

Υδραυλική & Υδραυλικά Έργα
5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

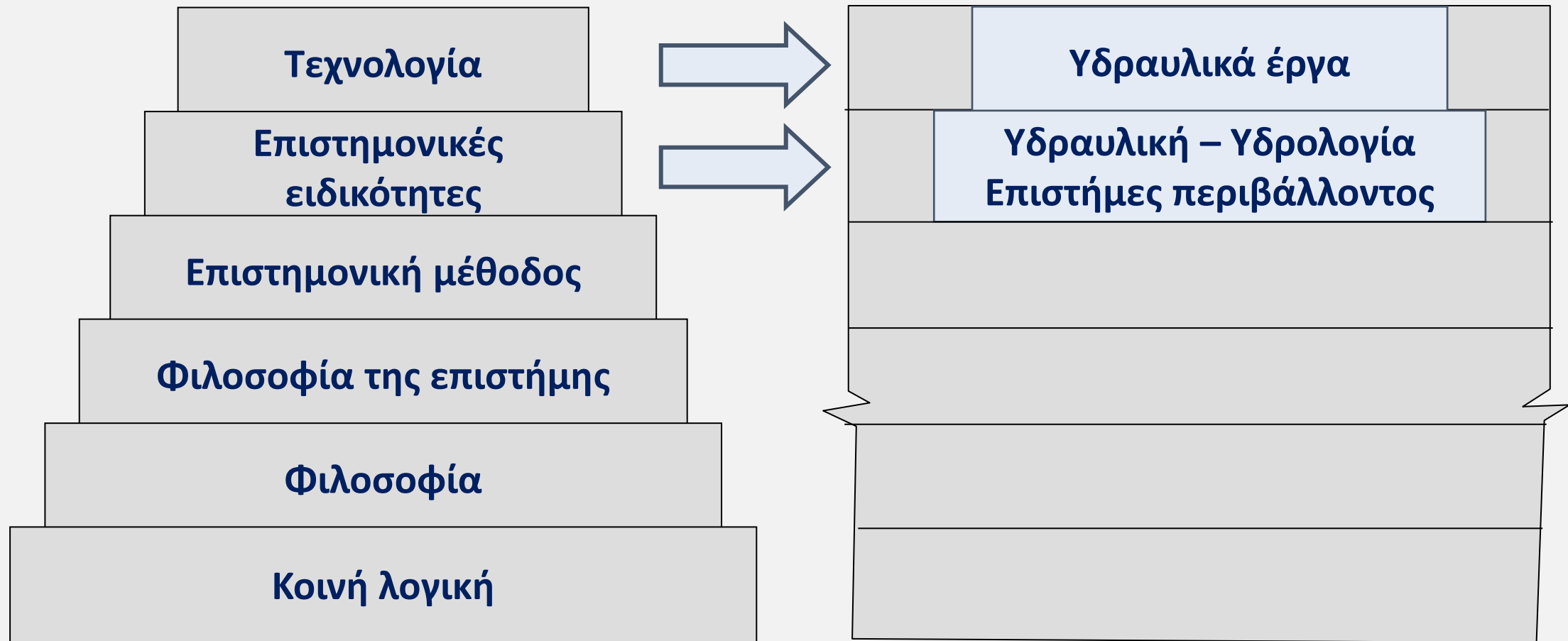
Υδροδοτικά έργα – Εξωτερικά υδραγωγεία

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Παναγιώτης Κοσσιέρης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Οκτώβριος 2023

Τα υδραυλικά έργα στο γενικό επιστημονικό και τεχνολογικό πλαίσιο



Το επιστημονικό-τεχνολογικό οικοδόμημα

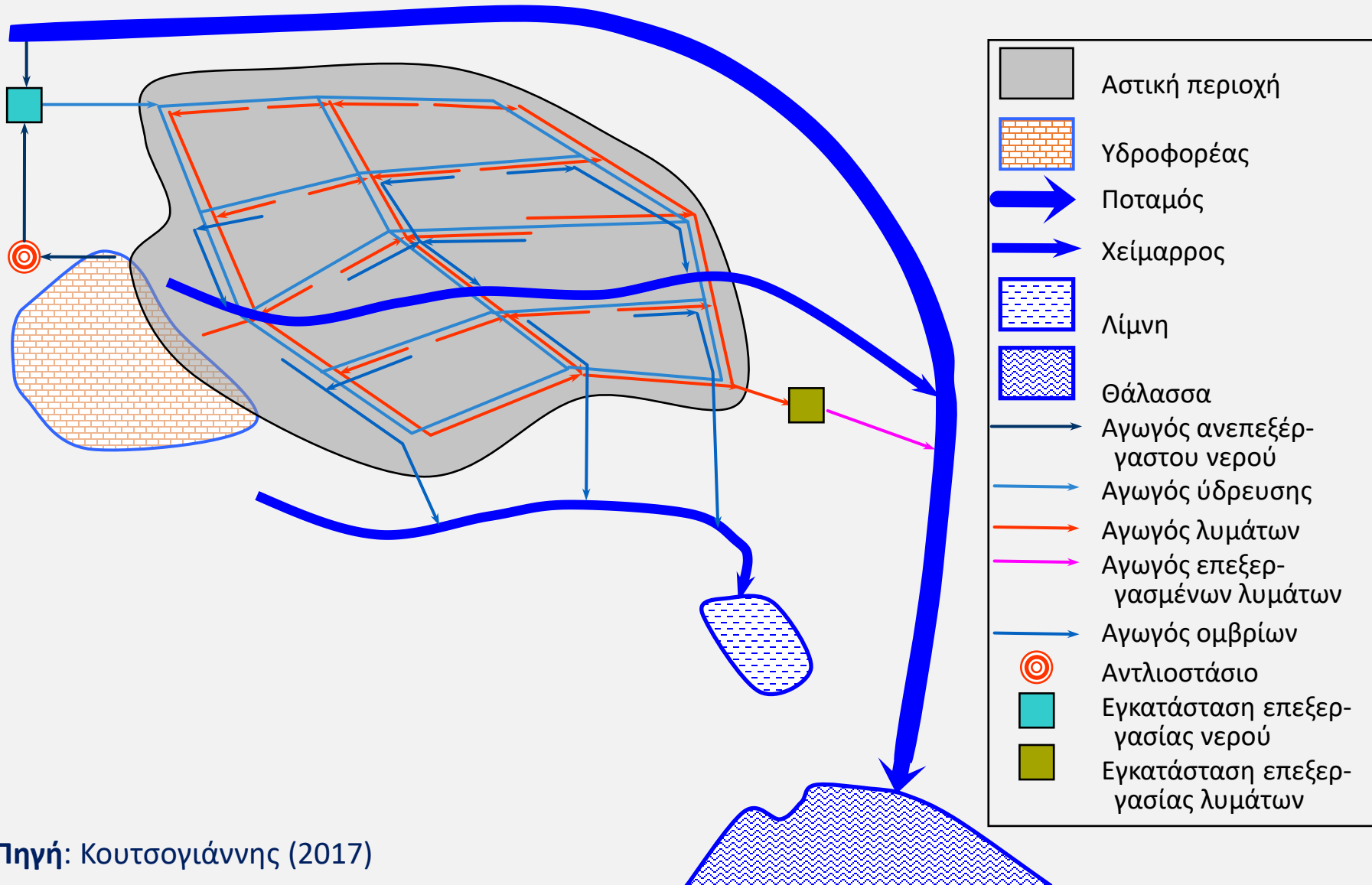
Πηγή: H.G. Gauch, Jr., *Scientific Method in Practice*, Cambridge, 2003

Προσαρμογή: Κουτσογιάννης (2017)

Κατηγορίες υδραυλικών έργων

- Έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων
 - Επιφανειακά νερά (φράγματα, υδροληψίες)
 - Υπόγεια νερά (γεωτρήσεις, υδρομαστεύσεις)
 - Υδροηλεκτρικά έργα
 - Υδροδοτικά έργα
 - Υδραγωγεία
 - Αντλιοστάσια
 - Δεξαμενές
 - Δίκτυα διανομής
 - Αστικές αποχετεύσεις
 - Δίκτυα ακαθάρτων
 - Δίκτυα ομβρίων
- Κατηγορίες έργων που πραγματεύεται το μάθημα Υδραυλική & Υδραυλικά Έργα (με έμφαση στα αστικά υδραυλικά έργα)
- Αντιπλημμυρικά έργα & έργα διευθέτησης υδατορευμάτων
 - Αρδευτικά έργα
 - Αποστραγγιστικά έργα
 - Αποξηραντικά έργα
 - Έργα προστασίας από διάβρωση
 - Έργα εμπλουτισμού υδροφορέων
 - Λιμενικά έργα
 - Έργα υγειονομικής τεχνολογίας
 - Εγκαταστάσεις επεξεργασίας πόσιμου νερού (διωλιστήρια)
 - Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

Αστικά υδροσυστήματα – Αστικά υδραυλικά έργα



Αστικά υδραυλικά έργα

- Υδρευτικά έργα (υδραγωγεία, δεξαμενές, μονάδες επεξεργασίας νερού, δίκτυα διανομής)
- Αποχετευτικά έργα (δίκτυα συλλογής ακαθάρτων και ομβρίων, έργα διευθέτησης αστικών υδατορευμάτων, μονάδες επεξεργασίας λυμάτων)

Πηγή: Κουτσογιάννης (2017)

Αρδευτικά υδросυστήματα – Εγγειοβελτιωτικά & αποστραγγιστικά έργα

□ Αρδευτικά έργα

- Έργα συλλογής και αποθήκευσης νερού
- Έργα μεταφοράς μεγάλης κλίμακας (τάφροι, διώρυγες, αγωγοί υπό πίεση)
- Δίκτυα διανομής (από την δεξαμενή μέχρι την είσοδο της αρδευτικής μονάδας – αγροτεμαχίου)
 - Επιφανειακή άρδευση με κατάκλυση → αγωγοί ελεύθερης επιφάνειας
 - Άρδευση με καταιονισμό → αγωγοί υψηλής πίεσης (30-80 m)
 - Στάγδην άρδευση → αγωγοί χαμηλής πίεσης (<20 m)

□ Αποστραγγιστικά έργα

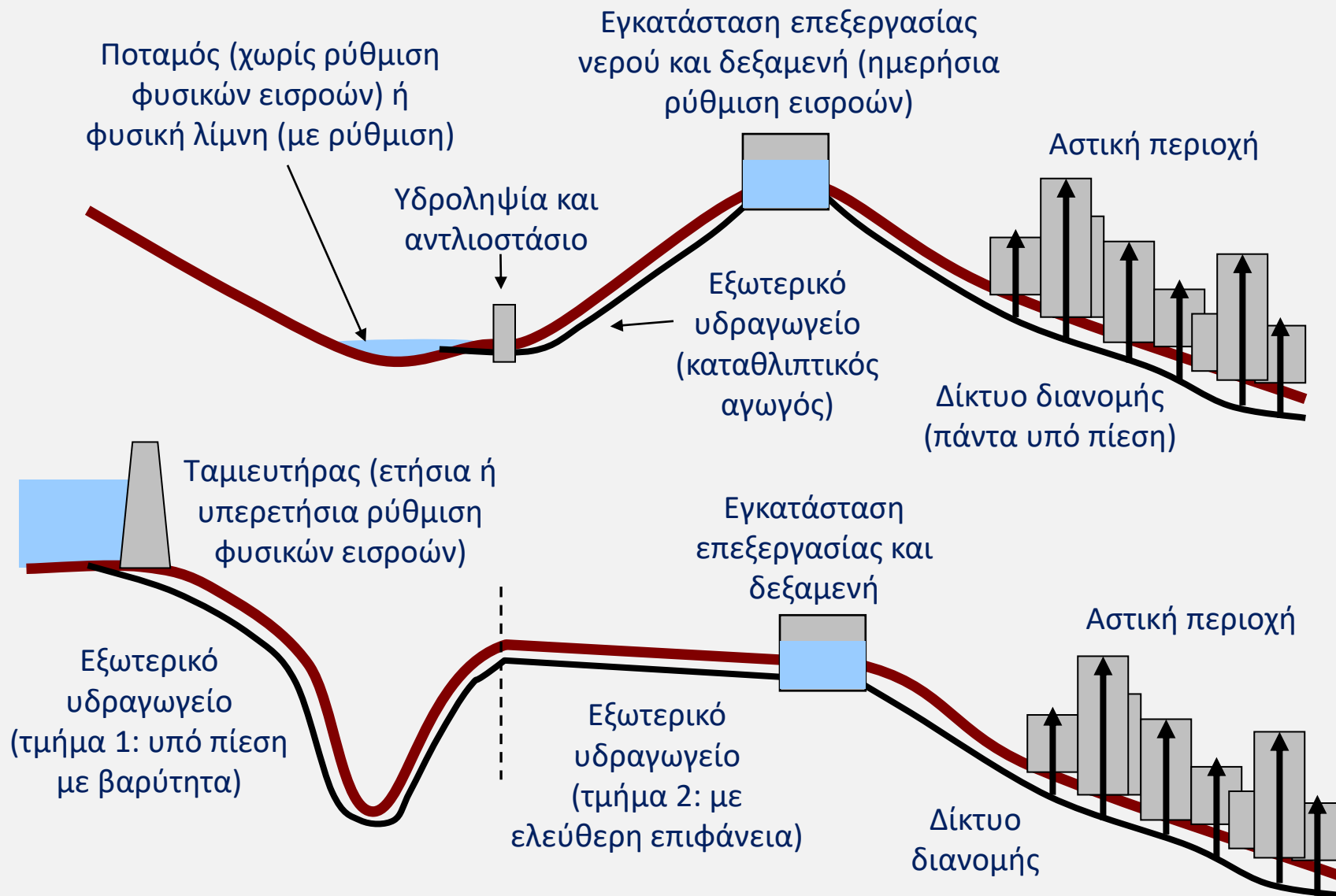
- Απαγωγή πλημμυρών και στραγγιδίων
- Διάθεση σε φυσικούς αποδέκτες
- Αγωγοί με ελεύθερη επιφάνεια



Υδροδοτικά έργα: Σκοπός και τυπική διάκριση

- Σκοπός των υδροδοτικών έργων είναι εξασφάλιση του απαιτούμενου νερού, σε επαρκή **ποσότητα** και με υψηλή **αξιοπιστία**, και η **μεταφορά** και **διανομή** του για την εξυπηρέτηση των υδατικών αναγκών μιας περιοχής (αστική, βιομηχανική, αγροτική), εξασφαλίζοντας συγκεκριμένα **ποιοτικά χαρακτηριστικά** του νερού και τηρώντας ένα σύνολο **λειτουργικών κριτηρίων** (ελάχιστες και μέγιστες πιέσεις).
- Αν και το είδος και γενική διάταξη των υδροδοτικών συστημάτων εξειδικεύεται κατά περίπτωση, ως επί το πλείστον μπορούν να διακριθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες, που μπορούν να μελετηθούν ως ανεξάρτητα υποσυστήματα:
 - **Έργα συλλογής νερού στις πηγές:** έργα ανάπτυξης/αξιοποίησης επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, κάθε κλίμακας, για την απαγωγή και (σε κάποιες περιπτώσεις) αποθήκευση του νερού (ταμιευτήρες)
 - **Έργα εξωτερικού υδραγωγείου:** έργα μεταφοράς του νερού από τις πηγές έως τις παρυφές της υδροδοτούμενης περιοχής, τις μονάδες επεξεργασίας (για υδρευτικά έργα) και τις δεξαμενές
 - **Δίκτυα διανομής:** συστήματα αγωγών που διανέμουν νερό, από τις δεξαμενές σε πολλαπλά σημεία προορισμού (καταναλωτές)

Τυπικές διατάξεις αστικών υδροδοτικών έργων



Παρατηρήσεις

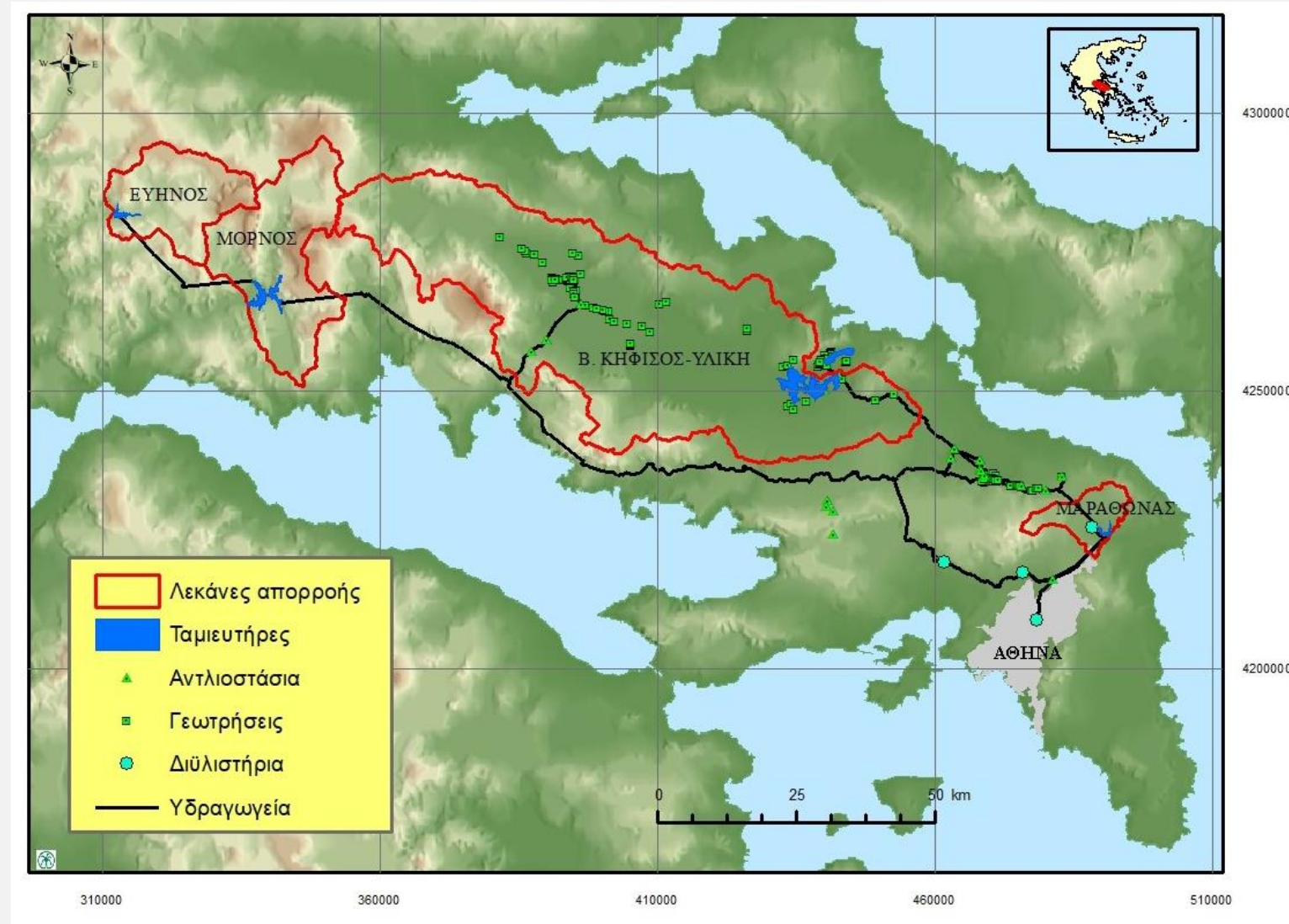
- Συχνά ως εξωτερικό υδραγωγείο αναφέρεται το σύνολο των έργων συλλογής και μεταφοράς. Το μάθημα εξετάζει μόνο τα έργα μεταφοράς.
- Η δεξαμενή αποτελεί το κατάντη όριο του εξωτερικού υδραγωγείου και το ανάντη όριο του δικτύου διανομής (αναφέρεται και ως εσωτερικό υδραγωγείο).

