



ΠΟΛΥΤΕΧΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ &

ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΩΝ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ-ΑΡΔΕΥΣΗΣ**



Παλιούρας Ξενοφών

Επιβλέπων καθηγητής: Κανέλλος Φώτιος, Επίκουρος Καθηγητής Πολυτεχνείου
Κρήτης

Χανιά 2016

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση του αντλιοστασίου του Βλητέ Σούδας στην Matlab. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αντλιών και συγκεκριμένα των φυγοκεντρικών που είναι και οι πιο κοινές καθώς και οι υδραυλικές ιδιότητες μιας αντλητικής εγκατάστασης. Επίσης περιγράφεται το αντλιοστάσιο του Βλητέ και ο τρόπος λειτουργίας του όπως και ο τρόπος με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση. Επιπλέον παρουσιάζεται το μοντέλο το οποίο προσομοιάζει την λειτουργία του αντλιοστασίου, καθώς και η διαδικασία ελέγχου των δεξαμενών και το feedback στους ελεγκτές των αντλιών. Τέλος, παρατίθεται ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου με βάση ένα σενάριο ημερήσιας ζήτησης.

Περιεχόμενα

1. Η αντλία -Χαρακτηριστικά , Μοντελοποίηση	4
1.1 Εισαγωγή	4
1.2 Ταξινόμηση αντλιών	4
1.3 Φυγοκεντρική αντλία.....	5
1.3.1 Βασική αρχή λειτουργίας	5
1.3.2 Κατηγορίες φυγοκεντρικών αντλιών.....	7
1.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας.....	9
1.3.4 Καμπύλη Παροχής - Ύψους (Q-H)	10
1.3.5 Καμπύλη βαθμού απόδοσης (η)	11
1.3.6 Καμπύλη ισχύος (P ή N)	12
1.3.7 Σηπλαιώση	13
1.4 Πολυβάθμιες αντλίες.....	14
1.5 Μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής	16
1.6 Μοντέλο φυγοκεντρικής αντλίας	19
2. Αντλητική Εγκατάσταση	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Η χαρακτηριστική καμπύλη σωληνογραμμής	25
2.3 Σημείο λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης	28
2.4 Συνεργασία αντλιών	30
2.4.1 Παράλληλη λειτουργία αντλιών	30
2.4.2 Λειτουργία αντλιών εν σειρά	32
2.5 Αγωγός με απώλειες.....	34
2.6 Σωλήνας σε κύρτωση	37
2.7 Δεξαμενή μεταβλητού ύψους	39
2.8 Βαλβίδα αντεπιστροφής.....	41
2.9 Υδραυλικό Ρευστό	44
3. Αντλιοστάσιο Βλητέ.....	45
3.1 Τρόπος λειτουργίας	45
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των αντλιών.....	46
4. Μοντέλο προσομείωσης	48
4.1 Περιγραφή του μοντέλου	48
4.2 Έλεγχος αντλιών.....	53
4.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις	60
4.4 Συμπεράσματα.....	63
Βιβλιογραφία	65

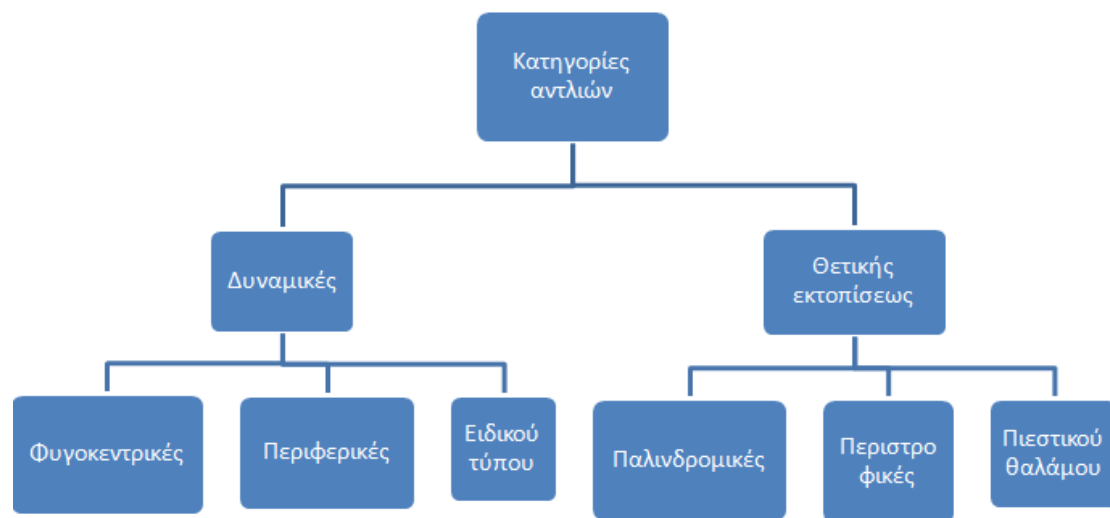
1. Η αντλία -Χαρακτηριστικά , Μοντελοποίηση

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός των αντλιών είναι η διακίνηση υγρών όπως νερού, λαδιού, παραγώγων του πετρελαίου, γάλακτος κλπ. από μία δεξαμενή σε μία άλλη που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συνήθως στάθμη από την πρώτη. Ως δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί μία λίμνη, ένας ποταμός, ένα δοχείο πίεσης κλπ. Στη γενική περίπτωση η διακίνηση του υγρού μεταξύ δύο δεξαμενών γίνεται μέσω σωλήνωσης στην οποία παρεμβάλλεται η αντλία: η διατομή εισόδου (αναρρόφησης) συνδέεται προς την πλευρά της δεξαμενής από την οποία γίνεται η αναρρόφηση προς την οποία καταθλίβεται το υγρό. Η αντλία προσδίδει ενέργεια στο υγρό η οποία αντιστοιχεί στην ενεργειακή αναβάθμιση του υγρού μεταξύ δεξαμενής κατάθλιψης και δεξαμενής αναρρόφησης(λόγω διαφοράς στάθμης και διαφοράς στατικής πίεσης) και στην ενέργεια που δαπανάται λόγω υδραυλικών απωλειών που αναπτύσσονται στην σωλήνωση μέσω της οποίας γίνεται η ανακίνηση του υγρού.

1.2 Ταξινόμηση αντλιών

Η ταξινόμηση και η κατηγοριοποίηση των αντλιών μπορεί να γίνει βάσει διάφορων κριτηρίων όπως: η αρχή λειτουργίας τους, ο αριθμός των βαθμίδων τους, οι κατασκευαστικές τους λεπτομέρειες, το υγρό το οποίο διακινούν κτλ. Ωστόσο, σήμερα ο πιο διαδεδομένος τρόπος κατάταξης των αντλιών είναι βάσει της λειτουργίας τους, δηλαδή τον μηχανισμό με τον οποίο προσδίδεται η ενέργεια στο υγρό. Με γνώμονα αυτό το κριτήριο οι αντλίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι οι δυναμικές αντλίες (ή κινητού τύπου) και οι αντλίες θετικής εκτοπίσεως (ή στατικού τύπου).



Εικόνα 1: Κατηγοριοποίηση αντλιών βάσει τρόπου λειτουργίας[7]

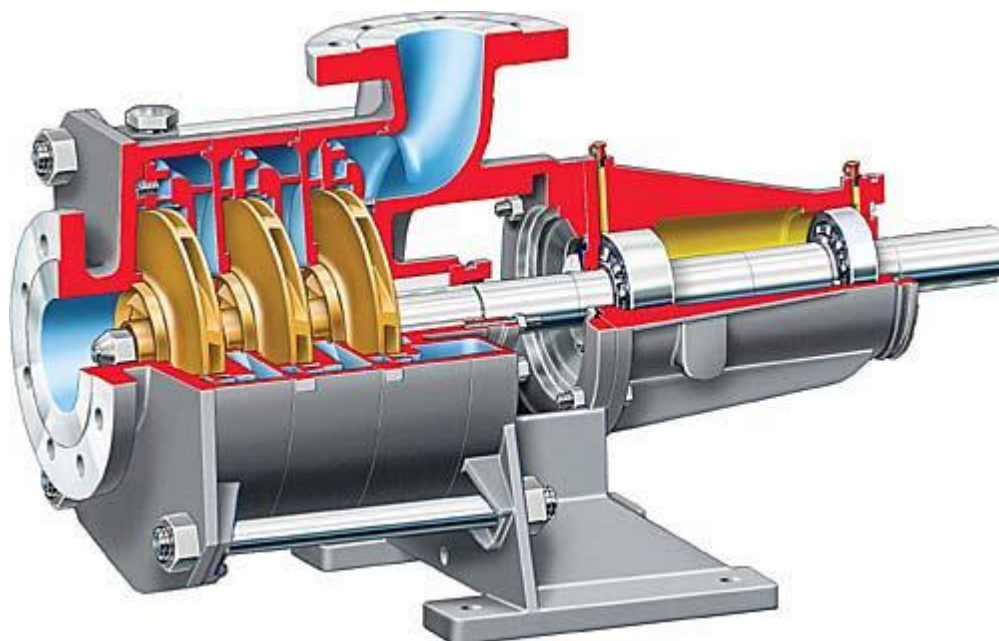
Οι δυναμικές αντλίες λειτουργούν προσδίδοντας στο υγρό κινητική ενέργεια με φυγοκεντρικές δυνάμεις, ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, μεταφορά ορμής ή μηχανική ώθηση. Βέβαια οι δυναμικές αντλίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε φυγοκεντρικές αντλίες, περιφερειακές αντλίες και δυναμικές αντλίες ειδικού τύπου.

Οι αντλίες θετικής εκτοπίσεως λειτουργούν εκτοπίζοντας υγρό από ένα χώρο και προωθώντας το προς έναν άλλο είτε με κάποιο μηχανικό μέσο είτε με κάποιο άλλο ρευστό (π.χ. αέρα). Τέλος, οι αντλίες θετικής εκτοπίσεως μπορούν κι αυτές να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες: τις παλινδρομικές, τις περιστροφικές και τις αντλίες πιεστικού θαλάμου.

1.3 Φυγοκεντρική αντλία

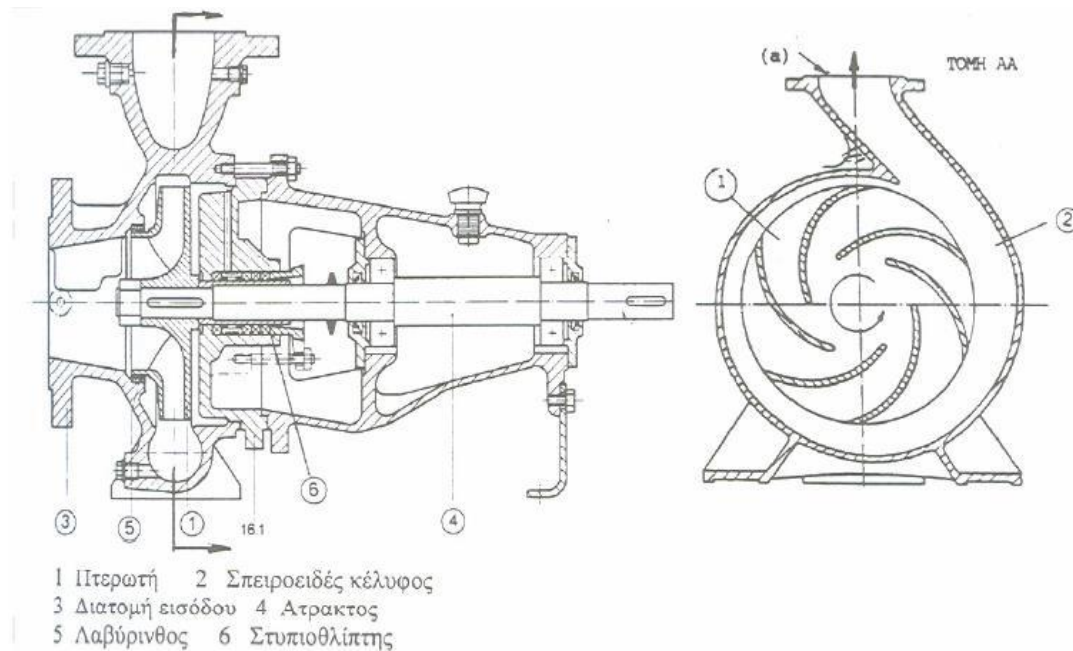
1.3.1 Βασική αρχή λειτουργίας

Το 1689 ο φυσικός Denis Papin ανέπτυξε την φυγοκεντρική αντλία η οποία αποτελεί σήμερα την πιο ευρέως χρησιμοποιημένη αντλία στον κόσμο. Οι φυγοκεντρικές αντλίες λειτουργούν χρησιμοποιώντας τη φυγόκεντρο δύναμη η οποία δημιουργείται από ένα περιστρεφόμενο δίσκο πάνω στον οποίο υπάρχουν πτερύγια ειδικής μορφής. Ο δίσκος αυτός είναι γνωστός και ως στροφείο ή πτερωτή.



Εικόνα 2: Χαρακτηριστική ημιτομή φυγοκεντρικής αντλίας όπου φαίνονται τα εξαρτήματά της

Οι φυγοκεντρικές αντλίες αποτελούνται από περιστρεφόμενες μονάδες υψηλής ταχύτητας και μεγάλης δυναμικότητας, οι οποίες κινούνται από μηχανές εσωτερικής καύσεως, ή ηλεκτρικούς κινητήρες, ή ατμοστρόβιλους. Η φυγοκεντρική κινητική ενέργεια που δημιουργείται από την περιστροφική κίνηση του στροφείου, προσδίδει ροή στο υγρό. Το υγρό που αναρροφάται, στη συνέχεια φτάνει στο άνοιγμα αναρρόφησης και εξαναγκάζεται σε περιστροφή οδηγούμενο από τα πτερύγια. Η περιστροφική κίνηση της πτερωτής προσδίδει περιστροφή στη μάζα του υγρού η οποία οδηγείται από τα πτερύγια μεταδίδοντας φυγοκεντρική δύναμη στο υγρό. Η κίνηση αυτή εξαναγκάζει το υγρό να διατρέχει τα πτερύγια κατά μήκος τους και τελικά να πετάγεται έξω από την πτερωτή. Το υγρό εξερχόμενο από την πτερωτή φτάνει σε έναν εσωτερικό χώρο της αντλίας, με σπειροειδή μορφή και συνεχώς αυξανόμενη διατομή απ' όπου και φεύγει από την έξοδο της αντλίας.



Εικόνα 3: Μηχανολογικό σχέδιο φυγοκεντρικής αντλίας.

Ο τρόπος κατασκευής και η αρχή λειτουργίας τους, προσδίδουν στις φυγοκεντρικές αντλίες αρκετά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τις, τις πλέον διαδεδομένες αντλίες μέχρι και σήμερα. Η κατασκευή μιας φυγοκεντρικής αντλίας μπορεί να θεωρηθεί σχετικά οικονομική, απλή και στιβαρή. Επιπλέον το γεγονός πως μπορούν να αναπτύξουν υψηλό αριθμό στροφών, επιτρέπει την απευθείας σύνδεσή τους σε έναν ασύγχρονο κινητήρα. Παράλληλα οι φυγοκεντρικές αντλίες μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα παροχών, η τοποθέτηση βαλβίδων ελέγχου ροής δεν προκαλεί ζημιά στην αντλία. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο πως μπορούν να λειτουργήσουν με πολύ υψηλούς βαθμούς απόδοσης. Ενδεικτικά ο βαθμός απόδοσης μίας φυγοκεντρικής αντλίας, όπου δουλεύει στο κανονικό σημείο λειτουργίας της, μπορεί να φτάσει και το ~85%.

1.3.2 Κατηγορίες φυγοκεντρικών αντλιών

Οι φυγοκεντρικές αντλίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν επιπλέον αναλόγως τα διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Ο πιο συνήθης τρόπος κατηγοριοποίησης τους είναι αναλόγως τη ροή την οποία ακολουθεί το ρευστό. Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται είναι οι εξής :

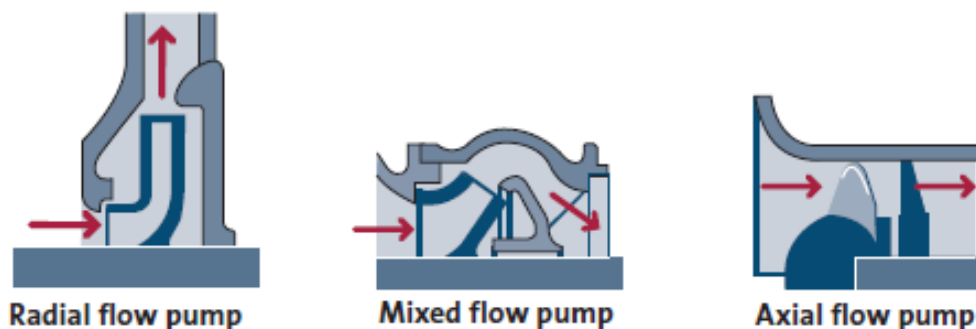
- Ακτινικής Ροής
- Αξονικής Ροής
- Μεικτής ροής

Ακτινικής ροής : Στις αντλίες ακτινικής ροής το ρευστό εισέρχεται στην αντλία κατά την διεύθυνση του άξονα και αφότου περάσει από την πτερωτή εξέρχεται κατά τη διεύθυνση της ακτίνας. Αυτό συμβαίνει όταν το πλάτος των πτερυγίων της πτερωτής είναι μικρό σε σχέση με τη διάμετρο.

Αξονικής ροής : Στις αντλίες αξονικής ροής το ρευστό εισέρχεται στην αντλία κατά την διεύθυνση του άξονα και αφότου περάσει από την πτερωτή εξέρχεται και πάλι κατά τη διεύθυνση του άξονα. Αυτό συμβαίνει όταν το πλάτος των πτερυγίων της πτερωτής είναι μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρο. Οι αξονικές εμβολοφόρες αντλίες χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις, οι οποίες κινούνται υδραυλικά ή σε υδραυλικά συστήματα ελέγχου. Έχουν έναν αριθμό εμβόλων μικρής διαμέτρου, τα οποία είναι τοποθετημένα παράλληλα ή λοξά προς τον άξονα κινήσεως. Μπορούμε να πετύχουμε μια περίπου ομαλή ροή του υγρού με τη χρήση περισσότερων εμβόλων. Ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας της κινήσεως του εμβόλου, οι αντλίες διακρίνονται σε: Πλάκα και άξονας υπό γωνία, πλάκα υπό γωνία, άξονας υπό γωνία.

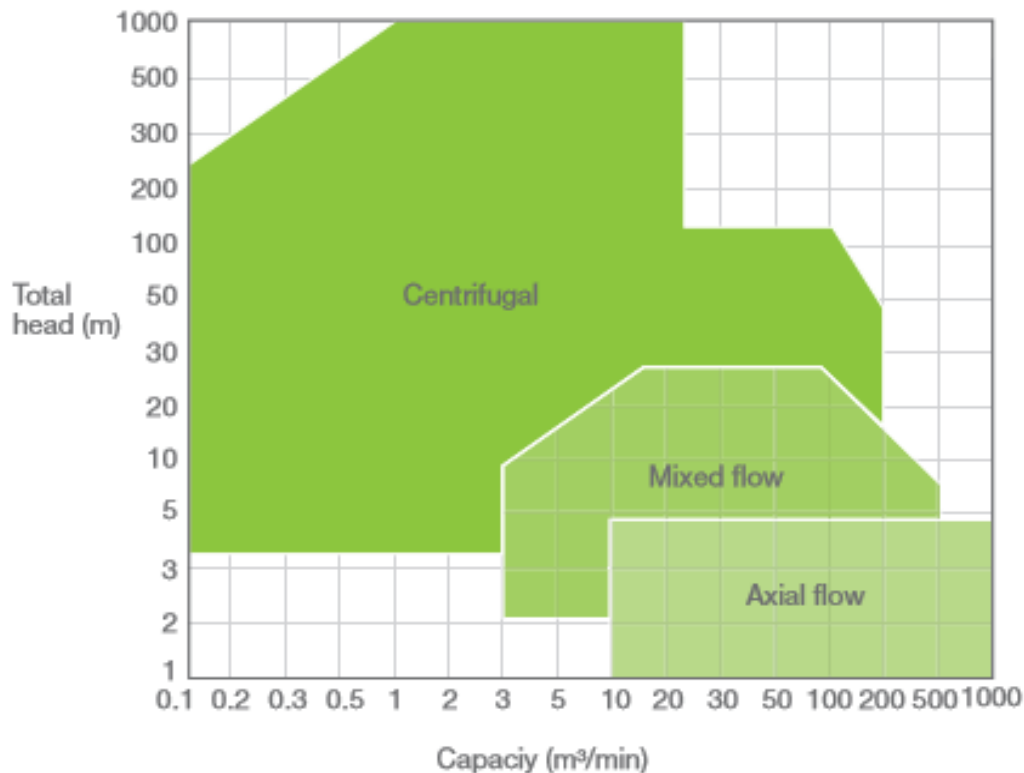
Μεικτής ροής : Στην ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της πλήρως ακτινικής και της πλήρως αξονικής ροής διακρίνονται οι αντλίες μεικτής ροής.

