

Υδραυλική & Υδραυλικά Έργα
5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

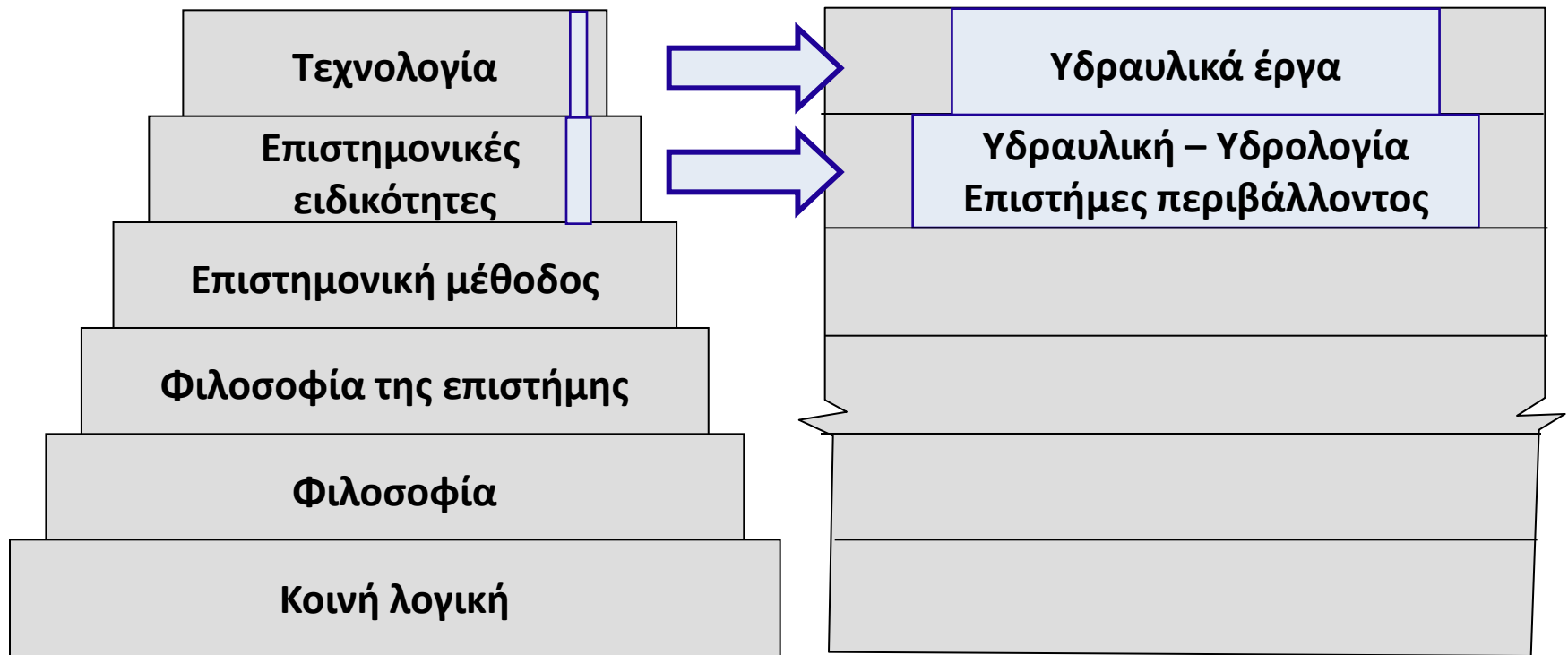
**Αρχές σχεδιασμού έργων υδροληψίας,
μεταφοράς και διανομής νερού**

Δημήτρης Κουτσογιάννης & Ανδρέας Ευστρατιάδης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, 2019