Εξωτερικά υδραγωγεία vs. δίκτυα διανομής

- ❑ Τα έργα του **εξωτερικού υδραγωγείου** παρουσιάζουν τεράστια ποικιλία ως προς τα τεχνολογικά τους χαρακτηριστικά (γενική διάταξη, Η/Μ εξοπλισμός, υλικά), αλλά και την υδραυλική τους λειτουργία (συνήθως υπό πίεση, για μικρές παροχές, και με ελεύθερη επιφάνεια, για μεγάλες).
- ❑ Αντίθετα, τα δίκτυα διανομής αποτελούν πάντα **πλέγματα αγωγών υπό πίεση** (με εξαίρεση τα δίκτυα επιφανειακής άρδευσης), η γενική διάταξη των οποίων ακολουθεί την πολεοδομική διαμόρφωση της περιοχής (πρακτικά ταυτίζεται με αυτή του οδικού δικτύου).
- ❑ Τα εξωτερικά υδραγωγεία σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν με **σταθερή παροχή** (συνεχή στο 24ωρο ή διακοπτόμενη), ενώ η παροχή των έργων διανομής είναι **χρονικά μεταβαλλόμενη**, ακολουθώντας τη μεταβλητότητα της ζήτησης των διαφόρων χρηστών νερού που εξυπηρετούν.
- ❑ Η εξισορρόπηση της χρονικής ανομοιομορφίας μεταξύ της μεταφερόμενης παροχής από το εξωτερικό υδραγωγείο και των χρονικά μεταβαλλόμενων παροχών στο δίκτυο διανομής γίνεται με την παρεμβολή κατάλληλου **ρυθμιστικού έργου** (δεξαμενή).
- ❑ Η διαστασιολόγηση των έργων εξωτερικού υδραγωγείου γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά της ζήτησης την **ημέρα αιχμής**, ενώ του δικτύου διανομής με βάση τα χαρακτηριστικά της **ώρας αιχμής**.

Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας

- Έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων:
 - 4 ταμιευτήρες (φρ. Μαραθώνα, Μόρνου, Ευήνου + λίμνη Υλίκη)
 - 70 γεωτρήσεις (ΒΑ Πάρνηθα)
- Εξωτερικό υδραγωγείο:
 - 475 km αγωγών με ελεύθερη ροή και υπό πίεση (σήραγγες, καταθλιπτικοί αγωγοί, σίφωνες)
 - Αντλιοστάσια
- Δίκτυο διανομής:
 - 14 000 km αγωγών υπό πίεση
 - 57 δεξαμενές
 - 4 μονάδες επεξεργασίας νερού



Υδατικοί πόροι και έργα αξιοποίησης

- Όμβρια νερά → στέρνες
- Πηγαία νερά → έργα υδρομάστευσης
- Ρηχά υπόγεια νερά → πηγάδια
- Βαθιά υπόγεια νερά → γεωτρήσεις
- Νερά ποταμών χωρίς ρύθμιση → υδροληψίες επί της κοίτης
- Επιφανειακά νερά με ρύθμιση/αποθήκευση
 - Χρονική κλίμακα ρύθμισης: ετήσια, υπερετήσια, εποχιακή ή μικρότερη
 - Τεχνικά έργα εντός ή εκτός κοίτης (φράγματα ή λιμνοδεξαμενές, αντίστοιχα)
 - Φυσικές λίμνες
- Θαλάσσιο νερό → έργα αφαλάτωσης
- Επεξεργασμένα λύματα (για άρδευση)

Παρατηρήσεις

- Η εκτίμηση του υδατικού δυναμικού μιας περιοχής αποτελεί αντικείμενο υδρολογικής μελέτης, ενώ η λειτουργία των έργων αξιοποίησης αποτελούν αντικείμενο μιας μελέτης διαχείρισης υδατικών πόρων.
- Σε αντίθεση με τις μελέτες σχεδιασμού των υδραγωγείων και δικτύων διανομής, που συνήθως αναφέρονται στις δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας τους, τα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων μελετώνται για ένα μεγάλο εύρος υδροκλιματικών καταστάσεων (χρονοσειρές εισροών).

Ελληνικές πόλεις με ολική ή μερική υδροδότηση από ταμιευτήρες

Πόλη	Λεκάνη τροφοδοσίας και έργο	Παρατηρήσεις
Αθήνα	Φράγμα Μαραθώνα στο Χάραδρο	Λειτουργεί από τη δεκαετία του 1930
Αθήνα	Βοιωτικός Κηφισός – Υλίκη	Λειτουργεί από τη δεκαετία του 1950
Αθήνα	Φράγμα Μόρνου	Λειτουργεί από τη δεκαετία του 1980
Αθήνα	Φράγμα Ευήνου (Αγίου Δημητρίου) και σήραγγα Ευήνου-Μόρνου	Λειτουργεί μερικώς από τη δεκαετία του 1990 και πλήρως από το 2001
Θεσσαλονίκη	Αλιάκμονας κατάντη ΥΠΕ Ασωμάτων (αναρρυθμιστικό έργο Αγ. Βαρβάρας)	Λειτουργεί από το 2003, εξυπηρετώντας και αρδευτικές ανάγκες
Καρδίτσα	Φράγμα Πλαστήρα	Λειτουργεί από τη δεκαετία του 1960
Αγρίνιο	Φράγμα Καστρακίου	Λειτουργεί από τη δεκαετία του 1970
Πάτρα	Φράγμα Αστερίου στον π. Παραπείρο και φράγμα εκτροπής π. Πείρου	Λειτουργεί μερικώς από το 2021
Ηράκλειο	Φράγμα Αποσελέμη και σήραγγα εκτροπής οροπεδίου Λασιθίου	Λειτουργεί από το 2016
Ρόδος	Φράγμα Γαδουρά	Λειτουργεί μερικώς από το 2015
ΔΕ Σοφάδων, Παλαμά, Καρδίτσας	Φράγμα Σμοκόβου	Λειτουργεί από το 2003 κυρίως για άρδευση, τα δίκτυα δεν έχουν ολοκληρωθεί

Υδραγωγεία υπό πίεση: Βασικά στάδια σχεδιασμού

- Διαμόρφωση γενικής διάταξης υδραγωγείου (υδραγωγείο → σύστημα αγωγών και συνοδών έργων):
 - Ορισμός ανάντη και κατάντη ορίου (πηγή, υδροληψία, δεξαμενή)
 - Χάραξη σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή
 - Παρεμβολή ειδικών συσκευών για τον έλεγχο της ροής ή/και της πίεσης
- Επιλογή υλικού και κλάσης αγωγών (με βάση και τον έλεγχο υδροστατικών πιέσεων)
- Εκτίμηση χαρακτηριστικών μεγεθών σχεδιασμού (για το πέρας της ωφέλιμης ζωής του συστήματος):
 - Παροχή (μελλοντικές υδατικές ανάγκες, απώλειες νερού)
 - Ισοδύναμη τραχύτητα (για μακροχρόνια χρήση των αγωγών, με προσαύξηση για τοπικές απώλειες)
- Προσδιορισμός διαθέσιμων ενεργειακών απωλειών:
 - Στάθμη ελεύθερης επιφάνειας, ανάντη και κατάντη
 - Εναλλακτική συνθήκη: ελάχιστη απαιτούμενη πίεση
- Επιλογή διαμέτρων εμπορίου
- Υδραυλικοί έλεγχοι (χάραξη ΓΕ και ΠΓ → υδραυλική μηκοτομή)

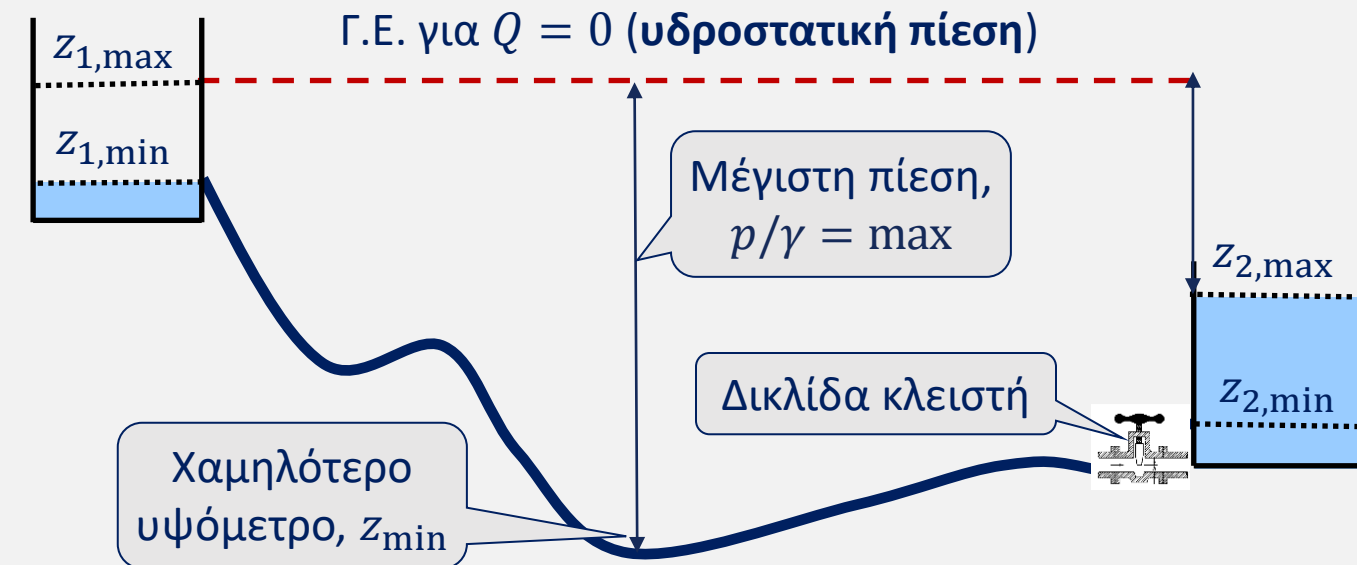
Υδραγωγεία υπό πίεση: Έλεγχος μέγιστων πιέσεων

- Σκοπός: προσδιορισμός απαιτούμενης αντοχής του αγωγού, επιλογή κατάλληλου υλικού/κλάσης
- Έλεγχος σε συνθήκες υδροστατικής πίεσης:
 - Μηδενική ροή ($Q = 0$, κλειστή δικλίδα)
 - Οριζόντια γραμμή ενέργειας ($J = 0$)
- Οριακή συνθήκη: στάθμη ανάντη δεξαμενής z_1

- Εξίσωση ενέργειας για υψόμετρο αγωγού z :

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \Rightarrow z_1 = z + \frac{p}{\gamma} \Rightarrow \frac{p}{\gamma} = z_1 - z$$

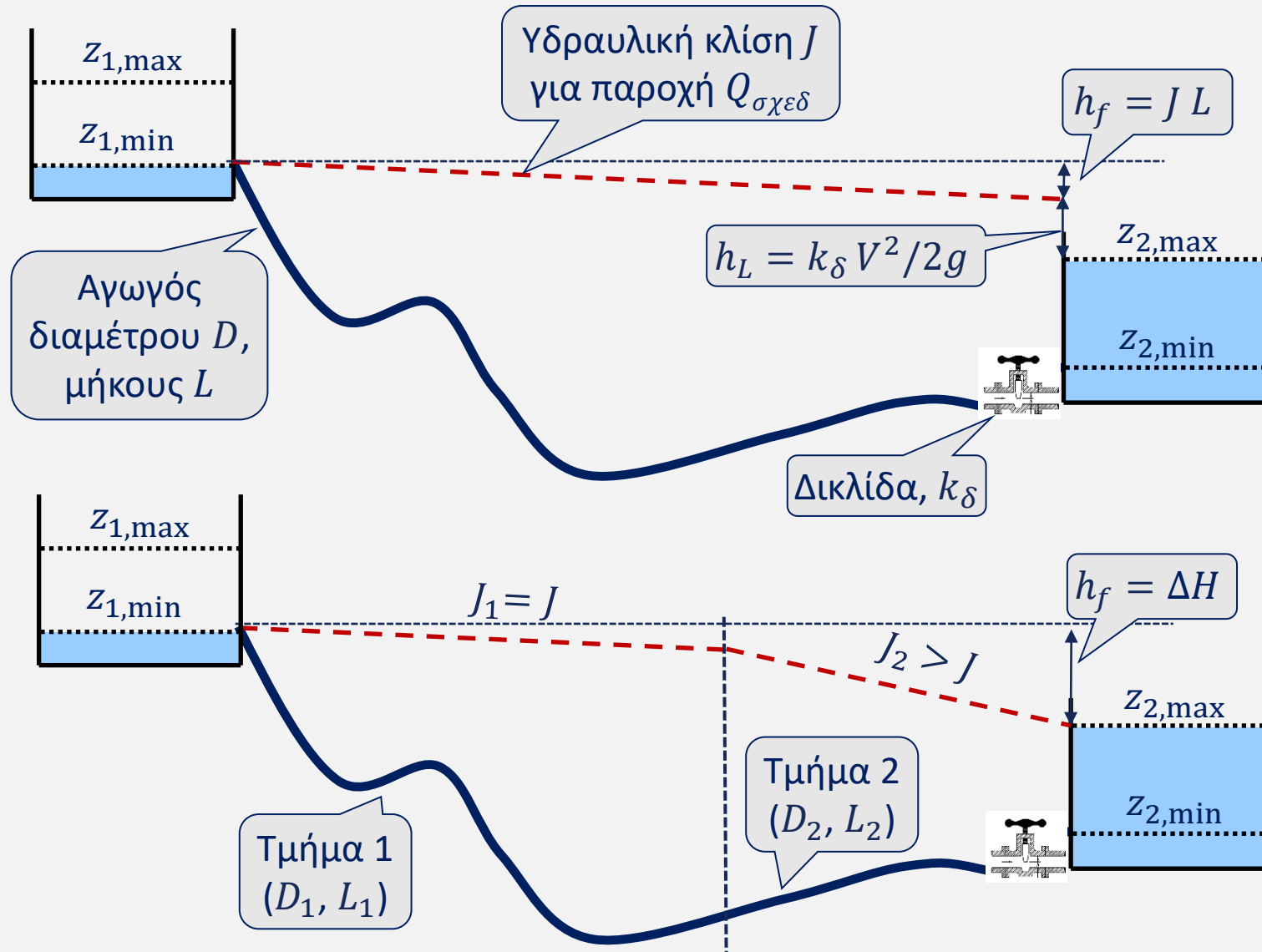
- Δυσμενέστερη συνθήκη ($p/\gamma = \max$):
 - Μέγιστο ενεργειακό υψόμετρο ανάντη, $z_{1,\max}$
 - Χαμηλότερο σημείο μηκοτομής, z_{\min}



Παρατηρήσεις

- Ο έλεγχος είναι τοπογραφικός, και δεν απαιτεί υδραυλικούς υπολογισμούς
- Για την εκτίμηση της ζητούμενης αντοχής γίνεται προσαύξηση της υδροστατικής πίεσης κατά 20-30% για την αντιμετώπιση υπερπιέσεων από υδραυλικό πλήγμα

Υδραγωγεία υπό πίεση: Διαστασιολόγηση



Παρατηρήσεις

- Λαμβάνεται ο δυσμενέστερος συνδυασμός ενεργειακών υψομέτρων, ώστε $\Delta H = \min$ (ελάχιστη στάθμη ανάντη, μέγιστη στάθμη κατόντη)
- Διάταξη Α: υπολογισμός θεωρητικής διαμέτρου D_θ και εφαρμογή αμέσως μεγαλύτερης διαμέτρου εμπορίου, $D_1 > D_\theta$ ($h_f < z_{1,min} - z_{2,max}$)
- Διάταξη Β: μίγμα διαμέτρων εμπορίου, $D_1 > D_\theta > D_2$ για τα αντίστοιχα μήκη, L_1 και L_2 , έτσι ώστε $J_1 L_1 + J_2 L_2 = \Delta H$

Υδραγωγεία υπό πίεση: Τεχνολογία αγωγών

- Γενικά εφαρμόζονται **σωλήνες εμπορίου**, που διατίθενται σε διάφορα υλικά, διαμέτρους και κλάσεις
- Γενικά εφαρμόζονται τα κάτωθι όρια:
 - Μικρότερη επιτρεπτή κλάση (ονομαστική αντοχή σε πίεση): 10 atm
 - Μικρότερη επιτρεπτή διάμετρος: 90-100 mm (παλαιότερα 63 mm)
- Η επιλογή του **υλικού και αντοχής** των σωληνώσεων γίνεται και με βάση το **μέγιστο ύψος πίεσης** (έλεγχος υδροστατικών πιέσεων), λαμβάνοντας υπόψη και τις υπερπιέσεις λόγω υδραυλικού πλήγματος, σε συνθήκες απότομης διακοπή της ροής (κλείσιμο δικλείδας, διακοπή λειτουργίας αντλίας).
- Συνήθως, για μικρές διαμέτρους (ενδεικτικά, μέχρι 400 mm) προτιμώνται οι πλαστικοί αγωγοί, ενώ για μεγαλύτερες οι **χαλύβδινοι**, οι οποίοι αντέχουν, ανάλογα με το πάχος τους, οποιαδήποτε πίεση.
- Οι πλαστικοί αγωγοί είναι από PVC (παλαιότερη τεχνολογία, άκαμπτοι σωλήνες), ενώ οι σωλήνες νέας γενιάς είναι από **πολυαιθυλαίνιο** υψηλής ή χαμηλής πυκνότητας (HDPE/LDPE), που έχουν πολλά κατασκευαστικά πλεονεκτήματα (μικρό βάρος, ευκαμψία).
- Παλαιότερα, στα δίκτυα διανομής είχαν τύχει ευρείας εφαρμογής οι αμιαντοτσιμεντοσωλήνες, που ωστόσο σταδιακά έχουν αντικατασταθεί για λόγους υγιεινής.

