

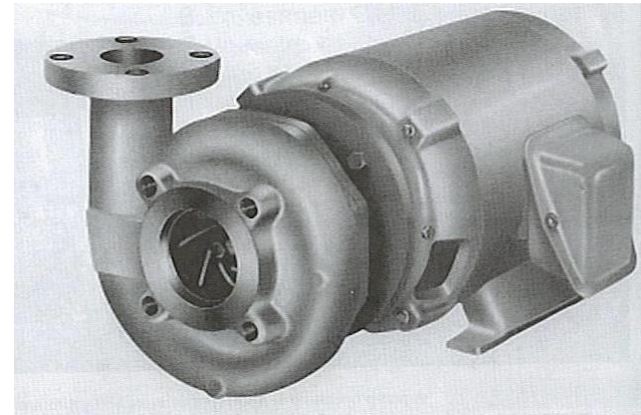
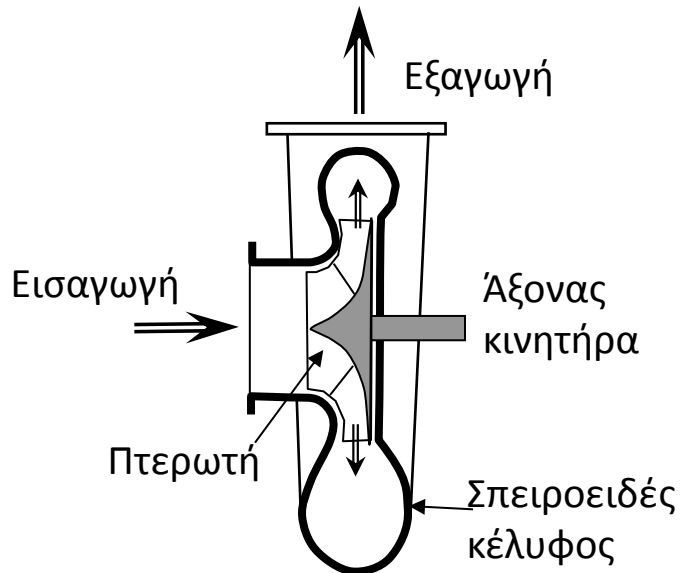
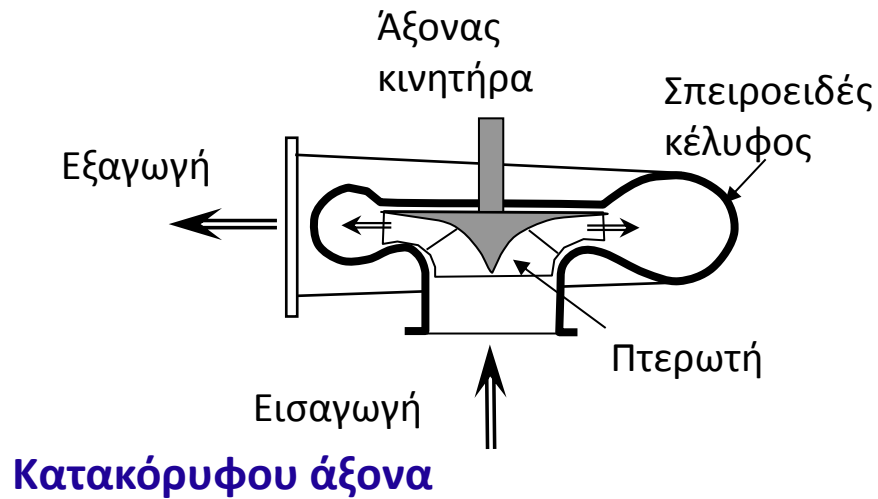
Υδραυλική & Υδραυλικά Έργα
5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