Παρακάτω φαίνεται και σε σχήμα η ροή του ρευστού καθώς και η μορφή της πτερωτής κατά σειρά για αντλία ακτινικής ροής, αντλία μεικτής ροής, αντλία αξονικής ροής.



Εικόνα 4: Ροή ρευστού σε αντλία ακτινικής, μεικτής και αξονικής ροής. [6]

Τα οικονομικά κριτήρια αλλά και οι ανάγκες για απόδοση της αντλίας σε σχέση με την απαιτούμενη παροχή, μανομετρικό και τον τρόπο εγκατάστασης είναι μερικοί μόνο από τους λόγους για τους οποίους υπάρχουν διαφορετικά είδη φυγοκεντρικών αντλιών. Στο σχήμα που ακολουθεί, διακρίνονται τα διάφορα είδη φυγοκεντρικών αντλιών και οι περιοχές χρήσης τους αναλόγως την παροχή και το ολικό ύψος (Q και H) που απαιτούνται.



Εικόνα 5: Τύποι αντλιών και περιοχές χρήσης τους. [6]

Όπως παρατηρούμε και από το παραπάνω διάγραμμα υπάρχουν περιοχές όπου μπορεί να καλύπτονται από δύο διαφορετικά είδη αντλιών ωστόσο βάσει της μελέτης που έχει προηγηθεί για ένα αντλητικό σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά κριτήρια αλλά και τις υφιστάμενες ανάγκες επιλέγεται η καταλληλότερη αντλία.

1.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας περιέχουν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά και την απορροφούμενη ισχύ της αντλίας για συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής. Τα υλικά κατασκευής της αντλίας, τα υπόλοιπα κατασκευαστικά της χαρακτηριστικά της καθώς και τα βασικά υδραυλικά χαρακτηριστικά που εμπεριέχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες της αποτελούν στην ουσία την ταυτότητά της. Αποτελούν ένα από τα κύρια εργαλεία για την επιλογή της κατάλληλης αντλίας, για την εκάστοτε εφαρμογή είτε γνωρίζουμε το επιθυμητό σημείο λειτουργίας, είτε γνωρίζουμε την χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου. Η μεταβολή των βασικών υδραυλικών χαρακτηριστικών μεγεθών της αντλίας περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες και είναι:

- Χαρακτηριστική καμπύλη Παροχής - Ολικού Ύψους (Q-H)
- Χαρακτηριστική καμπύλη Παροχής - Ισχύος (Q-P)
- Χαρακτηριστική καμπύλη Παροχής - Ολικής Απόδοσης (Q-η)

1.3.4 Καμπύλη Παροχής - Ύψους (Q-H)

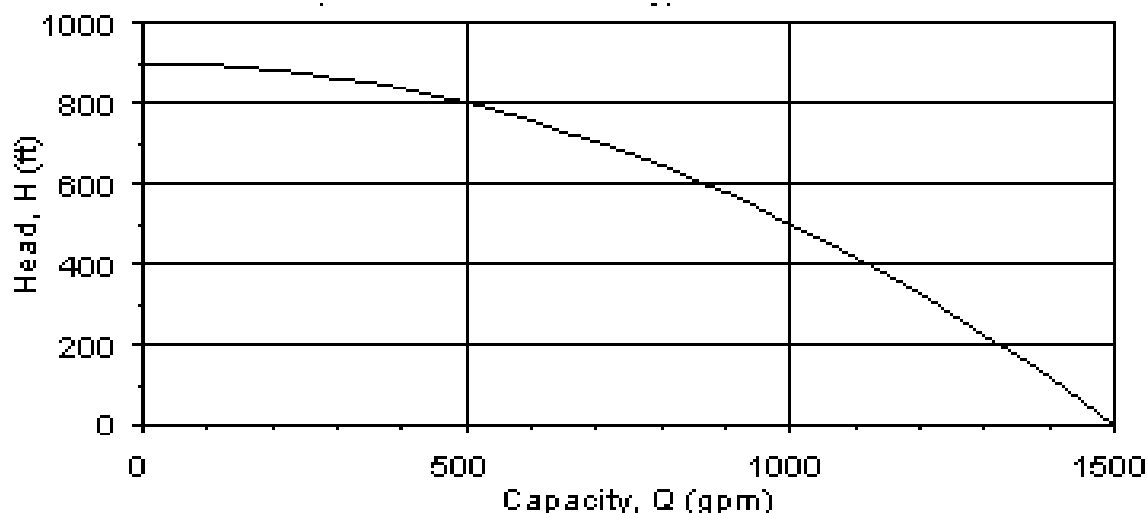
Η καμπύλη Q-H δείχνει το ύψος το οποίο είναι ικανή η αντλία να στείλει το υγρό για κάθε τιμή παροχής. Η μονάδα με την οποία μετράται το ύψος είναι τα «μέτρα στήλης υγρού». Ο λόγος που χρησιμοποιούμε αυτή τη μονάδα μέτρησης είναι το πλεονέκτημά της πως είναι ανεξάρτητη του είδους του υγρού που διακινεί η αντλία ενώ είναι και ανεξάρτητη της πυκνότητάς του. Η σχέση του ύψους και της πίεσης δίνεται από τον εξής τύπο :

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad (1.1)$$

Όπου:

- Η το ύψος (m)
- P η πίεση ($Pa = N/m^2$)
- ρ η πυκνότητα του υγρού ($\frac{kg}{m^3}$)
- g επιτάχυνση λόγω βαρύτητας (m/s^2)

Όπως θα δούμε και στην παρακάτω εικόνα τα μεγέθη του ύψους και της παροχής είναι αντιστρόφως ανάλογα. Ο ρυθμός μείωσης της παροχής εξαρτάται από την κατασκευή της αντλίας και είναι σημαντικό για την επιλογή της κατάλληλης αντλίας. Παρακάτω φαίνεται και σε διάγραμμα η καμπύλη ύψους – παροχής QH.



Εικόνα 6: Καμπύλη παροχής - ύψους.

1.3.5 Καμπύλη βαθμού απόδοσης (η)

Η σχέση μεταξύ της ενέργειας που απορροφά η αντλία από τον κινητήρα και της ενέργειας που προδίδεται στο ρευστό μέσω της αντλίας ορίζεται ως βαθμός απόδοσης. Και καθορίζεται από το σημείο που λειτουργεί η αντλία. Ως κανονικό σημείο λειτουργίας ή BEP (Best efficiency point) ορίζεται το σημείο εκείνο όπου ο βαθμός απόδοσης παίρνει την μέγιστη τιμή.

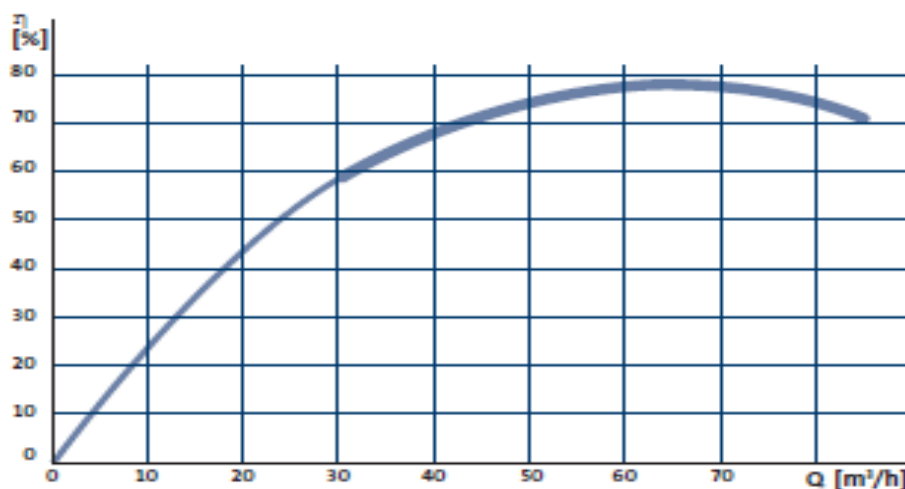
Γνωρίζοντας το σημείο λειτουργίας, θα πρέπει να επιλεγεί η αντλία που θα λειτουργεί πιο κοντά στο κανονικό σημείο λειτουργίας της διότι αυτό εξασφαλίζει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης και επιπλέον οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στην αντλία θα είναι οι μικρότερες δυνατές. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα και την πιο οικονομική λειτουργία της αντλίας αφού δεν έχουμε μεγάλες απώλειες ενέργειας ενώ παράλληλα το κόστος συντήρησης είναι μικρότερο.

Πρακτικά το να λειτουργεί μια αντλία συνεχώς στο κανονικό σημείο λειτουργίας της, είναι απίθανο, αφού οι ανάγκες σε ζήτηση παροχής θα είναι μεταβλητές στο χρόνο. Επομένως, επιλέγεται η αντλία της οποίας το κανονικό σημείο λειτουργίας είναι κοντά στις τιμές παροχής και ύψους που υπάρχουν συνήθως στο σύστημα. [6]

Κάποιες από τις ενδείξεις ότι η αντλία δεν λειτουργεί κοντά στο κανονικό σημείο λειτουργίας είναι οι εξής :

- Θόρυβος
- Δονήσεις
- Συχνές ανάγκες συντήρησης
- Μεγάλες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας
- Σπηλαίωση (θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο)
- Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας

Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα της καμπύλης του βαθμού απόδοσης.



Εικόνα 7: Καμπύλη βαθμού απόδοσης. [7]

1.3.6 Καμπύλη ισχύος (P ή N)

Στην καμπύλη ισχύος φαίνεται η ισχύς που απορροφά η αντλία συναρτήσει της παροχής. Όπως είναι αναμενόμενο, αύξηση της παροχής θα συνεπάγεται και αυξημένη απορρόφηση ισχύος από την αντλία. Η ισχύς η οποία απορροφά η αντλία, μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

$$N = \frac{\rho g H Q}{3600 \eta} \quad (1.2)$$

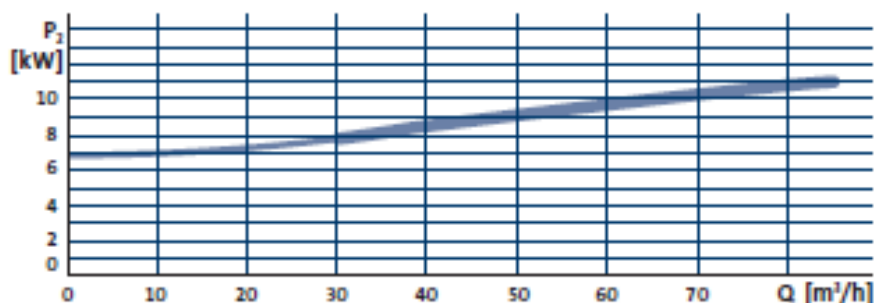
Όπου :

- ρ η πυκνότητα του υγρού $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- g επιτάχυνση λόγω βαρύτητας $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
- H το ύψος (m)
- Q η παροχή $\left(\frac{m^3}{h}\right)$
- η ο βαθμός απόδοσης

Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν επιλέγεται ο κινητήρας για την αντλία, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερης ισχύος από την ισχύ την οποία απορροφά η αντλία. Κι αυτό διότι υπάρχουν απώλειες κατά την μεταφορά ενέργειας από τον κινητήρα στην αντλία (τυπικές τιμές βαθμού απόδοσης για κινητήρες υψηλής ισχύος είναι ~97%) καθώς επίσης πρέπει να υπάρχει περίσσεια ισχύος ώστε να μπορέσει ο κινητήρας να επιταχύνει γρήγορα την αντλία και να καλύψει τυχόν σφάλμα στον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας της αντλίας. Έτσι επιλέγεται τυποποιημένος κινητήρας του οποίου η ονομαστική ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απορροφά η αντλία κατά ένα περιθώριο ασφαλείας. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικές τιμές του περιθωρίου ασφαλείας συναρτήσει της ισχύς την οποία απορροφά η αντλία.

Απορροφούμενη ισχύς αντλίας (kW)	Περιθώριο ασφαλείας (%)
Έως 5,5	25
Έως 22	16
Έως 55	13
Άνω 55	10

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα με την καμπύλη ισχύος της αντλίας.



Εικόνα 8: Καμπύλη απορροφούμενης ισχύος από την αντλία.

1.3.7 Σπηλαίωση

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης αναπτύσσεται όταν σε μια περιοχή της ροής η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, οπότε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμοποιημένου υγρού(ατμού). Άρα η σπηλαίωση είναι ένα φαινόμενο που αναπτύσσεται αποκλειστικά σε ροές υγρών.

Σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli, σε οποιαδήποτε αύξηση ταχύτητας ροής του υγρού μειώνεται αντίστοιχα η πίεση. Επομένως αυξάνεται η ταχύτητα κίνησης του υγρού ώστε η πίεση να γίνει ίση με τη μέγιστη τάση των ατμών, όπου σχηματίζονται μέσα στη μάζα του φυσαλίδες ατμού. Στη συνέχεια, εκτός και αν υπάρχει αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας, νέες φυσαλίδες σχηματίζονται διαρκώς ενώ οι παλιές αυξάνονται σε μέγεθος μέχρι που καταρρέουν επηρεάζοντας το σύνολο της αντλίας με αποτέλεσμα την πτώση του βαθμού απόδοσης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα φθοράς της πτερωτής της αντλίας λόγω σπηλαίωσης. Φαίνεται σαν να έχουν σχηματιστεί μικροί πόροι πάνω στην πτερωτή.



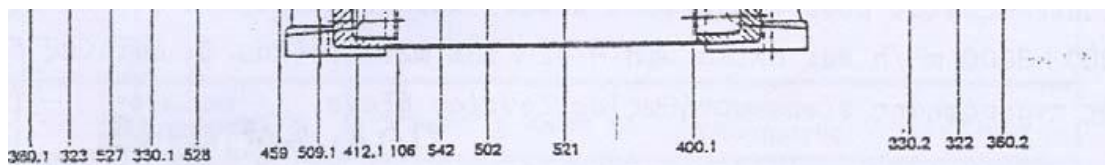
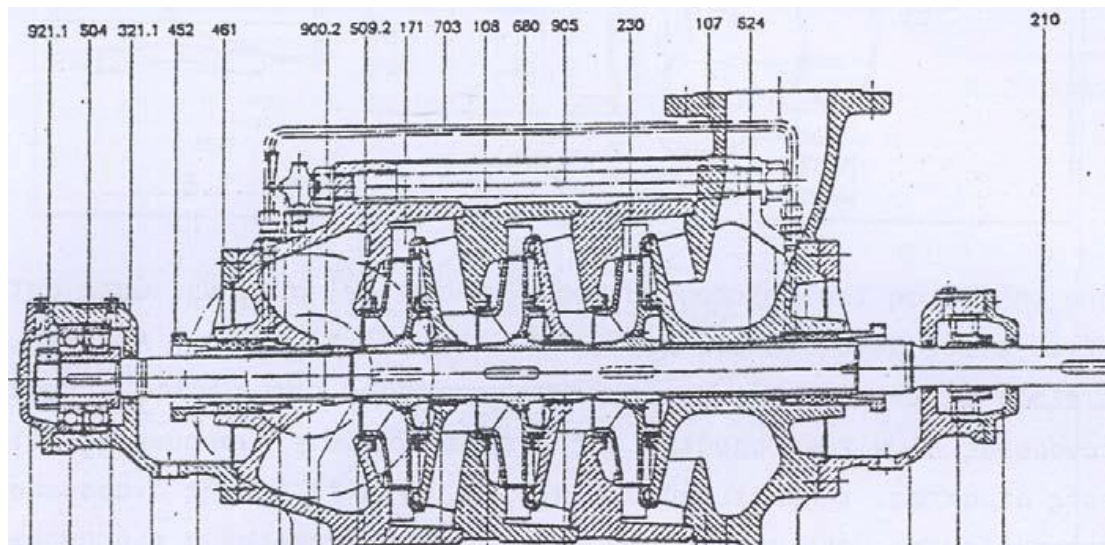
Εικόνα 9: Μορφή σπηλαιώσης στην πτερωτή αντλίας.

1.4 Πολυβάθμιες αντλίες

Όπως είναι λογικό η ενέργεια που είναι δυνατόν να εναλλαχθεί από την πτερωτή δεν είναι απεριόριστη και αυτό διότι οι ταχύτητες του ρευστού που αναπτύσσονται δημιουργούν προβλήματα σπηλαιώσης, αλλά λειτουργούν και καταλυτικά στην ανάπτυξη πολύ ισχυρών δυνάμεων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με τις πολυβάθμιες αντλίες. Ουσιαστικά πρόκειται για αντλίες με περισσότερους δρομείς(πτερωτές) που λειτουργούν εν σειρά. Πρόκειται ουσιαστικά για περισσότερες αντλίες, όσες είναι ο αριθμός των πτερωτών, δηλαδή των βαθμίδων εν σειρά και οι οποίες είναι τοποθετημένες στο ίδιο σώμα. Επομένως η ίδια παροχή διέρχεται διαδοχικά από τους δρομείς(πτερωτές), σε κάθε ένα από τους οποίους λαμβάνει χώρα μια συγκεκριμένη ενεργειακή μεταβολή.

Το γεγονός πως οι πολυβάθμιες αντλίες μπορούν να προσφέρουν υψηλό ύψος σε σχέση με την παροχή τις καθιστά κατάλληλες σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο ύψος από την αντλία.

Οι διαδοχικές πτερωτές μιας πολυβάθμιας αντλίας είναι ταυτόσημες για το λόγο ότι το υγρό είναι ασυμπίεστο και υπάρχει η ίδια παροχή και ύψος σε κάθε βαθμίδα. Αυτό επίσης έχει ως αποτέλεσμα την απλότητα και οικονομικότητα της κατασκευής. Η κάθε πτερωτή μαζί με τη στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων αποτελεί μία βαθμίδα. Τα οδηγητικά πτερύγια υπάρχουν προκειμένου να αφαιρεθεί η συστροφή από το υγρό καθώς εισέρχεται στην επόμενη διαδοχική πτερωτή.

