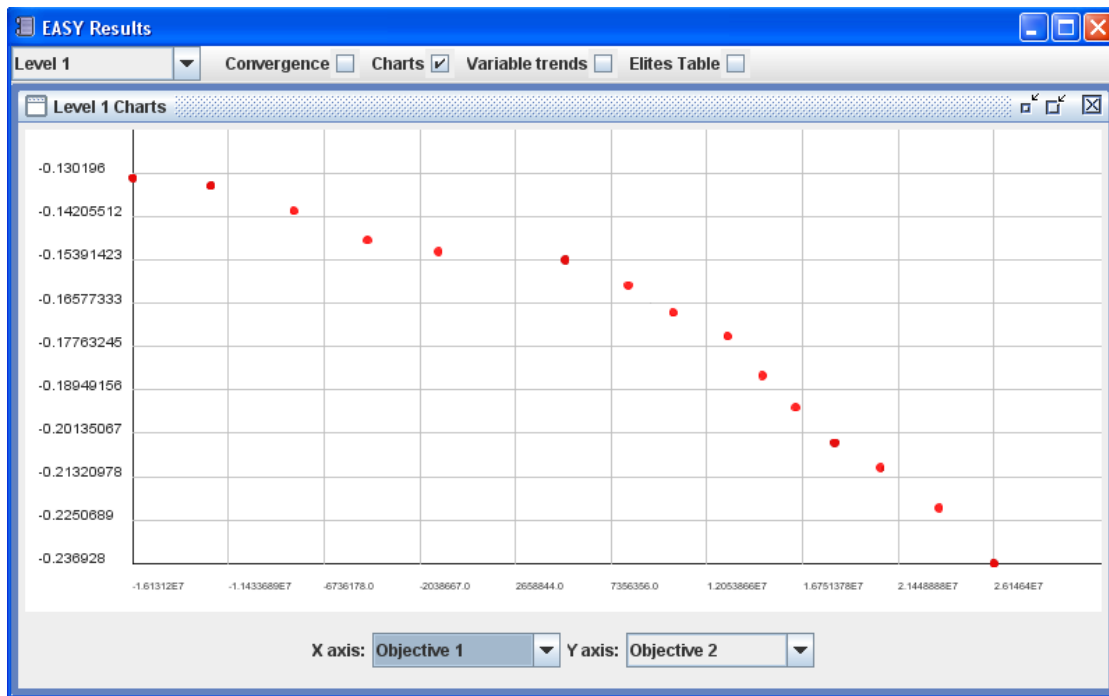
Εν κατακλείδι, η ανάλυση αυτή μας έδειξε ξεκάθαρα πως υπάρχουν πολλές δυνατές επιλογές για το μέγεθος της εγκατάστασης, αλλά περιορίσαμε εξ' αρχής τη λειτουργία της στις 6 ώρες κάθε ημέρα του έτους. Φυσικά οι επιλογές αυτές μας δίνουν καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον ένα στόχο και χειρότερα ως προς τον άλλο. Θέλοντας όμως να βρούμε τη χρυσή τομή ανάμεσα στους δύο στόχους διερευνήσαμε μία μικρή περιοχή των λύσεων για 6 ώρες λειτουργίας, η οποία μας βοήθησε να προσανατολιστούμε σε μία αντλία των 22 MW. Η λύση αυτή όπως φάνηκε μας προσφέρει ταυτόχρονα και οικονομική βιωσιμότητα αλλά και σημαντική βελτίωση του συντελεστή φορτίου της εγκατάστασης. Βέβαια δε μπορεί να κριθεί ως μοναδική λύση αφού ο επενδυτής που θα προβεί στη συγκεκριμένη επένδυση ίσως επιθυμεί μία διαφορετική αναλογία ανάμεσα στους δύο στόχους.

#### **4.6.4 Διερεύνηση αποτελεσμάτων με ευνοϊκότερη τιμολογιακή πολιτική**

Στην ενότητα αυτή θα διερευνήσουμε τη μεταβολή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, από το προηγούμενο κεφάλαιο, σε περίπτωση που η οικονομική συμφωνία που έκλεινε ο κατασκευαστής του έργου με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας ήταν πιο ευνοϊκή. Ως πιο ευνοϊκή θεωρείται η οικονομική συμφωνία στην οποία η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον πάροχο είναι πιο χαμηλή ή η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στον πάροχο είναι πιο υψηλή. Δηλαδή θα εξετάσουμε την περίπτωση που οι τιμές της συμφωνίας δεν είναι οι μέσες τιμές που έχουμε δεχθεί αλλά ευνοϊκότερες.