**Καταθλιπτικοί αγωγοί και
αντλιοστάσια**

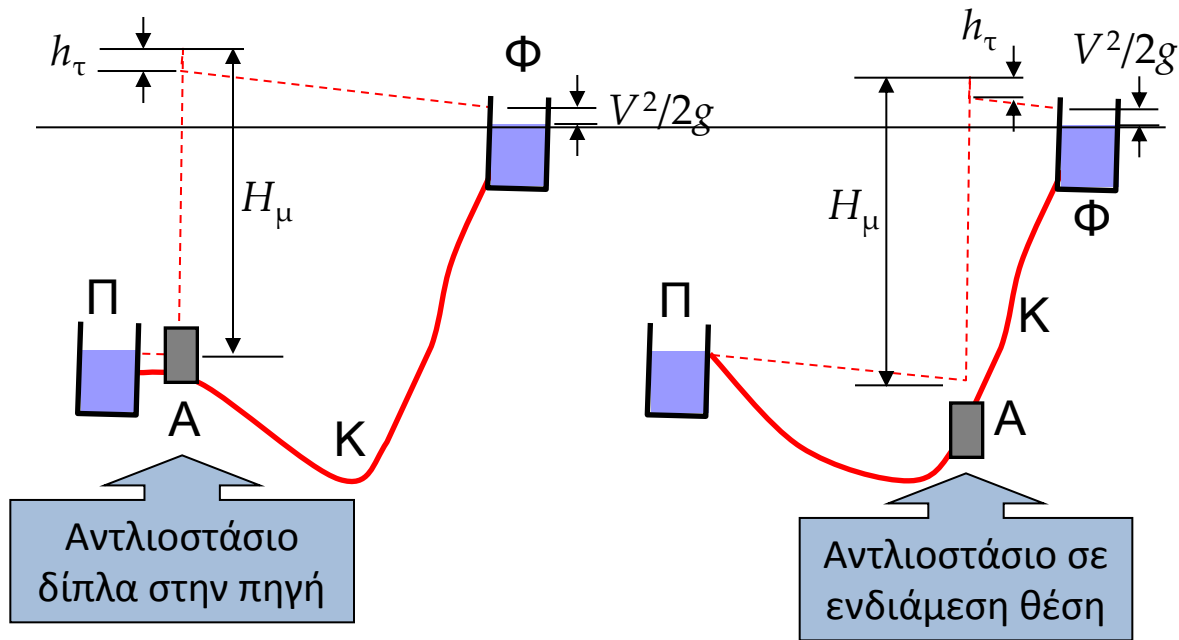
Δημήτρης Κουτσογιάννης & Ανδρέας Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, 2017

Τυπικές φυγοκεντρικές αντλίες



Μανομετρικό ύψος αντλίας



Το μανομετρικό ύψος είναι η διαφορά υψομέτρων της γραμμής ενέργειας ανάντη και κατόντη. Από το σχήμα προκύπτει:

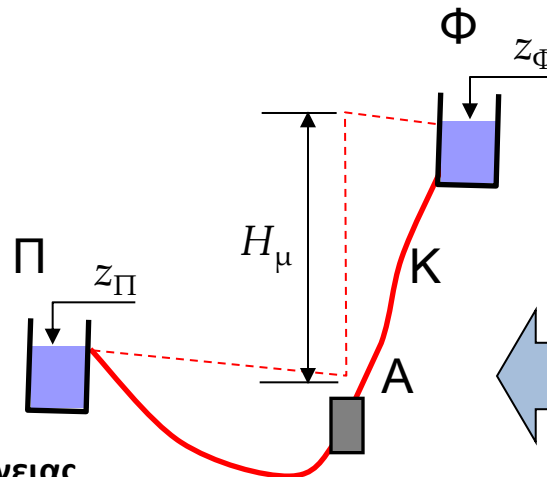
$$H_{\mu} = z_{\Phi} - z_{\Pi} + \sum h_f + \sum h_{\tau}$$

(όπου και το $V^2/2g$ έχει θεωρηθεί ως τοπική απώλεια στην είσοδο του φρεατίου).

Στο απλουστευμένο σχήμα:

$$H_{\mu} = z_{\Phi} - z_{\Pi} + \sum h_f = z_{\Phi} - z_{\Pi} + J L$$

όπου J η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής και L το συνολικό μήκος του αγωγού.