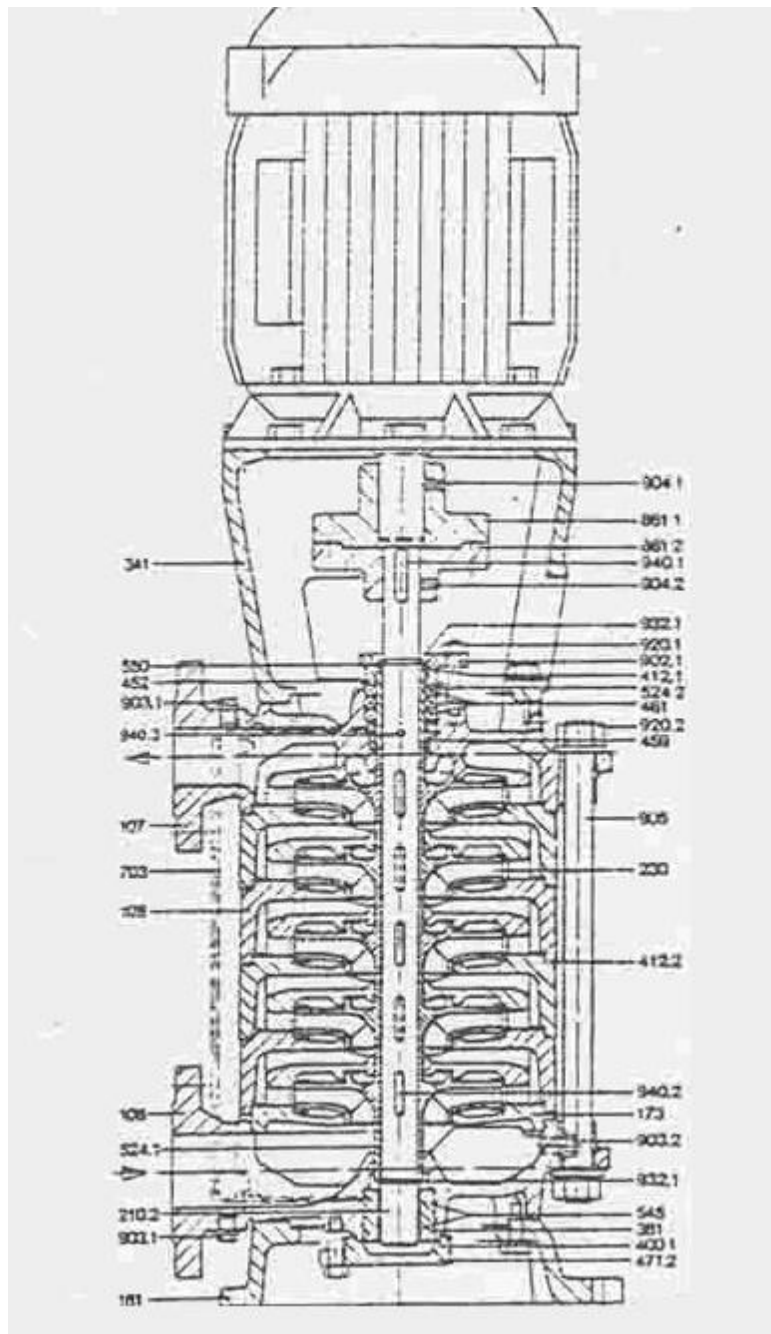


Πίνακας εξαρτημάτων

106	Σώμα άναρροφήσεως	360.1	Πώμα άκράϊας φωλεάς	521	Ένδιάμεσα χιτώνια
107	Σώμα καταθλίψεως	360.2	Πώμα (πλευράς κινήσεως)	524	Προστατευτικό χιτώνιο
108	Ένδιάμεσες βαθμίδες	400.1	Παρεμβύσμα βαθμίδων	527	Δακτυλίδι ένσφ. τριθέως
171	Όδηγά πτερύγια καταθλίψεως	412.1	Έλαστικός δακτύλιος στεγαν. Ο	528	Χιτώνιο συσφιξεως
210	Άξονας	452	Στυπιοθλίπτης	542	Δακτυλίδι βαθμίδων
230	Πτερωτή	459	Δακτυλίδι στυπιοθήκης	680	Μανδύας
321.1	Ένσφαιρος τριθέυς	461	Παρεμβύσματα (σαλαμίστρα)	703	Σωλήν ύδατ. σφραγίσεως
322	Κυλινδρικός τριθέυς (πλήρης)	502	Δακτυλίδι στεγανότητος	900.2	Άσφαλιστικός κοχλίας
323	Ένσφαιρος τριθέυς γων. έπαφής	504	Παρεμβύσμα ένσφ. τριθέως	905	Ένόετες
330.1	Άκράϊα φωλεά	509.1	Παράκυκλος έξωτερικός	921.1	Περίσκλησιον άξονα
330.2	Φωλεά (πλευράς κινήσεως)	509.2	Παράκυκλος έσωτερικός		

Τò 509.2 είναι γιά τὰ μεγέθη 4604-4610
Τò 521 είναι γιά τὰ μεγέθη 4612-4625

Εικόνα 10: Τομή πολυβάθμιας αντλίας με πίνακα εξαρτημάτων

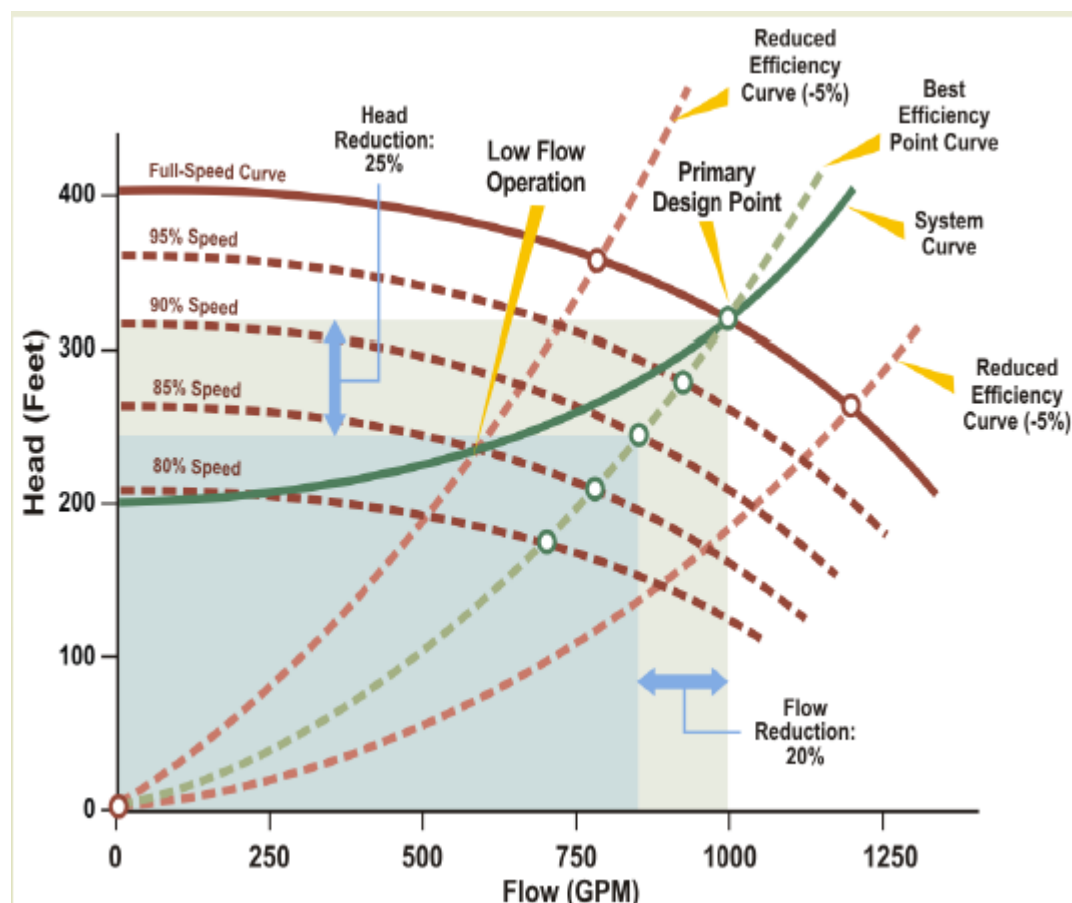


Εικόνα 11: Τομή πολυβάθμιας αντλίας 5 βαθμίδων με πίνακα εξαρτημάτων

1.5 Μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής

Σε πολλές εφαρμογές όπου υπάρχει χρήση αντλιών, όπως είναι τα αντλιοστάσια ύδρευσης-άρδευσης, δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία της αντλίας στην ονομαστική της απόδοση συνεχώς λόγω του γεγονότος ότι οι ανάγκες σε παροχή αυξομειώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις. Για αυτόν τον λόγο μπορεί να

αποτελέσει ένα σημαντικό πλεονέκτημα η δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας γιατί διατηρείται η μερική απόδοση ώστε η ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα να μπορεί να αντιστοιχηθεί με τις απαιτήσεις του συστήματος. [6]



Εικόνα 12: Σημεία βέλτιστης απόδοσης για διαφορετικές στροφές[6]

Με αυτόν τον τρόπο για διαφορετικές στροφές λειτουργίας της αντλίας προκύπτουν και οι ανάλογες χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας. Η καμπύλη σωληνογραμμής (system curve στο διάγραμμα) αναφέρεται στην διαμόρφωση της διάταξης και προκύπτει από στοιχεία που την αποτελούν όπως αντλίες, σωλήνες και μένει σταθερή κατά την εναλλαγή στροφών αφού οι αντλίες είναι προσαρμοσμένες να λειτουργούν σε διαφορετικές στροφές με τα αντίστοιχα ζεύγη παροχής-μανομετρικού ύψους. Επομένως όταν θέλουμε μεταβολή της παροχής ψάχνουμε το σημείο βέλτιστης απόδοσης από την αντίστοιχη καμπύλη το οποίο θα συμπίπτει με την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας που έχει προκύψει από τις καινούριες στροφές.

Τα πλεονεκτήματα που έχουν οι αντλίες μεταβλητών στροφών είναι πολλά, και τις καθιστούν αρκετά διαδεδομένες σε σύνθετες εφαρμογές άντλησης όπου υπάρχει μεταβαλλόμενη ζήτηση σε παροχή. Επομένως μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών κι αυτό διότι θα λειτουργούν αποδοτικότερα άρα και οικονομικότερα σε σχέση με μία διάταξη αντλιών σταθερών στροφών. Όταν μεταβάλλονται οι ανάγκες σε ζήτηση, η αντλία αλλάζει στροφές -άρα και

χαρακτηριστική καμπύλη και καμπύλη βαθμού απόδοσης βρίσκοντας νέο σημείο λειτουργίας για το σύστημα το οποίο θα είναι και το πλέον αποδοτικό για τα νέα δεδομένα, πράγμα το οποίο δεν θα μπορούσε να συμβεί με μία απλή αντλία η οποία θα λειτουργούσε σταθερά υπερκαλύπτοντας την ζήτηση, με υπερβολική κατανάλωση αχρείαστης ενέργειας είτε θα προκαλούσε ελλείψεις σε παροχή. Παράλληλα η επιλογή τέτοιων αντλιών είναι προτιμότερη και από τον έλεγχο ροής με χρήση βάνας ή κλάδου Bypass λόγω των απωλειών ενέργειας που προκαλούν τα τελευταία. Επομένως οι αντλίες μεταβλητών στροφών έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας στον κύκλο ζωής τους αφού μπορούν να προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας έως και 50% σε σχέση με μια αντλία σταθερών στροφών αλλά είναι και σαφώς φιλικότερες προς το περιβάλλον.

Στην γενική περίπτωση τα σημεία λειτουργίας τα οποία έχουν τον ίδιο βαθμό απόδοσης ονομάζονται αντίστοιχα σημεία λειτουργίας. Τα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας έχουν πολύ σημαντικό ρόλο κατά την μελέτη αντλιών μεταβλητών στροφών γιατί μπορεί να υπολογιστεί κάθε φορά το ύψος και η παροχή που αποδίδει η αντλία σε διαφορετικές στροφές, έχοντας όμως κάθε φορά τον ίδιο βαθμό απόδοσης. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια μεταβολή του βαθμού απόδοσης αλλά αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όταν ο αριθμός στροφών δεν μειώνεται κάτω από το 20% των αρχικών στροφών. Ο νέος βαθμός απόδοσης μπορεί να υπολογιστεί μέσω του τύπου :

$$\eta' = 1 - (1 - \eta) \left(\frac{n}{n'} \right)^{0.1} \quad (1.3)$$

Όπου :

- η ο βαθμός απόδοσης
- n αριθμός στροφών

Οι σχέσεις που ισχύουν για τα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας είναι οι εξής:

$$1. \quad \frac{n}{n'} = \frac{Q}{Q'} \quad (1.4)$$

$$2. \quad \left(\frac{n}{n'} \right)^2 = \frac{H}{H'} \quad (1.5)$$

$$3. \quad \left(\frac{n}{n'} \right)^3 = \frac{P}{P'} \quad (1.6)$$

Όπου

- n η ταχύτητα περιστροφής (στροφές)
- Q η παροχή
- H το ύψος

- Ρ η ισχύς

Βέβαια παρά τα πολλά πλεονεκτήματα των αντλιών μεταβλητών στροφών και την ευρύτητα εφαρμογών που μπορούν να καλύψουν, δεν αποτελούν πάντα την βέλτιστη λύση σε μια αντλητική εγκατάσταση αφού υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που θα κρίνουν την αποτελεσματικότητα της.

Τέλος, η επιλογή αντλιών μεταβλητών στροφών ως εναλλακτική είναι αποδεκτή όταν οι αντλίες θα πρέπει να λειτουργούν τουλάχιστον 2000 ώρες ετησίως και να έχουμε μεταβολές στην ζήτηση κατά τουλάχιστον 30%. Επίσης η επιλογή τους δεν θεωρείται συμφέρουσα όταν θα λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα κοντά στον μέγιστο φορτίο τους κι αυτό διότι, το μέγιστο φορτίο που μπορεί να προσφέρει μία τέτοια αντλία είναι σαφώς μικρότερο από μία αντλία σταθερών στροφών. Οι αντλίες μεταβλητών στροφών μπορούν να είναι οικονομικά ανταγωνιστικές όταν η ισχύς της αντλίας είναι άνω των 15 ίππων, διαφορετικά το μεγαλύτερο αρχικό κόστος τέτοιου τύπου αντλιών της καθιστά αρκετά πιο ακριβές σε σχέση με τις αντλίες σταθερών στροφών. Τέλος, η χρήση των αντλιών μεταβλητών στροφών είναι ευνοϊκή για αντλητικά συστήματα στα οποία το γεωδαιτικό ύψος (υψομετρική διαφορά των δεξαμενών) δεν είναι πάνω από το 40% του συνολικού μανομετρικού ύψους που είναι αναγκαίο για την αντλητική εγκατάσταση. Κι αυτό διότι όσο έχουμε μείωση των στροφών η χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας θα πέφτει προς τα κάτω, και υπάρχει περίπτωση να μην δύναται να καλυφθεί το απαιτούμενο ύψος

1.6 Μοντέλο φυγοκεντρικής αντλίας

Με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα, είτε του κατασκευαστή είτε του χρήστη που θα μοντελοποιήσει την αντλία, υπάρχουν τρεις επιλογές παραμετροποίησης του μοντέλου της φυγοκεντρικής αντλίας:

- Με πολυώνυμο σε προσέγγιση
- Με δύο μονοδιάστατες χαρακτηριστικές : P-Q και N-Q
- Με δύο δυσδιάστατες χαρακτηριστικές: P-Q-W και N-Q-W

Παραμετροποίηση της αντλίας με πολυώνυμο με προσέγγιση

Εάν επιλεγεί η μέθοδος του πολυωνύμου, η αντλία παραμετροποιείται με το πολυώνυμο του οποίου οι συντελεστές καθορίζονται, αναλυτικά ή πειραματικά, για δεδομένη περιστροφική ταχύτητα από τα δεδομένα που παρέχονται. Τα χαρακτηριστικά της αντλίας σε άλλες περιστροφικές ταχύτητες καθορίζονται από τους σχετικούς τύπους.

Το προσεγγιστικό πολυώνυμο προκύπτει από την εξίσωση Euler στιγμιαίου παλμού, η οποία για συγκεκριμένη αντλία, περιστροφική ταχύτητα και ρευστό έχει ως εξής:

$$p_{ref} = k * p_E - p_{HL} - p_D \quad (1.7)$$

Όπου:

p_{ref}	Απώλεια πίεσης κατά μήκος του σωλήνα σε σχέση με το καθεστώς αναφοράς, όπου χαρακτηρίζεται από την γωνιακή ταχύτητας αναφοράς και την πυκνότητα
k	Διορθωτικός συντελεστής. Ο συντελεστής αυτός εισάγεται ώστε να αντιπροσωπεύει τις διαστατικές διακυμάνσεις, την δυσαρμονία των λεπίδων, τον όγκο της περρωτής, τον εσωτερικό συντελεστή του ρευστού κλπ. Ο συντελεστής αυτός θα πρέπει να οριστεί ως 1 εάν προσεγγιστικοί συντελεστές καθορίζονται πειραματικά
p_E	Πίεση Euler
p_{HL}	Απώλεια πίεσης εξαιτίας υδραυλικών απωλειών στην αντλία
p_D	Απώλεια πίεσης που προκαλείται από τις αποκλίσεις της παροχής έργου της αντλίας από την ονομαστική της τιμή

Η πίεση Euler, P_E , καθορίζεται από την εξίσωση Euler για φυγοκεντρικές μηχανές, βασισμένες σε γνωστές αντλητικές διαστάσεις. Για μία υπάρχουσα αντλία, η οποία λειτουργεί σε σταθερή περιστροφική ταχύτητα και συγκεκριμένο ρευστό, η πίεση Euler μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση

$$p_E = \rho_{ref}(c_0 - c_1 * q_{ref}) \quad (1.8)$$

Όπου

ρ_{ref}	Πυκνότητα του ρευστού
c_0, c_1	Προσεγγιστικοί συντελεστές. Μπορούν να καθοριστούν είτε αναλυτικά από την εξίσωση Euler(1.10) είτε πειραματικά.

q_{ref}	Ογκομετρική παροχή της αντλίας στο καθεστώς αναφοράς
-----------	--

Η απώλεια πίεσης εξαιτίας των υδραυλικών απωλειών στην αντλία, P_{HL} , προσεγγίζεται με την εξίσωση

$$p_{HL} = p_{ref} * c_2 * q_{ref}^2 \quad (1.9)$$

Όπου:

ρ_{ref}	Πυκνότητα του ρευστού
c_3	Προσεγγιστικός συντελεστής
q_{ref}	Ογκομετρική παροχή της αντλίας σε καθεστώς αναφοράς
q_D	Ονομαστική παροχή αντλίας

Το προσεγγιστικό πολυώνυμο που προκύπτει παίρνει την μορφή

$$p_{ref} = \rho_{ref} \left(k(c_0 - c_1 * q_{ref}) - c_2 * q_{ref}^2 - c_3(q_D - q_{ref})^2 \right) \quad (1.10)$$

Τα χαρακτηριστικά της αντλίας, που προσεγγίζονται με τέσσερις συντελεστές c_0 , c_1 , c_2 , c_4 καθορίζονται από ένα συγκεκριμένο ρευστό και μία συγκεκριμένη περιστροφική ταχύτητα στον άξονα περιστροφής της αντλίας. Αυτοί οι δύο παράμετροι αντιστοιχούν κατά συνέπεια στην πυκνότητα αναφοράς καθώς και στην περιστροφική ταχύτητα αναφοράς, παράμετροι οι οποίες υπάρχουν στο πλαίσιο διαλόγου του στοιχείου. Για να ισχύσουν τα χαρακτηριστικά για άλλη περιστροφική ταχύτητα ω ή πυκνότητα ρ χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι τύποι. Με βάση αυτούς τους τύπους, η παροχή στο καθεστώς αναφοράς, η οποία ανταποκρίνεται σε δοθείσα παροχή και περιστροφική ταχύτητα, υπολογίζεται από τον τύπο

$$q_{ref} = q \frac{\omega_{ref}}{\omega} \quad (1.11)$$

Όπου q και ω είναι ακαριαίες τιμές της παροχής και την περιστροφικής ταχύτητας, Τότε η διαφορά πίεσης στο καθεστώς αναφοράς υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση και μετατρέπεται σε διαφορική πίεση p στην παρούσα περιστροφική ταχύτητα και πυκνότητα

$$p = p_{ref} \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}} \right)^2 \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (1.12)$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει την χαρακτηριστική της αντλίας για $\omega > 0$ και $q \Rightarrow 0$. Εκτός αυτών των ορίων, η χαρακτηριστική προσεγγίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$p = \begin{cases} -k_{leak} * q & for \omega \leq 0 \\ p_{max} - k_{leak} * q & for \omega > 0, q < 0 \\ -k_{leak} * (q - q_{max}) & for \omega > 0, q > q_{max} \end{cases} \quad (1.13)$$

$$q_{max} = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \quad (1.14)$$

$$a = (c_2 + c_3)a^2 \quad (1.15)$$

$$b = (k * c_1 - 2c_3 * q_D)a \quad (1.16)$$

$$c = k * c_0 - c_0 - c_3 * q_D^2 \quad (1.17)$$

$$a = \frac{\omega}{\omega_{ref}} \quad (1.18)$$

$$q_{max} = \rho \frac{1}{a^2} (k * c_0 - c_3 * q_D^2) \quad (1.19)$$

Όπου:

k_{leak}	Συντελεστής απωλειών από διαρροή
q_{max}	Μέγιστη παροχή αντλίας για συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα. Η παροχή καθορίζεται με βάση την Εξίσωση (1.10) για $p = 0$.
p_{max}	Μέγιστη πίεση στην αντλία για συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα. Η πίεση καθορίζεται με βάση την Εξίσωση (1.10) για $q = 0$.

k	Διορθωτικός συντελεστής, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (1.7).
-----	--

Η υδραυλική ισχύς στην έξοδο της αντλίας σε συνθήκες αναφοράς είναι

$$N_{hyd} = p_{ref} * q_{ref} \quad (1.20)$$

Η υδραυλική ισχύς στην έξοδο για αυθαίρετη περιστροφική ταχύτητα και πυκνότητα καθορίζεται από τους αντίστοιχους τύπους

$$N = N_{ref} \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}} \right) \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}} \right) \quad (1.21)$$

Η ισχύς στον άξονα περιστροφής της αντλίας αποτελείται από την θεωρητική υδραυλική ισχύ (ισχύς προτού ισχύσουν οι απώλειες σχετικά με τις υδραυλικές απώλειες και την σπηλαίωση από τον σχεδιασμό της παροχής) και την απώλεια τριβής στον άξονα περιστροφής. Η θεωρητική υδραυλική ισχύς προσεγγίζεται από την πίεση Euler

$$N_{hyd0} = p_{Eref} * q_{ref} \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}} \right)^3 \quad (1.22)$$

Όπου

N_{hyd0}	Θεωρητική υδραυλική ισχύς της αντλίας
p_{Eref}	Πίεση Euler. Θεωρητική πίεση που εξελίσσεται στην αντλία πριν τις απώλειες που σχετίζονται με τις υδραυλικές απώλειες και την απόκλιση της ονομαστικής παροχής.

Η ολική απόδοση της αντλίας η υπολογίζεται από τον τύπο

$$\eta = \frac{N_{hyd}}{N_{mech}} \quad (1.23)$$

Παραμετροποίηση της αντλίας από την διαφορά πίεσης και την πραγματική ισχύ σε διαφορετικές περιστροφικές ταχύτητες

Εάν παραμετροποιήσουμε το μοντέλο με δυσδιάστατες χαρακτηριστικές: P-Q-W και N-Q-W, οι χαρακτηριστικές της αντλίας διαβάζονται από δύο δυσδιάστατες αναζητήσεις πίνακα: για την διαφορά πίεσης εξαιτίας της παροχής της αντλίας και της περιστροφικής ταχύτητας καθώς και για την πραγματική ισχύ της αντλίας που βασίζεται στην παροχή της αντλίας και την περιστροφική ταχύτητα.