Έτσι στην ενότητα αυτή θα μεταβάλουμε την τιμή πώλησης της kWh από 0,15 €/kWh σε 0,16 €/kWh. Αφού κάνουμε την αλλαγή αυτή στον κώδικα Fortran που έχουμε γράψει θα ξανατρέξουμε τον ΕΑ χωρίς όμως να αλλάξουμε καμία από τις ρυθμίσεις που έγιναν στην προηγούμενη ενότητα. Γι' αυτό το λόγο δε θα αναφερθούμε στις ρυθμίσεις αυτές καθόλου για να αποφύγουμε τις άσκοπες επαναλήψεις.

Επομένως επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης, μετά τις αλλαγές που αναφέραμε στην αντικειμενική συνάρτηση κέρδους ή ζημίας. Παρόμοια μετά από 1100 αξιολογήσεις παρατηρούμε ότι ο ΕΑ έχει συγκλίνει και μπορούμε να διακόψουμε τη διαδικασία. Έτσι, στις επόμενες εικόνες δίνεται σχηματικά και σε πίνακα το μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, όπως αυτές προέκυψαν από τον ΕΑ:



Σχήμα 4.18 Μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων για τους 2 στόχους του προβλήματος, με ευνοϊκότερη τιμολογιακή πολιτική

Level 1 Elites								
ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable 1	200.70449...	44.3800991	1.7816229...	137.19766...	5.49433171	39.6902452	18.391100...	119.80656...
Variable 2	6.8019538...	6.2252170...	3.8375342	6.2655907	6.4559129	6.1733147...	6.0348948	6.6116316
Objective 1	2.61464E7	5087070.0	-1.61312E7	1.83231E7	-1.23088E7	-1131440.0	-8229540.0	1.64083E7
Objective 2	-0.236928	-0.152906	-0.130196	-0.203465	-0.132372	-0.150608	-0.139373	-0.193677
9	10	11	12	13	14	15		
33.4373732	103.78338...	71.3460094	150.48541...	83.656651...	57.667652...	171.58906...		
6.8942298	6.6347006	6.830793	6.7673503	6.9	6.853862	6.807724		
-4614880.0	1.47965E7	1.04017E7	2.05609E7	1.30757E7	8191580.0	2.34376E7		
-0.147382	-0.184906	-0.167507	-0.210371	-0.173984	-0.160019	-0.221541		

Πίνακας 4.5 Οι 15 ελίτ λύσεις που έχουν βρεθεί από τον ΕΑ μέχρι τη στιγμή που σταματάμε την εκτέλεση του

Από τις 15 ελίτ λύσεις που φαίνονται στις παραπάνω εικόνες μπορούμε για άλλη μία φορά να παρατηρήσουμε πως οι ώρες λειτουργίας της αντλίας ανεξάρτητα από το ονομαστικό της μέγεθος τείνουν πάλι στον αριθμό 6. Όπως προαναφέραμε οι 6 ώρες λειτουργίας για κάθε ημέρα παρουσιάζονται να είναι η χρυσή τομή ανάμεσα στους δύο στόχους που έχουμε θέσει. Παράλληλα παρατηρούμε για άλλη μία φορά την ύπαρξη ακραίων λύσεων που ικανοποιούν στο έπακρο τον ένα στόχο εις βάρος του δεύτερου.

Η σημαντικότερη όμως παρατήρηση εστιάζεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερα ονομαστικά μεγέθη αντλίας παρουσιάζονται πια ως ελκυστικές λύσεις. Πιο συγκεκριμένα η λύση των 39 MW και 6 ώρες λειτουργίας είναι πια οικονομικά υλοποιήσιμη όπως φαίνεται από τον πίνακα των ελίτ λύσεων. Η συγκεκριμένη λύση αναφέρεται σκόπιμα γιατί είναι η λύση που προσεγγίζει για άλλη μία φορά τα όρια της οικονομικής βιωσιμότητας, αντίστοιχα με την λύση της προηγούμενης ενότητας τα 22 MW. Δηλαδή παρατηρούμε ένα πολύ σημαντικό άλμα στα ονομαστικά μεγέθη αντλιών που είναι εφικτά πια μετά τις αλλαγές στην τιμή πώλησης της kWh. Με αυτή την αλλαγή είναι προφανές ότι είναι πια δυνατό να μεγαλώσουμε ακόμα περισσότερο

το συντελεστή φορτίου της ΥΗΕ έχοντας παράλληλα κέρδη. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ότι με τη λύση των 39 MW μπορούμε να επιτύχουμε συντελεστή φορτίου της τάξεως του 15,06 %, δηλαδή σχεδόν 1 % παραπάνω από τη λύση των 22 MW.