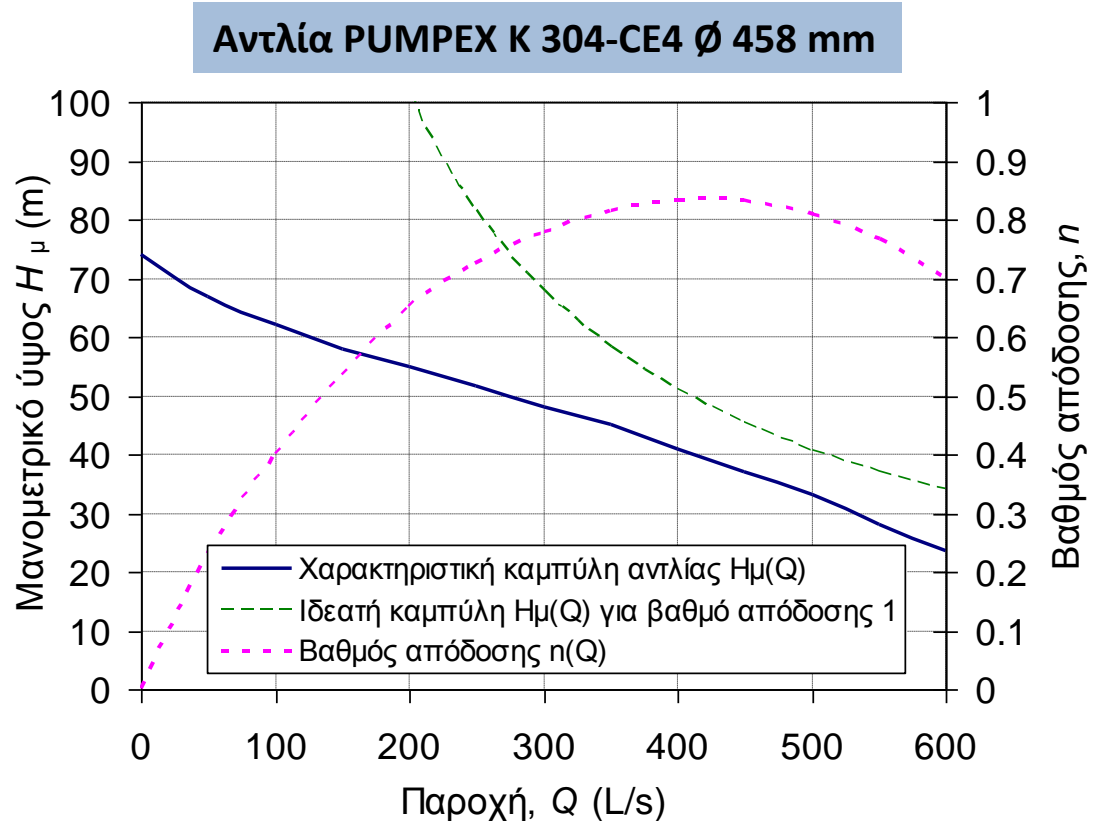


Απλουστευμένη υδραυλική, θεωρώντας ότι η γραμμή ενέργειας ταυτίζεται με την πιεζομετρική γραμμή και οι τοπικές απώλειες έχουν ενσωματωθεί στις γραμμικές

- Π: Πηγή (δεξαμενή ανάντη)
- Φ: Φρεάτιο (δεξαμενή κατόντη)
- A: Αντλιοστάσιο
- K: Καταθλιπτικός αγωγός
- H_{μ} : Μανομετρικό ύψος αντλίας
- h_{τ} : Τοπικές απώλειες
- $V^2/2g$: Ύψος κινητικής ενέργειας
- z : Υψόμετρο
- Διακεκομμένη γραμμή: γραμμή ενέργειας

Ισχύς και ενέργεια αντλίας

- ❑ Μηχανική ισχύς: $P_{\mu} = \rho g Q H_{\mu}$ (για παροχή Q και μανομετρικό ύψος H_{μ})
- ❑ Παραγόμενο μηχανικό έργο: $W = \rho g V H_{\mu}$ (για συνολικό όγκο V)
- ❑ Ολική ισχύς της αντλίας: $P = \rho g Q H_{\mu} / \eta$ (για βαθμό απόδοσης η)
- ❑ Ενέργεια που καταναλώνεται: $E = \rho g V H_{\mu} / \eta$
- ❑ Μια συγκεκριμένη αντλία έχει δεδομένη ισχύ κινητήρα P_0 (στο παράδειγμα 200 kW)
- ❑ Στην ιδεατή περίπτωση μηδενικών απωλειών ($\eta = 1$) θα μπορούσε να ανυψώσει οποιαδήποτε παροχή Q σε ύψος $H_{\mu} = P_0 / (\rho g Q)$.
- ❑ Στην πράξη το ύψος είναι μικρότερο και δίνεται από καμπύλη του κατασκευαστή
- ❑ Ο συντελεστής απόδοσης η και η αποδιδόμενη ισχύς P μεταβάλλονται με την παροχή.



Σημείο λειτουργίας αντλίας

- Για δεδομένο τύπο αντλίας είναι δεδομένη από τον κατασκευαστή η χαρακτηριστική καμπύλη $H_{\mu} = f(Q)$.
- Για δεδομένο σύστημα αντλιοστασίου-καταθλιπτικού αγωγού μπορεί να προσδιοριστεί με υδραυλικούς υπολογισμούς μια άλλη σχέση $H_{\mu} = \varphi(Q)$.
- Συγκεκριμένα ισχύει:

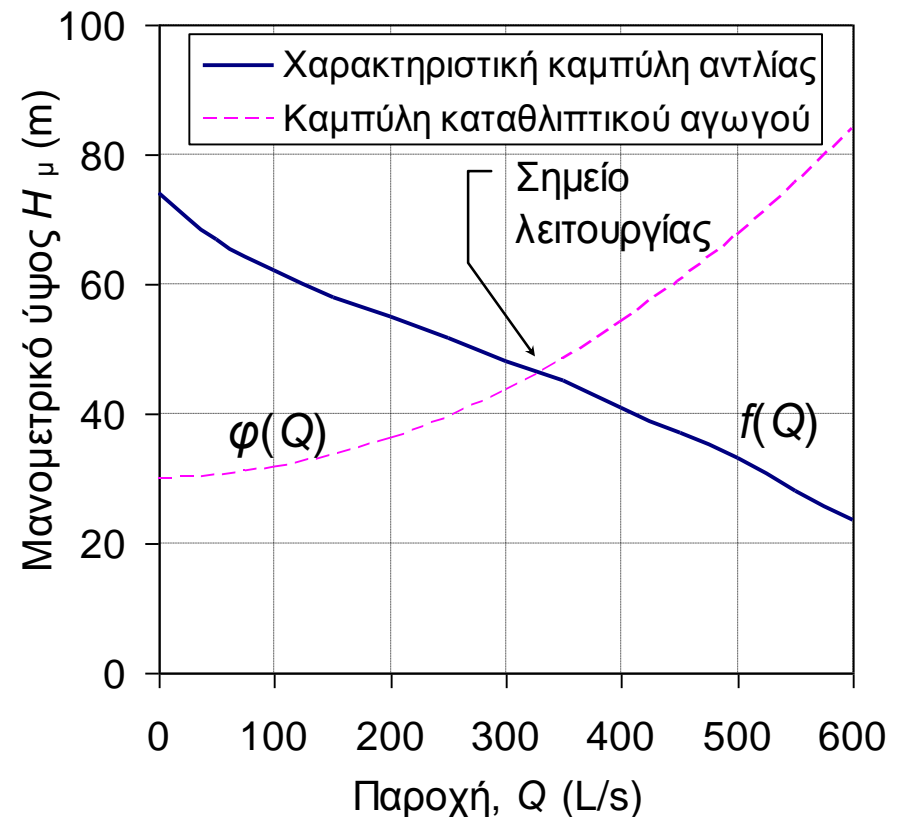
$$H_{\mu} = \varphi(Q) = \Delta z + J L$$

όπου $\Delta z = z_{\Phi} - z_{\Pi}$, J η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής και L το συνολικό μήκος του αγωγού.

- Υπενθυμίζεται ότι η κλίση J δίνεται από την ακόλουθη σχέση (γενικευμένος τύπος Manning):

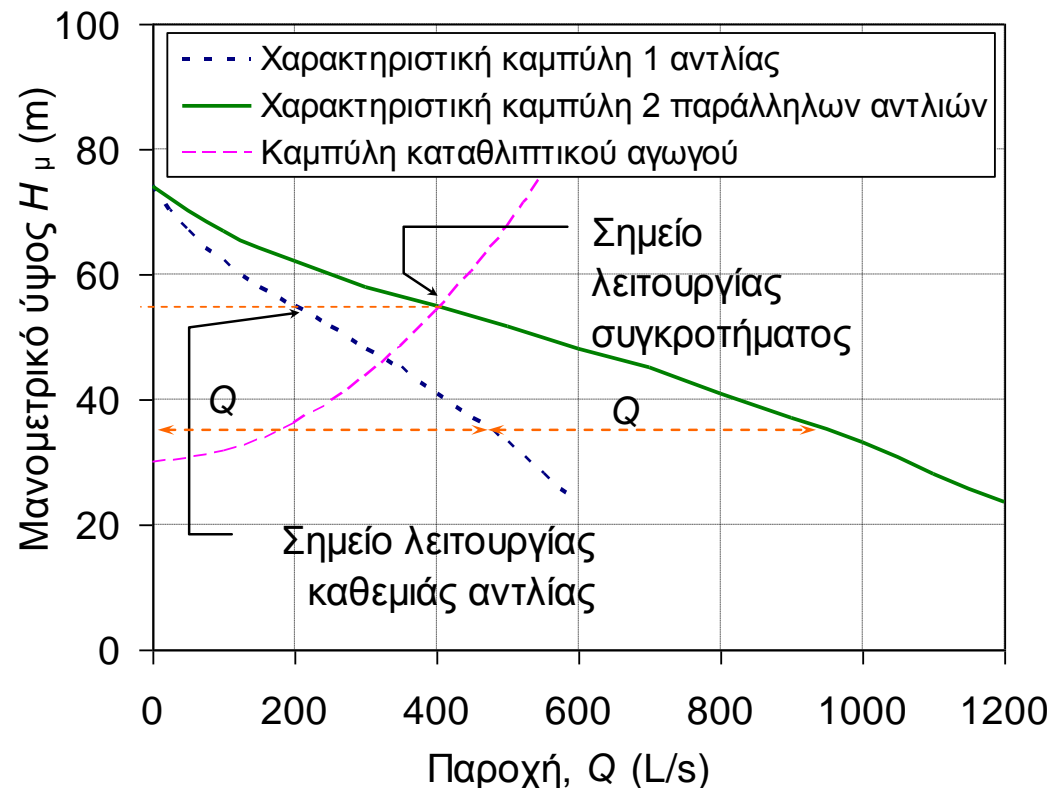
$$J = \left(\frac{4^{3+\beta} N^2 Q^2}{\pi^2 D^{5+\beta}} \right)^{\frac{1}{1+\gamma}}$$

- Τελικά, το (μοναδικό) σημείο (Q, H_{μ}) στο οποίο θα λειτουργήσει η αντλία στο δεδομένο σύστημα αντλιοστασίου-καταθλιπτικού αγωγού δίνεται από τη σχέση $f(Q) = \varphi(Q)$.