Και η διαφορά πίεσης καθώς και η πραγματική ισχύς υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο εάν η πυκνότητα του ρευστού ρ είναι διαφορετική από την πυκνότητα αναφοράς ρ_{ref}

$$p = p_{ref} \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (1.24)$$

$$N = N_{ref} \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (1.25)$$

Όπου p_{ref} και N_{ref} είναι η διαφορά πίεσης και η πραγματική ισχύς που βρίσκεται από της γραφικές.

Βασικές υποθέσεις και περιορισμοί

- Η συμπίεστικότητα του ρευστού αμελείται
- Η αντλία περιστρέφεται με θετική φορά, και ταχύτητα που είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδέν.
- Η αντίστροφη ροή στην αντλία επιτρέπεται μόνο με σταθερό άξονα

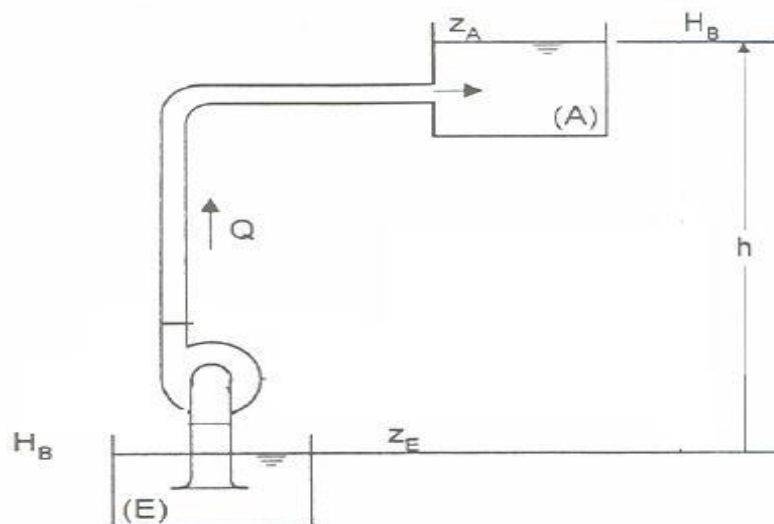
2. Αντλητική Εγκατάσταση

2.1 Εισαγωγή

Στην γενική περίπτωση η διακίνηση υγρών μέσω σωλήνωσης γίνεται από μία δεξαμενή, την δεξαμενή αναρρόφησης, προς μία άλλη, την δεξαμενή κατάθλιψης, που βρίσκεται (κατά κανόνα) σε υψηλότερη στάθμη και στην οποία επικρατεί η ίδια ή μεγαλύτερη στατική πίεση από αυτή στην δεξαμενή αναρρόφησης. Ο όρος δεξαμενή έχει εδώ ευρεία έννοια και μπορεί να είναι ένας ποταμός, μία λίμνη κλπ. Στην γενική λοιπόν περίπτωση το υγρό στην δεξαμενή κατάθλιψης έχει μεγαλύτερη ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας από όση είχε στην δεξαμενή αναρρόφησης. Η επιπλέον αυτή ενέργεια προσδίδεται στο υγρό από την αντλία η οποία πρέπει επιπρόσθετα να καλύψει τις ενεργειακές απώλειες που λαμβάνουν χώρα κατά την διακίνηση του υγρού μέσω της σωλήνωσης. Η εγκατάσταση που περιλαμβάνει την αντλία, τις σωληνώσεις από την δεξαμενή αναρρόφησης και κατάθλιψης, τον χώρο αναρρόφησης και κατάθλιψης και τα σχετικά εξαρτήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια λειτουργίας και συντήρηση ονομάζεται αντλητική εγκατάσταση.

2.2 Η χαρακτηριστική καμπύλη σωληνογραμμής

Η καμπύλη της σωληνογραμμής προκύπτει από τις απώλειες που υπάρχουν κατά μήκος της διάταξης και μπορεί να αναφέρεται σε απώλειες στα εξαρτήματα, τις αντιστάσεις των σωληνώσεων καθώς και την διαφορά ύψους που θέλουμε να υπερνικήσουμε. Επίσης η γραφική της αναπαράσταση συναρτήσει της παροχής Q , παρατηρούμε ότι μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η διερχόμενη παροχή.



Εικόνα 13: Τυπική αντλητική εγκατάσταση.

Η γραφική αυτή αναπαράσταση του μανομετρικού ύψους (H) συναρτήσει της παροχής (Q) ονομάζεται **χαρακτηριστική καμπύλη της σωληνογραμμής**.

Γεωδαιτικό ύψος: Το γεωδαιτικό ύψος είναι ανεξάρτητο της παροχής και ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά στάθμης μεταξύ της δεξαμενής αναρρόφησης και της δεξαμενής κατάθλιψης. Πρόκειται δηλαδή ουσιαστικά για το ύψος στο οποίο καλείται η αντλία να ανυψώσει το υγρό.

Απώλειες σε επιμέρους εξαρτήματα: Κάθε αντλητική εγκατάσταση εκτός από την αντλία, τις δεξαμενές και τις σωληνώσεις αποτελείται και από επιμέρους εξαρτήματα όπως βαλβίδες, γωνίες, στόμια κλπ. Καθώς το υγρό ρέει μέσα από αυτά τα εξαρτήματα υπάρχουν απώλειες ενέργειας. Οι απώλειες οι οποίες σημειώνονται εξαρτώνται από την ταχύτητα του υγρού, άρα κατά συνέπεια και από την παροχή αφού ο τύπος που συνδέει την ταχύτητα με την παροχή είναι ο εξής:

$$Q = c \cdot A \quad (2.1)$$

Όπου :

- Q η παροχή (m³/s)
- C η ταχύτητα του υγρού (m/s)
- A το εμβαδόν της διατομής αγωγού (m²)

Οι απώλειες ύψους H οι οποίες εμφανίζονται στα επιμέρους εξαρτήματα μπορούν να υπολογιστούν και είναι της μορφής :

$$H = k_1 \cdot Q^2 \quad (2.2)$$

Όπου :

- k_1 ο συντελεστής τοπικών απωλειών του εξαρτήματος
- Q παροχή

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω, εφόσον οι απώλειες εξαρτώνται από το τετράγωνο της παροχής, μικρές αυξήσεις στην παροχή μπορούν να επιφέρουν μεγάλες απώλειες.

Απώλειες τριβής στους σωλήνες: Η απώλεια τριβής στους σωλήνες εξαρτάται και αυτή από την παροχή, αλλά και από άλλα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα η τραχύτητα στην σωλήνωση. Πρόκειται στην ουσία για την τριβή η οποία αναπτύσσεται μεταξύ του ρέοντος υγρού και των τοιχωμάτων της σωλήνωσης. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν απώλειες ύψους αφού μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα, λόγω τριβής. Οι απώλειες τριβής στους σωλήνες είναι και αυτές της ίδιας μορφής με τις απώλειες στα επιμέρους εξαρτήματα δηλαδή :

$$H = k_2 \cdot Q^2 \quad (2.3)$$

Όπου ο συντελεστής k_2 εξαρτάται από τα διάφορα χαρακτηριστικά της σωληνογραμμής όπως τραχύτητα, μήκος, διατομή του αγωγού, αριθμό Reynolds κτλ.

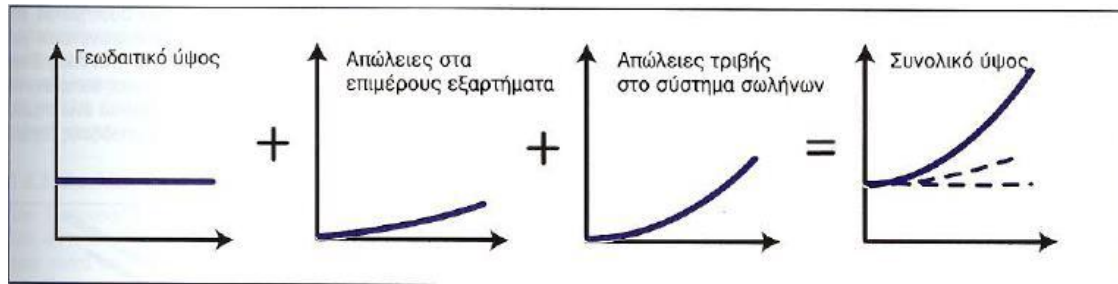
Προκύπτει λοιπόν από τα παραπάνω ότι η εξίσωση της σωληνογραμμής θα είναι της μορφής $H\Sigma = h + k_1 \cdot Q^2 + k_2 \cdot Q^2 = h + (k_1 + k_2) \cdot Q^2$. Δηλαδή

$$H\Sigma = h + k \cdot Q^2 \quad (2.4)$$

Όπου :

- h το γεωδαιτικό ύψος
- k συντελεστής απωλειών

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε πως μεταβάλλεται το μανομετρικό ύψος συναρτήσει της παροχής. Όπως παρατηρούμε όσον αφορά το γεωδαιτικό ύψος το μανομετρικό παραμένει σταθερό ανεξαρτήτως παροχής, ενώ στα επιμέρους εξαρτήματα καθώς και στο σύστημα των σωλήνων μεταβάλλεται ανοδικά όσο αυξάνεται η διερχόμενα παροχή.



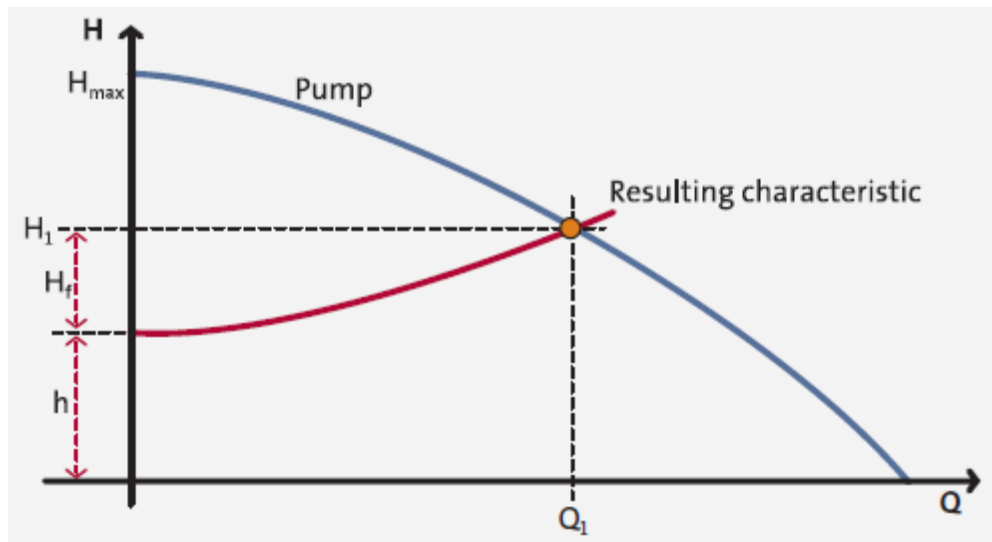
Εικόνα 14: Υπολογισμός μανομετρικού [7]

Τέλος η χαρακτηριστική καμπύλη σωληνογραμμής προκύπτει και γραφικά προσθέτοντας κατά Η τις τρεις καμπύλες.

2.3 Σημείο λειτουργίας αντλητικής εγκατάστασης

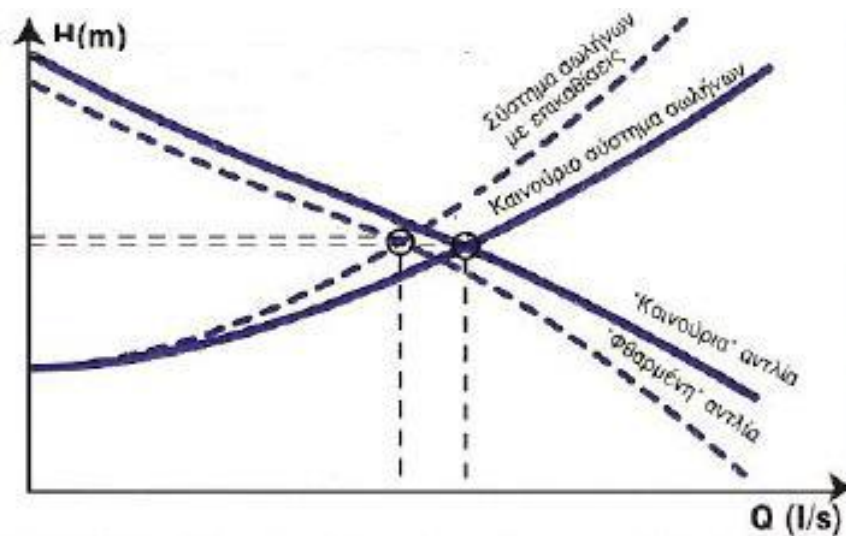
Ως σημείο λειτουργίας της αντλίας εννοούμε το σημείο(που αναφέρεται σε συγκεκριμένη παροχή και μανομετρικό ύψος) στο οποίο το σύστημα ισορροπεί και όπου η αντλία καταφέρνει να υπερνικήσει τις υπάρχουσες απώλειες και να καλύψει το απαιτούμενο ύψος που θέλουμε ώστε να διακινήσει το υγρό.

Πιο συγκεκριμένα στο σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης, με δεδομένη την χαρακτηριστική $Q-H$ της αντλίας 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 την διακίνηση της παροχής στην αντλητική εγκατάσταση και η οποία περιγράφεται από την χαρακτηριστική της σωλήνωσης. Επομένως το σημείο λειτουργίας προκύπτει γραφικά από την τομή της χαρακτηριστικής καμπύλης της αντλίας με την καμπύλη σωληνογραμμής.



Εικόνα 15: Σημείο λειτουργίας αντλίας.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειώσουμε πως πάντα το πραγματικό σημείο λειτουργίας θα διαφέρει από το σημείο λειτουργίας που προκύπτει από τους υπολογισμούς και τα μοντέλα simulation. Αυτό προκύπτει για διάφορους λόγους όπως είναι οι κακοτεχνίες, τυχόν παράγοντες που δεν έχουν προβλεφθεί καθώς και από παράγοντες που προκύπτουν κατά την πάροδο του χρόνου όπως η φθορά των αντλιών και των αγωγών (αύξηση της τραχύτητας, εναπόθεση επικαθίσεων κλπ.).



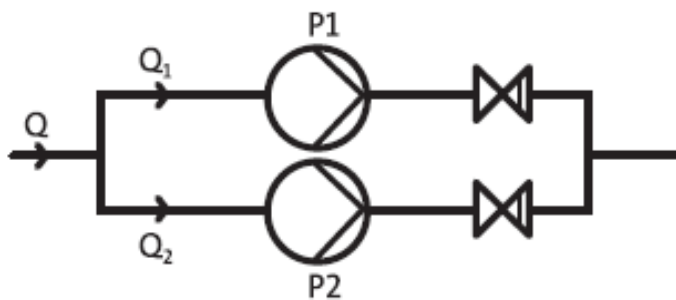
Εικόνα 16: Μεταβολή καμπύλων μετά από χρήση.

2.4 Συνεργασία αντλιών

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές οι αντλητικές διατάξεις έχουν σύνθετη διάταξη. Η διάταξη αυτή μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία αντλίες, ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ευελιξία στην λειτουργία του αντλητικού συστήματος, η οποία επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται σε διαφορετικές συνθήκες ζήτησης ενώ παράλληλα βελτιώνεται η αξιοπιστία της. Οι αντλίες σε μια αντλητική διάταξη δύνανται να τοποθετηθούν με δύο τρόπους, με παράλληλη σύνδεση και σε σειρά.

2.4.1 Παράλληλη λειτουργία αντλιών

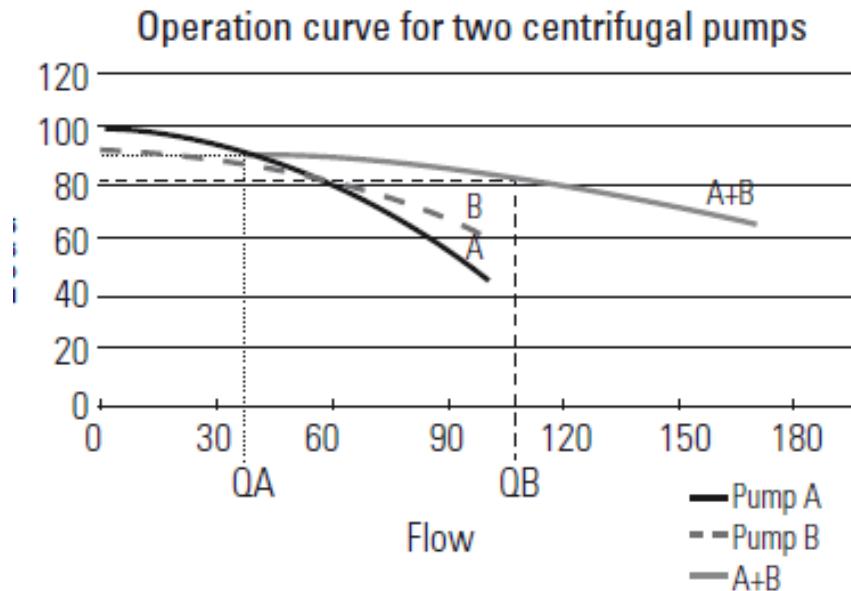
Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η ζητούμενη παροχή μεταβάλλεται στο χρόνο κατά τη λειτουργία της διάταξης. Για την κάλυψη της μεταβαλλόμενης ζήτησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο, τρεις ή και περισσότερες αντλίες συνδεδεμένες παράλληλα. Κατά την μεταβολή λοιπόν της ζήτησης, ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται οι αντίστοιχες αντλίες ώστε να εξυπηρετείται η ζήτηση. Οι αντλίες οι οποίες καταθλίπτουν σε ένα κοινό αγωγό κατάθλιψης χαρακτηρίζονται ως παράλληλα συνδεδεμένες. Παρακάτω φαίνεται και σχηματικά η παράλληλη σύνδεση δύο αντλιών P1 και P2.



Εικόνα 17: Παράλληλη διάταξη αντλιών.

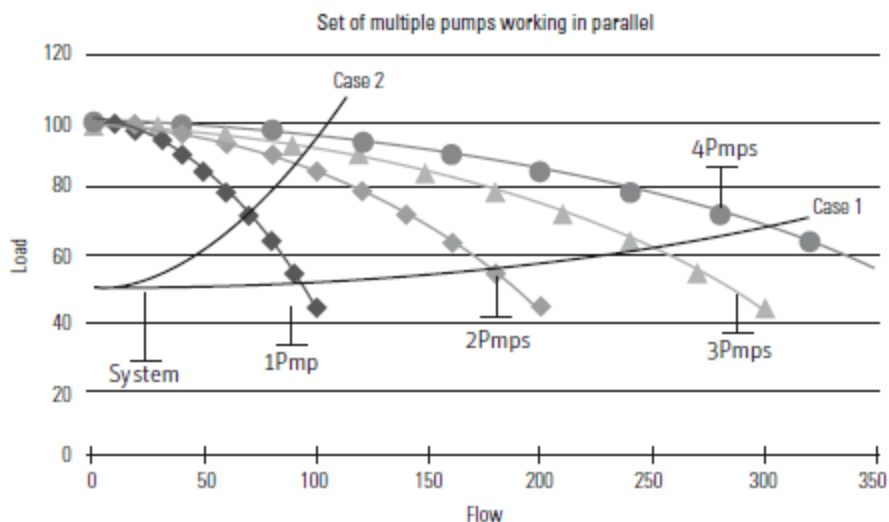
Στην περίπτωση παράλληλα συνδεδεμένων αντλιών, συνήθως επιλέγονται ταυτόσημες αντλίες παρόμοιου μεγέθους και τύπου κι αυτό προς απλοποίηση του συστήματος. Επιπλέον όταν δεν λειτουργούν συγχρόνως όλες οι αντλίες τοποθετούνται αντεπίστροφες βαλβίδες μετά από κάθε αντλία. Με αυτό τον τρόπο όταν κάποια αντλία παύει την λειτουργία της οι βαλβίδες δεν επιτρέπουν την επιστροφή του νερού προς τα πίσω. Στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης των αντλιών είναι προφανές ότι η συνολική παροχή Q θα ισούται με το άθροισμα των επιμέρους παροχών της κάθε αντλίας, δηλαδή $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$. Το συνολικό

μανομετρικό H θα ισούται με το μανομετρικό της κάθε αντλίας, δηλαδή $H=H_1=H_2=H_3=...=H_n$. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και διαγραμματικά πως μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική παροχή και ύψος δυο αντλιών. Όπως φαίνεται προσθέτουμε κατά Q τις καμπύλες ύψους – παροχής της κάθε αντλίας.