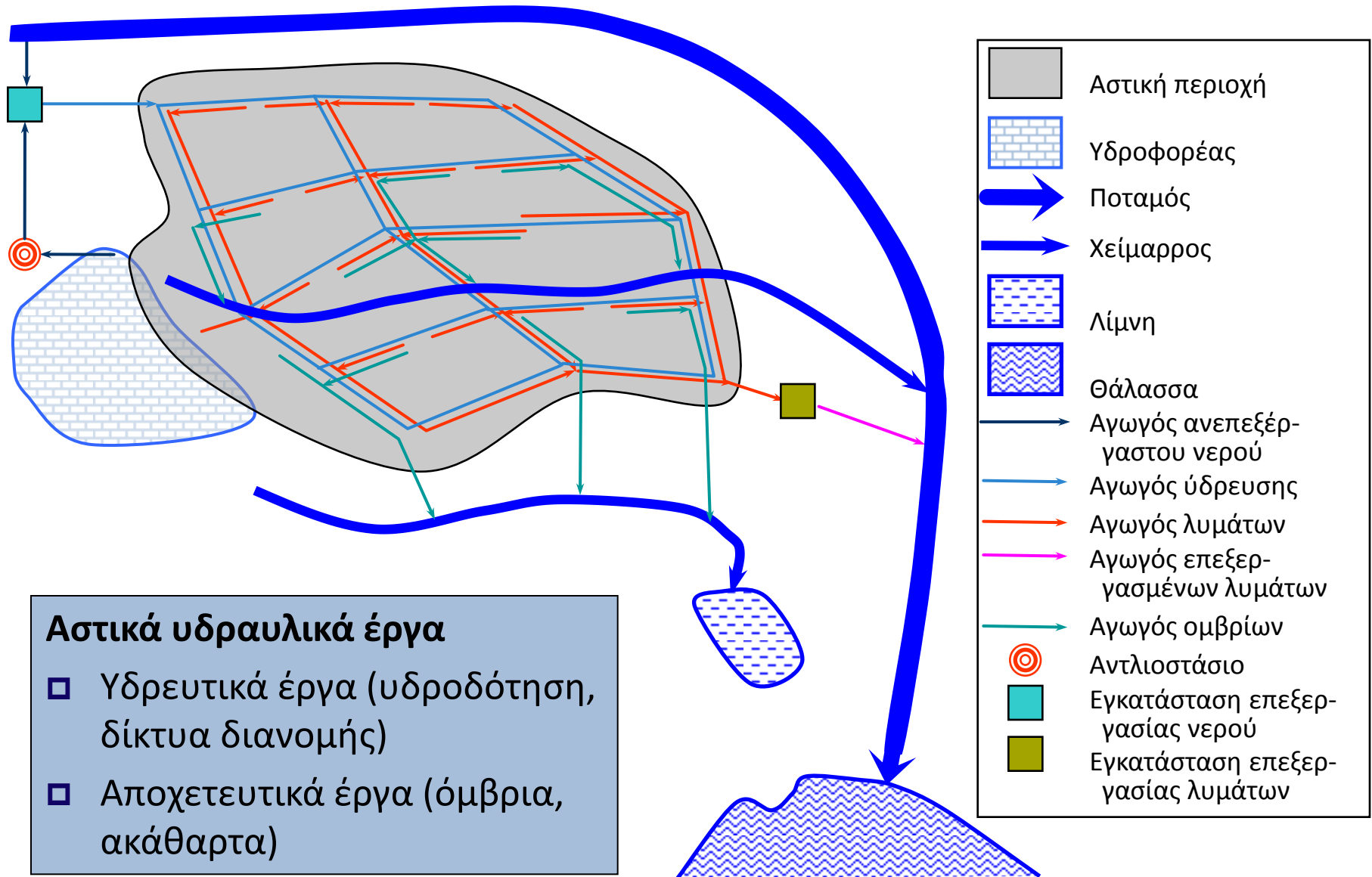
Τα υδραυλικά έργα στο γενικό επιστημονικό και τεχνολογικό πλαίσιο



Το επιστημονικο-τεχνολογικό οικοδόμημα

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

Αστικά υδροσυστήματα – αστικά υδραυλικά έργα



Αρδευτικά υδросυστήματα – εγγειο-βελτιωτικά & 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 (απαιτούμενη πίεση 30-80 m)
 - **Στάγδην** άρδευση → αγωγοί χαμηλής πίεσης (απαιτούμενη πίεση <20 m)