Υδραγωγεία υπό πίεση: Αγωγοί εμπορίου από πολυαιθυλένιο (HDPE)

Ονομαστική διάμετρος (mm)	Εσωτερική διάμετρος (mm)					
	10 atm	12.5 atm	16 atm	20 atm	25 atm	32 atm
63	55.4	53.6	51.4	48.8	45.8	42.0
75	66.0	63.8	61.4	58.2	54.4	50.0
90	79.2	76.6	73.6	69.8	65.4	60.0
110	96.8	93.8	90.0	85.4	79.8	73.4
125	110.2	106.6	102.2	97.0	90.8	83.4
140	123.4	119.4	114.6	108.6	101.6	93.4
160	141.0	136.4	130.8	124.2	116.2	106.8
180	158.6	153.4	147.2	139.8	130.8	120.2
200	176.2	170.6	163.6	155.2	145.2	133.6
225	198.2	191.8	184.0	174.6	163.4	150.2
250	220.4	213.2	204.6	194.2	181.6	167.0
280	246.8	238.8	229.2	217.4	203.4	187.0
315	277.6	268.6	257.8	244.6	228.8	210.4
355	312.8	302.8	290.6	275.6	258.0	
400	352.6	341.2	327.4	310.6	290.6	
450	396.6	383.8	368.2	349.4	327.0	
500	440.6	526.4	409.2	388.4		
560	493.6	477.6	458.4			
630	555.2	537.4	515.6			

Διάμετροι πλαστικών αγωγών

- Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των πλαστικών σωλήνων του εμπορίου είναι η **ονομαστική διάμετρος** D_n και το **πάχος** t των τοιχωμάτων τους, για την αντίστοιχη κλάση, με βάση τα διεθνή πρότυπα.
- Το μέγεθος D_n αναφέρεται στην εξωτερική διάμετρο, ενώ οι **υδραυλικοί υπολογισμοί** γίνονται με την αντίστοιχη εσωτερική, ήτοι:

$$D = D_n - 2t$$

Υδραγωγεία υπό πίεση: Αγωγοί εμπορίου από άλλα υλικά

Αγωγοί από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

Ονομαστική διάμετρος (mm)	Εσωτερική διάμετρος (mm)		
	10 atm	12.5 atm	16 atm
63	57.0		53.6
75	67.8		63.8
90	81.4	79.0	76.6
110	99.4	97.0	93.6
125	113.0	110.2	106.4
140	126.6	123.6	119.2
160	144.6	141.2	136.2
200	180.8	176.4	170.2
225	203.4	198.6	191.6
250	226.2	220.6	212.8
280	253.2	247.0	238.4
315	285.0	278.0	268.2
355	321.2	313.2	
400	361.8	353.2	340.6
450	407.0	397.0	
500	452.2	441.2	

Λοιπά υλικά σωληνώσεων για υδροδοτικά συστήματα:

- **Χαλύβδινοι** αγωγοί διατίθενται σε διαμέτρους 100-2000 mm, με διαβαθμίσεις ανά 50 mm μέχρι τη διάμετρο των 400 mm, και ανά 100 mm για μεγαλύτερες. Οι αγωγοί αυτοί είναι οικονομικοί για μεγάλες διαμέτρους και έχουν πολύ υψηλή αντοχή.
- Σωλήνες από **αμιαντοτσιμέντο** διατίθενται σε διαμέτρους 100-1000 mm, με διαβαθμίσεις ανά 50 mm μέχρι τη διάμετρο των 500 mm, και ανά 100 mm για τις μεγαλύτερες. Το υλικό αυτό δεν εφαρμόζεται πλέον, για υγειονομικούς λόγους.
- Στους **μη πλαστικούς** αγωγούς η ονομαστική διάμετρος ταυτίζεται με την εσωτερική.

Υδραγωγεία υπό πίεση: Τραχύτητα σχεδιασμού

- Δεδομένου ότι τα υδροδοτικά έργα σχεδιάζονται με χρονικό ορίζοντα 40 ετών, οι τιμές εφαρμογής των συντελεστών ισοδύναμης τραχύτητας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη **γήρανση** των αγωγών.
- Κατά κανόνα, οι τιμές της ισοδύναμης τραχύτητας λαμβάνονται προσαυξημένες, ώστε στους υδραυλικούς υπολογισμούς να συμπεριληφθούν και οι **τυπικές τοπικές απώλειες**.
- Ελάχιστη αποδεκτή ισοδύναμη τραχύτητα, για νερό που δεν προκαλεί διάβρωση ή επικαθήσεις αλάτων: $k_s = 0.1 \text{ mm}$.
- Σε **μελέτες σχεδιασμού**, εφόσον αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης ή επικαθήσεων αλάτων στους αγωγούς, συστήνεται $k_s = 0.5 \div 2.0 \text{ mm}$ (η χαμηλή τιμή για πλαστικούς αγωγούς), με γενική τυπική τιμή $k_s = 1.0 \text{ mm}$.



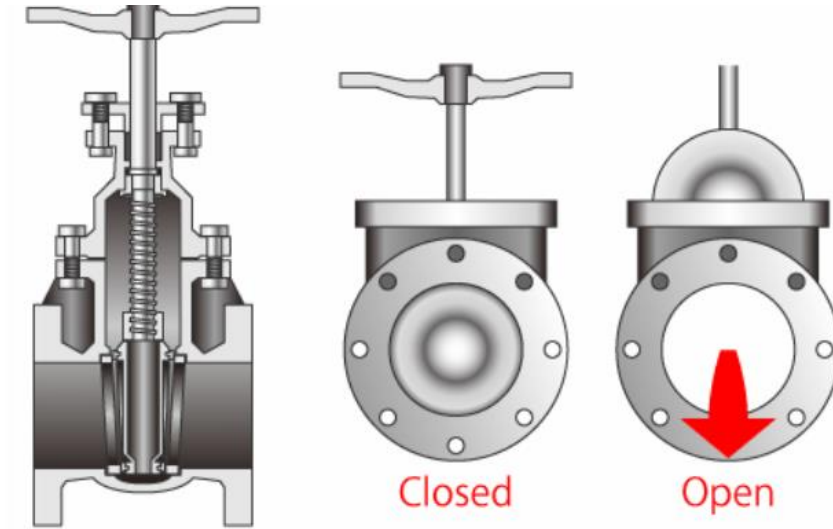
Ενδεικτικός πίνακας εργαστηριακών τιμών ισοδύναμης τραχύτητας τυπικών υλικών (δεν συστήνεται η χρήση τους σε μελέτες)

Υλικό αγωγού	k_s (mm)
Ορείχαλκος, χαλκός	0.0015
Χάλυβας εμπορίου ή σφυρήλατος σίδηρος	0.045
Χυτοσίδηρος με ασφαλική επάλειψη	0.12
Γαλβανισμένος σίδηρος	0.15
Χυτοσίδηρος χωρίς επάλειψη	0.26
Σκυρόδεμα	0.3 – 3.0
Πλαστικό (λείοι σωλήνες εργοστασίου)	< 0.01
Πλαστικό, μετά από χρήση	> 0.10

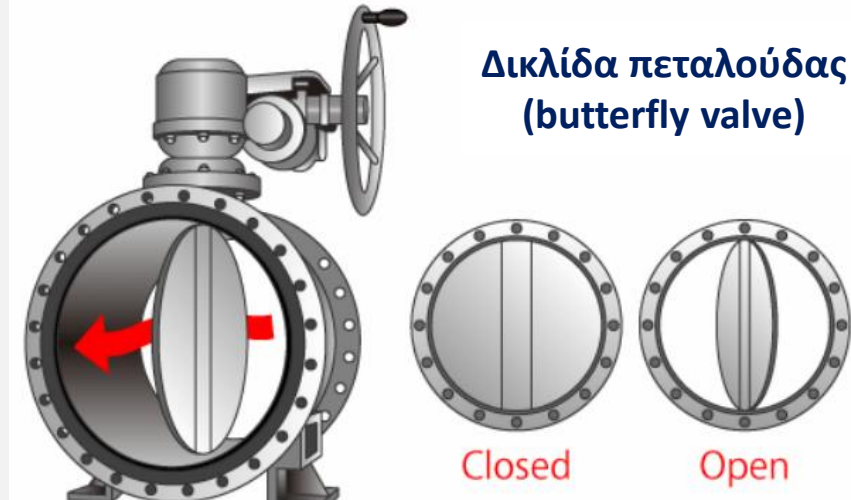
Υδραγωγεία υπό πίεση: Συσκευές ελέγχου παροχής

- **Δικλίδες (βάνες):** Επιτυγχάνουν έλεγχο των συνθηκών ροής σε υδραγωγεία, ρυθμίζοντας την παροχή μέσω των τοπικών απωλειών, και επιτρέπουν την απομόνωση τμημάτων αγωγών, για λόγους συντήρησης. Συνήθως είναι χυτοσιδηρές, και διατίθενται σε διάφορους τύπους, ανάλογα και με τη διάμετρο του αγωγού (πεταλούδας, συρταρωτές, κυλινδρικές). Τοποθετούνται σε θέσεις όπου υπάρχει εύκολη πρόσβαση, π.χ. κοντά σε δεξαμενές.
- **Βαλβίδες αντεπιστροφής:** Εγκαθίστανται κυρίως σε καταθλιπτικούς αγωγούς, ώστε να εξασφαλίσουν ότι η ροή γίνεται μόνο προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.
- **Εκκενωτές:** Σύστημα τριών δικλίδων μορφής «Τ», τοποθετούνται σε χαμηλά σημεία υδραγωγείων και δικτύων, επιτρέποντας την εκροή του νερού προς έναν παρακείμενο φυσικό αποδέκτη, για έκπλυση των αγωγών και απομάκρυνση των φερτών.

Συρταρωτή δικλίδα (gate valve)



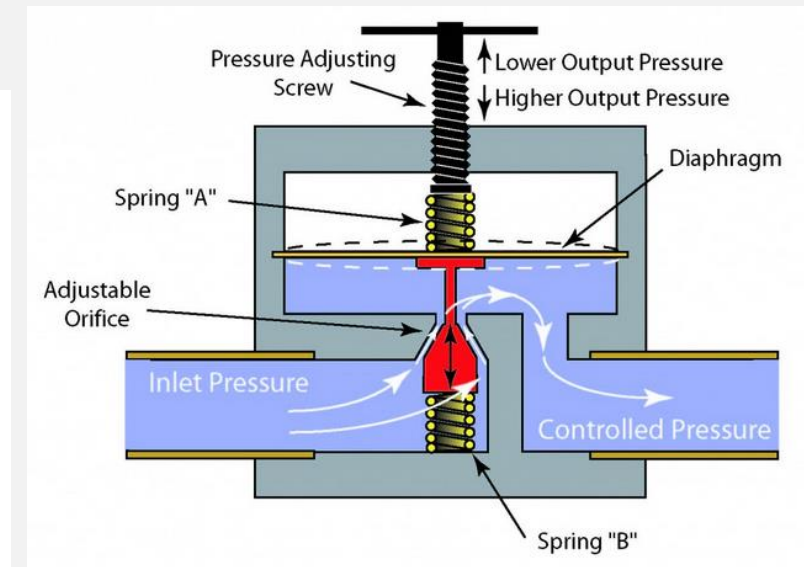
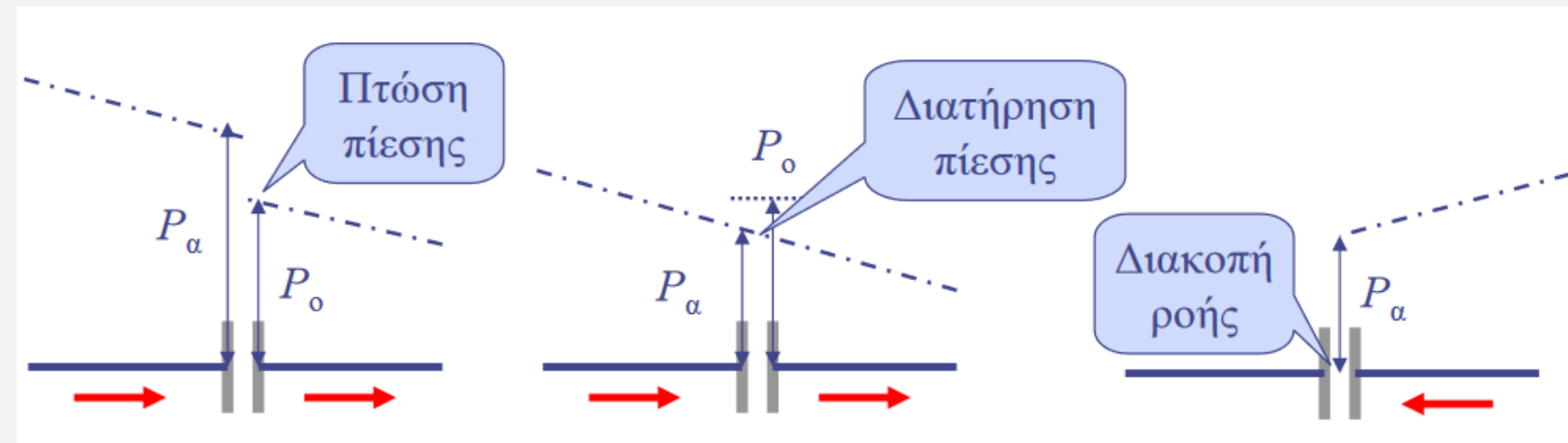
Δικλίδα πεταλούδας (butterfly valve)



Πηγή: Παπανικολάου (2016)

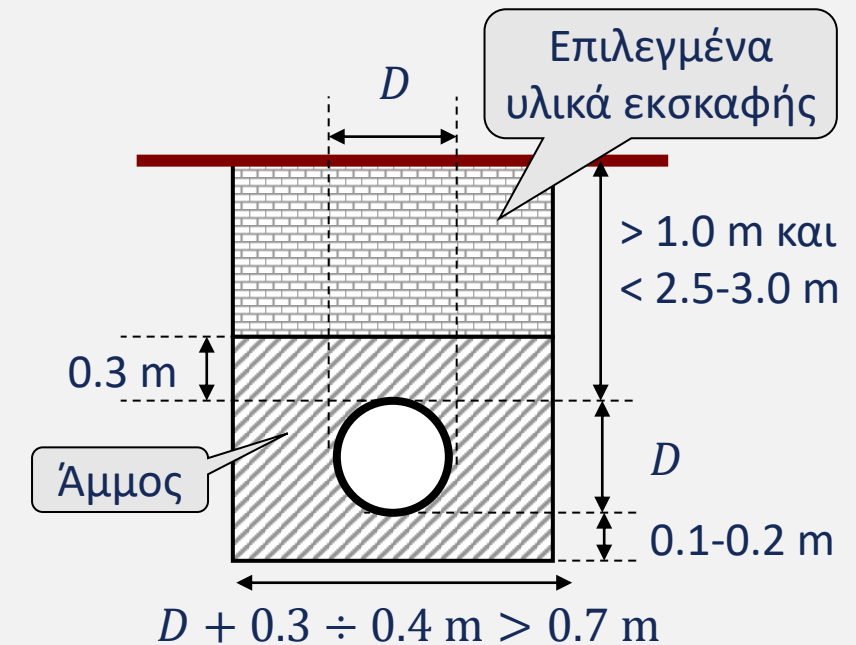
Υδραγωγεία υπό πίεση: Ειδικές συσκευές ελέγχου πίεσης

- ❑ **Πιεζοθραυστικά φρεάτια:** Πολύ μικρές δεξαμενές, αμελητέας ρυθμιστικής ικανότητας, που δημιουργούν συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας. Τοποθετούνται σε υψηλά σημεία, για την αποφυγή υποπίεσεων, στο πέρας καταθλιπτικών αγωγών, και στα όρια μεταξύ πιεζομετρικών ζωνών δικτύων διανομής.
- ❑ **Μειωτές πίεσης:** Αυτόματες βαλβίδες που εξασφαλίζουν σταθερή πίεση εξόδου p_o , αν η ανάντη πίεση p_a είναι μεγαλύτερη, ενώ σε περίπτωση αντιστροφής της ροής λειτουργούν ως βαλβίδες αντεπιστροφής.
- ❑ **Αερεξαγωγοί:** Συνήθως διπλού στομίου, τοποθετούνται σε υψηλά σημεία, ώστε σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας να απομακρύνουν τον αέρα, ενώ σε συνθήκες υποπίεσης (υδραυλικό πλήγμα) να εισάγουν αέρα, για αποσυμπίεση.