Εικόνα 18: Υπολογισμός συνολικής καμπύλης παράλληλων αντλιών

Επομένως σε εφαρμογές που υπάρχει ανάγκη σε μεγάλες παροχές ενδείκνυται η χρήση παράλληλων αντλιών, αφού σε αυτή την περίπτωση έχουμε άθροισμα των επιμέρους παροχών. Ωστόσο, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η προσθήκη ταυτόσημης αντλίας σε παράλληλη σύνδεση, δεν συνεπάγεται τον διπλασιασμό της παροχής που θα είχαμε αν λειτουργούσε μία αντλία. Αυτό προκύπτει και γραφικά. Η καμπύλη σωληνογραμμής θα μείνει ανεπηρέαστη ενώ η καμπύλη $Q-H$ θα διπλασιαστεί κατά Q . Επομένως το σημείο τομής των γραφικών προς εύρεση του σημείου λειτουργίας δεν θα είναι για διπλάσια παροχή κι αυτό φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Για αρχική παροχή Q και προσθήκη δεύτερης ταυτόσημης αντλίας η τελική παροχή Q' δεν θα είναι $Q' > 2Q$.

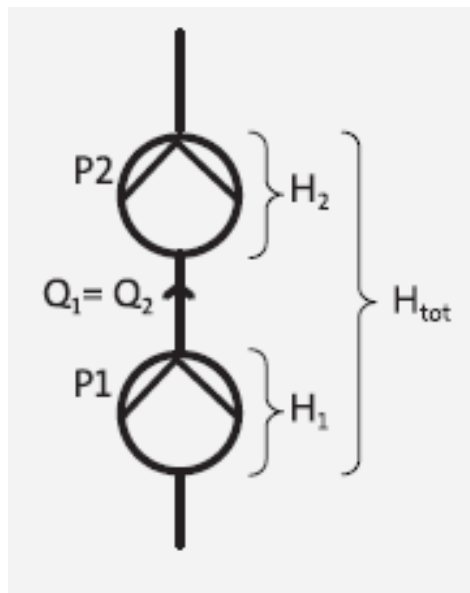


Εικόνα 19: Παράλληλη σύνδεση αντλιών για διαφορετικές περιπτώσεις.

Αυτό που παρατηρούμε είναι πως με την προσθήκη δεύτερης αντλίας έχουμε μεγάλη αύξηση της παροχής κι αυτό διότι δεν είναι μεγάλη η αύξηση μανομετρικού. Ωστόσο όσο προσθέτουμε αντλίες υπάρχει όλο και μικρότερη αύξηση της παροχής ενώ έχουμε αύξηση του μανομετρικού. Μάλιστα κατά την προσθήκη της τέταρτης αντλίας δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου αύξηση της παροχής. Αντιθέτως η παροχή μοιράζεται σε όλες τις αντλίες.

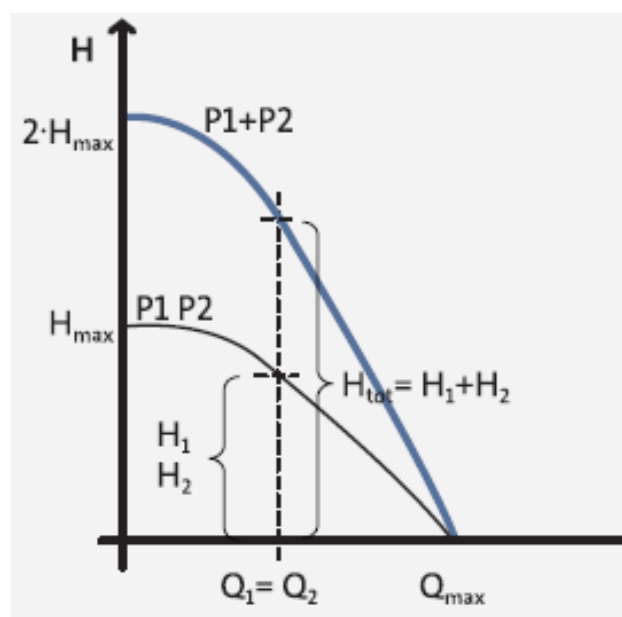
2.4.2 Λειτουργία αντλιών εν σειρά

Ο άλλος τρόπος σύνδεσης αντλιών είναι η σύνδεσή τους σε σειρά. Κατά την σύνδεση αυτή υπάρχει ο κοινός αγωγός στον οποίο τοποθετούνται οι αντλίες η μία μετά την άλλη. Η σύνδεση αυτή προτιμάται όταν θέλουμε να καλύψουμε μεγάλο ύψος. Επίσης στηρίζονται στην αρχή λειτουργίας των πολυβάθμιων αντλιών όπου ουσιαστικά έχουμε την μία αντλία μετά την άλλη συνδεδεμένη σε σειρά. Ένας ακόμη λόγος που γίνεται χρήση αυτής της σύνδεσης για να καλυφθούν μεγάλα ύψη είναι ότι όταν έχουμε μία αντλία που θα πρέπει να καλύψει μεγάλο ύψος έχουμε μείωση της απόδοσης, και έτσι είναι προτιμότερο να γίνει χρήση δύο ή περισσότερων αντλιών συνδεδεμένων σε σειρά αντί για μία μοναδική αντλία. Γενικώς η σύνδεση αντλιών σε σειρά πρόκειται για την περίπτωση όπου η έξοδος της μίας αντλίας (κατάθλιψη) αποτελεί την είσοδο για την επόμενη (αναρρόφηση). Παρακάτω φαίνεται και σχηματικά η εν σειρά σύνδεση δύο αντλιών P1 και P2.



Εικόνα 20: Σύνδεση αντλιών σε σειρά.

Στην εν σειρά λειτουργία των αντλιών η διακινούμενη παροχή Q θα είναι ίση με τις επιμέρους παροχές της κάθε αντλίας, δηλαδή $Q=Q_1=Q_2=Q_3=\dots=Q_n$ ενώ το συνολικό μανομετρικό H θα είναι το άθροισμα των επιμέρους μανομετρικών κάθε αντλίας δηλαδή $H=H_1+H_2+H_3+\dots+H_n$. Όπως φαίνεται λοιπόν η τελική χαρακτηριστική των αντλιών θα αποτελείται από το καθ' ύψος άθροισμα των χαρακτηριστικών καμπυλών της κάθε αντλίας για συγκεκριμένη παροχή. Επίσης στην σύνδεση σε σειρά όπως και στην παράλληλη σύνδεση η τελική παροχή θα είναι διαφορετική απ' ότι θα ήταν αν λειτουργούσε μία μόνο αντλία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και διαγραμματικά πώς προκύπτει η συνολική χαρακτηριστική καμπύλη δύο όμοιων εν σειρά συνδεδεμένων αντλιών.



Εικόνα 21: Συνολική καμπύλη αντλιών σε σειρά

Η χρήση αντλιών συνδεδεμένες σε σειρά μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες πολλών εφαρμογών. Για παράδειγμα, είναι ενδεικτική η χρήση τους για δίκτυα άρδευσης σε διαφορετικά υψόμετρα κι αυτό διότι αναλόγως το πόσες αντλίες είναι σε λειτουργία μπορεί να αυξομειώνεται το ύψος που μπορεί να σταλεί το νερό. Άρα όταν υπάρχει ανάγκη για ζήτηση νερού σε περιοχή χαμηλού υψόμετρου μπορεί να λειτουργεί μία αντλία. Ενώ όταν θα υπάρξει ζήτηση σε κάποια περιοχή μεγαλύτερου υψόμετρου μπορεί να ξεκινήσουν να λειτουργούν και άλλες αντλίες ώστε να καλυφθεί το ζητούμενο ύψος. Επιπλέον σε τέτοιες περιπτώσεις διατάξεων αντλιών συνδεδεμένων σε σειρά η εγκατάσταση των αντλιών δεν γίνεται αμέσως η μία μετά την άλλη γιατί κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα την πολύ μεγάλη αύξηση της στατικής πίεσης στον αγωγό αμέσως μετά τις αντλίες, κάτι το οποίο θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα. Έτσι συνηθέστερη είναι η εγκατάσταση της δεύτερης αντλίας μετά από κάποια απόσταση ώστε να μην υπάρχουν τόσο μεγάλες αυξήσεις στην στατική πίεση.

Μία άλλη περίπτωση επιλογής αντλιών συνδεδεμένες σε σειρά είναι προφανώς και οι εφαρμογές που θέλουμε αύξηση της παροχής, αφού όπως είπαμε και προηγουμένως η τελική παροχή θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα είχαμε αν λειτουργούσε μία μόνο αντλία.

Τέλος με την εφαρμογή της εν σειρά σύνδεσης αντλιών μπορεί να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης αφού κατ' αυτό τον τρόπο δύναται να αυξηθεί η στατική πίεση στον αγωγό αναρρόφησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση μια αντλίας μικρότερου μεγέθους, *inducer* στα αγγλικά, πριν από την κύρια αντλία η οποία έχει τον κύριο ρόλο της διακίνησης του υγρού. Έτσι η μικρή αντλία αυξάνει την στατική πίεση στον αγωγό αναρρόφησης της κύριας αντλίας ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση σπηλαιώσης στην κύρια αντλία. Μία τέτοια εφαρμογή είναι μεγάλοι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί.

2.5 Αγωγός με απώλειες

Με προϋπόθεση ότι υπάρχουν σταθερές συνθήκες ορμής του ρευστού, στο μοντέλο δεν λαμβάνονται υπόψη ούτε η συμπίεστικότητα του ρευστού ούτε η αδράνειά του, που σημαίνει ότι χαρακτηριστικά όπως το υδραυλικό πλήγμα δεν μπορούν να ερευνηθούν. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης τυχόν αντιστάσεων που προκύπτουν από γωνίες ή άλλες διακυμάνσεις κατά μήκος του αγωγού με ισοδύναμα τμήματα αγωγού με αντιστάσεις.

Η απώλεια πίεσης εξαιτίας της τριβής υπολογίζεται με την εξίσωση Darcy, στην οποία οι απώλειες είναι ανάλογες με το τον συντελεστή τριβής της ροής και το τετράγωνο της ροής. Ο συντελεστής τριβής σε τυρβώδη ροή καθορίζεται από την προσέγγιση Haaland. Ο συντελεστής τριβής κατά τη διάρκεια της εναλλαγής από στρωτή σε τυρβώδη ροή καθορίζεται από την γραμμική παρεμβολή μεταξύ των

ακραίων σημείων αυτών των δύο. Με βάση αυτές τις υποθέσεις, ο σωλήνας προσομοιάζεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις

$$p = \frac{f(L+L_{eq})}{D_H} \frac{\rho}{2A^2} q|q| + \rho g(z_B - z_A) \quad (2.12)$$

$$f = \begin{cases} \frac{K_s}{Re} & , for Re \leq Re_L \\ f_L + \frac{f_T - f_L}{Re_T - Re_L} (Re - Re_L) & , for Re_L < Re < Re_T \\ \frac{1}{\left(-1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{r}{D_H} \right)^{1.11} \right) \right)^2} & , for Re \geq Re_T \end{cases} \quad (2.13)$$

$$Re = \frac{q^* D_H}{A^* v} \quad (2.14)$$

Όπου :

p	Απώλεια πίεσης κατά μήκος του αγωγού εξαιτίας της τριβής
q	Παροχή στον σωλήνα
Re	Αριθμός Reynolds
Re_L	Μέγιστος αριθμός Reynolds για στρωτή ροή
Re_T	Ελάχιστος αριθμός Reynolds για τυρβώδη ροή
K_s	Σχηματικός παράγοντας που χαρακτηρίζει την διατομή του αγωγού
f_L	Συντελεστής τριβής για όριο στρωτής ροής
f_T	Συντελεστής τριβής για όριο τυρβώδους ροής

A	Επιφάνεια διατομής αγωγού
D_H	Υδραυλική διάμετρος του σωλήνα
L	Γεωμετρικό μήκος του σωλήνα
L_{eq}	Ισοδύναμο μήκος τοπικών απωλειών
r	Ύψος τραχύτητας στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα
v	Κινηματικό ιξώδες του ρευστού
z_A, z_B	Υψόμετρο του σωλήνα στην είσοδο A και στην έξοδο B
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας

Η θετική κατεύθυνση είναι από το A στο B και η διαφορά πίεσης P ισούται με $P_a - P_b$

Βασικά συμπεράσματα

- Η ροή υποθέτουμε ότι εξελίσσεται πλήρως κατά μήκος του σωλήνα
- Η αδράνεια του ρευστού, η συμπίεστικότητα καθώς και ενδοτικότητα των τοιχωμάτων δεν λαμβάνονται υπόψη

Βασικές παράμετροι

- Σχηματική διάταξη (κυκλική, τετραγωνική κλπ.)
- Εσωτερική διάμετρος
- Γεωμετρικός σχηματικός συντελεστής (56 για τετράγωνο, 62 για ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, 64 για κυκλική διατομή κ.α.)
- Μήκος σωλήνα
- Συνολικό ισοδύναμο μήκος απωλειών
- Ύψος εσωτερικής τραχύτητας
- Άνω όριο στρωτής ροής
- Κάτω όριο τυρβώδους ροής
- Υψομετρικές διαφορές της αρχής και του τέλους του αγωγού

2.6 Σωλήνας σε κύρτωση

Ο σωλήνας σε κύρτωση εκφράζει μια υδραυλική απώλεια. Η απώλεια πίεσης στην κύρτωση υποθέτουμε ότι προκύπτει (1) από την απώλεια στον ευθύ σωλήνα και (2) από την απώλεια εξαιτίας στην καμπυλότητα.

Η θετική κατεύθυνση ορίζεται από το Α στο Β. Το οποίο σημαίνει ότι η ροή είναι θετική όταν έχει κατεύθυνση από το Α στο Β, και η διαφορά πίεσης εκφράζεται ως $P = P_a - P_b$.

Η απώλεια πίεσης εξαιτίας της καμπυλότητας του σωλήνα για τυρβώδη ροή υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$p = K \frac{\rho}{2A^2} q|q| \quad (2.15)$$

Όπου

q	Παροχή
p	Απώλεια πίεσης
K	Συντελεστής απώλειας πίεσης
A	Επιφάνεια διατομής καμπύλης
ρ	Πυκνότητα ρευστού

Ο συντελεστής απώλειας πίεσης καθορίζεται με βάση το:

$$K = K_d * K_r * K_a \quad (2.16)$$

Όπου:

K_d	Βασικός συντελεστής τριβής
K_r	Διορθωμένος συντελεστής που αναφέρεται στην καμπυλότητα της κάμψης
K_α	Διορθωμένος συντελεστής που αναφέρεται στην γωνία της κύρτωσης

Το μέγεθος της καμπυλότητας της κάμψης στον σωλήνα βρίσκεται από τον τύπο:

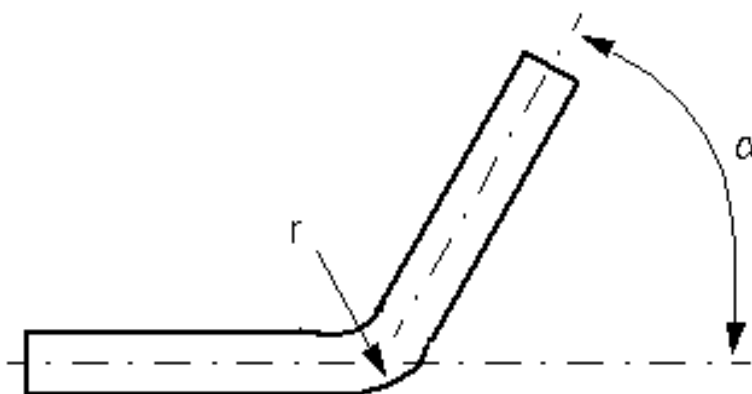
$$r = \text{bend radius} / \text{pipe diameter}$$

Προσέγγιση για κάμψεις που δεν είναι των 90 μοιρών υπολογίζονται με βάση τον εμπειρικό τύπο:

$$K_\alpha = \alpha(0,0142 - 3,703 \cdot 10^{-5} \alpha) \quad (2.17)$$

Όπου

α	Γωνία κάμψης σε μοίρες ($0 \leq \alpha \leq 180$)
----------	---



Βασικά συμπεράσματα :

- Η αδράνεια του ρευστού, η συμπιεστότητά του καθώς και η ενδοτικότητα του τοιχώματος δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή υποθέτουμε ότι είναι ακαριαία και λαμβάνει χώρο όταν $Re=Re_{cr.}$.
- Η κάμψη υποθέτουμε ότι θα εφαρμοστεί σε ένα καθαρό αγωγό από εμπορικό χάλυβα.

2.7 Δεξαμενή μεταβλητού ύψους

Η δεξαμενή μεταβλητού ύψους προσομοιώνει μια υδραυλική δεξαμενή με ρευστό, το οποίο υπόκειται σε σταθερή πίεση. Η πίεσης παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως μεταβολής της στάθμης του ρευστού στη δεξαμενή. Το στοιχείο αυτό εκφράζει την μεταβολή της στάθμης μέσω αυξομειώσεων της καθώς και την απώλεια της πίεσης στον συνδεδεμένο σωλήνα εξαιτίας ενός φίλτρου ή εξαρτημάτων ή οποιαδήποτε άλλη τοπική απώλεια. Η απώλεια αυτή εκφράζεται με τον συντελεστή απώλειας πίεσης. Επίσης υπολογίζεται ο όγκος του ρευστού στην δεξαμενή ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους ελεγκτές που εκκινούν ή κλείνουν τις αντλίες.

Η πίεση στην είσοδο της δεξαμενής υπολογίζεται από της παρακάτω εξισώσεις:

$$p = p_{elev} - p_{loss} + p_{pr} \quad (2.18)$$

$$p_{elev} = r * g * H \quad (2.19)$$

$$p_{loss} = K \frac{\rho}{2A_p^2} q|q| \quad (2.20)$$

$$A_p = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (2.21)$$

$$H = \begin{cases} \frac{V}{A}, & \text{for constant - area tank} \\ f(V), & \text{for table - specified tank} \end{cases} \quad (2.22)$$

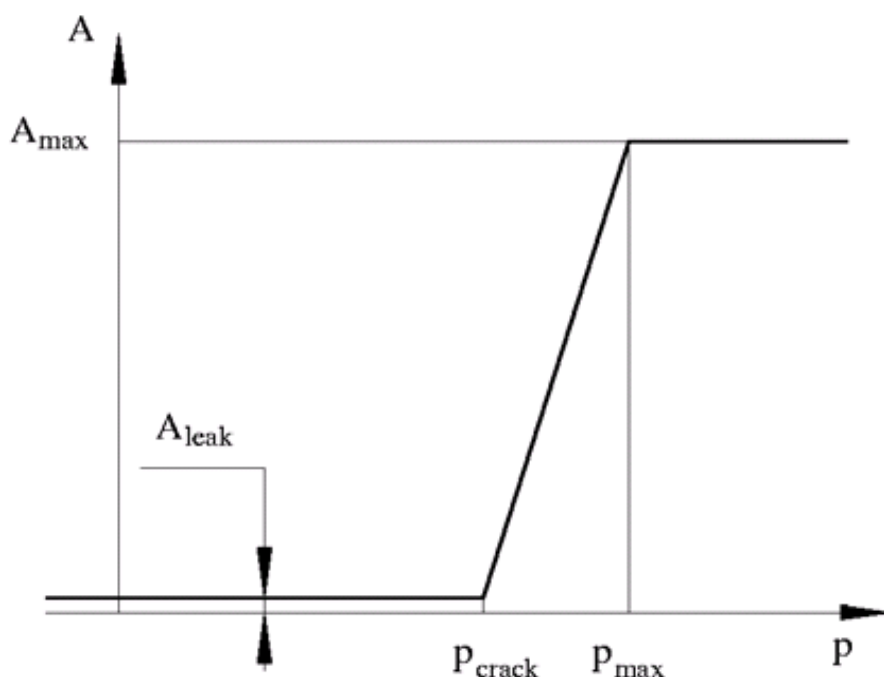
$$V = V_0 + q * t \quad (2.23)$$

Όπου:

p	Πίεση στην είσοδο της δεξαμενής
p_{elev}	Πίεσης εξαιτίας της στάθμης του ρευστού
p_{loss}	Απώλεια πίεσης στον σωλήνα σύνδεσης
p_{pr}	Pressurization(συμπίεση)
ρ	Πυκνότητα του ρευστού
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
H	Στάθμη ρευστού σε σχέση με τον πάτο της δεξαμενής
K	Συντελεστής απώλειας πίεσης
A_p	Επιφάνεια σωλήνα σύνδεσης
d	Διάμετρος σωλήνα σύνδεσης
q	Παροχή
V	Στιγμιαία στάθμη ρευστού
V_0	Αρχική στάθμη ρευστού
A	Επιφάνεια δεξαμενής
t	Χρόνος προσομοίωσης

2.8 Βαλβίδα αντεπιστροφής

Ο ρόλος της βαλβίδας ελέγχου είναι να επιτρέπει τη ροή προς μία κατεύθυνση και να την αποκλείει προς την αντίθετη. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει την τυπική εξάρτηση μεταξύ της επιφάνειας εντός της βαλβίδας που επιτρέπει την ροή A και την διαφορά πίεσης κατά μήκος της βαλβίδας $p=p_A-p_B$.