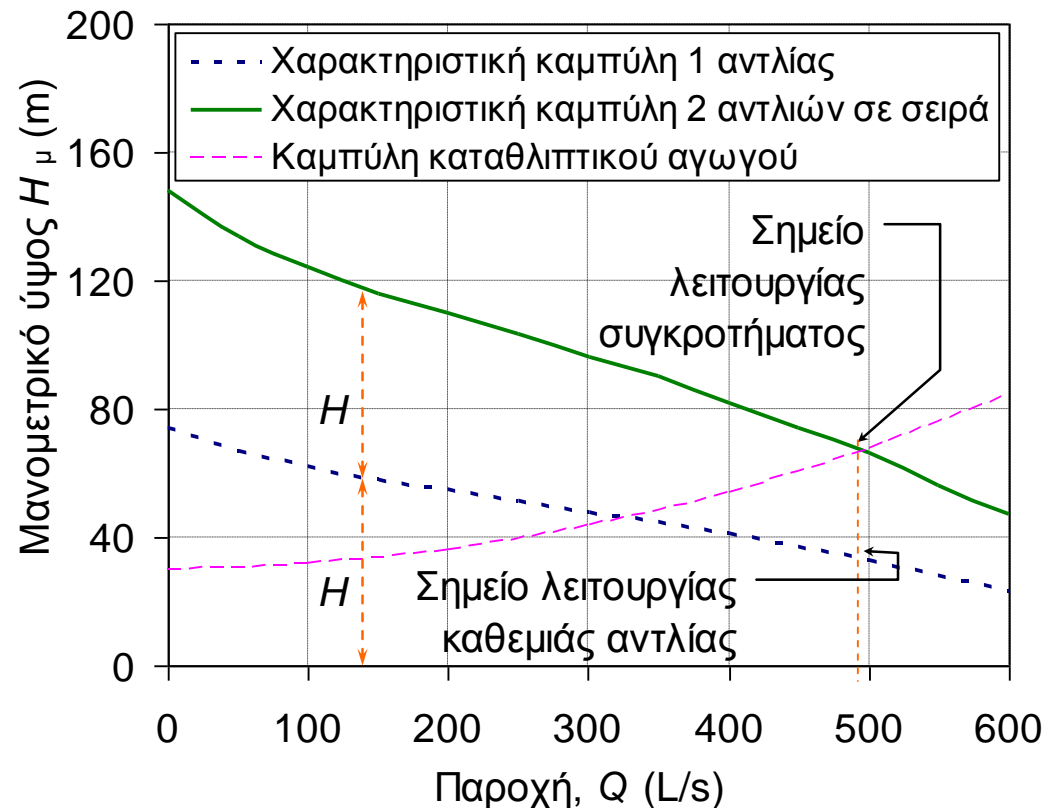
Αντλίες σε παράλληλη διάταξη

- Η παροχή σε ένα αντλιοστάσιο δεν είναι σταθερή σε όλη τη περίοδο λειτουργίας του έργου. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερη η τοποθέτηση περισσότερων από μιας αντλιών σε παράλληλη διάταξη.
- Στην ίδια λύση συνηγορούν και λόγοι ασφάλειας, αξιοπιστίας και λειτουργικότητας: π.χ. τοποθέτηση δύο αντλιών και μιας όμοιας εφεδρικής, αντί μιας μοναδικής.
- Οι αντλίες σε παράλληλη διάταξη έχουν το ίδιο μανομετρικό ύψος, ενώ οι παροχές τους προστίθενται.
- Ωστόσο, αυτό το μανομετρικό ύψος είναι διαφορετικό από εκείνο στο οποίο λειτουργεί μία μοναδική αντλία.
- Το νέο σημείο λειτουργίας (Q, H_{μ}) του συγκροτήματος των αντλιών καθώς και το σημείο λειτουργίας (Q', H_{μ}) καθεμιάς από τις αντλίες του συγκροτήματος βρίσκεται όπως στο διπλανό παράδειγμα (για δύο όμοιες αντλίες).