Υδραγωγεία υπό πίεση: Τοποθέτηση αγωγών

- ❑ Τοποθέτηση πάντα σε **σκάμμα**, αντιδιαμετρικά και σε μικρότερο βάθος από αγωγούς αποχέτευσης ακαθάρτων και ομβρίων, με επικάλυψη τουλάχιστον 1.0 m, ώστε να προστατεύονται από τον παγετό, την ηλιακή ακτινοβολία και τα υπερκείμενα φορτία.
- ❑ Ως προς την κατά μήκος **κλίση**, γενικά ακολουθούν την τοπογραφία, ώστε να ελαχιστοποιείται ο όγκος των εκσκαφών.
- ❑ Αν το έδαφος είναι εντελώς **οριζόντιο**, τοποθετούνται με κατιούσα κλίση (0.2 ως 0.4%) για κάποιο μήκος, και μετά με ανάστροφη κλίση, για μήκος ίσο με το προηγούμενο.
- ❑ Στα υψηλά σημεία γίνεται απομάκρυνση των φυσαλίδων μέσω **αερεξαγωγών**, ενώ στα χαμηλά τοποθετούνται **εκκενωτές** για την απομάκρυνση των φερτών και καθαρισμό.
- ❑ Σε αλλαγές διεύθυνσης, συμβολές «T», και μεγάλες κλίσεις (>20%) οι αγωγοί **αγκυρώνονται** με σώματα από άοπλο σκυρόδεμα.



Εξωτερικά υδραγωγεία: Γενικές αρχές σχεδιασμού

- Σύνδεση **πηγής** (υδροληπτικό έργο) με τις παρυφές της υδροδοτούμενης περιοχής → απαραίτητη η εξαρχής χωροθέτηση της **δεξαμενής**, που αποτελεί το κατάντη όριο του εξωτερικού υδραγωγείου.
- Για συνήθειες παροχές, η μεταφορά του νερού γίνεται **υπό πίεση**, με τα εξής πλεονεκτήματα:
 - Ευελιξία στη χάραξη, για οποιαδήποτε τοπογραφική διαμόρφωση
 - Εφαρμογή διαμέτρων εμπορίου, για διάφορους τύπους υλικών και ορίων αντοχής σε πίεση
 - Ελαχιστοποίηση κόστους και περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Πρακτικά, δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το **μέγιστο ύψος πίεσης**, που μπορεί να φτάσει ακόμη και 300-400 m → έλεγχος σε συνθήκες υδροστατικής πίεσης.
- Για μεγάλα ύψη πίεσης ενδείκνυται η εφαρμογή χαλύβδινων αγωγών, σε όλο το μήκος ή κατά τμήματα.
- Το **ελάχιστο ύψος πίεσης** μπορεί να φτάσει στο μηδέν (δηλαδή η πιεζομετρική γραμμή να εφάπτεται του εδάφους), ακόμη και να λάβει μικρές αρνητικές τιμές (μέχρι -7 m) → έλεγχος για την παροχή σχεδιασμού.
- Για οποιαδήποτε διάταξη εξωτερικού υδραγωγείου υπό πίεση, πάντοτε τοποθετείται **δικλίδα** αμέσως **ανάντη της δεξαμενής**, για τον έλεγχο/ρύθμιση της εισερχόμενης παροχής.

Εξωτερικά υδραγωγεία: Παροχή σχεδιασμού

- Οι παροχές και λοιπά μεγέθη σχεδιασμού των υδροδοτικών έργων υποδομής αναφέρονται στο πέρας του **ωφέλιμου χρόνου ζωής** τους, που συμβατικά λαμβάνεται ίσος με 40-50 χρόνια (για έργα Π/Μ) .
- Εφόσον το εξωτερικό υδραγωγείο καταλήγει σε δεξαμενή, ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τις **υδατικές ανάγκες** της **ημέρας αιχμής**, προσμετρώντας και τις **απώλειες** κατά τη μεταφορά και διανομή του νερού.
- Η συνολική ποσότητα νερού που απαιτείται να μεταφερθεί την ημέρα αιχμής αναφέρεται και ως **μέγιστος ημερήσιος όγκος** και συμβολίζεται με \mathcal{V}_H .
- Γενικά, τα **υδραγωγεία βαρύτητας** σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν σε 24ωρη βάση, συνεπώς σχεδιάζονται με τη λεγόμενη **μέγιστη ημερήσια παροχή**, ήτοι:

$$Q_H = \mathcal{V}_H / T_H, \text{ όπου } T_H \text{ η διάρκεια μιας ημέρας (86400 s)}$$

- Όταν η μεταφορά του νερού απαιτεί **άντληση** (καταθλιπτικοί αγωγοί) θεωρείται μικρότερη διάρκεια λειτουργίας (συνήθως 16-20 ώρες), προκειμένου να συντηρούνται τα αντλιοστάσια, οπότε η παροχή σχεδιασμού του εξωτερικού υδραγωγείου είναι:

$$Q_A = \mathcal{V}_H / T_A$$

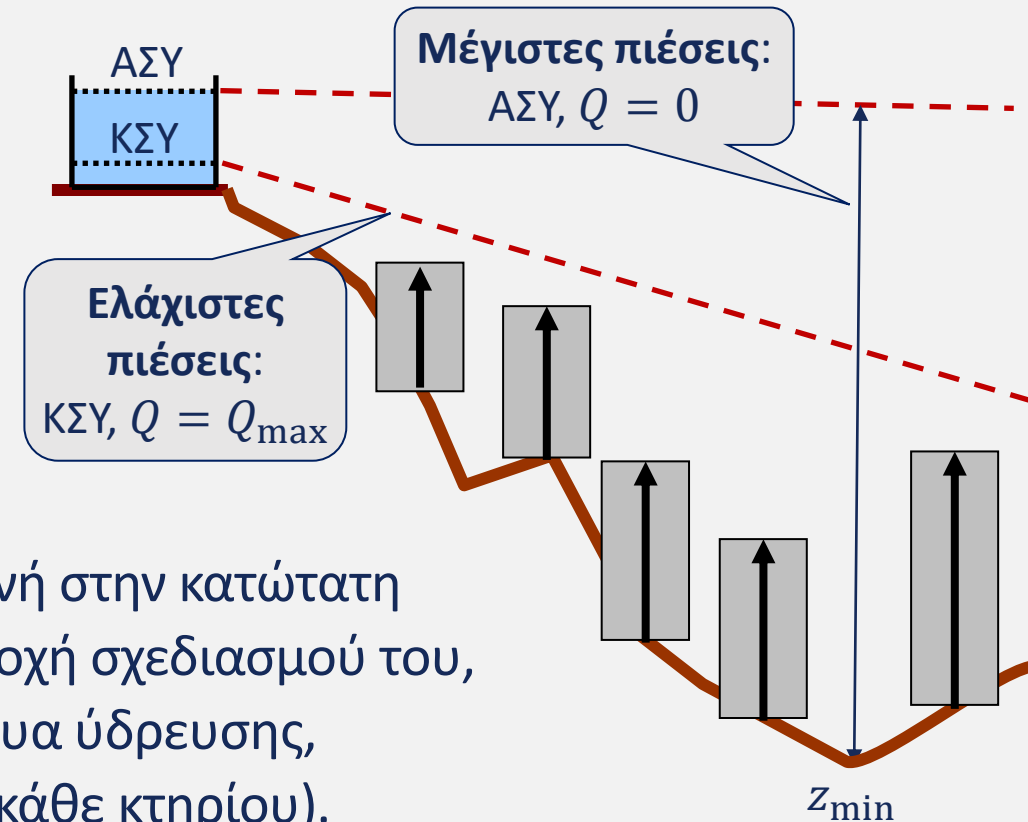
όπου T_A ο χρόνος λειτουργίας του αντλιοστασίου (εξ ορισμού: $Q_A > Q_H$).

Εξωτερικά υδραγωγεία: Χωροθέτηση δεξαμενής

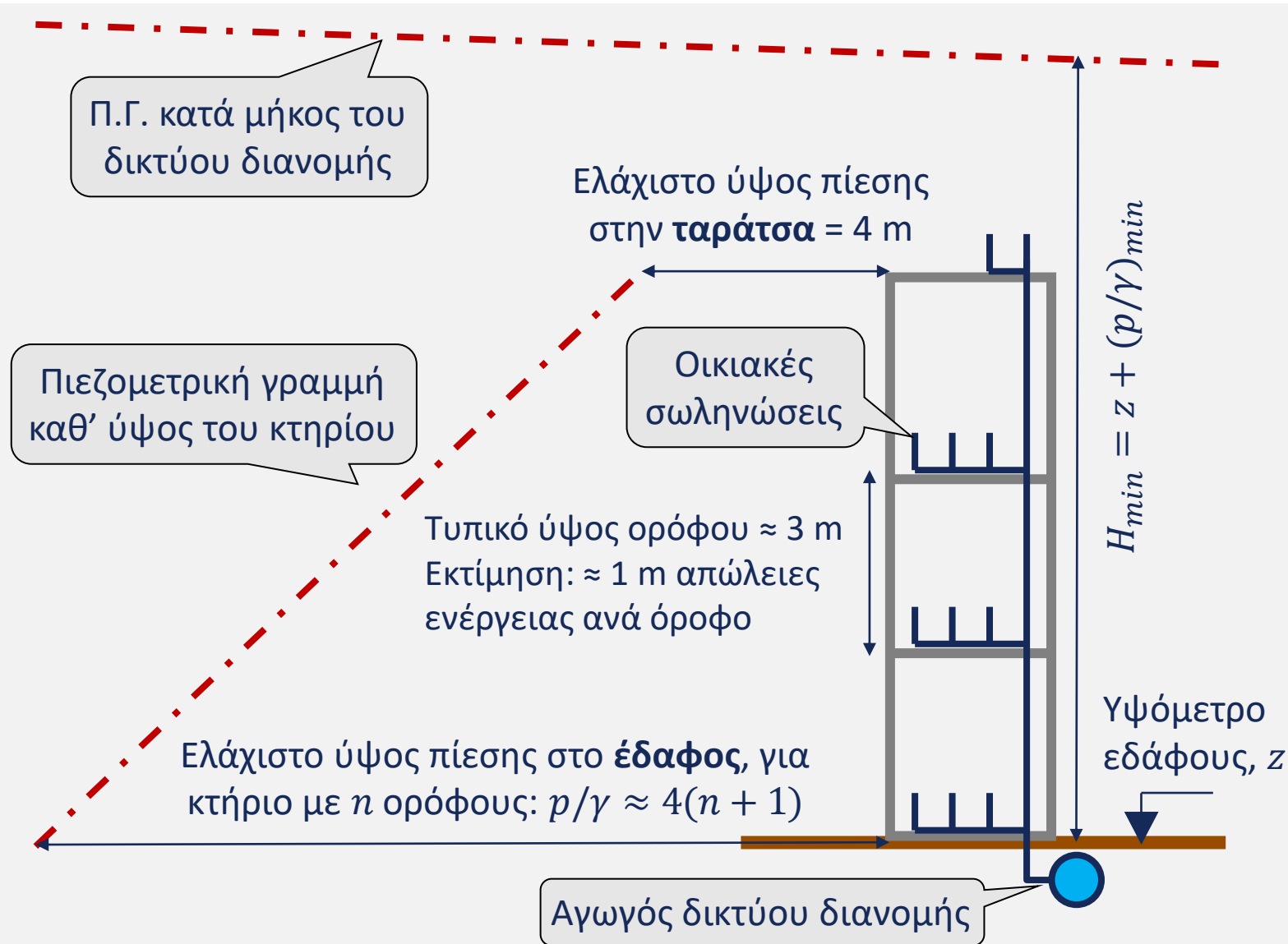
□ Επιδιώκεται η οριζοντιογραφική τοποθέτηση της δεξαμενής όσο το δυνατό **πιο κοντά στην περιοχή υδροδότησης**, ενώ η υψομετρική της τοποθέτηση εξαρτάται δραστικά από το επιτρεπόμενο **εύρος πιέσεων** που ορίζεται με βάση τις **λειτουργικές απαιτήσεις του δικτύου διανομής**, λαμβάνοντας υπόψη και άλλους περιορισμούς (κατασκευαστικούς, πολεοδομικούς, κτλ.).

□ Σε δίκτυα ύδρευσης, η **μέγιστη πίεση**, η οποία ελέγχεται σε συνθήκες υδροστατικής πίεσης, θεωρώντας την ανώτατη στάθμη ύδατος (ΑΣΥ), δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60-70 m, προκειμένου να αποφευχθούν βλάβες στις εσωτερικές υδραυλικές εγκαταστάσεις των κτηρίων. Σε περιοχές με σημαντικές νυχτερινές καταναλώσεις και απώλειες, γίνεται δεκτό υψηλότερο όριο (π.χ., 120 m στο δίκτυο της ΕΥΔΑΠ).

□ Η **ελάχιστη πίεση**, η οποία ελέγχεται θεωρώντας την δεξαμενή στην κατώτατη στάθμη ύδατος (ΚΣΥ) και λειτουργία του δικτύου για την παροχή σχεδιασμού του, ορίζεται από τις προδιαγραφές του συστήματος (π.χ., σε δίκτυα ύδρευσης, απαιτείται η εξασφάλιση ύψους πίεσης 0.4 atm στην οροφή κάθε κτηρίου).



Εξωτερικά υδραγωγεία: Εύρος υψομετρικής τοποθέτησης δεξαμενής

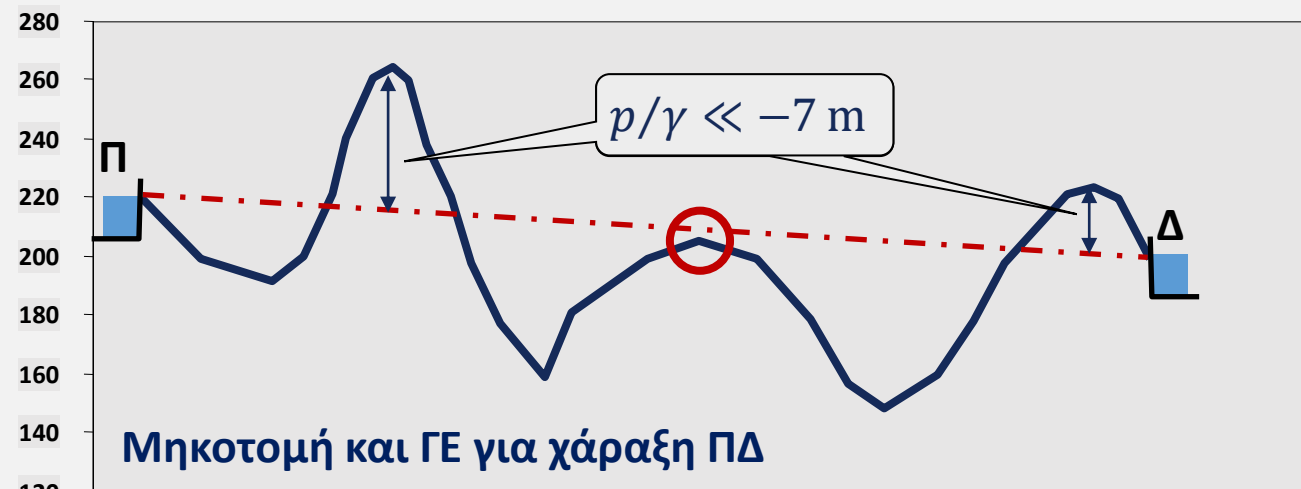
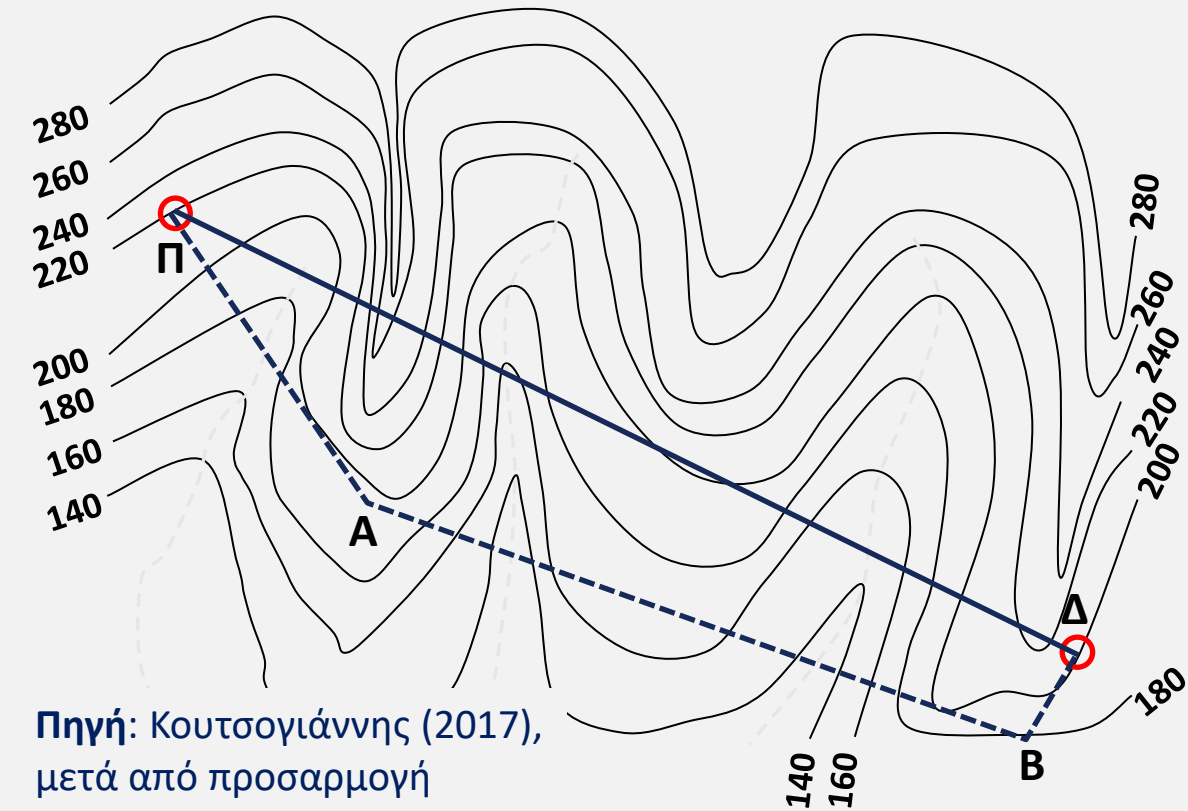


Παρατηρήσεις

- Για δεδομένες απαιτήσεις πίεσης στο δίκτυο, προσδιορίζονται η μέγιστη ΑΣΥ και ελάχιστη επιτρεπόμενη ΚΣΥ της δεξαμενής.
- Ο προσδιορισμός της ΑΣΥ βασίζεται μόνο στην τοπογραφία, ενώ για την ΚΣΥ πρέπει να είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά του δικτύου.
- Σε επίπεδο αρχικού σχεδιασμού, θεωρείται μια εύλογη υψομετρική διαφορά από το υψηλότερο σημείο του δικτύου (π.χ., 15-25 m), με βάση και τα ύψη των κτηρίων.