Η βαλβίδα παραμένει κλειστή για όσο η διαφορά πίεσης κατά μήκος της βαλβίδας είναι χαμηλότερη από την καθορισμένη πίεση κατά την οποία ανοίγει η βαλβίδα. Όταν η διαφορά πίεσης προσεγγίσει την καθορισμένη πίεση, ο ελεγκτής σπρώχνει το αντίστοιχο δίσκο, σφαίρα κ.α. εκτός θέσης, και δημιουργείται έτσι πέρασμα μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Αν η παροχή είναι αρκετά υψηλή και η πίεση συνεχίσει να αυξάνεται, η επιφάνεια εντός της βαλβίδας που επιτρέπει την ροή εντός της βαλβίδας συνεχίζει να αυξάνεται επίσης, έως ότου φτάσει στο μέγιστο που έχει οριστεί. Συνήθως αυτή η μέγιστη επιφάνεια καθώς και η αντίστοιχη πίεση, γενικά παρέχονται σε καταλόγους του κατασκευαστή και είναι τρεις πολύ σημαντικές παράμετροι για το εξάρτημα αυτό.

Επιπλέον, η επιφάνεια απωλειών είναι επίσης απαραίτητη για να μοντελοποιήσουμε πλήρως την βαλβίδα. Ο κύριος ρόλος αυτής της παραμέτρου δεν είναι προσδιορίσει την πιθανή διαρροή, αν και είναι σημαντικό κι αυτό, αλλά να διατηρήσει την αριθμητική ακεραιότητα του κυκλώματος εμποδίζοντας ένα τμήμα του συστήματος να απομονωθεί όταν η βαλβίδα κλείσει τελείως. Ένα απομονωμένο κομμάτι του συστήματος θα μπορούσε να επηρεάσει την υπολογιστική απόδοση ή ακόμα να προκαλέσει σφάλμα υπολογισμού. Θεωρητικά αυτή η παράμετρος μπορεί να οριστεί ως μηδέν, όμως αυτό δεν συνίσταται.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη το καθεστώς στρωτής και τυρβώδους ροής ελέγχοντας τους αριθμούς Reynolds (Re) και συγκρίνοντάς τους με τους κρίσιμους αριθμούς Reynolds (Re_{cr}). Η παροχή καθορίζεται με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$q = \begin{cases} C_D * A \sqrt{\frac{2}{\rho} |p| \text{sign}(p)}, & \text{for } Re \geq Re_{cr} \\ 2C_{DL} * A \frac{D_H}{v * p} p, & \text{for } Re < Re_{cr} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$A(p) = \begin{cases} A_{leak}, & \text{for } p \leq p_{crack} \\ A_{leak} + k * (p - p_{crack}), & \text{for } p_{crack} < p < p_{max} \\ A_{max}, & \text{for } p \geq p_{max} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$k = \frac{A_{max} - A_{leak}}{p_{max} - p_{crack}} \quad (2.7)$$

$$p = p_A - p_B \quad (2.8)$$

$$Re = \frac{q * D_H}{A(p) * v} \quad (2.9)$$

$$C_{DL} = \left(\frac{C_D}{\sqrt{Re_{cr}}} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$D_H = \sqrt{\frac{4A(p)}{\pi}} \quad (2.11)$$

Όπου

q	Παροχή που διέρχεται της βαλβίδας
p	Διαφορά πίεσης κατά μήκος της βαλβίδας

p_A, p_B	Μετρήσεις τιμών πίεσης στην είσοδο και έξοδο του στοιχείου.
C_D	Συντελεστής απομείωσης της παροχής
$A(p)$	Ακαριαία επιφάνεια της περιοχής του στομίου
A_{max}	Επιφάνεια διόδου για εντελώς ανοιχτή βαλβίδα
A_{leak}	Επιφάνεια διαρροής για κλειστή βαλβίδα
p_{crack}	Πίεση στην οποία αρχίζει να ανοίγει η βαλβίδα
p_{max}	Πίεση κατά την οποία ανοίγει πλήρως η βαλβίδα
D_H	Ακαριαία υδραυλική διάμετρος του στομίου
ρ	Πυκνότητα του ρευστού
ν	Κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Η θετική κατεύθυνση ροής καθορίζεται από το Α προς το Β. Αυτό σημαίνει ότι παροχή είναι θετικής από το Α προς το Β, και η διαφορά πίεσης καθορίζεται ως

$$p = p_A - p_B.$$

Βασικά συμπεράσματα και περιορισμοί

- Το άνοιγμα της βαλβίδας είναι γραμμικά ανάλογο της διαφοράς πίεσης
- Δεν λαμβάνεται υπόψη κανένα φορτίο στην βαλβίδα όπως η αδράνεια, η τριβή κ.α.
- Η μετάβαση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής υποθέτουμε ότι είναι ακαριαία και συμβαίνει αμέσως όταν $Re = Re_{cr}$

2.9 Υδραυλικό Ρευστό

Πριν ξεκινήσει να τρέχει το μοντέλο θα πρέπει να προσδιορίσουμε τον τύπο του υδραυλικού ρευστού που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση. Κι αυτό διότι πρέπει να είναι γνωστές οι ιδιότητες του ρευστού, όπως το κινηματικό ιξώδες, η πυκνότητα και ο συντελεστής όγκου για όλα τα υδραυλικά στοιχεία στην προσομοίωση. Αυτές οι ιδιότητες του ρευστού θα πρέπει είναι σταθερές κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η πυκνότητα καθορίζεται από τον τύπο του ρευστού, ενώ το κινηματικό ιξώδες απαιτεί επιπλέον τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας.

Όταν γίνεται αναφορά σε υδραυλικά στοιχεία προς προσομοίωση πρέπει να υπολογίζεται και η επιρροή του παγιδευμένου αέρα. Το μίγμα του με το ρευστό προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$E = E_l \frac{1 + a \left(\frac{p_\alpha}{p_\alpha + p} \right)^{1/n}}{1 + a \frac{p_\alpha^{1/n}}{n+1} E_l} \quad (2.24)$$

Όπου:

E_l	Καθαρός συντελεστής μάζας υγρού
p_α	Ατμοσφαιρική πίεση
α	Σχετική περιεκτικότητα αερίου υπό ατμοσφαιρική πίεση, $\alpha = V_G/V_L$
V_G	Όγκος του αερίου υπό ατμοσφαιρική πίεση
V_L	Όγκος ρευστού
n	Ρυθμός θέρμανσης για το συγκεκριμένο αέριο

Ο βασικός λόγος που μελετάται το ρευστό ως μείγμα υγρού και αέρα είναι ώστε να μοντελοποιηθεί, κατά προσέγγιση, η σπηλαιώση που εμφανίζεται σε ένα θάλαμο στον οποίο η πίεση πέφτει κάτω από τα επίπεδα κορεσμού αερίου για το ρευστό.

3. Αντλιοστάσιο Βλητέ

3.1 Τρόπος λειτουργίας

Το κεντρικό αντλιοστάσιο Βλητέ βρίσκεται στον Βλητέ Σούδας σε υψόμετρο 90m. Αποτελείται από 9 αντλίες όπου οι 1-6 εξυπηρετούν τις ανάγκες σε ύδρευση και οι υπόλοιπες 7-9 τις ανάγκες σε άρδευση. Συγκεκριμένα οι αντλίες της ύδρευσης βρίσκονται στον αγωγό ύδρευσης ενώ οι αντλίες άρδευσης είναι στον αγωγό άρδευσης αντίστοιχα. Το αντλητικό σύστημα προωθεί νερό στις δεξαμενές των Κορακιών σε υψόμετρο 214m, μία δεξαμενή για την ύδρευση και μία για την άρδευση. Το νερό φτάνει και καταθλίπτεται στο φρεάτιο του Βλητέ με φυσική ροή από τις γεωτρήσεις στα Μυλωνιανά και τις πηγές στα Μεσκλά, ενώ από εκεί προωθείται στην δεξαμενή ύδρευσης των Κορακιών με τις αντλίες 1-6. Οι αντλίες 1-4 είναι τα κύρια προωθητικά αντλητικά συγκροτήματα τύπου πομόνα, από τις οποίες το πολύ δύο από τις κύριες αντλίες βρίσκονται σε ταυτόχρονη λειτουργία. Οι αντλίες 5-6 αποτελούν τα άλλα δύο προωθητικά οριζόντια συγκροτήματα.

Για τις ανάγκες άρδευσης γίνεται χρήση τριών υποβρυχίων αντλητικών συστημάτων τύπου booster τα οποία βρίσκονται επί του αγωγού άρδευσης Μ.Χωράφια – Βλητέ τα οποία αντλούν νερό από τις πηγές Ζούρμπου. Γίνεται χρήση τους μόνο κατά την καλοκαιρινή περίοδο. [7]

Μια ιδιαιτερότητα του αντλιοστασίου του Βλητέ είναι ο τρόπος λειτουργίας και κάλυψης των αναγκών άρδευσης κατά την χειμερινή περίοδο. Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν οι αντλίες 7-9 της άρδευσης λειτουργούν μόνο κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, λόγω του ότι τον χειμώνα οι ανάγκες σε νερό είναι σαφώς μικρότερες και εξαιτίας της μείωσης του τουριστικού ρεύματος αλλά και τον βροχών. Όταν λοιπόν δεν λειτουργούν οι αντλίες, αυτές την ζήτηση σε άρδευση καλύπτουν οι αντλίες 1-6 μαζί με την ζήτηση για ύδρευση. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση συστήματος το οποίο επιτρέπει την υπερχείλιση της δεξαμενής κι έτσι μέρος του νερού υπερχειλίζει προς τον δεξαμενή άρδευσης με αποτέλεσμα την πλήρωση κι αυτής. Παράλληλα, επί του αγωγού ύδρευσης και πριν την δεξαμενή ύδρευσης έχει τοποθετηθεί βάνα με αγωγό που επιτρέπει την σύνδεση τους και τη μεταφορά νερού από το σύστημα ύδρευσης στο σύστημα άρδευσης. Επομένως η δεξαμενή ύδρευσης τροφοδοτείται από τον αγωγό ύδρευσης ενώ η δεξαμενή άρδευσης τροφοδοτείται από το σύστημα υπερχείλισης της δεξαμενής ύδρευσης προς αυτή της άρδευσης αλλά και του σωλήνα σύνδεσης των δύο αγωγών.

Παρακάτω φαίνονται οι κύριες αντλίες 1-4 του αντλιοστασίου Βλητές.



Εικόνα 22: Αντλίες 1-4 στον Βλητέ Σούδας

3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των αντλιών

Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΟΑΚ οι αντλίες 1-4 είναι αντλίες τύπου πομώννας. Πρόκειται για πολυβάθμιες αντλίες και πιο συγκεκριμένα 15 βαθμίδων έκαστη, της εταιρίας TORRENT TAMESIS PUMPS. Η παροχή της κάθε αντλίας είναι 350 m³/hr και φέρουν κινητήρα 335 ίππων (HP) και 1450 rpm. Οι αντλίες 5-6 αποτελούν οριζόντια προωθητικά συγκροτήματα. Η αντλία 5 φέρει κινητήρα 80 ίππων (HP) και παροχής 100 m³/hr. Η αντλία 6 είναι οριζόντια πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία 3 βαθμίδων της εταιρίας Δράκος Πολέμης και έχει παροχή 180 m³/hr. Φέρει κινητήρα 125 ίππων (HP) και 1450 rpm. Οι αντλίες 7-8 είναι τύπου booster πολυβάθμιες αντλίες, 4 βαθμίδων και παροχής 300 m³/hr. Είναι εταιρίας ANAVALOS PUMPS και φέρουν κινητήρα 250 ίππων (HP). Τέλος η αντλία 9 είναι εταιρίας TORRENT TAMESIS PUMPS πολυβάθμια, 4 βαθμίδων και παροχής 300 m³/hr ενώ φέρει κινητήρα 260 ίππων (HP).[7]

Αντλία	Παροχή (m ³ /hr)	Πολυβά- θμια	Εταιρία	Τύπος	Κινητήρας (HP)	Στροφές
1	350	15 βαθμίδες	TORRENT TAMESIS	12KHN/15	335	1450
2	350	15 βαθμίδες	TORRENT TAMESIS	12KHN/15	335	1450
3	350	15 βαθμίδες	TORRENT TAMESIS	12KHN/15	335	1450
4	350	15 βαθμίδες	TORRENT TAMESIS	12KHN/15	335	1450
5	100	-	-	-	80	-
6	180	3 βαθμίδες	Δράκος Πολέμης	MS125/3	125	1450
7	300	4 βαθμίδες	ANAVALO S PUMPS	10MD/4	250 (εταιρίας Franklin)	2900
8	300	4 βαθμίδες	ANAVALO S PUMPS	10MD/4	250 (εταιρίας Franklin)	2900
9	300	4 βαθμίδες	TORRENT TAMESIS PUMPS	10KMM/4	260(εταιρί ας ATURIA)	2900

Πίνακας: δεδομένα για τις αντλίες από Ο.Α.Κ. [7]

4. Μοντέλο προσομείωσης

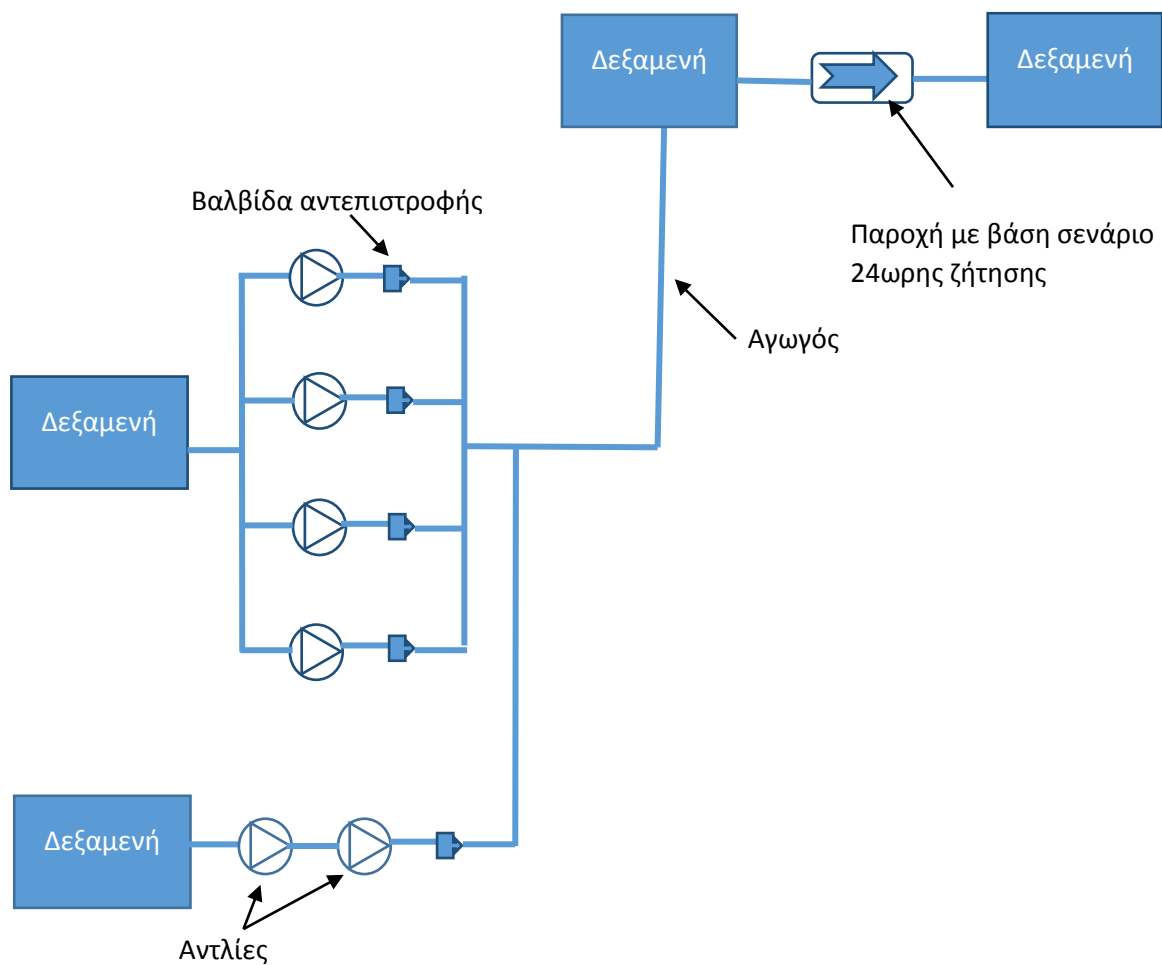
4.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο τρέχει ένα σενάριο 24ωρης ζήτησης νερού για ύδρευση και άρδευση. Η μοντελοποίηση βασίστηκε στη χρήση μοντέλων του Simulink/Matlab. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως η εργαλειοθήκη του Simulink και η εργαλειοθήκη του Simscape.

Πρωτού ξεκινήσει η τελική μοντελοποίηση όμως, ορίστηκε μια απλουστευμένη μορφή της διάταξης του αντλιοστασίου, η οποία περιέχει χονδρικά τα βασικότερα τμήματα του, ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα ενώ παράλληλα είναι πλήρως κατανοητή. Μετά από το πρώτο αυτό βήμα, έγινε η παραμετροποίηση των στοιχείων που το αποτελούν, προσθήκη μετρητών πίεσης και παροχής, όπως και όγκου του νερού στις δεξαμενές.

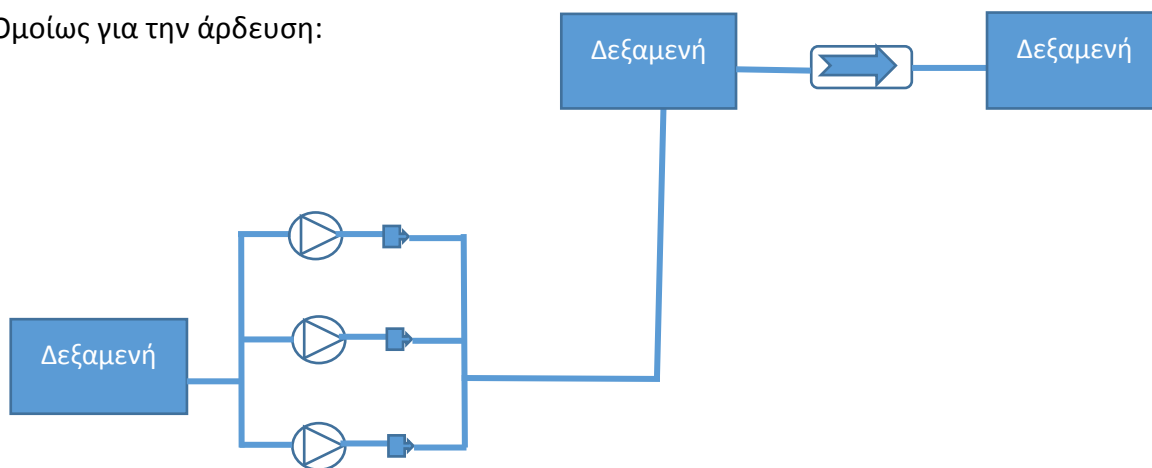
Το μοντέλο αποτελείται από δύο αντλητικές διατάξεις, μία για την ύδρευση και μία για την άρδευση. Στην διάταξη της ύδρευσης έχουμε δύο εικονικές δεξαμενές από όπου αντλούν νερό τέσσερις παράλληλες και δυο σε σειρά αντλίες αντίστοιχα, οι οποίες σαν διατάξεις είναι και παράλληλες μεταξύ τους. Η αθροιστική παροχή τους μέσω μιας διάταξης σωληνώσεων φτάνει τις δεξαμενές των Κορακιών. Μετά από κάθε αντλία υπάρχει βαλβίδα αντεπιστροφής ενώ μετά τις εν σειρά υπάρχει μία μόνο. Επιπλέον μετά από κάθε δεξαμενή έχει τοποθετηθεί ένα εργαλείο προς προσομοίωση της ζήτησης νερού και διοχέτευσης της ροής. Την ίδια ακριβώς λογική έχει και η διάταξη της άρδευσης με διαφορά της διάταξη των αντλιών όπου είναι τρεις αντλίες συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους.

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η απλουστευμένη διάταξη ύδρευσης με τα βασικά χαρακτηριστικά της.



Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση διάταξης ύδρευσης

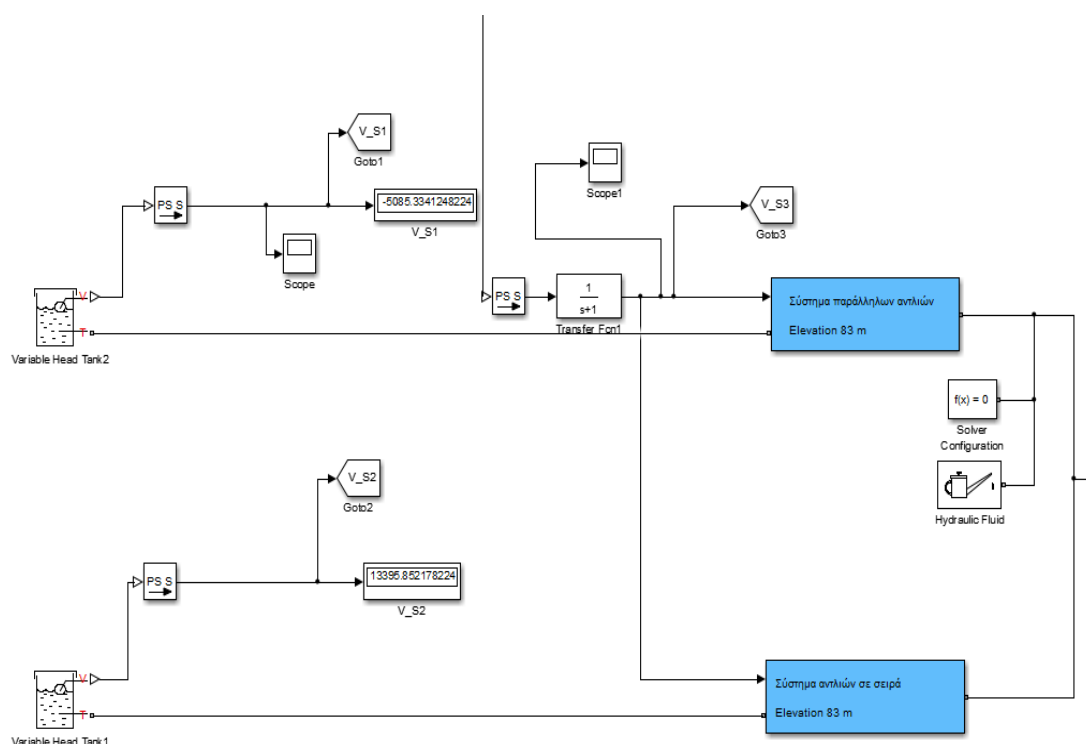
Ομοίως για την άρδευση:



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση διάταξης άρδευσης

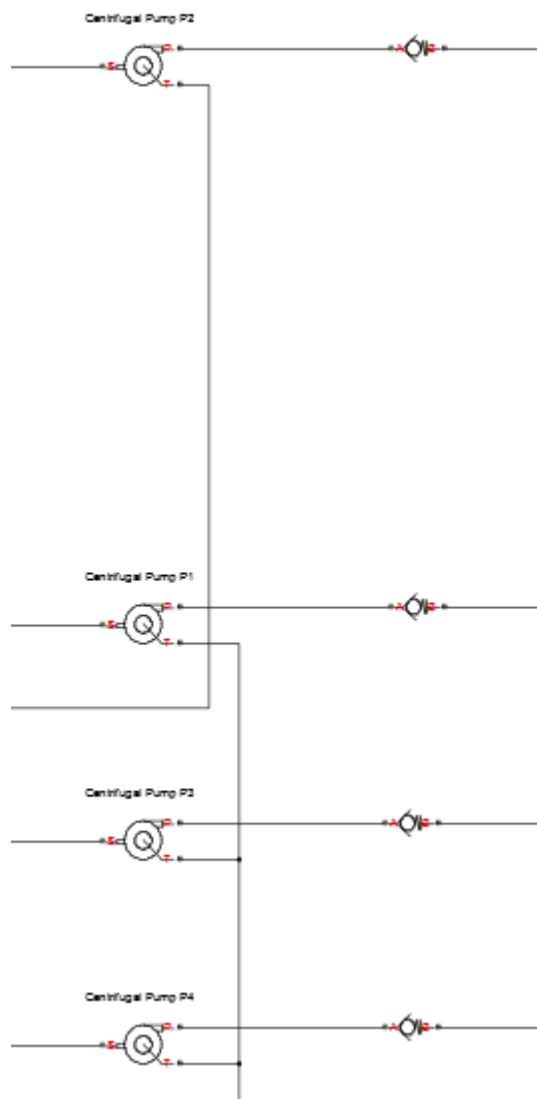
Παρακάτω φαίνεται πως προσομοιώνονται στο μοντέλο τα παραπάνω συστήματα.

Υπάρχουν οι δεξαμενές ύδρευσης από τις οποίες αντλούν νερό οι δύο διατάξεις των αντλιών όπως και τα εργαλεία που προσδιορίζουν την διαφορική που τρέχει το μοντέλο αλλά και τα χαρακτηριστικά του υγρού. Προσδιορίζοντας πρώτα τις ιδιότητες του ρευστού αλλά και την θερμοκρασία του, ξεκινάει η προσομείωση μέσω της επίλυσης ενός συνόλου διαφορικών εξισώσεων που επιλύονται συνεχώς όσο τρέχει το μοντέλο, ενώ παράλληλα προκύπτουν τα αποτελέσματα απευθείας στο παράθυρο του μοντέλου.



Εικόνα 23: Δεξαμενές ύδρευσης-άρδευσης, προσδιορισμός διαφορικής εξίσωσης επίλυσης και θήματος, χαρακτηριστικών του υγρού αλλά και αντλητικά συστήματα ύδρευσης-άρδευσης

Μετά από κάθε μία από τις τέσσερις παράλληλες αντλίες έχουν τοποθετηθεί από μία βαλβίδα αντεπιστροφής ώστε όταν κλείνει κάποια από τις αντλίες να μην έχουμε αρνητική ροή στην αντλία καθώς δε δύναται το μαθηματικό της μοντέλο να λειτουργήσει. Ομοίως στην διάταξη των εν σειρά αντλιών έχει τοποθετηθεί μία βαλβίδα αντεπιστροφής στην έξοδο της τελευταίας αντλίας αφού η αποφυγή αρνητικής ροής στην έξοδο της τελευταίας συνεπάγεται το ίδιο και στην προηγούμενη.



Εικόνα 24: Αντλίες 1-4 της διάταξης ύδρευσης και βαλβίδες αντεπιστροφής μετά από κάθε αντλία

Το αντλιοστάσιο βρίσκεται στα 90μ ενώ οι δεξαμενές των Κορακιών στα 214μ από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι υψομετρικές αυτές διαφορές γίνονται αντιληπτές από το πρόγραμμα καθώς για να οριστεί πλήρως η διάταξη της σωλήνωσης απαιτεί τον καθορισμό του ύψους που βρίσκονται οι δύο άκρες του όπως και το μήκος. Επιπλέον έχουν τοποθετηθεί και καμπυλωτά τμήματα αγωγού με τις αντίστοιχες απώλειες ώστε το μοντέλο να ανταποκρίνεται όσο είναι δυνατόν στην πραγματικότητα.

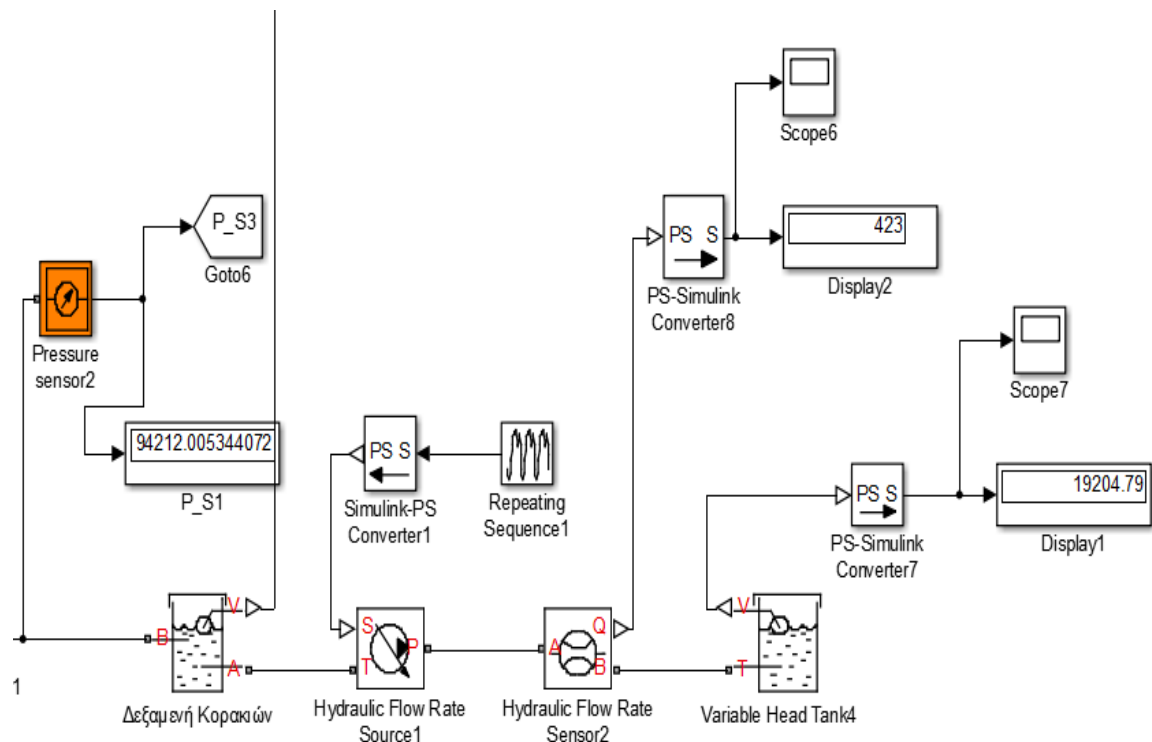
Η μοντελοποίηση των σωληνώσεων βασίστηκε στη χάρτη που δίνεται on line στην [2] όπου υπάρχει η διαδρομή των αγωγών και οι τοποθεσίες των δεξαμενών. Η ρύθμιση των υψομετρικών διαφορών και ο τρόπος με τον οποία διαχωρίστηκαν οι σωλήνες έγινε με βάση την δυνατότητα του Google Earth “Elevation Profile – Προφίλ Ανύψωσης». Τοποθετώντας τα αντίστοιχα σημεία με την μέθοδο Spline, το Google Earth μας δείχνει τις υψομετρικές διαφορές συναρτήσει του μήκους διαδρομής.



Εικόνα 25: Διάταξη σωλήνων στην εφαρμογή Google Earth και χρήση της δυνατότητας «Προφίλ ανύψωσης» για την μοντελοποίησή τους

Τέλος βάσει της τραχύτητας του σωλήνα και του κρίσιμου αριθμού Raynolds προσομοιάστηκε πλήρως η διάταξη των σωληνώσεων, καθώς όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί γίνονται απευθείας στο μοντέλο όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός των πιέσεων σε κάθε σημείο σε χρόνο real time κατά την εκτέλεση.

Από την κεντρική δεξαμενή απ' όπου φεύγει η κεντρική παροχή προς τις καταναλώσεις, η ζήτηση προσομοιάστηκε την χρήση ενός μοτίβου κατανάλωσης για μία συγκεκριμένη μέρα. Έτσι χρησιμοποιήθηκε μια 24ωρη τυπική ζήτηση στο μοντέλο, η οποία ωστόσο ήταν ανεξάρτητη αντιστάσεων και άλλων παραγόντων ώστε να αντιστοιχηθεί στην πραγματικότητα. Με αυτό τον τρόπο, η ροή διοχετεύεται σε μία τελική δεξαμενή που θεωρείται ότι είναι η ζήτηση ύδρευσης και άρδευσης αντίστοιχα των Χανίων σε m^3/h .



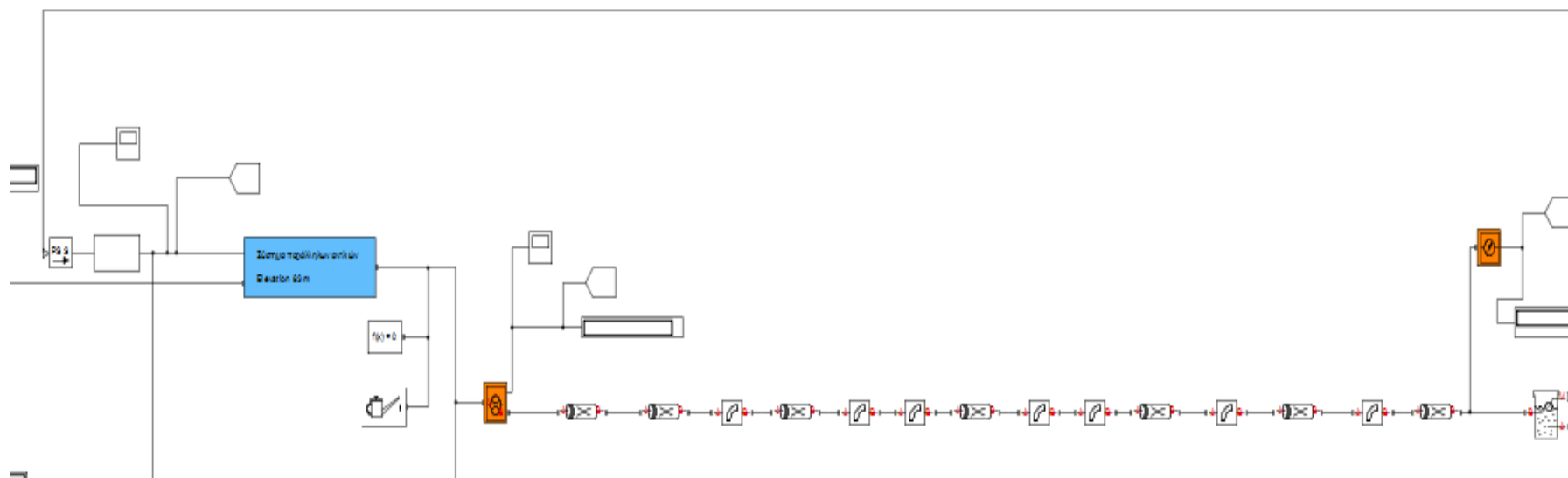
Εικόνα 26: Προσομοίωση της ζήτησης παροχής από την δεξαμενή Κορακιών

4.2 Έλεγχος αντλιών

Όσο τρέχει το μοντέλο, σε κάθε βήμα οι δεξαμενές στέλνουν ένα σήμα στους ελεγκτές των αντλιών το οποίο δείχνει τον όγκο του ρευστού που περιέχουν. Το σήμα αυτό το αξιολογείται από τους ελεγκτές οι οποίοι δίνουν την αντίστοιχη εντολή στους εκκινητές των αντλιών ώστε να ανοίγουν ή να κλείνουν την κάθε αντλία. Ο στόχος που τέθηκε ήταν να μένει σταθερή η στάθμη των δεξαμενών των Κορακιών, δηλαδή αναλόγως της αυξομείωσης της ζήτησης να προσαρμόζονται σε

πραγματικό χρόνο οι αντλίες και να υπερκαλύπτουν την ζήτηση ενώ να κλείνουν όταν έχει φτάσει στην επιθυμητή στάθμη η δεξαμενή.

Εδώ φαίνεται και η μορφή που έχει το μοντέλο στο σημείο που το σήμα έρχεται από την δεξαμενή και μπαίνει στο σύστημα των αντλιών.



Εικόνα 27: Το σήμα έρχεται από την δεξαμενή ύδρευσης και φτάνει στους ελεγκτές των αντλιών

Ομοίως λειτουργεί και η διάταξη της άρδευσης.

Επομένως όλες οι αντλίες λειτουργήσαν με γνώμονα να κρατήσουν την δεξαμενή γεμάτη και μόνο, ανεξάρτητα από οποιοδήποτε άλλο παράγοντα. Τα όρια της στάθμης όπου θα ανοίγουν και θα κλείνουν οι αντλίες τέθηκαν αυθαίρετα με πειραματισμό. Με δοκιμές επιτεύχθηκε το ζητούμενο αποτέλεσμα ενώ δεν λήφθηκαν υπόψη πρακτικά ζητήματα όπως είναι η κατανάλωση ισχύος για παράδειγμα.

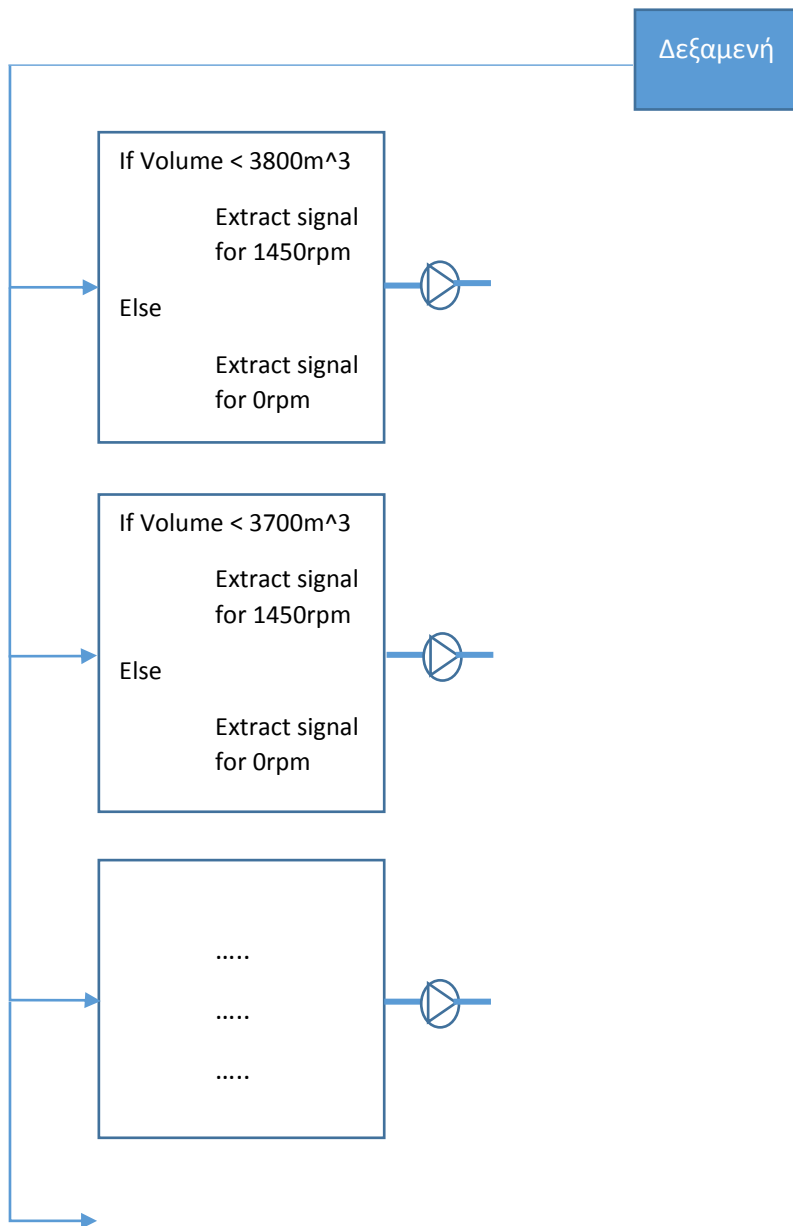
Όμως θα μπορούσε να επιτευχθεί οποιουδήποτε είδους βελτιστοποίηση στο μοντέλο και να ρυθμίσουμε τους εκκινητές ανάλογα. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να λειτουργήσει με τέτοιο τρόπο ώστε να εξοικονομείται η μέγιστη δυνατή ισχύς είτε να μην ζητείται μόνο η πλήρωση της δεξαμενής αλλά η υπερπλήρωση, προς δημιουργία αποθέματος ασφαλείας για τυχόν απρόβλεπτες ανάγκες. Ή σε άλλη περίπτωση, όπως θα μπορούσε να είναι η βλάβη μια αντλίας, θα ρυθμίζονταν οι υπόλοιπες αντλίες ώστε να ικανοποιήσουν την ζήτηση συνεργαζόμενες χωρίς την χαλασμένη.

Βέβαια θα μπορούσε κανείς να πειραματιστεί και με τελείως διαφορετική σειρά ένταξης των αντλιών . Δηλαδή για κάποιο λόγο όταν κάποια αντλία ξεκινήσει να λειτουργεί και για κάποιο λόγο πάψει την λειτουργία της, να πρέπει να περάσει μία ώρα πρώτου ξεκινήσει πάλι να λειτουργεί. Με την χρήση ενός Delay στον εκκινητή της λοιπόν θα μπορούσε να επιτευχθεί κάτι τέτοιο.

Ομοίως υπάρχουν πολλές διαφορετικές περιπτώσεις που προκύπτουν αλλά και τρόπου ρύθμισης προς επίτευξη διαφορετικών αποτελεσμάτων, αναλόγως τι ζητάει ο χρήστης.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως για διατήρηση σταθερής στάθμης το μοντέλο λειτούργησε όπως φαίνεται παρακάτω.