Ενώ για πλήρη διερεύνηση της ακραίας οικονομικά βιώσιμης λύσης που μπορούμε να επιτύχουμε, με τις ευνοϊκές τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, παραθέτουμε τον επόμενο Πίνακα που αναφέρεται σε 6 ώρες λειτουργίας του αντλιοστασίου καθημερινά, αντίστοιχα με την προηγούμενη ενότητα:

Ονομαστική Ισχύς Αντλίας	Κέρδος ή Ζημία σε €	Συντελεστής Φορτίου ΥΗΣ %
38	2.726.997,3	15,01
39	1.131.440	15,06
40	-546.706,3	15,11
41	-1.770.589,5	15,14
42	-3.550.680,8	15,18

Πίνακας 4.6 Εύρεση της πιο οριακά οικονομικά βιώσιμης λύσης, για 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας, για ευνοϊκότερη τιμολογιακή πολιτική

Δηλαδή παρατηρούμε ότι η λύση με αντλία ονομαστικής ισχύος 39 MW και 6 ώρες λειτουργίας είναι όντως η πιο ακραία οικονομικά βιώσιμη λύση. Στόχος της ενότητας είναι να αποδείξει ότι ανάλογα με την οικονομική συμφωνία που θα υλοποιηθεί ανάμεσα στον επενδυτή του έργου και του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετική λύση θα κριθεί κατάλληλη και υλοποιήσιμη. Είναι γνωστό πως οι τιμές αυτές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώνονται πάντα ανάλογα με τον ενεργειακό σχεδιασμό που υλοποιεί η κάθε χώρα. Συνεπώς αν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από συμβατικές ηλεκτροπαραγωγές μονάδες, γίνει πιο ακριβή λόγω της επιβάρυνσης από τα κόστη εκπομπής ρύπων, τότε τόσο πιο εφικτή είναι μία πιο μεγάλη αντλιοσταμειυτική εγκατάσταση. Δηλαδή βλέπουμε πόσο άμεσα επηρεάζεται ένα επενδυτικό πλάνο τέτοιας φύσεως από την ανάγκη μίας χώρας να στραφεί σε πιο οικολογικές λύσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και διαχείρισης του ηλεκτρικού δικτύου.

## 5 Συνολικά Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που προηγήθηκε μπορούμε να οδηγηθούμε σε μερικά πολύ σημαντικά συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, έχει γίνει πια προφανές ότι το μέγεθος του αντλιοστασίου που θα επιλεγεί να δημιουργηθεί για τον ΥΗΣ Πουρνάρι Ι υπόκειται σε κάποιους λογικούς περιορισμούς. Ο ήδη υπάρχον υδροηλεκτρικός σταθμός έχει ονομαστική ισχύ 330 MW και παράγει συγκεκριμένα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα πάντα με την ποσότητα νερού που δύναται να διατεθεί από τον ποταμό Άραχθο. Συνεπώς αυτά τα στοιχεία συνθέτουν σε γενικές γραμμές τα περιθώρια που έχει ο ΥΗΣ να εκμεταλλευτεί επιπλέον ποσά ενέργεια, με τη βοήθεια ενός αντλιοστασίου.

Επομένως όπως παρατηρήσαμε αν εγκαταστήσουμε μία αντλία με πολύ μεγάλη ονομαστική ισχύ, θα αντλούνται πολύ μεγάλες ποσότητες νερού κάθε ημέρα, με αποτέλεσμα να αναγκάζομαστε να υπερχειλίζουμε μεγάλο μέρος των υδάτων αυτών. Αυτό φυσικά οδηγεί σε σημαντικές απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας, που έχουμε πληρώσει για να την αξιοποιήσουμε, με άμεση συνέπεια να οδηγούμαστε σε μη οικονομικά βιώσιμες λύσεις.