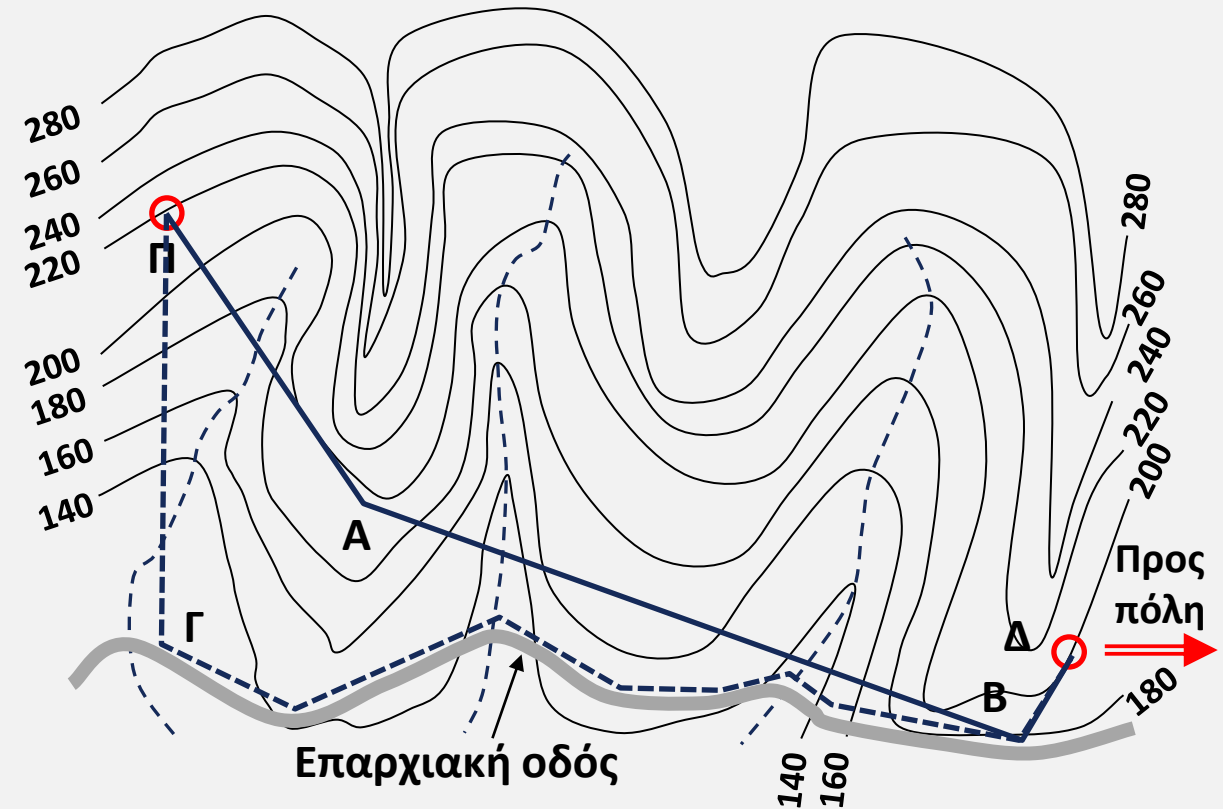
Εξωτερικά υδραγωγεία υπό πίεση: Χάραξη σε οριζοντιογραφία (1)

- **Ευθεία χάραξη ΠΔ:** Με επιτρεπτές υποπιέσεις στην περιοχή των μεγάλων υψομέτρων ($+260 > +220$ m), και στο ύψωμα κοντά στη δεξαμενή Δ
- **Τεθλασμένη χάραξη ΠΑΒΔ:** Αυξημένο μήκος, αλλά χωρίς προβλήματα υποπιέσεων.



Εξωτερικά υδραγωγεία υπό πίεση: Χάραξη σε οριζοντιογραφία (2)

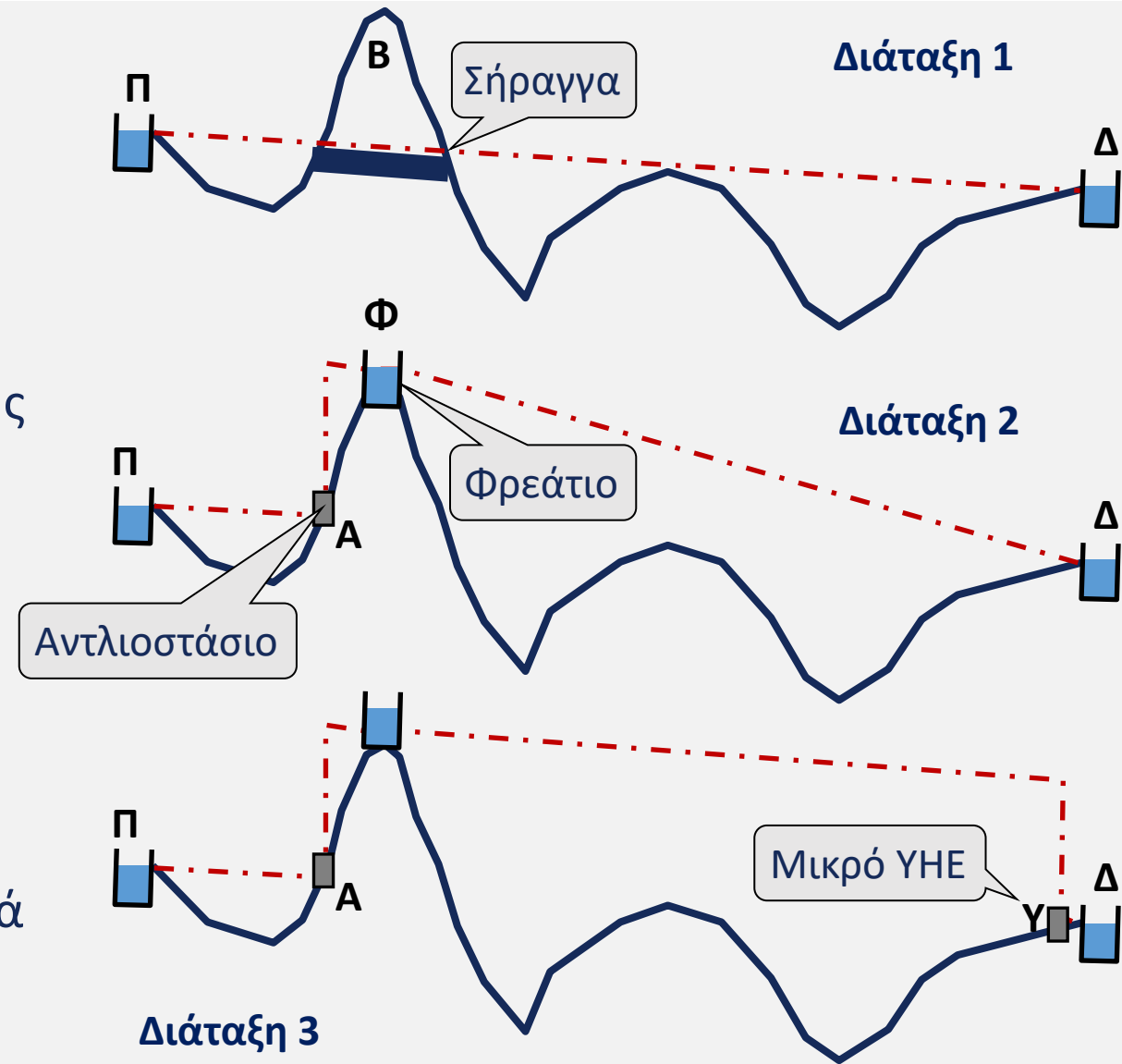
- **Τεθλασμένη χάραξη ΠΓΒΔ:** Μεγαλύτερη παράκαμψη, ώστε μεγάλο τμήμα του αγωγού να τοποθετηθεί παράλληλα σε υφιστάμενη οδό
- Και οι δύο χαράξεις είναι **τεχνικά άρτιες**, καθώς καμιά δεν εμφανίζει πρόβλημα υποπιέσεων.
- Η ΠΓΒΔ έχει μεγαλύτερο μήκος και παρουσιάζει μικρή αύξηση στη μέγιστη πίεση. Όμως το γεγονός ότι βρίσκεται δίπλα σε υφιστάμενη επαρχιακή οδό είναι πιθανόν να την καθιστά **οικονομικότερη** (ευχερέστερη, άρα φτηνότερη, κατασκευή και αποφυγή απαλλοτρίωσης), **λειτουργικότερη** (ευχερέστερη εποπτεία και συντήρηση) και **περιβαλλοντικά πιο φιλική** (δεν απαιτούνται επεμβάσεις στο τοπίο).



Πηγή: Κουτσογιάννης (2017), μετά από προσαρμογή

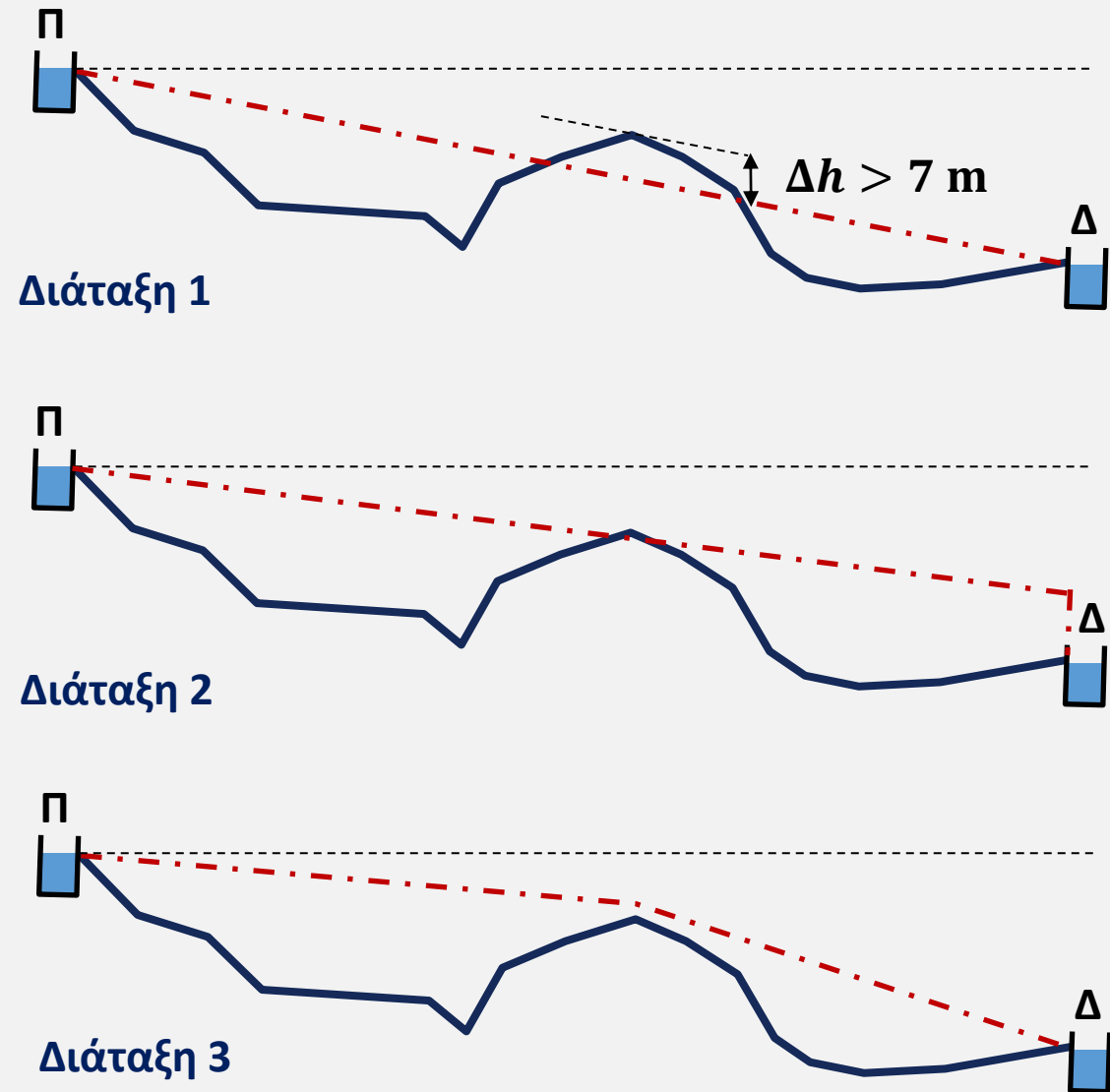
Εξωτερικά υδραγωγεία υπό πίεση: Παρεμβολή μεγάλων υψομέτρων

- **Διάταξη 1:** Αποφυγή υποπιέσεων με κατασκευή σήραγγας στον ορεινό όγκο (ακριβή και τεχνικά δυσχερής λύση, μόνο για πολύ μεγάλη παροχή, π.χ. $10 \text{ m}^3/\text{s}$, άρα μεγάλη διάμετρο)
- **Διάταξη 2:** Αγωγός βαρύτητας ΠΑ, αντλιοστάσιο Α, καταθλιπτικός αγωγός ΑΦ, φρεάτιο Φ (για έλεγχο της Π.Γ. και προστασία έναντι υδραυλικού πλήγματος), αγωγός βαρύτητας ΦΔ
- **Διάταξη 3:** Όπως η διάταξη (2), αλλά και με την κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού έργου Υ για ανάκτηση (μερική ή πλήρη) της ενέργειας άντλησης (εφαρμόζεται για σχετικά μεγάλη παροχή).
- Τα παραπάνω έχουν νόημα μόνο αν δεν είναι τεχνικά ή/και οικονομικά εφικτή η παράκαμψη του ορεινού όγκου, μέσω μιας χάραξης μεγαλύτερου μήκους.



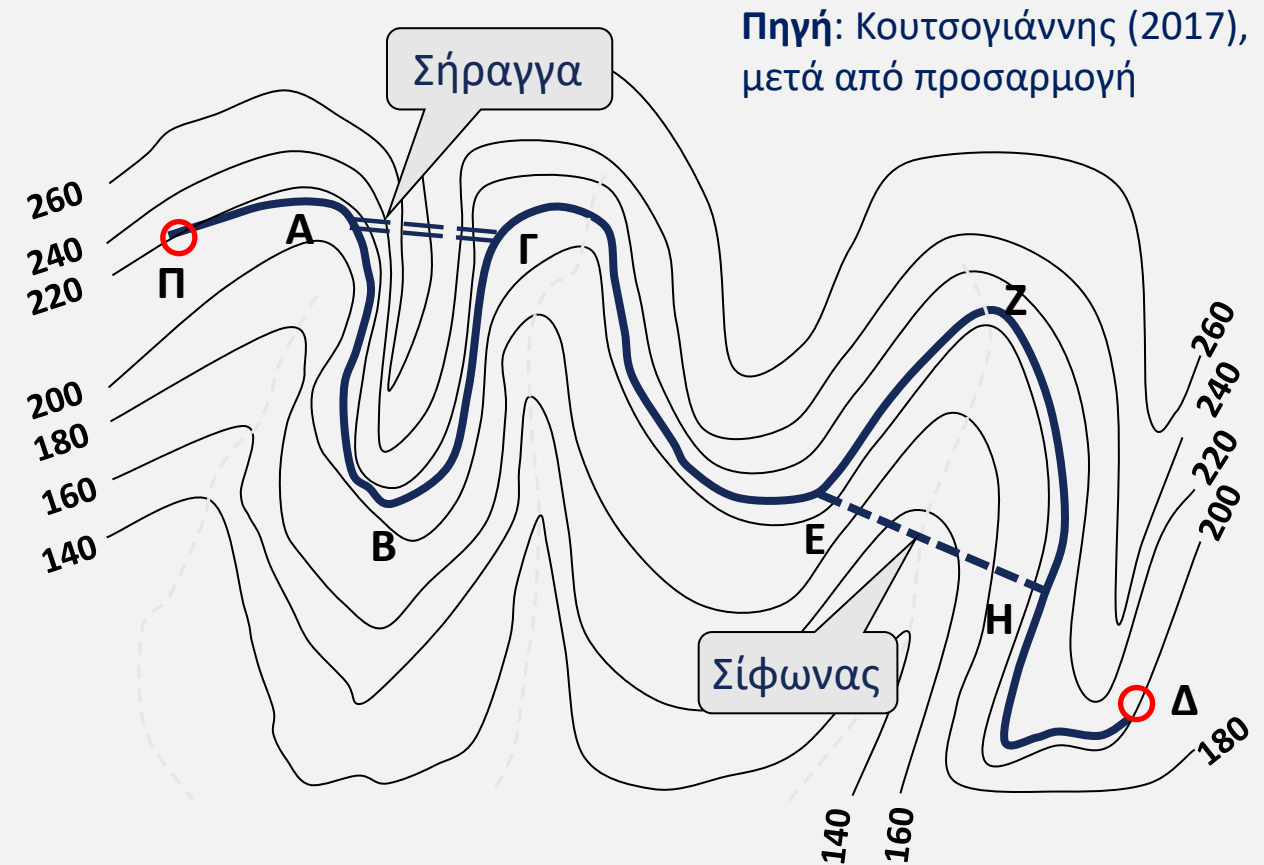
Εξωτερικά υδραγωγεία υπό πίεση: Προβλήματα υποπίεσεων

- **Διάταξη 1:** Δημιουργούνται υποπίεσεις λόγω της παρεμβολής υψώματος, το οποίο είναι χαμηλότερο από την πηγή → ελέγχεται αν η απόσταση της ΠΓ από το έδαφος υπερβαίνει τα -7 m, οπότε η επιλογή της ενιαίας διαμέτρου δεν είναι εφικτή.
- **Διάταξη 2:** Εφαρμογή ενιαίας διαμέτρου σε όλο το μήκος του υδραγωγείου, αλλά μεγαλύτερης από τη διάταξη 1, έτσι ώστε στο υψηλότερο ενδιάμεσο σημείο να τηρείται το αποδεκτό όριο υποπίεσης.
- **Διάταξη 3:** Εφαρμογή μίγματος διαμέτρων, μιας μεγαλύτερης ανάντη του υψώματος και μιας μικρότερης κατόντη αυτού.
- **Παρατήρηση:** Στο ύψωμα μπορεί να τοποθετηθεί πιεζοθραυτικό φρεάτιο, χωρίς να είναι απαραίτητο.