□ Αποστραγγιστικά έργα

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



Υδατικοί πόροι και συναφή έργα αξιοποίησης

- ❑ Όμβρια νερά (στέρνες)
- ❑ Πηγαία νερά (υδρομάστευση)
- ❑ Ρηχά υπόγεια νερά (πηγάδια)
- ❑ Βαθειά υπόγεια νερά (γεωτρήσεις)
- ❑ Νερά ποταμών χωρίς ρύθμιση (υδροληψία)
- ❑ Επιφανειακά νερά με ρύθμιση/αποθήκευση
 - Ετήσιας ή υπερετήσιας ρύθμισης (μεγάλα έργα – ταμιευτήρες)
 - Εποχιακής ρύθμισης (μικρά έργα, π.χ. λιμνοδεξαμενές)
- ❑ Φυσικές λίμνες (υδροληψία)
- ❑ Θάλασσα (αφαλάτωση)
- ❑ Επαναχρησιμοποίηση λυμάτων (για άρδευση)

Κριτήρια επιλογής υδατικών πόρων προς αξιοποίηση

- ❑ Διαθεσιμότητα νερού – ποσότητα – αξιοπιστία
- ❑ Ποιότητα νερού
- ❑ Περιβάλλον – επιπτώσεις
- ❑ Οικονομικότητα (αρχική επένδυση έργων υποδομής, λειτουργικό κόστος για μεταφορά και επεξεργασία νερού)

Ελληνικές πόλεις με ολική ή μερική υδροδότηση από επιφανειακά νερά μετά από ρύθμιση

Πόλη	Λεκάνη τροφοδοσίας/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 Αγίου Δημητρίου στον Εύηνο	Λειτουργεί μερικώς από τη δεκαετία του 1990 και πλήρως από τη δεκαετία του 2000
Θεσσαλονίκη	Αλιάκμονας κατάντη φράγματος 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 στη θέση Βαλμαδούρα του π. Πείρου	Υπό κατασκευή
Ηράκλειο	Φράγμα Αποσελέμη και σήραγγα εκτροπής οροπεδίου Λασιθίου	Λειτουργεί από το 2016 (χωρίς την εκτροπή)
Ρόδος	Φράγμα Γαδουρά	Λειτουργεί μερικώς από το 2015

Γενική διάταξη υδροδοτικών έργων

- Σκοπός των έργων υδροδότησης είναι η εξασφάλιση του απαιτούμενου νερού, σε **επαρκή ποσότητα** και **κατάλληλη ποιότητα**, και η μεταφορά και διανομή του με **υψηλή αξιοπιστία** για την εξυπηρέτηση των υδατικών αναγκών της περιοχής μελέτης.
- Δεν υπάρχει μοναδική «συνταγή» για το είδος και τη γενική διάταξη των υδροδοτικών έργων (έργα ύδρευσης, αρδευτικά έργα). Ωστόσο, στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα έργα μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες:
 - **Έργα εξωτερικού υδραγωγείου**: περιλαμβάνουν τα έργα συλλογής του νερού στις πηγές (υδατικοί πόροι), μεταφοράς του στις παρυφές της υδροδοτούμενης περιοχής, τις μονάδες επεξεργασίας (για υδρευτικά έργα) και τις δεξαμενές.
 - **Δίκτυα διανομής**: συστήματα αγωγών υπό πίεση που διανέμουν το νερό από τις δεξαμενές σε πολλαπλά σημεία προορισμού (καταναλωτές).
- Τα έργα εξωτερικού υδραγωγείου παρουσιάζουν τεράστια ποικιλία ως προς τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά (γενική διάταξη, συνιστώσες, Η/Μ εξοπλισμός, υλικά), αλλά και την υδραυλική τους (ροή με ελεύθερη επιφάνεια ή – συνηθέστερα – υπό πίεση).
- Αντίθετα, τα δίκτυα διανομής αποτελούν πάντα πλέγματα αγωγών που λειτουργούν υπό πίεση (με εξαίρεση τα δίκτυα επιφανειακής άρδευσης).
- Τα εξωτερικά υδραγωγεία σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν με **σταθερή παροχή** (συνεχή στο 24ωρο ή διακοπτόμενη), ενώ η παροχή των έργων διανομής είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Η εξισορρόπηση της χρονικής ανομοιομορφίας εισροών και εκροών γίνεται με την παρεμβολή κατάλληλου **ρυθμιστικού έργου** (δεξαμενή).