Αντλίες με διάταξη σε σειρά

- Για μεγάλα μανομετρικά ύψη ο βαθμός απόδοσης μικραίνει σημαντικά, οπότε είναι προτιμότερη η χρήση δύο ή περισσότερων αντλιών σε σειρά αντί μιας μοναδικής αντλίας.
- Οι αντλίες σε σειρά έχουν την ίδια παροχή, ενώ τα μανομετρικά ύψη τους προστίθενται.
- Ωστόσο, αυτή η παροχή είναι διαφορετική από εκείνη στην οποία λειτουργεί μία μοναδική αντλία.
- Το νέο σημείο λειτουργίας (Q, H_{μ}) του συγκροτήματος των αντλιών καθώς και το σημείο λειτουργίας (Q, H_{μ}') καθεμιάς από τις αντλίες του συγκροτήματος βρίσκεται όπως στο διπλανό παράδειγμα (για δύο όμοιες αντλίες)



Σχεδιασμός αντλιοστασίου και καταθλιπτικού αγωγού

- Ο σχεδιασμός του αντλιοστασίου και του καταθλιπτικού αγωγού αντιμετωπίζεται ως ενιαίο πρόβλημα, και όχι ως δύο μεμονωμένα προβλήματα.
- Δεν υπάρχει μια μοναδική τεχνική λύση στο πρόβλημα. Από τις πολυάριθμες εφικτές τεχνικές λύσεις επιλέγεται η οικονομικότερη.
- Το **συνολικό κόστος**, του οποίου ζητείται η ελαχιστοποίηση, περιλαμβάνει τρεις κύριες συνιστώσες, που πρέπει να αναχθούν σε **ετήσια βάση**:
 - (K_1) το αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του καταθλιπτικού αγωγού,
 - (K_2) το αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του αντλητικού συγκροτήματος και το ενδιάμεσο κόστος για την αντικατάσταση των αντλιών (αντλίες εν λειτουργία και εφεδρικές),
 - (K_3) το καταναμεμημένο στο χρόνο κόστος λειτουργίας του αντλιοστασίου (πρακτικά, λαμβάνεται το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας).
- Τα K_1 και K_2 είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους, καθώς και τα K_1 και K_3 .
- Πριν οποιοδήποτε υπολογισμό θα πρέπει να εκπονηθεί μια γενική διάταξη των έργων, να επιλεγεί το υλικό του αγωγού, να υιοθετηθεί το γενικό σχήμα του συγκροτήματος (πόσες αντλίες σε παράλληλη διάταξη ή/και σε σειρά) και να εκτιμηθούν η παροχή σχεδιασμού και ο βαθμός απόδοσης του αντλιοστασίου.
- Με δεδομένα τα παραπάνω, το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως μοναδική μεταβλητή ελέγχου τη **διάμετρο εμπορίου του καταθλιπτικού αγωγού**.

Ετήσια κόστη καταθλιπτικού αγωγού & αντλιοστασίου

- Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής για τα έργα Πολιτικού Μηχανικού του αντλιοστασίου και του καταθλιπτικού αγωγού γενικά λαμβάνεται 40-50 χρόνια.
- Η αντίστοιχη διάρκεια για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (αντλίες και κινητήρες τους) είναι 20-25 χρόνια.
- Ο χρόνος απόσβεσης n του όλου συστήματος λαμβάνεται ίσος με τη διάρκεια των έργων Πολιτικού Μηχανικού.
- Η αναγωγή του αρχικού κόστους των έργων πολιτικού μηχανικού K_1 ($\equiv P$) σε ετήσια δαπάνη k_1 ($\equiv A$) γίνεται με βάση το συντελεστή απόσβεσης κεφαλαίου:

$$\frac{A}{P} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

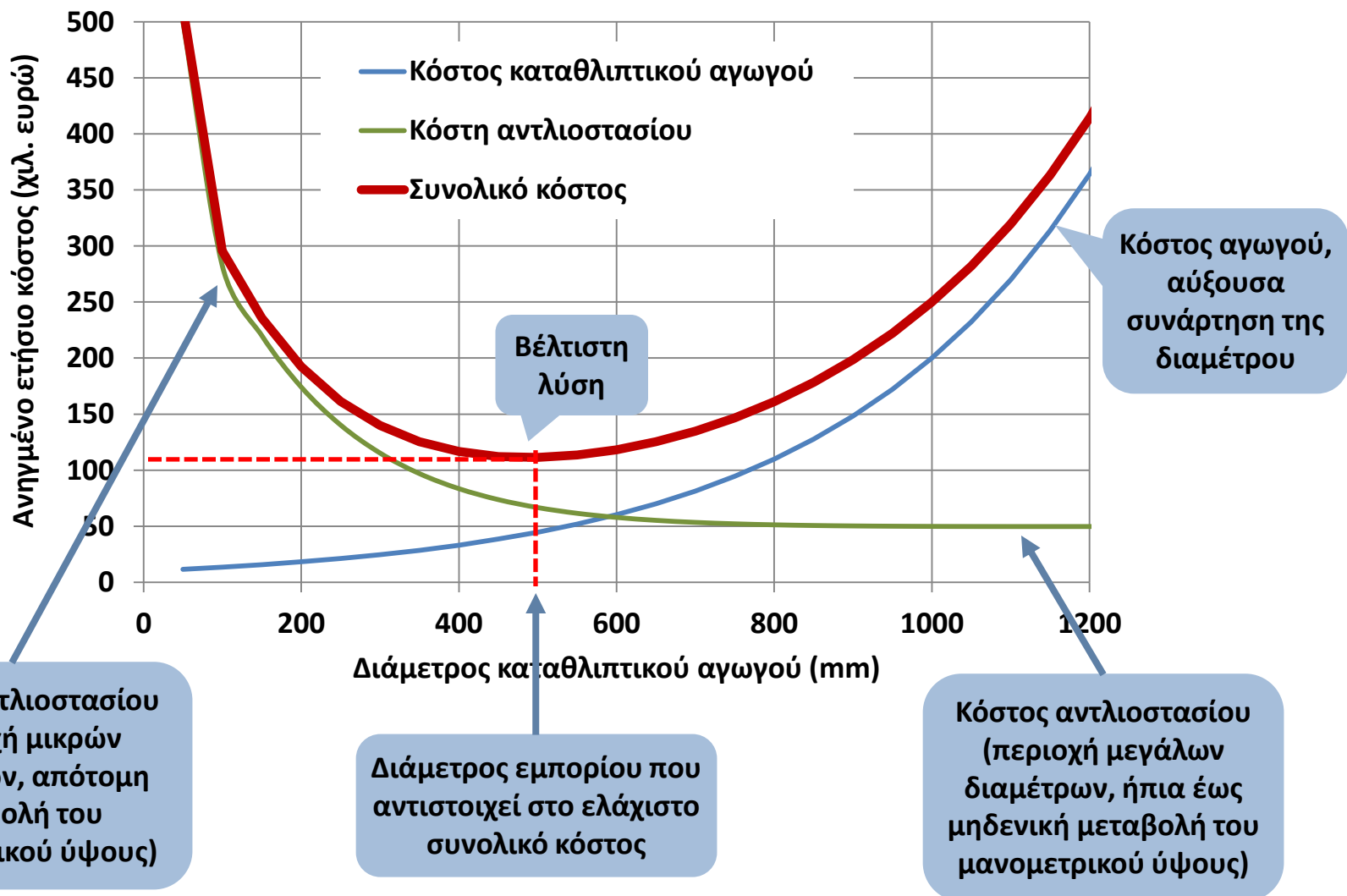
όπου i το επιτόκιο (αποπληθωρισμένο, 4-8%) και n χρόνος απόσβεσης (40-50 έτη).

- Στη διάρκεια του χρόνου απόσβεσης θα πρέπει να γίνει μία τουλάχιστον αντικατάσταση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (στα 20-25 έτη).
- Το αντίστοιχο κόστος θα πρέπει κατ' αρχάς να αναχθεί σε αρχικό κόστος. Αν F είναι το κόστος του εξοπλισμού σε σημερινές τιμές, τότε το ισοδύναμο αρχικό κόστος P προσδιορίζεται από τον τύπο του ανατοκισμού:

$$\frac{P}{F} = \frac{1}{(1+i)^n}$$

- Το ολικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι ίσο με F (αρχική εγκατάσταση), προσαυξημένο κατά P (για μία τουλάχιστον αντικατάσταση). Αυτό θα πρέπει και πάλι να αναχθεί σε ετήσια βάση, σύμφωνα με τα παραπάνω.

Βελτιστοποίηση συνολικού κόστους καταθλιπτικού αγωγού και αντλιοστασίου



Παράρτημα 1: Παρατηρήσεις για την επιλογή αντλιών

- Γενικός στόχος είναι να πετύχουμε τον υψηλότερο δυνατό βαθμό απόδοσης n για να αποφύγουμε σπατάλη ενέργειας.
- Για πολύ μεγάλες παροχές έχουν επιτευχθεί συντελεστές απόδοσης αντλιών (καθώς και στροβίλων και αντλιοστροβίλων) πολύ υψηλοί, που φτάνουν το 0.95. Όμως για παροχές σε τυπικά αστικά δίκτυα οι συντελεστές απόδοσης είναι αρκετά χαμηλότεροι.
- Αφού καθορίσουμε την παροχή της αντλίας, ανάλογα με το σχήμα του συγκροτήματος (π.χ. $Q = Q_{o\lambda}/2$ για δύο παράλληλες αντλίες) μπορούμε να εκτιμήσουμε μια πρώτη προσεγγιστική τιμή του n , τεχνολογικά εφικτή, από την εμπειρική σχέση

$$n = n_{\infty} - \frac{1}{\sqrt[3]{1/n_{\infty}^3 + Q/\lambda}} \quad \text{όπου} \quad n_{\infty} = 0.95 \quad \text{και} \quad \lambda = 0.14 \text{ L/s}$$

- Αφού ολοκληρώσουμε το σχεδιασμό του αντλιοστασίου, μετά από οικονομική βελτιστοποίηση βασισμένη στην παραπάνω τιμή του n θα συνεχίσουμε με λεπτομερέστερους υπολογισμούς προκειμένου να επιλέξουμε τον κατάλληλο τύπο αντλίας.
- Για την επιλογή αντλίας, υπάρχουν χρήσιμα εργαλεία και βάσεις δεδομένων στο διαδίκτυο (π.χ. <http://impeller.net/spaix.asp?LGG=en>)
- Αφού επιλέξουμε την αντλία, θα χρησιμοποιήσουμε τις καμπύλες του κατασκευαστή προκειμένου να εκτιμήσουμε: (α) το σημείο λειτουργίας του συγκροτήματος και της κάθε αντλίας, και (β) τον τελικό συντελεστή απόδοσης, την ισχύ και την ενέργεια.