Εξωτερικά υδραγωγεία με ελεύθερη επιφάνεια

- **Διάταξη 1:** Διαμόρφωση διώρυγας σε όλο το μήκος από την πηγή έως τη δεξαμενή, απαιτεί χάραξη με βάση την ισοκλινή, για την αποφυγή σημαντικών μεταβολών στις κλίσεις → μεγάλο μήκος, ποικίλες τεχνικές δυσχέρειες
- **Διάταξη 2:** Παρεμβολή τμημάτων υπό πίεση, όπως σήραγγες (τμήμα ΑΓ) και ανεστραμμένοι σίφωνες (τμήμα ΕΗ), για μείωση τους μήκους.

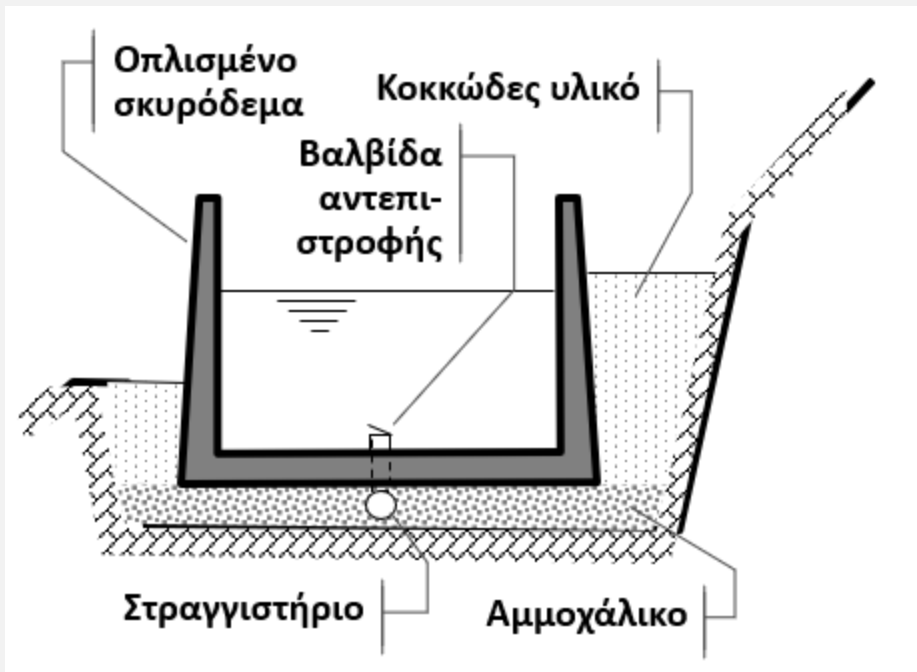


Παρατήρηση: Η διαμόρφωση υδραγωγείου με ελεύθερη επιφάνεια καθίσταται τεχνικοοικονομικά πρόσφορη μόνο όταν η μεταφερόμενη παροχή είναι πολύ μεγάλη (ενδεικτικά $>10 \text{ m}^3/\text{s}$).

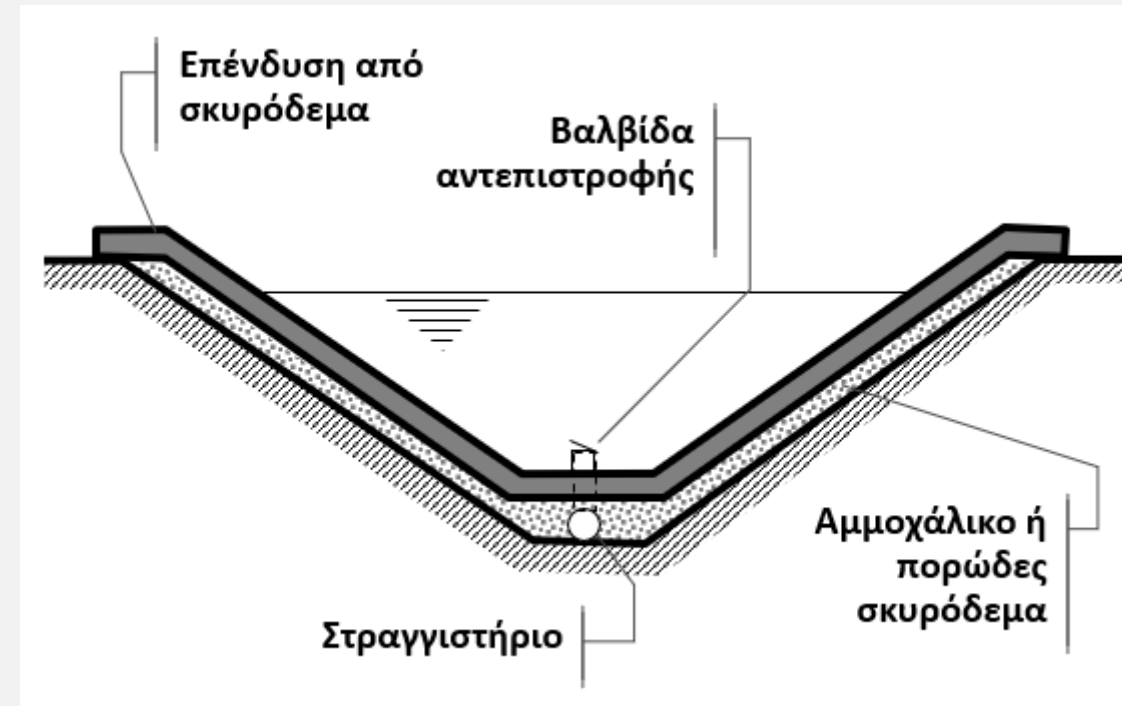
Τυπικές διατομές διωρύγων σε εξωτερικά υδραγωγεία

Ορθογωνική διατομή:

- Μικρό πλάτος κατάληψης
- Οπλισμένα τοιχώματα και πυθμένας
- Κατάλληλη για βραχώδη εδάφη (ορεινές περιοχές)



Πηγή: Κουτσογιάννης (2017)

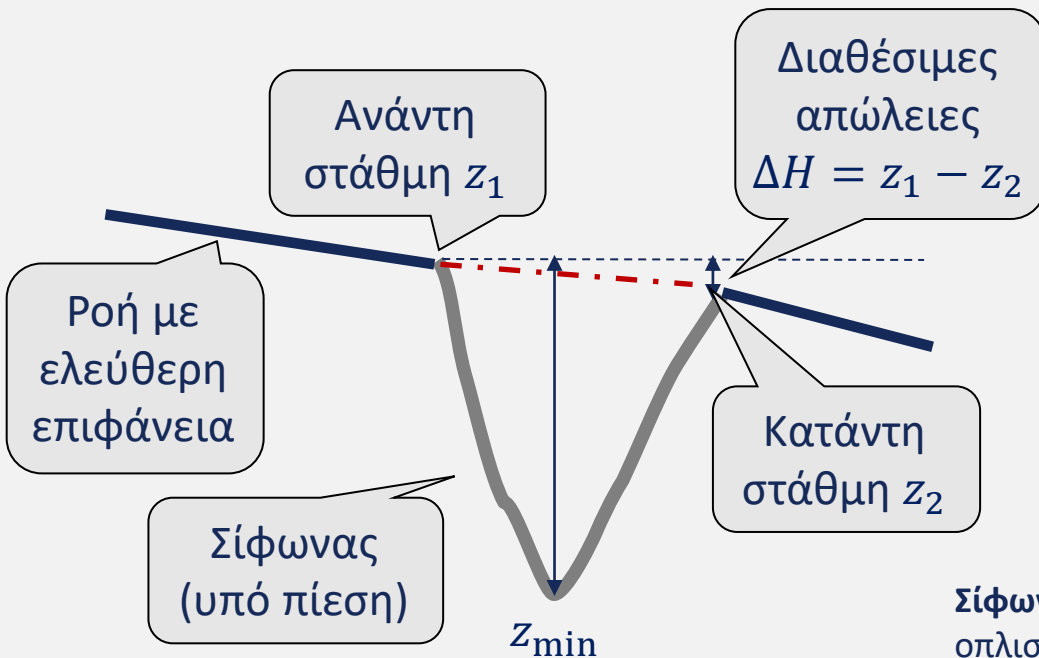


Τραπεζοειδής διατομή:

- Μεγάλο πλάτος κατάληψης
- Άοπλη ή ελαφρά οπλισμένη (με πλέγμα) επένδυση
- Κατάλληλη για γαιώδη εδάφη (πεδινές περιοχές)

Εξωτερικά υδραγωγεία: Ανεστραμμένοι σίφωνες

- **Ανεστραμμένος σίφωνας:** Τμήμα αγωγού υπό πίεση, μορφής «U», που εφαρμόζεται σε υδραγωγείο με ελεύθερη επιφάνεια, όταν παρεμβάλλεται κοιλάδα μεγάλου μήκους (αντί για την κατασκευή υδατογέφυρας).
- **Παρατήρηση:** Ο αγωγός πρέπει να έχει ιδιαίτερη υψηλή αντοχή, που καθορίζεται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ της ανάντη διατομής και του χαμηλότερου υψομέτρου της κοιλάδας (υδροστατική πίεση).



Σίφωνας Άμφισσας: Τμήμα του υδραγωγείου Μόρνου, δίδυμοι χαλύβδινοι αγωγοί επενδυμένοι με σπλισμένο σκυρόδεμα (μήκος 2410 m, διάμετρος 2x2.55 m, παροχή 23 m³/s, μέγιστο φορτίο 240 m)

Καταθλιπτικοί αγωγοί & αντλιοστάσια

- **Αντλιοστάσιο:** Μία ή περισσότερες αντλίες, τοποθετημένες σε σειριακή ή παράλληλη διάταξη.
- Σύνδεση αντλιών με αγωγό υπό πίεση (**καταθλιπτικός αγωγός**) που καταλήγει σε ελεύθερη επιφάνεια (φρεάτιο κατάθλιψης) για:
 - μεταφορά νερού σε μεγαλύτερο υψόμετρο (ανυψωτικό αντλιοστάσιο, $\Delta z = z_2 - z_1 > 0$)
 - αύξηση της παροχетеυτικότητας αγωγού βαρύτητας (ωστικό αντλιοστάσιο, $\Delta z = z_2 - z_1 < 0$)

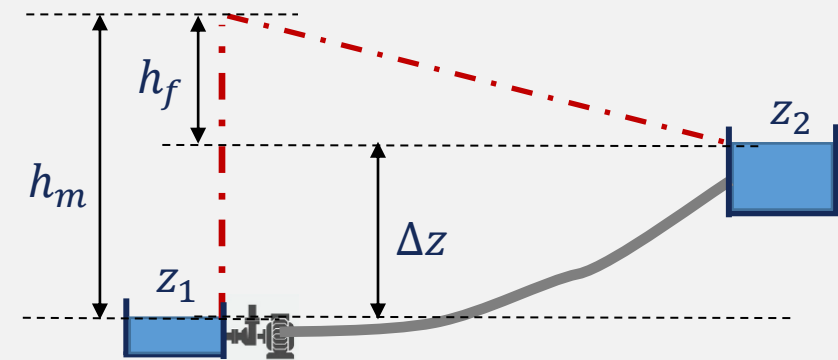
- **Μανομετρικό ύψος** (χωρίς τοπικές απώλειες):

$$z_2 = z_1 + h_f - h_m \Rightarrow h_m = \Delta z + h_f = \Delta z + J L$$

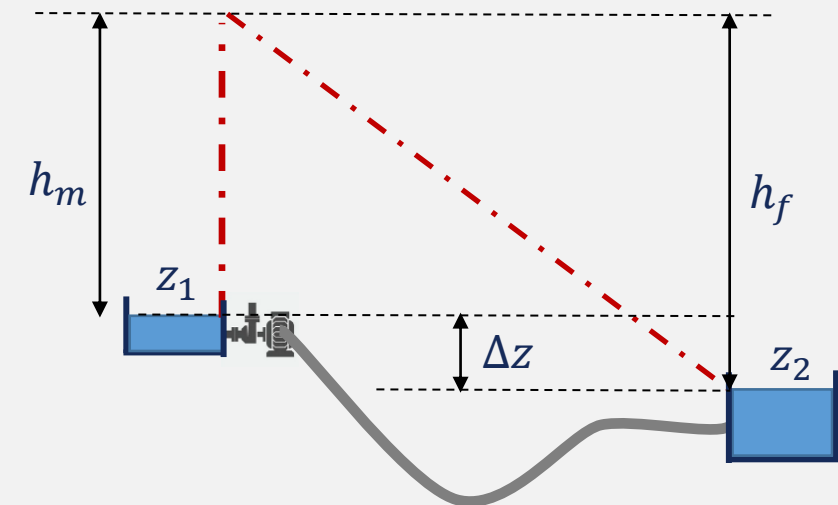
- **Ισχύς συστήματος:**

$$P = \gamma Q h_m / \eta$$

όπου $\gamma = \rho g$ το ειδικό βάρος του νερού (9.81 KN/m^3) και η ο βαθμός απόδοσης των αντλιών.



Ανυψωτικό αντλιοστάσιο



Ωστικό αντλιοστάσιο (booster)

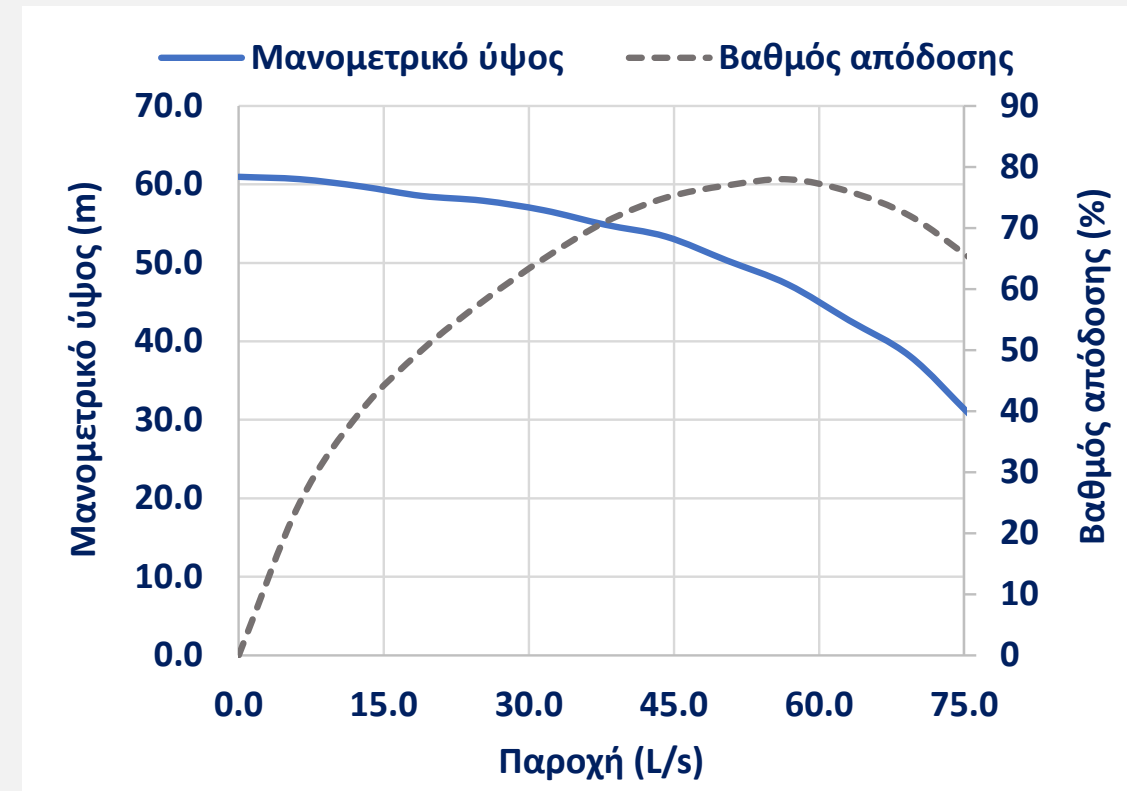
Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλιών εμπορίου

- Για δεδομένη ισχύ κινητήρα P (ονομαστική ισχύς), η ποσότητα $1 - \eta$ εκφράζει, σε αδιάστατη μορφή, τις απώλειες κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε υδραυλική, ήτοι σε μανομετρικό ύψος.
- Μια υποθετική αντλία σταθερής ισχύος P και χωρίς απώλειες, ήτοι με μοναδιαίο βαθμό απόδοσης, μπορεί να προσδώσει σε κάθε παροχή Q μανομετρικό ύψος:

$$h_m = P / (\gamma Q)$$

δηλαδή η ιδεατή σχέση $h_m = \varphi(Q)$ είναι παραβολή.

- Στην πράξη, τόσο ο βαθμός απόδοσης η όσο και η αποδιδόμενη ισχύς P μεταβάλλονται με την παροχή.
- Οι σχέσεις μανομετρικού ύψος – βαθμού απόδοσης – ισχύος – παροχής μιας **αντλίας εμπορίου** δίνονται από νομογραφήματα του κατασκευαστή, που προκύπτουν από εργαστηριακές μετρήσεις (**χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας**).