Από την άλλη βέβαια, αν επιχειρήσουμε να εγκαταστήσουμε ένα πολύ μικρό αντλιοστάσιο, τότε θα αντιμετωπίσουμε τα ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα. Δηλαδή είναι προφανές ότι μία τέτοια επένδυση θα είναι φυσικά οικονομικά κερδοφόρα αλλά θα αποτυγχάνει στον αρχικό στόχο για τον οποίο μελετήσαμε τη μετατροπή του σταθμού, την αποθήκευση ενέργειας. Το γεγονός ότι θα είναι κερδοφόρα σαν επένδυση οφείλεται φυσικά στο γεγονός ότι πολύ μικρές ποσότητες νερού θα αντλούνται καθημερινά και σχεδόν μηδαμινές ποσότητες θα οδηγούνται προς υπερχειλίση. Ενώ και τα ετήσια κέρδη που παρουσιάζει η επένδυση κρίνονται ικανά να καλύψουν το μικρό κόστος της αρχικής επένδυσης. Φυσικά όμως, όπως αναφέρθηκε, η συμβολή του έργου στην αποθήκευση περισευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και η αύξηση της ενεργειακής αξιοποίησης του ΥΗΣ θα είναι πραγματικά σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Έτσι οδηγηθήκαμε στην ιδέα της εύρεσης μίας χρυσής τομής ανάμεσα στις δύο επιδιώξεις του έργου. Δηλαδή αναζητήσαμε μία λύση που θα μπορούσε ταυτόχρονα να καλύψει και τις ενεργειακές επιδιώξεις μας, αλλά και να είναι οικονομικά βιώσιμη, πράγμα που θα οδηγούσε έναν επενδυτή στην υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου. Γιατί όπως είναι φυσικό καμία επιχείρηση άσχετα από τον δημόσιο ή τον ιδιωτικό της χαρακτήρα δε θα πραγματοποιούσε μία επένδυση που θα παρουσίαζε ζημίες.

Υιοθετώντας μέσες τιμές για την κοστολόγηση του τμήματος κατασκευής του έργου αλλά και την αγορά και πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγηθήκαμε σε συγκεκριμένα αποτελέσματα. Έτσι, διαπιστώσαμε ότι η εγκατάσταση μίας αντλίας με ονομαστική ισχύ μέχρι 22 MW και λειτουργίας της 6 ώρες κάθε ημέρα οδηγεί σε βιώσιμη επένδυση με ταυτόχρονη μέγιστη ενεργειακή αξιοποίηση του υδροηλεκτρικού σταθμού. Δηλαδή αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι η χρυσή τομή ανάμεσα στους στόχους που είχαμε θέσει για την επένδυση αυτή.

Στο πλαίσιο της θεωρητικά βέλτιστης λύσης των 22 MW ονομαστικής ισχύος για την αντλία και 6 ώρες λειτουργίας της, θα μπορούσαμε να παραθέσουμε τα επόμενα συνολικά οικονομικά και ενεργειακά αποτελέσματα της λύσης αυτής:



Οικονομικά αποτελέσματα:

Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε €	9.900.000
Κόστος αγωγού σε €	274.062,4
Κόστος για έργα πολιτικού μηχανικού σε €	1.980.000
Συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης σε €	12.154.062
Συνολικό κόστος χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση για ένα χρόνο σε €	5.009.076,5
Συνολικό κέρδος από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρόνο σε €	6.439.945
Συνολικά οικονομικά οφέλη κάθε χρόνο σε €	1.430.868,5
Τελικό κέρδος σε παρούσα αξία για 20 χρόνια λειτουργίας σε €	1.894.420

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικά οικονομικά αποτελέσματα για τη βέλτιστη λύση αντλίας 22 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Ενεργειακά αποτελέσματα:

Συντελεστής Φορτίου ΥΗΣ %	14,14
Συνολική ενέργεια που αγοράζεται για τη λειτουργία των αντλιών κάθε χρόνο σε MWh	62.613,5
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους χωρίς τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	364.526
Συνολική ενέργεια που παράγεται κάθε χρόνο από τους υδροστροβίλους με τη χρήση της αντλιοταμίευσης σε MWh	408.786,9
Ποσοστό αύξησης της παραγόμενης ενέργειας %	12,14
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης σε MWh	19.680,5
Συνολικός όγκος νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε m <sup>3</sup>	60,5
Συνολική ενέργεια νερού που υπερχειλίζει κάθε χρόνο σε MWh	0,0116
Συνολικές ενεργειακές απώλειες κάθε χρόνο στον κύκλο υδροστροβίλων - αντλιοταμίευσης χωρίς τις υπερχειλίσσεις σε MWh	19680,5
Ποσοστό ενεργειακών απωλειών (χωρίς υπερχειλίσσεις) σε σχέση με την προστιθέμενη ενέργεια	31,43

Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικά ενεργειακά αποτελέσματα για τη βέλτιστη λύση αντλίας 22 MW και 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας

Κρίνοντας όμως λογικό να μη θεωρήσουμε ότι οι τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι δεδομένες προχωρήσαμε και σε μία ακόμα διερεύνηση του προβλήματος. Ακριβώς επειδή οι τιμές αυτές δεν είναι σταθερές, αλλά εξαρτώνται από τη συμφωνία ανάμεσα στον πάροχο της ηλεκτρικής ενέργειας και του επενδυτή του έργου, θα έπρεπε να εξετάσουμε πως επηρεάζεται η βέλτιστη λύση που βρήκαμε με αλλαγή στις τιμές αυτές. Επιλέξαμε να διερευνήσουμε το πρόβλημα προς την κατεύθυνση που οι τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο ευνοϊκές για τον επενδυτή του έργου. Αυτή η επιλογή έγινε ακολουθώντας τη λογική που δείχνει ότι, οι τιμές έχουν την τάση να γίνουν πιο ευνοϊκές για τέτοιες επενδύσεις καθώς περνάνε τα χρόνια, αφού χρόνο με το χρόνο εισάγονται κόστη στην εκπομπή αέριων ρύπων και τα προβλήματα από τη διεύθυνση της αιολικής ενέργειας γίνονται πιο αισθητά.

Επομένως αφού επιλέξαμε υψηλότερη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (σε λογικά πάντα πλαίσια) διαπιστώσαμε ότι ακόμα μεγαλύτερες αντλίες φαίνονται να είναι δυνατές να υλοποιήσουν ένα βιώσιμο οικονομικά έργο. Το νέο όριο

οικονομικής βιωσιμότητας που τέθηκε μετά από αυτές τις αλλαγές είναι αντλία ονομαστικής ισχύος 39 MW και 6 ώρες λειτουργίας της κάθε ημέρα. Δηλαδή βλέπουμε πόσο άμεσα επηρεάζεται η αρχική επιλογή για το μέγεθος του έργου ανάλογα με την τιμολογιακή πολιτική που ακολουθείται για έργα αντίστοιχου ενδιαφέροντος.

Τέλος, πρέπει να σχολιασθούν κάποιοι παράγοντες που αν ληφθούν υπόψη στη λειτουργία του έργου ίσως να παρατηρούνται βιώσιμες λύσεις με ακόμα μεγαλύτερες αντλίες. Πιο αναλυτικά, αν ο διαχειριστής του έργου παρακολουθεί τη στάθμη του άνω ταμιευτήρα και παρατηρεί πως ορισμένες μέρες αυτή είναι ήδη σε πολύ υψηλό επίπεδο έχει τη δυνατότητα να μην αφήσει την αντλία να δουλέψει τις ημέρες αυτές. Με αυτό τον τρόπο θα αποφύγει να ξοδέψει ποσά ενέργειας για να αντλήσει ποσότητες νερού, που στο μεγαλύτερο μέρος τους θα υποχρεωθούν να υπερχειλίσουν, αφού έτσι και αλλιώς οι υδροστρόβιλοι θα δουλεύουν στη μέγιστη ονομαστική τους ισχύ για τις ημέρες αυτές. Επίσης, υπάρχουν πολύ μεγάλες πιθανότητες το έργο να δεχθεί επιχορήγηση από το κράτος ή την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο προώθησης ΑΠΕ και βελτίωσης της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου. Συνεπώς, το αρχικό κόστος του έργου θα μπορούσε να μειωθεί μέχρι και 50 %, με αποτέλεσμα να απαιτούνται ακόμα μικρότερες εισροές κάθε χρόνο για την κάλυψη της αρχικής επένδυσης.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, μονοσήμαντη λύση για τη δημιουργία του συγκεκριμένου έργου μπορεί να δοθεί στην περίπτωση μόνο που ο επενδυτής ενός τέτοιου έργου κατέληγε σε τελική συμφωνία με τον πάροχο του ηλεκτρικού δικτύου σχετικά με την τιμολογιακή πολιτική της kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως με την ανάλυση που προηγήθηκε διαπιστώσαμε ότι ένα έργο μετατροπής στον ΥΗΣ Πουρνάρι Ι είναι εφικτή και βιώσιμη για συγκεκριμένες επιλογές μεγέθους αντλίας και λειτουργίας του έργου καθημερινά. Επομένως, η μετατροπή ΥΗΣ σε αναστρέψιμους είναι μία επιλογή που πρέπει να αξιολογηθεί ιδιαίτερα από τους υπεύθυνους διαμόρφωσης του ενεργειακού σχεδιασμού της χώρας.