Παροχές σχεδιασμού

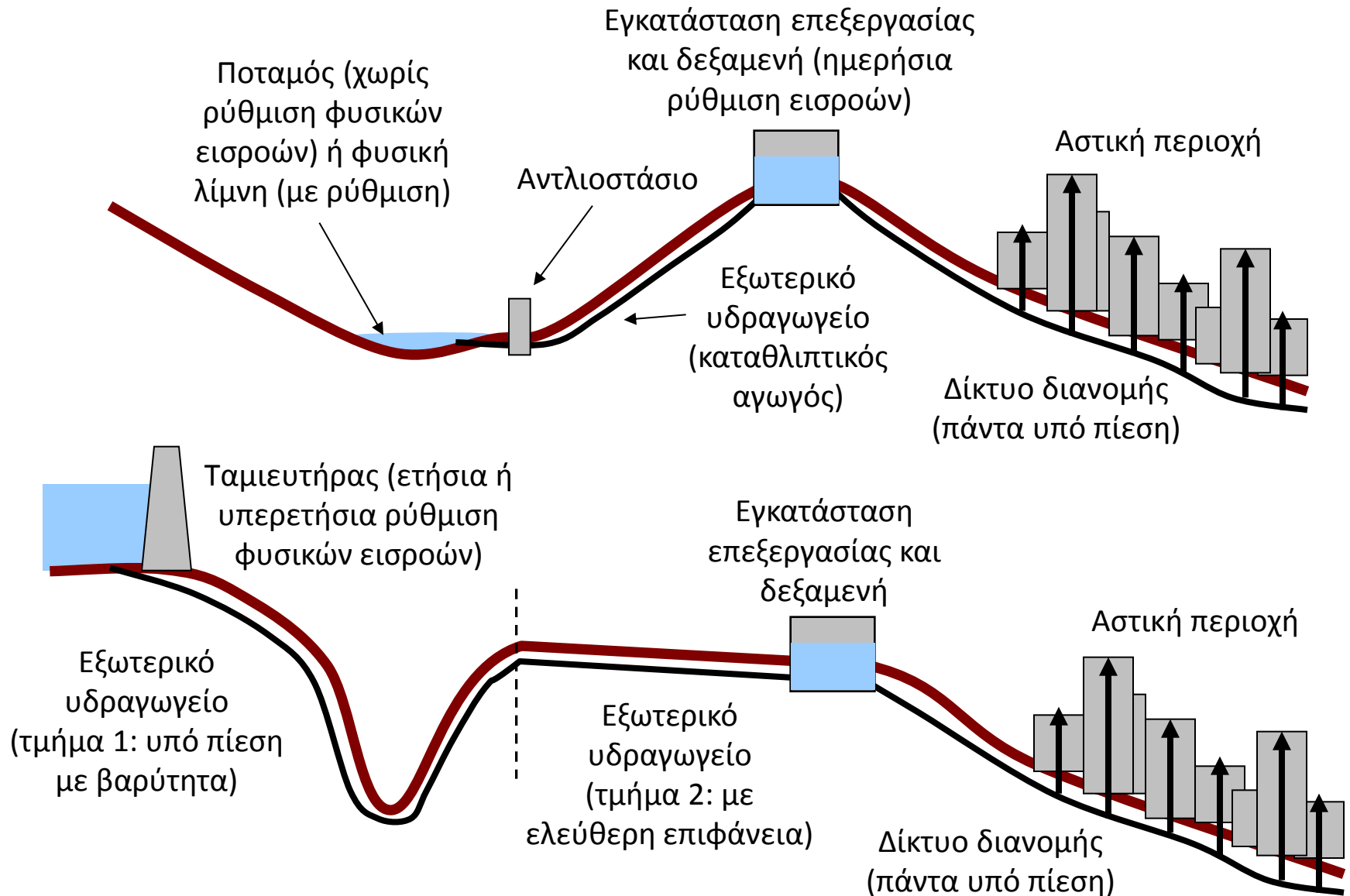
- Στην τυπική περίπτωση που το εξωτερικό υδραγωγείο καταλήγει σε δεξαμενή, ο σχεδιασμός του γίνεται με βάση τις υδατικές ανάγκες της **ημέρας αιχμής**, στην οποία προσμετρώνται και οι απώλειες κατά τη μεταφορά και διανομή του νερού.
- Αν V_H η συνολική ζήτηση της ημέρας αιχμής, η **παροχή σχεδιασμού** είναι ίση με:

$$Q_A = V_H / T_A$$

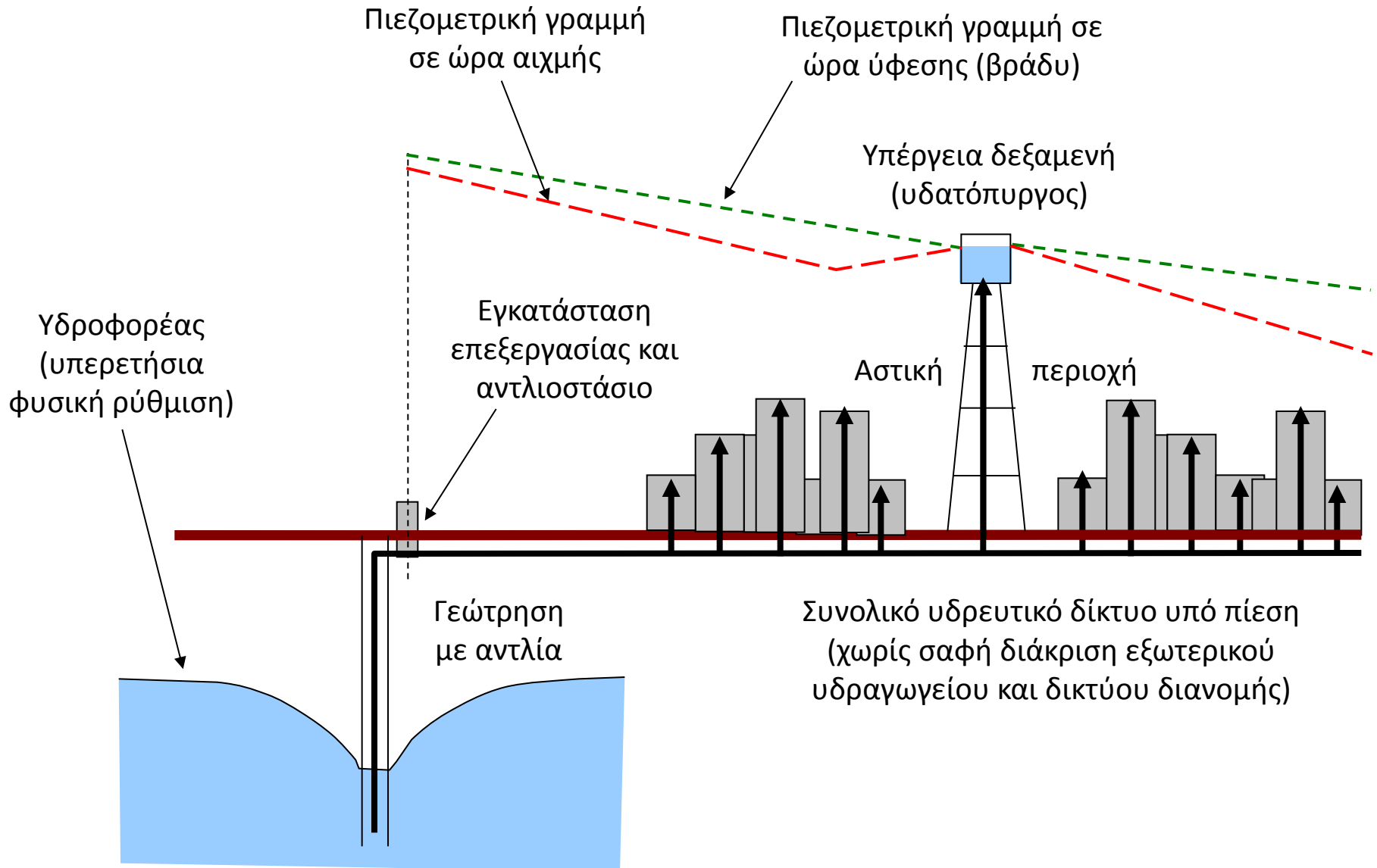
όπου T_A ο χρόνος λειτουργίας του υδραγωγείου.