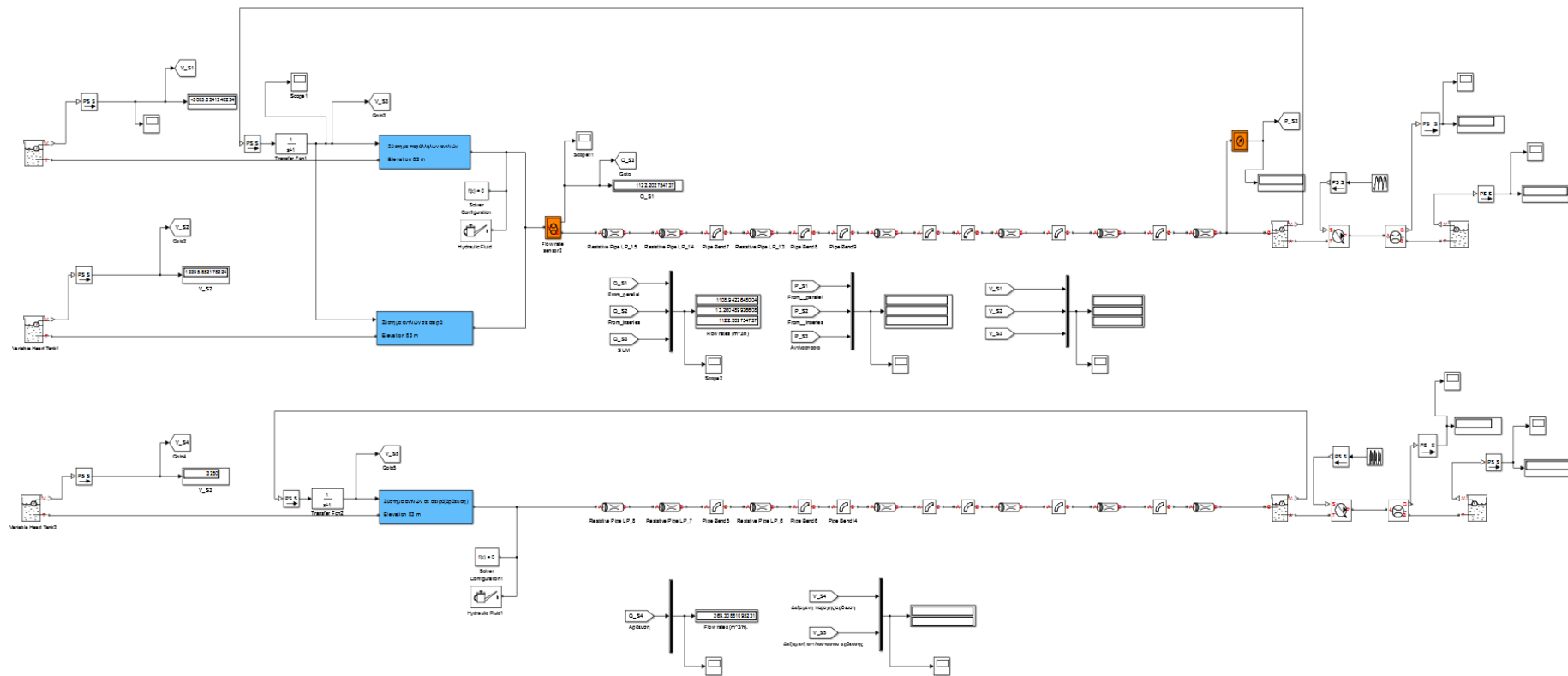
Για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος του ελέγχου του όγκου του νερού στις δεξαμενές και το feedback στους ελεγκτές των αντλιών θα παρουσιαστεί σχηματικά:



Εικόνα 28: Έλεγχος όγκου νερού στην δεξαμενή Κορακιών σε ψευδοκώδικα

Επομένως το μοντέλο ελέγχει σε κάθε βήμα τους όγκους στις δεξαμενές, και ανοίγει ή κλείνει τις αντίστοιχες αντλίες, βάσει του ορίου όγκου που έχει τεθεί σε κάθε ελεγκτή.

Παρακάτω ακολουθούν η συνολική εικόνα του μοντέλου καθώς και οι τρεις διατάξεις των αντλιών:



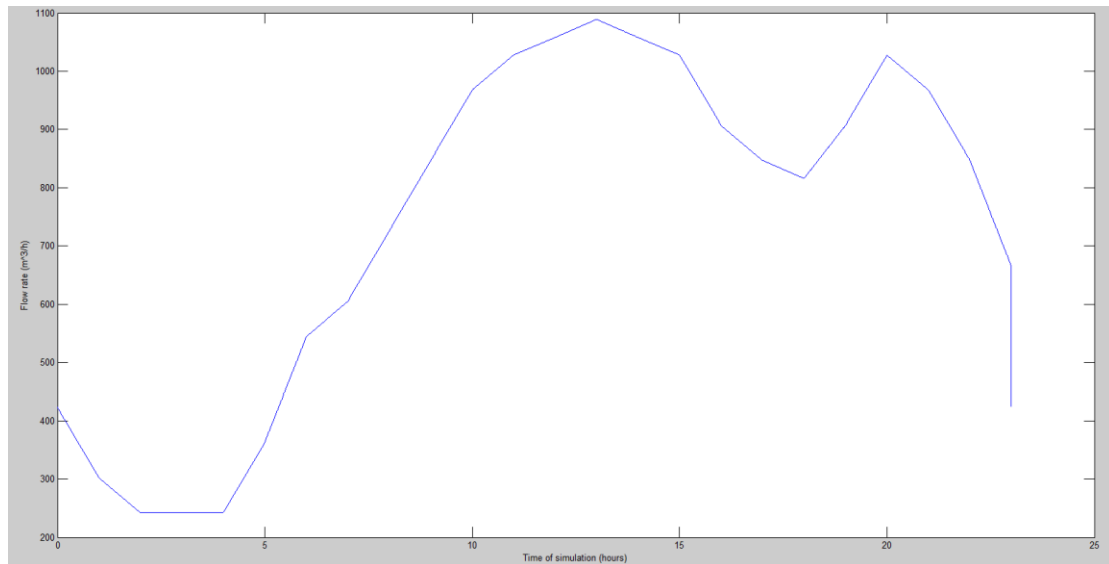
Εικόνα 29: Συνολική εικόνα μοντέλου

4.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Σε αυτό το σημείο παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των παροχών που προκύπτουν τρέχοντας το μοντέλο για ένα εικοσιτετράωρο σενάριο ζήτησης.

Υδρευση

-Ζήτηση παροχής

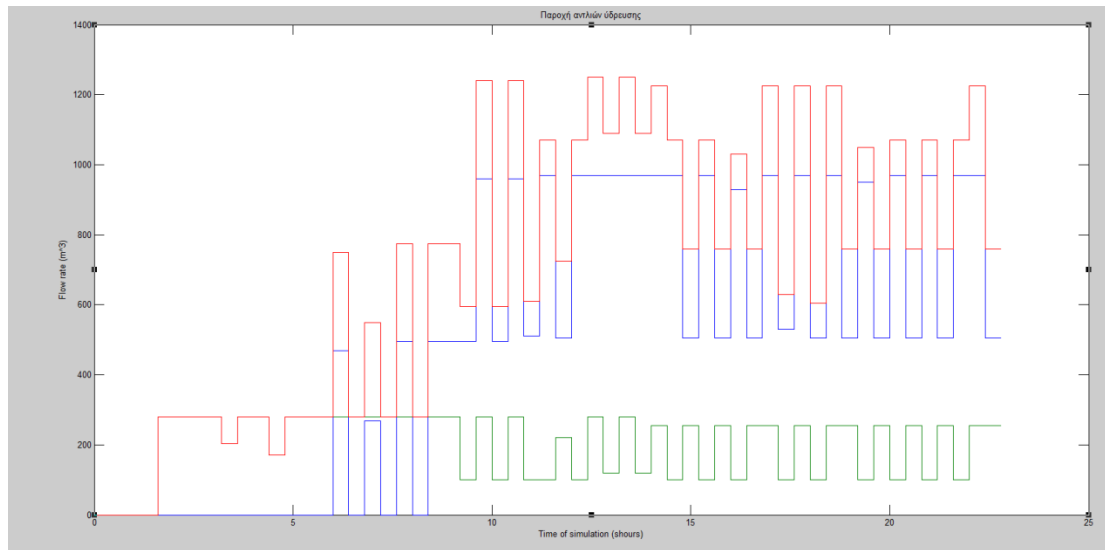


Εικονα 30: Ζήτηση ύδρευσης

Ξεκινώντας την προσομοίωση από τις 12 τα μεσάνυχτα μέχρι τις 12 τα μεσάνυχτα της άλλης μέρας, παρατηρείται όπως είναι λογικό ότι η ζήτηση για νερό είναι πολύ μικρή τις πρώτες ώρες μετά τα μεσάνυχτα μέχρι νωρίς το πρωί. Όσο πλησιάζουν οι ώρες αιχμής η ζήτηση φτάνει στο peak της και πέφτει πάλι το μεσημέρι προς απόγευμα, για να ξανανέβει το νωρίς το βράδυ πριν αρχίσει και πάλι την καθοδική πορεία.

-Παροχή αντλιών

Με ρύθμιση των τεσσάρων μεγάλων παράλληλων αντλιών 1-4 να ξεκινούν αντίστοιχα όταν ο όγκος του νερού πέσει κάτω από τα όρια 3800, 3700, 3500 και 3400 m^3 αλλά και τις δύο εν σειρά στα 3950 και 3900 m^3 προκύπτει η εξής η γραφική αναπαράσταση των παροχών στις αντλίες:

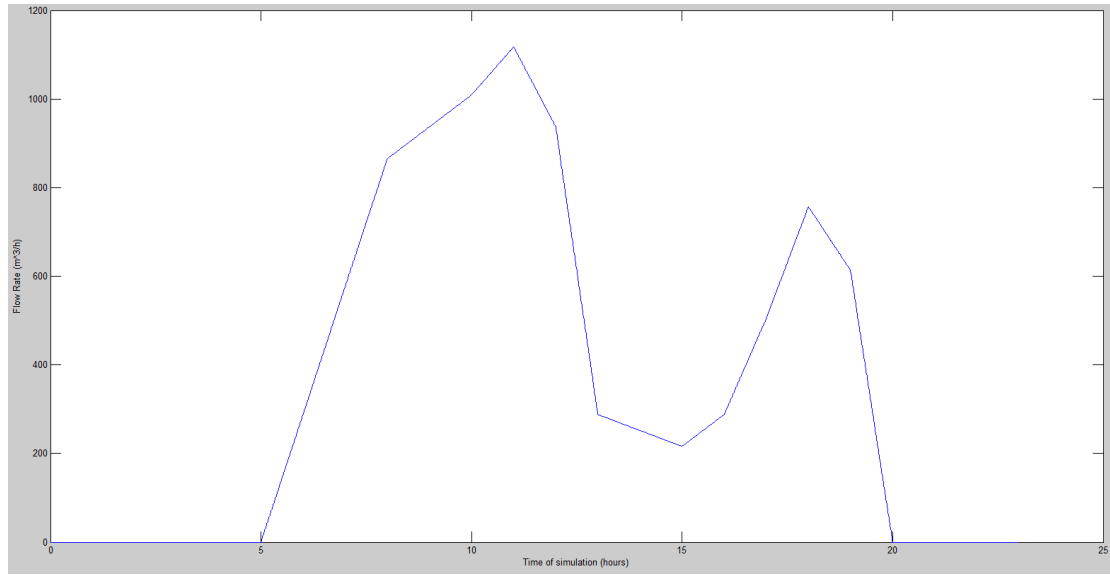


Εικόνα 31: Παροχή αντλιών ύδρευσης

Εδώ φαίνεται η παροχή των αντλιών ύδρευσης. Το πράσινο χρώμα αναφέρεται στις μικρές αντλίες εν σειρά ενώ το μπλε στις τέσσερις μεγάλες παράλληλες αντλίες. Η άλλη γραφική είναι η παροχή του κεντρικού αγωγού, με την συγκεντρωτική παροχή των δύο διατάξεων όπου φτάνει και στην δεξαμενή Κορακιών και την οποία διατηρεί σε σταθερή στάθμη. Ο τρόπος λειτουργίας των αντλιών είναι να ανοίγουν μία-μία, ανεβάζοντας απότομα στροφές και να λειτουργούν μέχρι να καλυφθεί η ζητούμενη παροχή και ύστερα να σβήνουν μέχρι να ξαναπέσει στα απαραίτητα όρια η δεξαμενή. Στο συγκεκριμένο σενάριο, με βάση την ρύθμιση αυτοματισμού που επιλέχθηκε για το μοντέλο, φαίνεται ότι στις εν σειρά αντλίες η μία λειτουργεί συνέχεια ενώ η δεύτερη ανοιγοκλείνει. Στις παράλληλες δεν λειτουργεί καμία μέχρι τις 6 το πρωί περίπου που υπάρχει μεγάλη αύξηση της ζήτησης και όπου μπαίνει σε λειτουργία η πρώτη, η οποία λειτουργεί ανοιγο-κλείνοντας μέχρι τις 9. Μετά τις 9 μπαίνει και η δεύτερη σε λειτουργία όπου τότε ανοίγει τότε κλείνει, ενώ η πρώτη μένει συνεχώς ανοιχτή δίνοντας παροχή στο σύστημα.

Άρδευση

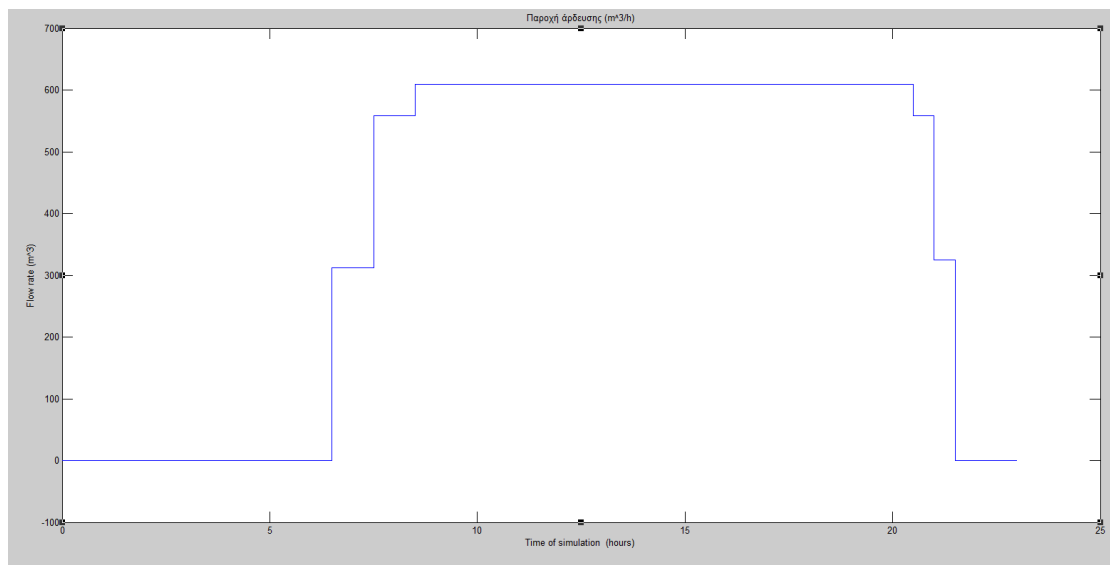
Ζήτηση



Εικόνα 32: Ζήτηση σε παροχή για άρδευση

Όπως είναι αναμενόμενο, το μοτίβο της ζήτησης για την άρδευση είναι ελάχιστο καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας. Ενώ έχουμε μέγιστη ζήτηση το πρωί μέχρι το μεσημέρι και μετά το απόγευμα αφού τότε υπάρχει και μικρότερη εξάτμιση νερού από τον ήλιο αλλά και λόγω ξεκούρασης το μεσημέρι.

Παροχή



Εικόνα 33: Παροχή αντλιών 6-7 άρδευσης

Εδώ φαίνεται ότι από τις τρεις παράλληλες αντλίες δεν λειτουργεί καμία μέχρι και τις 6 το πρωί όπου δεν υπάρχουν καθόλου ανάγκες για νερό. Ωστόσο από τις 7 το πρωί ανοίγουν μία-μία οι αντλίες ώστε να καλύψουν τη ζήτηση και λειτουργούν συνεχόμενα μέχρι και τις 8 περίπου το βράδυ όπου σβήνουν πάλι μία-μία και παραμένουν σβηστές μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

4.4 Συμπεράσματα

Για την μοντελοποίηση και προσομοίωση του αντλιοστασίου ύδρευσης-άρδευσης του Βλητέ έγινε χρήση του εργαλείου Simulink του προγράμματος Matlab.

Τρέχοντας το μοντέλο για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια και ζήτηση προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των παροχών όλων των αντλιών της ύδρευσης και της άρδευσης καθώς και του όγκου του νερού που περιέχουν οι δεξαμενές, αλλά και της πίεσης στα επιλεγμένα σημεία. Ρυθμίζοντας τις αντλίες να ανοίγουν και να κλείνουν για διαφορετικές τιμές όγκου νερού στις δεξαμενές οι οποίες καλύπτουν την ζήτηση νερού, μπορούμε να έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τον τρόπο που λειτουργούν. Για παράδειγμα σε περίπτωση βλάβης σε κάποια αντλία, τρέχοντας την προσομοίωση μπορούμε να δούμε πως θα λειτουργούν οι εναπομείνουσες αντλίες και τι παροχές και καταναλώσεις ισχύος θα προκύπτουν.

Επίσης μελλοντικά θα μπορούσε να τροποποιηθεί το μοντέλο ώστε να μελετηθεί η δυνατότητα βελτιστοποίησης της κατανάλωσης ισχύος. Βέβαια το μοντέλο, με τις κατάλληλες μετατροπές μπορεί να προσομοιώσει και άλλα αντλιοστάσια ύδρευσης-άρδευσης. Με την ίδια λογική, προσαρμόζοντας τις διατάξεις των αντλιών και τα χαρακτηριστικά τους, όπως και τα επιμέρους στοιχεία του νέου αντλητικού συστήματος προκύπτει το νέο μοντέλο προσομοίωσης.

Αντίστοιχα θα μπορούσε να μελετηθεί και η κατασκευή ενός νέου αντλιοστασίου από την αρχή. Με δεδομένο το γεωδαιτικό ύψος που πρέπει να καλυφθεί αλλά και τη ζήτηση, μπορούν να προβλεφθούν οι κατάλληλες σωληνώσεις, οι αντλίες αλλά και ο τρόπος με τον οποίο θα συνυπάρχουν όλα αυτά στο μοντέλο, ώστε και να φτάνει το νερό στις δεξαμενές αλλά και να καλύπτεται η ζήτηση συνεχώς χωρίς ελλείψεις.

Εν κατακλείδι, ένα μοντέλο προσομοίωσης ύδρευσης – άρδευσης μπορεί να φανεί χρήσιμο για πολλούς λόγους. Καταρχάς, λόγω της έλλειψης πόρων δεν υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες για δημιουργία νέων αντλιοστασίων, οπότε η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των υπαρχόντων κρίνεται αναγκαία στις περισσότερες περιπτώσεις. Παράλληλα μέσω της προσομοίωσης μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τον τρόπο που θα λειτουργεί ένα νέο αντλιοστάσιο αλλά και να προσαρμόζουμε συνεχώς τα μέρη που το αποτελούν εύκολα και γρήγορα σε ένα απλοποιημένο

περιβάλλον διεπαφής προγράμματος-χρήστη. Τέλος, στα μοντέλα αυτά υπάρχουν έτοιμα εργαλεία τα οποία μπορούν να δείξουν στον χρήστη ακριβώς τι χρειάζεται για την μελέτη του, όπως για παράδειγμα τι είδους αντλία και με τι χαρακτηριστικά πρέπει να επιλέξει ή ποια βάννα λειτουργεί καλύτερα, με αποτέλεσμα να προσδιορίζονται απευθείας τα επιμέρους στοιχεία του αντλητικού συστήματος αλλά να είναι και άμεσα ευδιάκριτη η επίδρασή τους στην λειτουργία του συστήματος.

Βιβλιογραφία

1. Υδροδυναμικές μηχανές αντλίες -υδροστρόβιλοι υδροδυναμικές μεταδόσεις, **Δημήτριος Ε. Παπαντώνης** Καθηγητής ΕΜΠ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ
2. <http://www.chemeng.ntua.gr/>
3. Pump Characteristics and ISO efficiency Curves, **Bernard da Cruz**
4. Best Practice Guide Energy Efficiency in Pumping Systems @ Sustainability Victoria 2015
5. **Grundfos** Pump Handbook
6. Energy efficiency and savings in pumping systems, The holistic approach, **Mr. T. Augustyn Grundfos** (Pty) Ltd. South Africa
7. **Μανδραμπαζάκης Αντώνιος**, Αξιολόγηση και διαδικασίες βελτιστοποίησης της λειτουργίας αντλιοστασίου νερού άρδευσης
8. **Καρβουνιάρης Χρήστος, Χαϊκάλης Νικόλαος**, Φυγοκεντρικές αντλίες: Θεωρία και παράδειγμα συναρμολόγησης-προοληπτικής συντήρησης-επισκευής
9. **Ειρήνη Κουντούπη**: Μελέτη του φαινομένου σπηλαίωσης σε φυγοκεντρική αντλία
10. www.smartwaters.gr/