Παράρτημα 2: Παρατηρήσεις για προκαταρκτική εκτίμηση της χαρακτηριστικής καμπύλης της αντλίας

- Σε προκαταρκτικούς υπολογισμούς που δεν έχουμε ακόμη επιλέξει συγκεκριμένο τύπο αντλίας και επομένως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη της, μπορούμε προσεγγιστικά να εργαστούμε με τον ακόλουθο τρόπο.
- Θεωρούμε ότι κοντά στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας ($H_{\mu,\lambda}$, Q_λ) η κλίση της εξίσωσης $H_\mu = f(Q)$ είναι ίδια με αυτή της θεωρητικής καμπύλης, δηλαδή:

$$H_\mu = P_0 / (\rho g Q).$$

- Η τελευταία είναι:

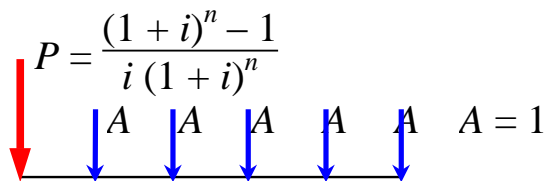
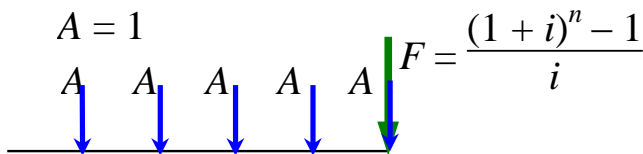
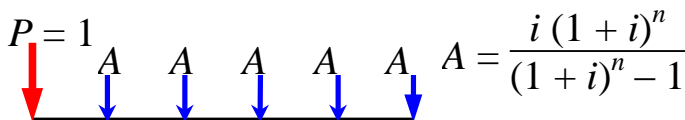
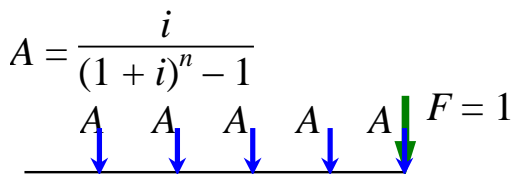
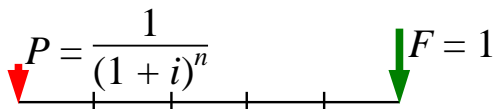
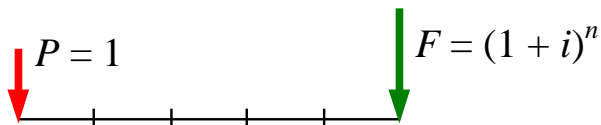
$$(dH_\mu/dQ)_\lambda = -P_0 / (\rho g Q_\lambda^2) = -H_{\mu,\lambda} / Q_\lambda.$$

- Προσεγγίζουμε την $H_\mu = f(Q)$ με μια γραμμική εξίσωση με την παραπάνω κλίση.
- Απλοί υπολογισμοί οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ζητούμενη προσέγγιση είναι:

$$H_\mu = 2H_{\mu,\lambda} - (H_{\mu,\lambda} / Q_\lambda) Q.$$

Παράρτημα 3: Χρονική αναγωγή οικονομικών μεγεθών

P : παρόν κεφάλαιο – F : τελικό κεφάλαιο – A : δόση – i : επιτόκιο – n : χρονική περίοδος



Συντελεστής ανατοκισμού (μιας δόσης)– (Single-payment) compound-amount factor

$$\frac{F}{P} = (1 + i)^n$$

Συντελεστής προεξόφλησης ή συντελεστής παρούσας αξίας (μιας δόσης) – (Single-payment) present-worth factor

$$\frac{P}{F} = \frac{1}{(1 + i)^n}$$

Συντελεστής χρεολυσίου – Sinking-fund factor

$$\frac{A}{F} = \frac{i}{(1 + i)^n - 1}$$

Συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου – Capital-recovery factor

$$\frac{A}{P} = \frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Συντελεστής ανατοκισμού ίσων δόσεων – Uniform series compound-amount factor

$$\frac{F}{A} = \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

Συντελεστής παρούσας αξίας ίσων δόσεων – Uniform series present-worth factor

$$\frac{P}{A} = \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}$$