- Γενικά, τα υδραγωγεία **βαρύτητας** σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν 24 ώρες την ημέρα αιχμής (συνεπώς σχεδιάζονται με τη **μέγιστη ημερήσια παροχή**), ενώ όταν η μεταφορά του νερού απαιτεί **άντληση** σχεδιάζονται για μικρότερη διάρκεια λειτουργίας (συνήθως 16-20 ώρες), ώστε να συντηρούνται τα αντλιοστάσια.
- Τα **έργα διανομής** κατάντη της δεξαμενής σχεδιάζονται με παροχή μεγαλύτερη από αυτή του εξωτερικού υδραγωγείου.
- Ειδικά, τα **δίκτυα διανομής υδρευτικού νερού** σχεδιάζονται με τη **μέγιστη ωριαία παροχή**, που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη ώρα της ημέρας αιχμής, στην οποία προστίθεται μια **παροχή έκτακτης λειτουργίας** για το ενδεχόμενο πυρκαγιάς, υποθέτοντας ενεργοποίηση ενός μικρού αριθμού πυροσβεστικών κρουνών στο δίκτυο (συνήθως δύο ή τρεις).
- Στα **αρδευτικά δίκτυα**, η παροχή σχεδιασμού είναι πιθανοτικό μέγεθος, καθώς ακόμα και σε συνθήκες αιχμής δεν αρδεύεται ταυτόχρονα όλη η περιοχή.