Πηγή: <https://edl.pumps.org/pump-fundamentals/pump-curves>, μετά από επεξεργασία

Σημείο λειτουργίας αντλίας

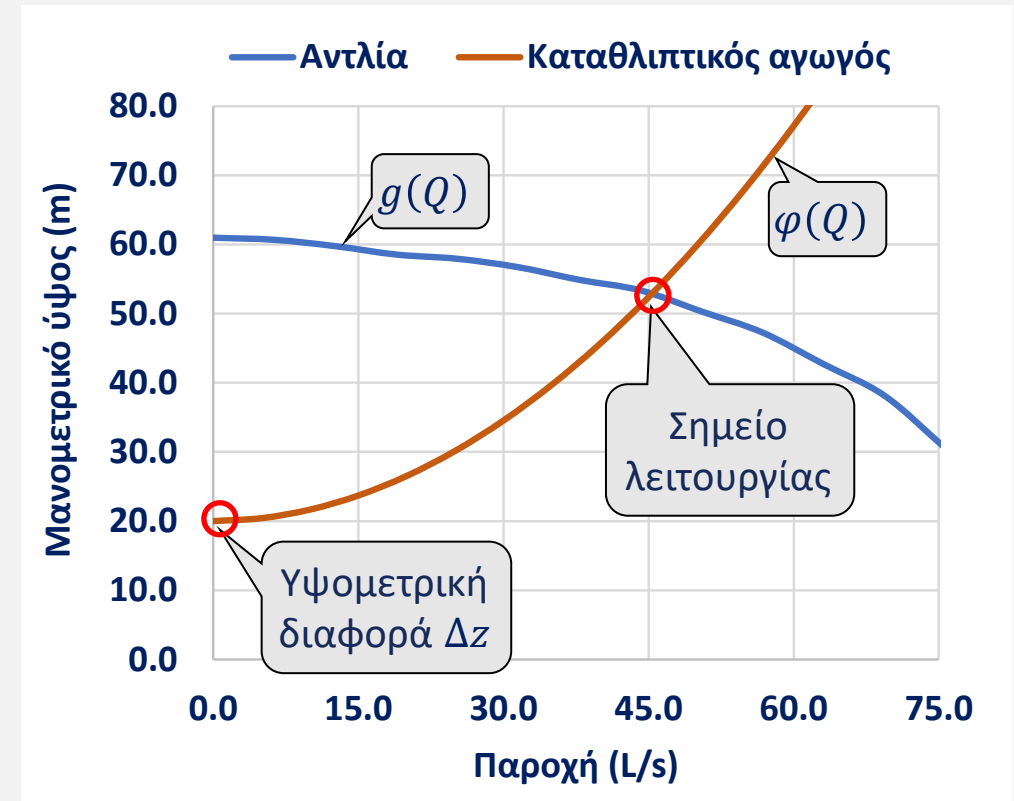
- Δεδομένα εισόδου:
 - Χαρακτηριστικά μεγέθη καταθλιπτικού αγωγού (L, D, k_s) και υψομετρική διαφορά, Δz
 - Χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας, $h_m = \varphi(Q)$, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή
- Σχέση υδραυλικής κλίσης-παροχής **καταθλιπτικού αγωγού**:

$$J(Q) = f(Q, D, k_s) \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^5}$$

- Η σχέση μανομετρικού ύψους-παροχής γράφεται:

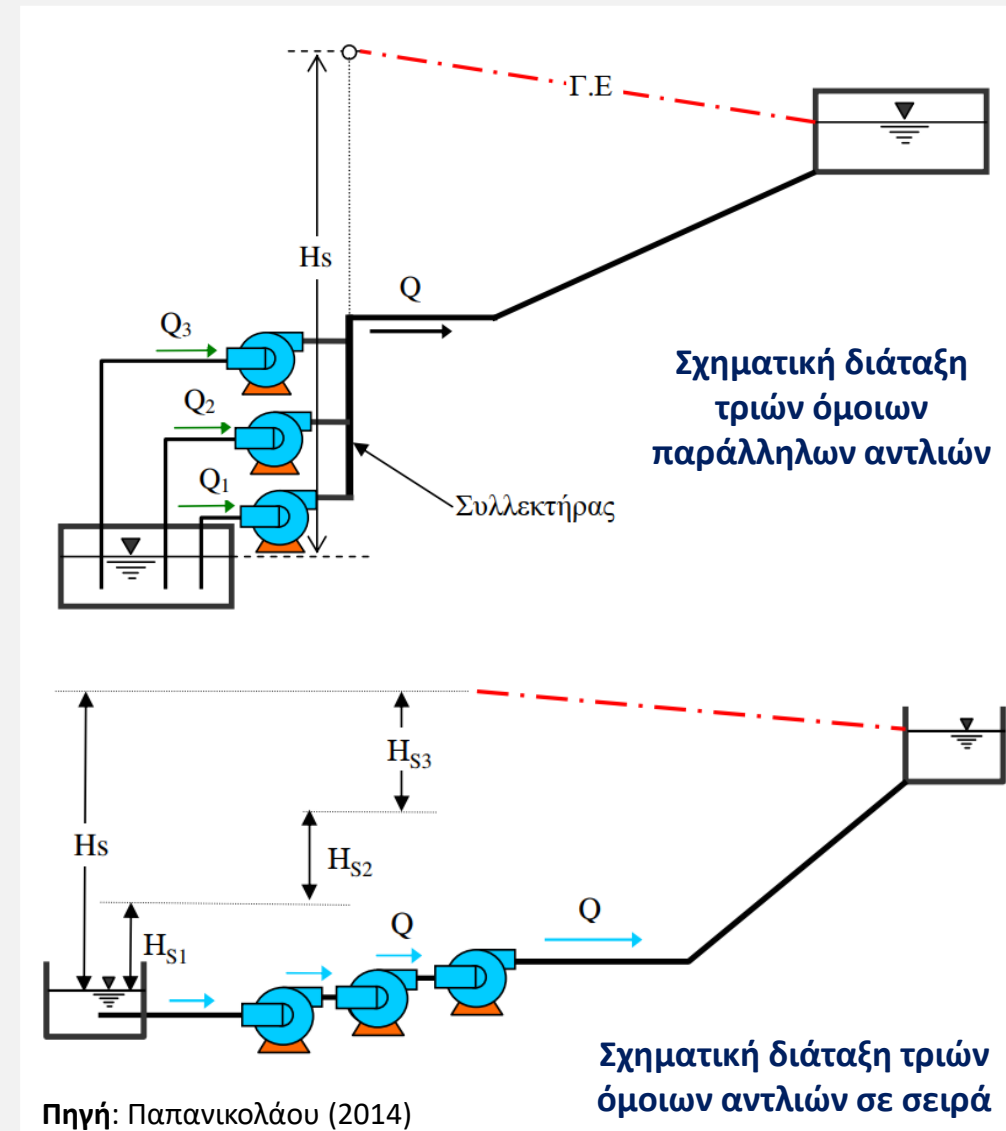
$$h_m = g(Q) = \Delta z + J(Q) L$$

- Ο συνδυασμός του μανομετρικού ύψους h_m και της παροχής Q που ορίζεται από την τομή των $\varphi(Q)$ και $g(Q)$ αποτελεί το (μοναδικό) **σημείο λειτουργίας** του συστήματος.
- Αν η ζητούμενη ποσότητα νερού που πρέπει να μεταφέρει το σύστημα είναι \mathcal{V} , τότε η αντλία θα πρέπει να λειτουργεί για χρονικό διάστημα $T_A = \mathcal{V}/Q$ (ήμερα αιχμής: $\mathcal{V} = \mathcal{V}_H$).



Συστήματα αντλιών σε παράλληλη διάταξη ή σε σειρά

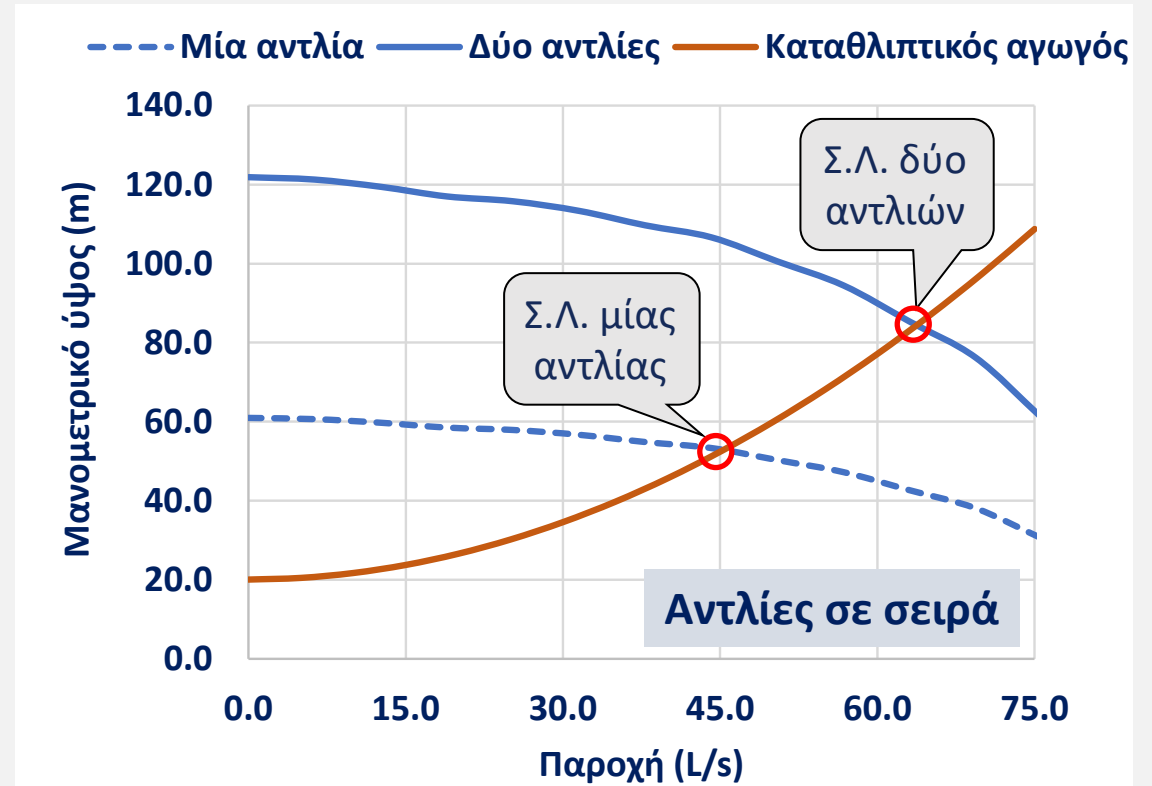
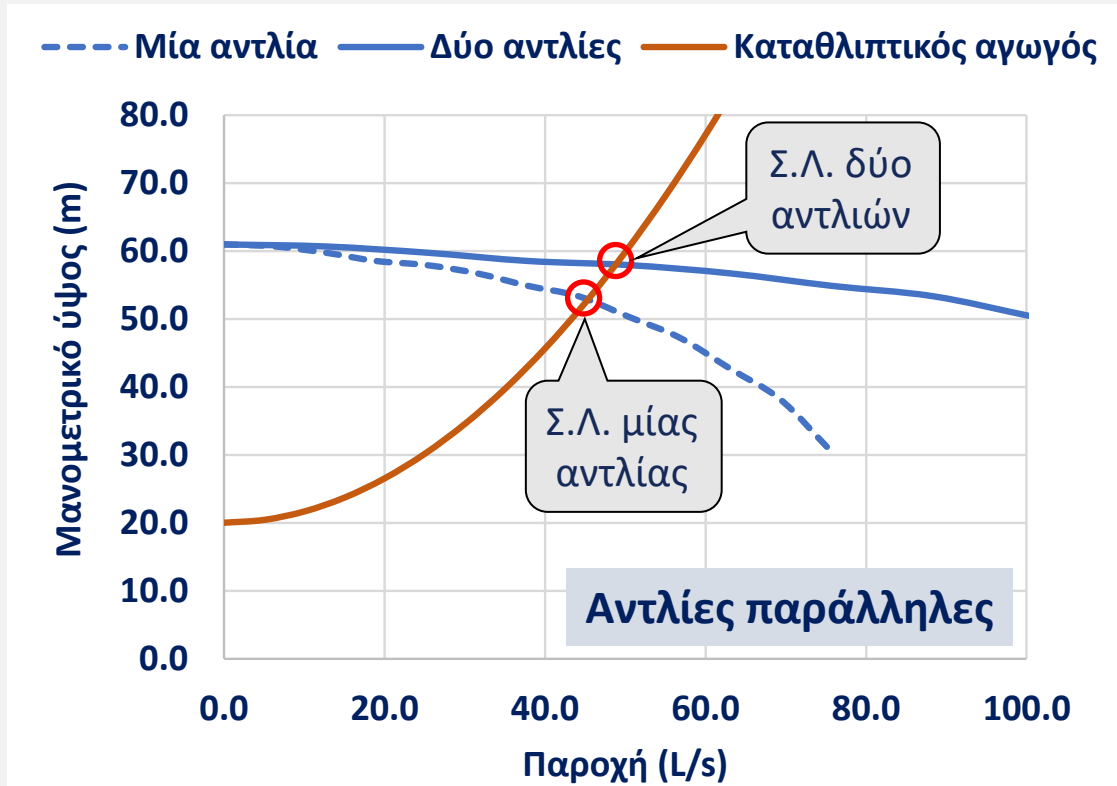
- Για μεγαλύτερη ευελιξία στη ρύθμιση της ροής, αλλά και για λόγους ασφάλειας, επιδιώκεται η διαμόρφωση συστημάτων αντλιών (κατά κανόνα όμοιων), εκ των οποίων τουλάχιστον μία **εφεδρική**. Η συνολική ισχύς των αντλιών σε λειτουργία και των εφεδρικών καλείται **εγκατεστημένη ισχύς**.
- Οι αντλίες είναι τοποθετούνται είτε σε **παράλληλη** διάταξη (συνήθης επιλογή) είτε **σε σειρά** (όταν πρέπει να καλυφθεί μεγάλη υψομετρική διαφορά).
- Οι παράλληλες αντλίες έχουν ίδιο μανομετρικό ύψος, ενώ οι παροχές τους προστίθενται, ενώ οι αντλίες σε σειρά έχουν ίδια παροχή και προστίθεται το μανομετρικό τους ύψος.
- Θέτοντας περισσότερες αντλίες σε λειτουργία, **μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας** της μεμονωμένης αντλίας, καθώς αυξάνονται τόσο η παροχή όσο και το μανομετρικό ύψος (αλλά με διαφορετικό τρόπο σε κάθε διάταξη).



Σημείο λειτουργίας παράλληλων αντλιών & αντλιών σε σειρά

- **Παράλληλες αντλίες:** για το ίδιο μανομετρικό ύψος διπλασιάζεται η παροχή → μετατόπιση καμπύλης $\varphi(Q)$ προς τα δεξιά
- **Αντλίες σε σειρά:** για την ίδια παροχή διπλασιάζεται το μανομετρικό ύψος → μετατόπιση καμπύλης $\varphi(Q)$ προς τα πάνω

Προσοχή: Η εφαρμογή διπλάσιας ισχύος (δύο όμοιες αντλίες, ισχύος P εκάστη) δεν συνεπάγεται διπλασιασμό των h_m και Q



Πρακτικά προβλήματα αντλιοστασίων & καταθλιπτικών αγωγών

- **Εκτίμηση παροχής και μανομετρικού ύψους συστήματος, για δεδομένες αντλίες εμπορίου**
 - Δεδομένα: υψομετρική διαφορά Δz , χαρακτηριστικά μεγέθη καταθλιπτικού αγωγού (μήκος L , διάμετρος D , ισοδύναμη τραχύτητα k_s), χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας, πλήθος & διάταξη αντλιών
 - Επίλυση: κατασκευάζονται η χαρακτηριστική καμπύλη του συστήματος των αντλιών, $\varphi(Q)$, και η αντίστοιχη καμπύλη του αγωγού, $g(Q)$, στην τομή των οποίων εντοπίζεται το σημείο λειτουργίας
- **Προκαταρκτική εκτίμηση εγκατεστημένης ισχύος αντλιοστασίου, για δεδομένη διάμετρο αγωγού**
 - Δεδομένα: υψομετρική διαφορά Δz , παροχή Q , χαρακτηριστικά μεγέθη καταθλιπτικού αγωγού (L , D , k_s), πλήθος αντλιών, βαθμός απόδοσης συστήματος η (χονδρική εκτίμηση)
 - Επίλυση: Υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες h_f στον αγωγό (1^ο τυπικό πρόβλημα), και εκτιμώνται το μανομετρικό ύψος $h_m = \Delta z + h_f$, η απαιτούμενη (συνολική) ισχύς των αντλιών σε λειτουργία, $P = \gamma Q h_m / \eta$, και η εγκατεστημένη ισχύς (προσμετρώντας και τις εφεδρικές αντλίες)
- **Εκτίμηση εγκατεστημένης ισχύος αντλιοστασίου & διαμέτρου αγωγού (διαστασιολόγηση συστήματος)**
 - Αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, με πολυάριθμες εφικτές τεχνικές λύσεις, από τις οποίες επιλέγεται η οικονομικότερη.

Οικονομικά μεγέθη συστήματος

- Το σύστημα αντλιοστασίου & καταθλιπτικού αγωγού περιλαμβάνει:
 - Έργα Πολιτικού Μηχανικού (αγωγοί, δικλίδες και άλλες ειδικές συσκευές, φρεάτια, κτηριακά αντλιοστασίου), με ωφέλιμη διάρκεια ζωής 40-50 έτη
 - Ηλεκτρομηχανολογικό (Η/Μ) εξοπλισμό (αντλίες, αυτοματισμοί), με διάρκεια ζωής 20-25 έτη
- Το **συνολικό κόστος** του συστήματος για όλη τη διάρκεια ωφέλιμης ζωής του (προσδιορίζεται από τη διάρκεια των έργων Π/Μ) περιλαμβάνει τις εξής κύριες συνιστώσες:
 - το αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του καταθλιπτικού αγωγού
 - το αρχικό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του Η/Μ εξοπλισμού
 - το ενδιάμεσο κόστος για την αντικατάσταση των αντλιών
 - το λειτουργικό κόστος του συστήματος (πρακτικά, αφορά στο κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος)
- Όλα τα παραπάνω εξαρτώνται από τα μεγέθη σχεδιασμού (**διάμετρος αγωγού & ισχύς αντλιοστασίου**).