Για εποπτικούς λόγους συγκεντρώνουμε τα εξής συμπεράσματα, τα οποία άνετα θα μπορούσαν να γενικευτούν για κάθε ΥΗΣ που υπάρχει πλάνο μετατροπής του σε αναστρέψιμο:

- Αύξηση της ονομαστικής ισχύος του αντλιοστασίου οδηγεί σε αύξηση της ενεργειακής αξιοποίησης του ΥΗΣ και στην αποθήκευση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου.
- Μείωση της ονομαστικής ισχύος του αντλιοστασίου οδηγεί σε αύξηση των οικονομικών οφελών από ένα τέτοιο έργο.
- Η αύξηση και η μείωση των ωρών λειτουργίας της αντλίας καθημερινά οδηγεί σε αντίστοιχα αποτελέσματα με την ισχύ της αντλίας.
- Η αύξηση της τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο οδηγεί επίσης σε κερδοφόρες λύσεις με μεγαλύτερες αντλίες και αντίστροφα. Ενώ και η μείωση της τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο για τη λειτουργία των αντλιών θεωρούμε επίσης ότι οδηγεί σε κερδοφόρες λύσεις με μεγαλύτερες αντλίες και αντίστροφα
- Οι βέλτιστες λύσεις συμβιβασμού οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης και ενεργειακής αξιοποίησης του ΥΗΣ εντοπίζονται σε πιο αυξημένες ώρες λειτουργίας του αντλιοστασίου (τουλάχιστον 6 ώρες καθημερινής λειτουργίας).

## 6 Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία:

- [1] Γιαννάκογλου Κ., Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική, Έκδοση 4<sup>η</sup>, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
- [2] ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., <http://www.ppcr.gr/Home.aspx?C=2>
- [3] Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Easy v2.0 User's Manual, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008
- [4] Ζερβός Α., Κάραλης Γ, Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009
- [5] Μαθιουλάκης Δ., Αναγνωστόπουλος Ι., Τουζόπουλος Δ., Βιομηχανική Ρευστομηχανική, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
- [6] Παναγιωτακόπουλος Δ., Συστημική Μεθοδολογία και Τεχνική Οικονομική, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη 2005
- [7] Παπαδόπουλος Ε., Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2001
- [8] Παπαντώνης Δ., Νέες προοπτικές για την Ανάπτυξη της αντλιοταμίευσης στην Ελλάδα Τεχνολογία και Τεχνολογικοί Περιορισμοί, Βιβλιοθήκη ΤΕΕ, Ιωάννινα 2009
- [9] Παπαντώνης Δ., Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Εκδόσεις Συμεών, Έκδοση 2<sup>η</sup>, Αθήνα 2004
- [10] Παπαντώνης Δ., Μελέτη και Χάραξη Φυγόκεντρων και Αξονικών Αντλιών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004
- [11] Παπαντώνης Δ., Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1998
- [12] Παπαντώνης Δ., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2008
- [13] Τσαγγάρης Σ., Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2005
- [14] Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=277>

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία:

- [15] Electricity Storage Association, <http://www.electricitystorage.org/ESA/home/>

- [16] European Commission, European Guide to Pump Efficiency Single Stage Centrifugal Pumps, EU 2003
- [17] German Wind Energy Association (BWE), <http://www.wind-energie.de/en/wind-energy-in-germany/>
- [18] Google Maps, <http://maps.google.com/maps>
- [19] John Shelley, Essentials of Fortran 77, 2<sup>nd</sup> Edition, Imperial College Computer Centre, London 1989
- [20] Michalewicz Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3<sup>rd</sup> Edition, Springer-Verlag, Charlotte 1996
- [21] Sulzer, Centrifugal Pump Handbook, Sulzer Brothers Limited, Switzerland 1986
- [22] United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Turbines and Pumps, Colorado 1971, <http://www.usbr.gov/>
- [23] Vanderplaats G., Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications, McGraw-Hill, Columbus 1984