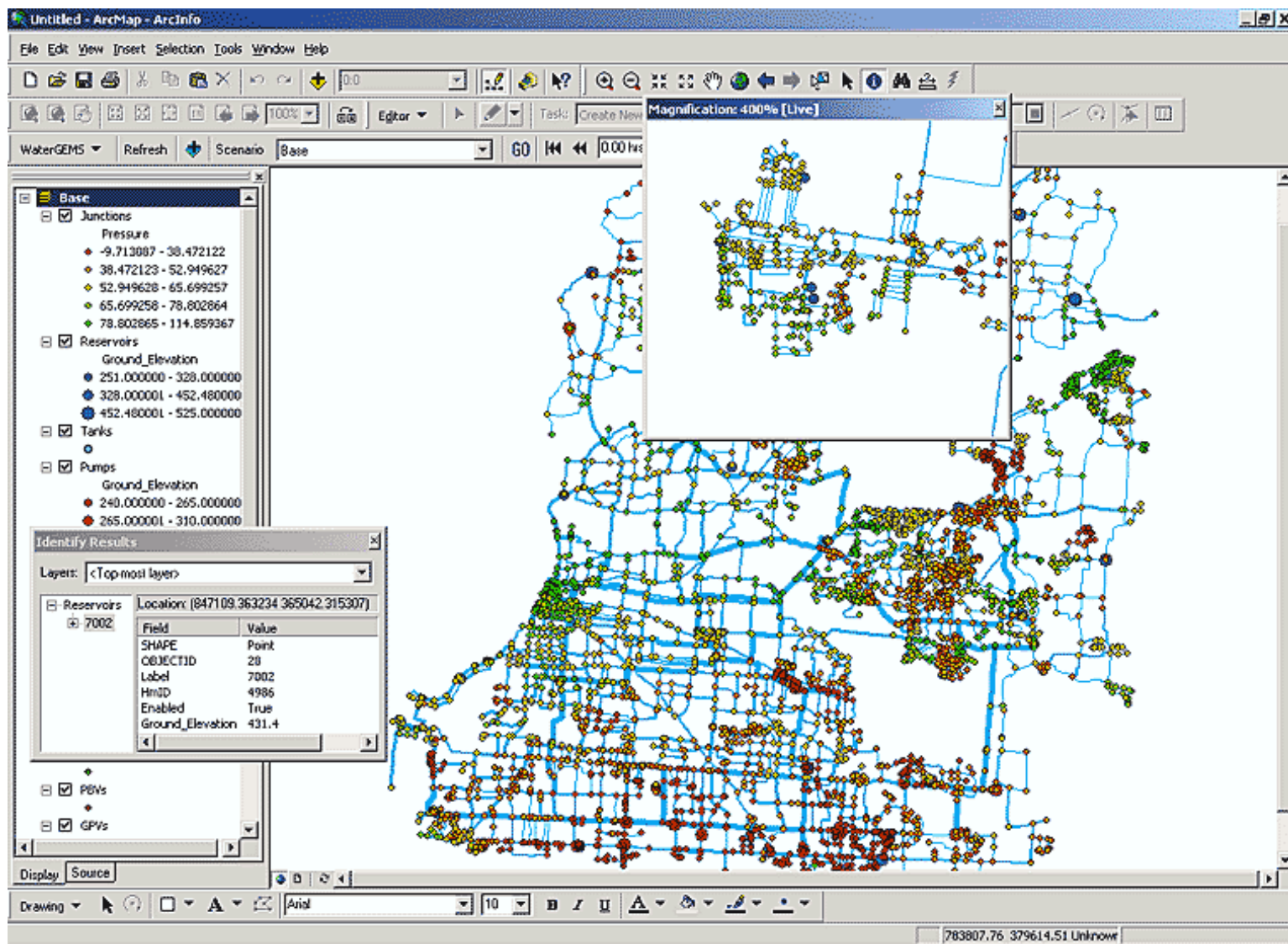
Τυπικές διατάξεις υδρευτικών έργων



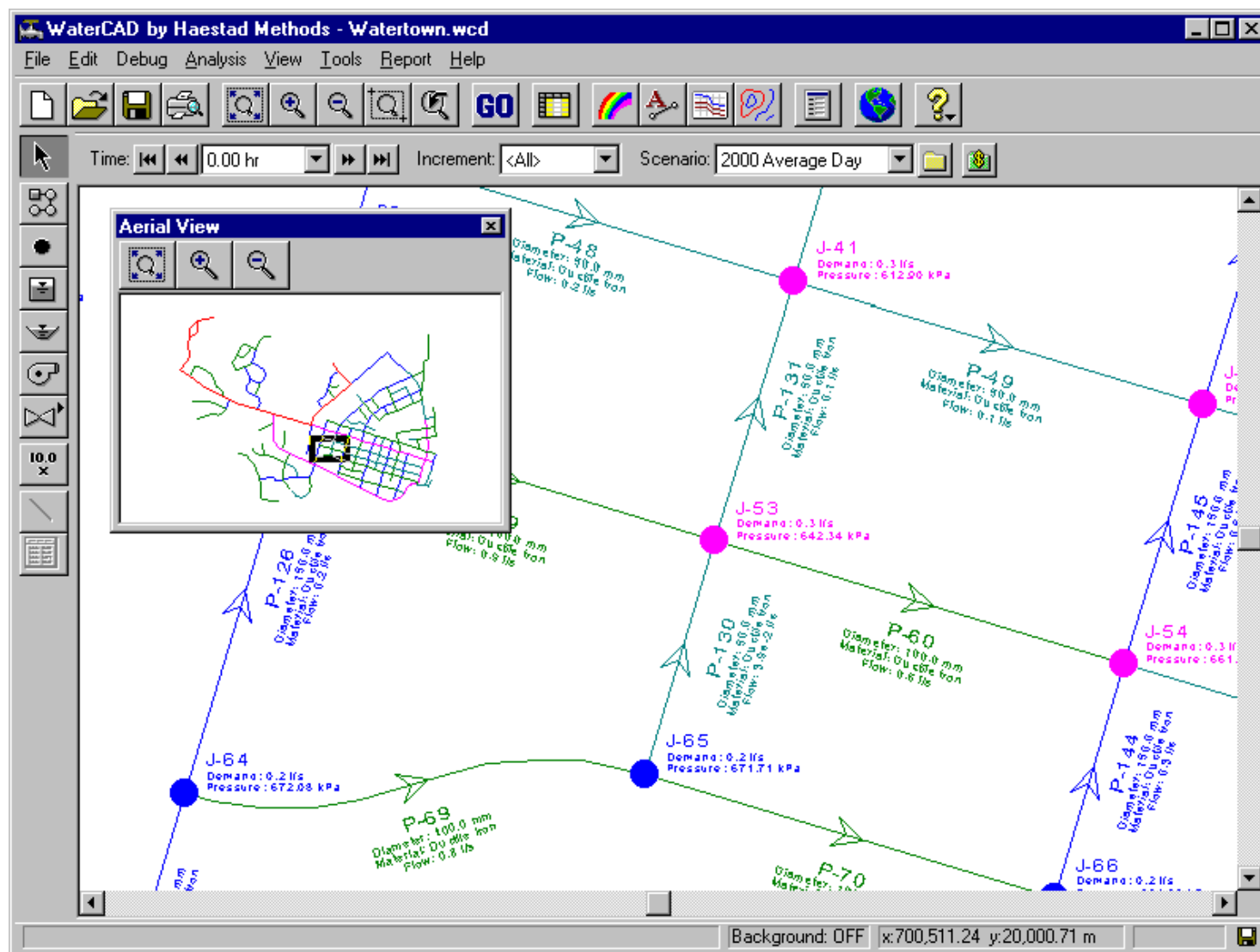
Μη τυπική διάταξη υδρευτικών έργων (επίπεδη πόλη)