Παρατήρηση: Τα οικονομικά μεγέθη του προβλήματος (κόστη) αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους → αναγωγή σε κοινή χρονική βάση με τη μέθοδο της ισοδύναμης ετήσιας δαπάνης

Βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης έργων υποδομής

- Το αρχικό κόστος, C , μιας επένδυσης (π.χ., κατασκευαστικό κόστος, αγορά υλικών και εξοπλισμού) ανάγεται σε **ισοδύναμη ετήσια δαπάνη** (equivalent annual cost) μέσω της σχέσης:

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

όπου i το επιτόκιο αναγωγής (discount rate) και n ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης.

- Το **επιτόκιο αναγωγής**, γενικά συνυπολογίζει τη μείωση της αξίας του χρήματος λόγω πληθωρισμού, το κόστος μακροπρόθεσμου δανεισμού, το κόστος ευκαιρίας της επένδυσης και το ρίσκο του επενδυτή.
- Κάθε άλλη πάγια δαπάνη ύψους F , η οποία προβλέπεται να πραγματοποιηθεί σε **μεταγενέστερο χρόνο** $m < n$ (π.χ. για αντικατάσταση εξοπλισμού), πρώτα ανάγεται σε σημερινές τιμές, μέσω της σχέσης:

$$C = F \frac{1}{(1+i)^m}$$

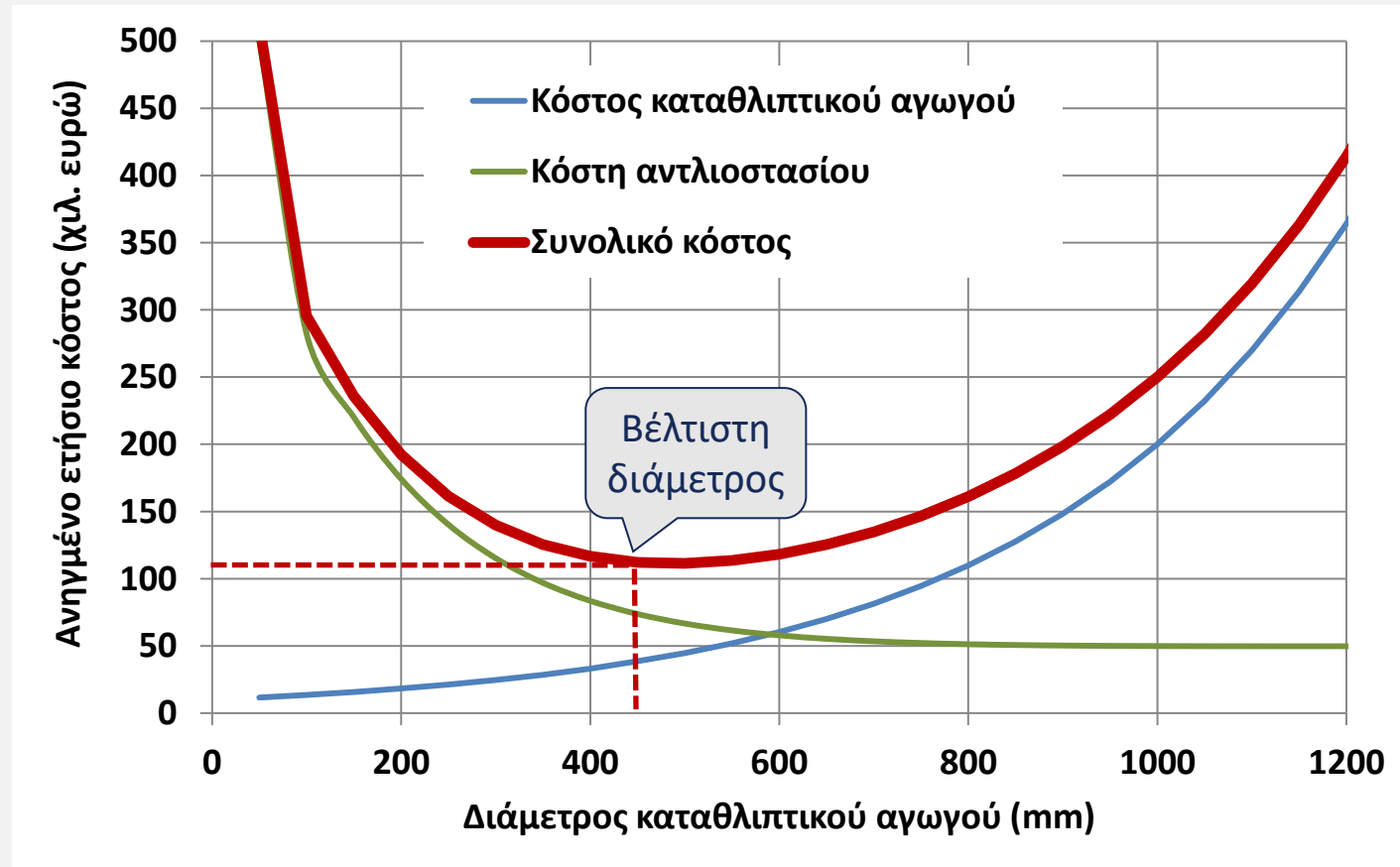
και στη συνέχεια ανάγεται σε ισοδύναμη ετήσια δαπάνη A , μέσω της προηγούμενης σχέσης.

- Στο συνολικό κόστος αθροίζονται όλα τα μεγέθη ισοδύναμων ετήσιων δαπανών, καθώς και τα κατανομημένα στο χρόνο **κόστη λειτουργίας και συντήρησης**.

Η διαστασιολόγηση αντλιών-αγωγών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης

Εναλλακτικές λύσεις προβλήματος, με **αντικρουόμενα οικονομικά μεγέθη**:

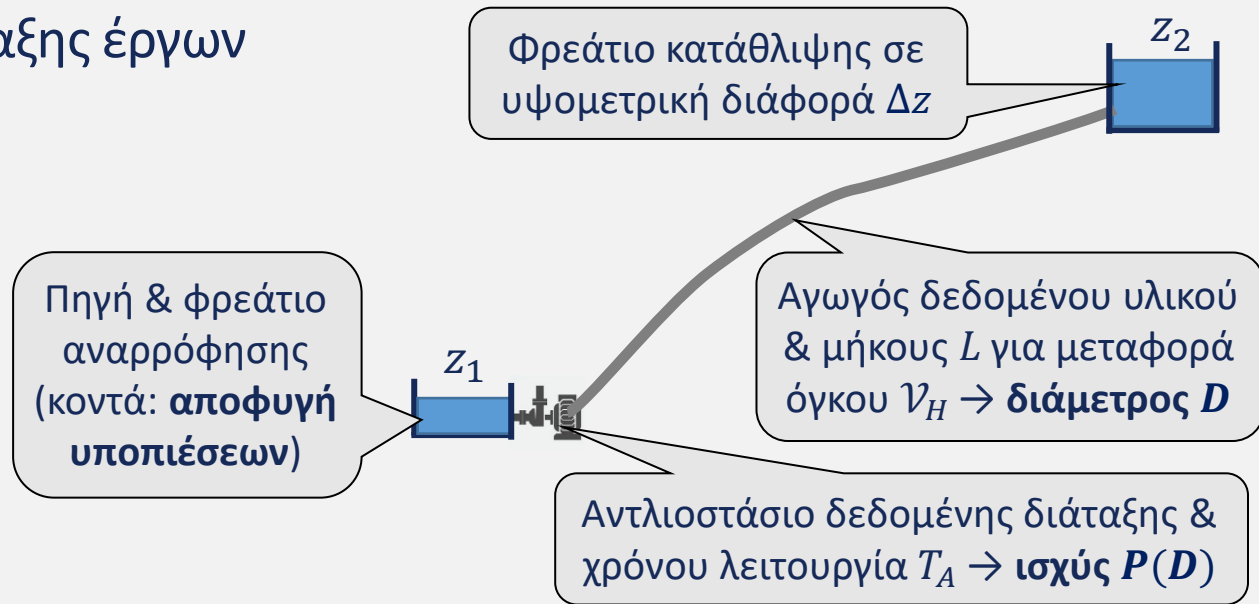
- Αγωγός μικρής διαμέτρου → μεγαλύτερες υδραυλικές απώλειες → μεγαλύτερο μανομετρικό ύψος → μεγαλύτερα κόστη αντλιοστασίου και κόστη ρεύματος έναντι μικρότερου κόστους αγωγού
- Αγωγός μεγάλης διαμέτρου → μικρότερες υδραυλικές απώλειες → μικρότερο μανομετρικό ύψος → μικρότερα κόστη αντλιοστασίου και κόστη ρεύματος έναντι μεγαλύτερου κόστους αγωγού



Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης: Διαμόρφωση μιας συνάρτησης συνολικού ετήσιου κόστους, σε όρους καθαρής παρούσας αξίας, με μοναδική μεταβλητή τη διάμετρο του καταθλιπτικού αγωγού

Τυποποίηση προβλήματος: Δεδομένα & παραδοχές

- Πρόδρομες εργασίες: Προσδιορισμός γενικής διάταξης έργων
- Δεδομένα προβλήματος:
 - υψομετρική διαφορά, Δz
 - μήκος και υλικό καταθλιπτικού αγωγού, L
 - ετήσιες υδατικές ανάγκες, \mathcal{V}_a
 - μέγιστη ημερήσια ζήτηση νερού, \mathcal{V}_H
- Παραδοχές τεχνικο-οικονομικών μεγεθών:
 - ισοδύναμη τραχύτητα αγωγού, k_s (για σχεδιασμό γενικά λαμβάνεται ίση με 1.0 mm)
 - παράλληλη διάταξη N όμοιων αντλιών (επιλέγεται διάταξη εν σειρά μόνο για πολύ μεγάλα Δz) και μία επιπλέον εφεδρικής (αν η διάταξη είναι σε σειρά, απαιτούνται περισσότερες εφεδρικές αντλίες)
 - ώρες άντλησης, T_A (την ημέρα αιχμής η άντληση γίνεται για διάστημα 16-20 ώρες)
 - χρόνοι ζωής καταθλιπτικού αγωγού ($n = 40-50$ έτη) και Η/Μ εξοπλισμού ($m = 20-25$ έτη)
 - επιτόκιο αναγωγής, i (τυπικό εύρος για έργα υποδομής: 4-6%)



Τυποποίηση προβλήματος: Υπολογισμοί σταθερών μεγεθών

- Παροχή σχεδιασμού συστήματος (= παροχή καταθλιπτικού αγωγού): $Q_A = \mathcal{V}_H / T_A$
- Παροχή κάθε αντλίας:
 - Q_A / N (σε σύστημα N όμοιων παράλληλων αντλιών η παροχή ισομοιράζεται)
 - Q_A (σε σύστημα αντλιών σε σειρά διέρχεται η συνολική παροχή)
- Βαθμός απόδοσης αντλιών:
 - Εξαρτάται από την παροχή, και γενικά είναι αύξουσα συνάρτηση αυτής
 - Στα συνήθη υδροδοτικά συστήματα κυμαίνεται από 70-80%, ενώ σε έργα μεγάλης κλίμακας (π.χ. ΥΗΕ με αντλησιοταμίευση) υπερβαίνει το 90%
 - Σε προκαταρκτικό επίπεδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κάτωθι εμπειρική σχέση, η οποία έχει παραχθεί με βάση δεδομένα από ένα μεγάλο αριθμό αντλιών εμπορίου (Κουτσογιάννης, 2007):

$$\eta = \eta_{\infty} - \left(\frac{1}{\eta_{\infty}^3} + \frac{Q}{\lambda} \right)^{-1/3}$$

όπου $\eta_{\infty} = 0.95$, $\lambda = 0.14$ L/s και Q η παροχή της μεμονωμένης αντλίας.

Τυποποίηση προβλήματος: Επαναληπτική διαδικασία ως προς D

- **Γενική διαδικασία:** Για διάφορες διαμέτρους εμπορίου (με εσωτερική διάμετρο D , ανάλογα με το υλικό του αγωγού), εκτιμώνται τα υδραυλικά και ενεργειακά μεγέθη του συστήματος και τα αντίστοιχα κόστη.
- Εκτίμηση **κλίσης γραμμής ενέργειας** κατά μήκος του καταθλιπτικού αγωγού:

$$J(D) = f(Q, D, k_s) \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^5}$$

- Εκτίμηση **μανομετρικού ύψους** (οι τοπικές απώλειες αγνοούνται):

$$h_m(D) = \Delta z + J(D) L$$

- Εκτίμηση **συνολικής απαιτούμενης ισχύος** αντλιοστασίου την ημέρα αιχμής:

$$P(D) = \gamma Q h_m(D) / \eta$$

- Εκτίμηση **εγκατεστημένης ισχύος** αντλιοστασίου, ανάλογα με τη διάταξη του συστήματος και το πλήθος των εφεδρικών αντλιών. Στην συνήθη διάταξη N **παράλληλων αντλιών σε λειτουργία και μίας όμοιας εφεδρικής**, η ισχύς κάθε αντλίας είναι $P(D)/N$, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι:

$$P_{\text{tot}}(D) = P(D)(N + 1)/N$$

Τυποποίηση προβλήματος: Εκτίμηση συνολικού ανηγμένου κόστους

- **Παραδοχές:** διάρκεια ζωής συστήματος n , χρόνος αντικατάστασης αντλιών m , επιτόκιο αναγωγής i
- Εκτιμώνται οι ακόλουθες συνιστώσες **πάγιου κόστους**, με βάση τις **τρέχουσες τιμές της αγοράς**:
 - κόστος προμήθειας και εγκατάστασης καταθλιπτικού αγωγού: $C_1 = C_1(D, L)$
 - κόστος προμήθειας και εγκατάστασης Η/Μ εξοπλισμού: $C_2 = C_2(P_{\text{tot}})$, όπου $P_{\text{tot}} = P_{\text{tot}}(D)$
 - ενδιάμεσο κόστος αντικατάστασης αντλιών μετά από m έτη: $F(P_{\text{tot}}) \approx C_2$
- Το **κόστος αντικατάστασης** των αντλιών, F , μετατρέπεται σε πάγια δαπάνη στην αρχή της οικονομικής ζωής των έργων: $C_3 = C_3(F, i, m)$
- Τα πάγια μεγέθη ανάγονται σε **ισοδύναμες ετήσιες δαπάνες**, ήτοι $A_1(C_1, i, n)$, $A_2(C_2, i, n)$, $A_3(C_3, i, n)$.
- Εκτιμάται το **ετήσιο κόστος ενέργειας**, $A_4 = A_4(D)$, θεωρώντας μια αντιπροσωπευτική τιμή ηλεκτρικού ρεύματος και την **ετήσια κατανάλωση ενέργειας**, που δίνεται από την (προσεγγιστική) σχέση:
$$E(D) = \gamma \mathcal{V}_a h_m(D) / \eta$$
- **Μονάδες:** $\gamma = 9.81 \text{ kN/m}^3$, \mathcal{V}_a σε m^3 , h_m σε $\text{m} \rightarrow E$ σε kJ (διαίρεση με 3600, για μετατροπή σε kWh)
- Το συνολικό ετήσιο ανηγμένο κόστος εκφράζεται τελικά ως **συνάρτηση της διαμέτρου**, ήτοι $A = A(D)$.

Σχεδιασμός αντλιοστασίου-καταθλιπτικού αγωγού: Τελικά σχόλια

- Στους υδραυλικούς υπολογισμούς εφαρμόζεται πάντοτε η **εσωτερική διάμετρος**, η οποία αναφέρεται σε δεδομένο υλικό και αντοχή του καταθλιπτικού αγωγού.
- Στην εκτίμηση της **ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας**, γίνεται η συντηρητική υπόθεση ότι ανυψώνεται η ετήσια ζήτηση νερού της περιοχής V_a , που αναφέρεται σε συνθήκες σχεδιασμού, σε μανομετρικό ύψος h_m , που υποθέτει λειτουργία όλων των αντλιών.
- Η σχέση $A(D)$ είναι μη γραμμική, αλλά κυρτή (έχει μοναδικό ολικό ελάχιστο).
- Επειδή οι τιμές των διαμέτρων λαμβάνονται από ένα διακριτό σύνολο (διαθέσιμες διάμετροι εμπορίου, για το επιλεχθέν υλικό), η σχέση $A(D)$ είναι στην πραγματικότητα μη συνεχής, οπότε η υπολογιστική διαδικασία απαιτεί **πεπερασμένο αριθμό δοκιμών**.
- Ως **αρχική λύση** στη διαδικασία δοκιμών μπορεί να εξεταστεί μια διάμετρος τέτοια ώστε να δίνει μια εύλογη ταχύτητα ροής (π.χ. 1.0 m/s) ή, ισοδύναμα, μια εύλογη κλίση της γραμμής ενέργειας (π.χ. 1.0%).
- Η διαδικασία εφαρμόζεται μόνο σε επίπεδο **προκαταρκτικής μελέτης**, προκειμένου να προσδιοριστεί η διάμετρος του καταθλιπτικού αγωγού (έργο Π/Μ). Τα ακριβή χαρακτηριστικά των αντλιών (καμπύλες λειτουργίας, βαθμός απόδοσης, κτλ.) θα προσδιοριστούν στην σχετική Η/Μ μελέτη.

Ολοκληρωμένη μελέτη υδροδοτικών συστημάτων

- Ποσοτικοποίηση ζήτησης νερού για διάφορες χρήσεις
- Καθορισμός πηγών νερού
- Ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού ανά πηγή
- Καθορισμός της μορφής επεξεργασίας του νερού
- Καθορισμός βασικών μεγεθών σχεδιασμού (παροχές και όγκοι)
- Γενική διάταξη έργων υδροληψίας
- Γενική διάταξη έργων επεξεργασίας και αναρρύθμισης (δεξαμενές)
- Γενική διάταξη έργων εξωτερικού υδραγωγείου
- Γενική διάταξη δικτύου διανομής
- Λεπτομερής διαστασιολόγηση και υδραυλικοί έλεγχοι όλων των έργων, για διάφορα σενάρια ζήτησης
- Επιλογή υλικών (σωληνώσεις, Η/Μ εξοπλισμός)
- Οικονομοτεχνική ανάλυση (για αγορά εξοπλισμού και κατασκευή έργων)
- Διαμόρφωση λεπτομερών κατασκευαστικών σχεδίων