Δίκτυο διανομής: Φυσική απεικόνιση

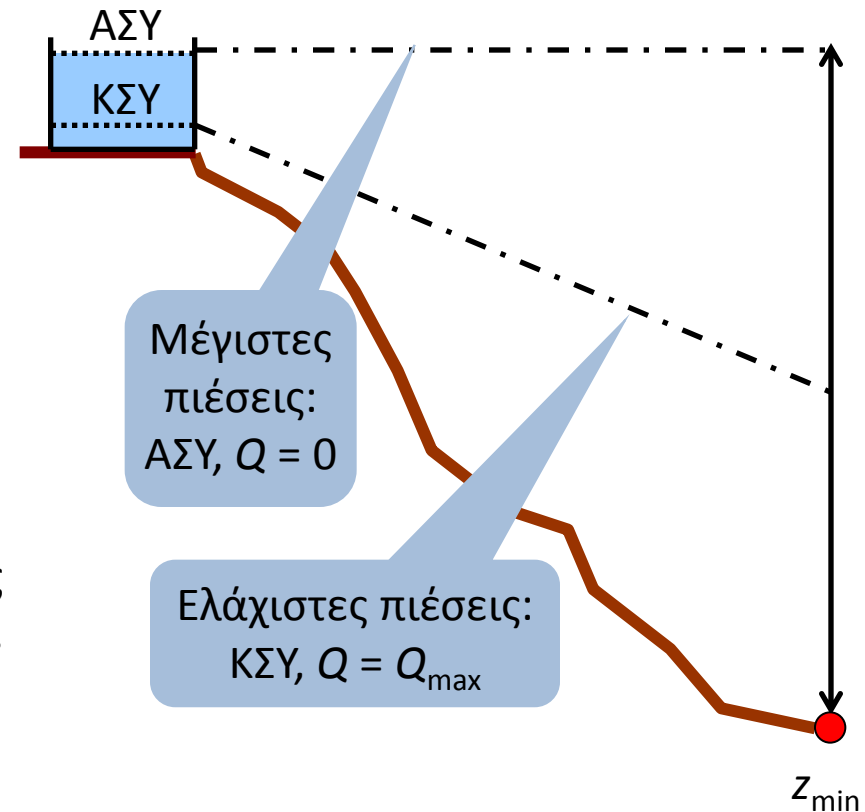


Δίκτυο διανομής: Μαθηματική αναπαράσταση

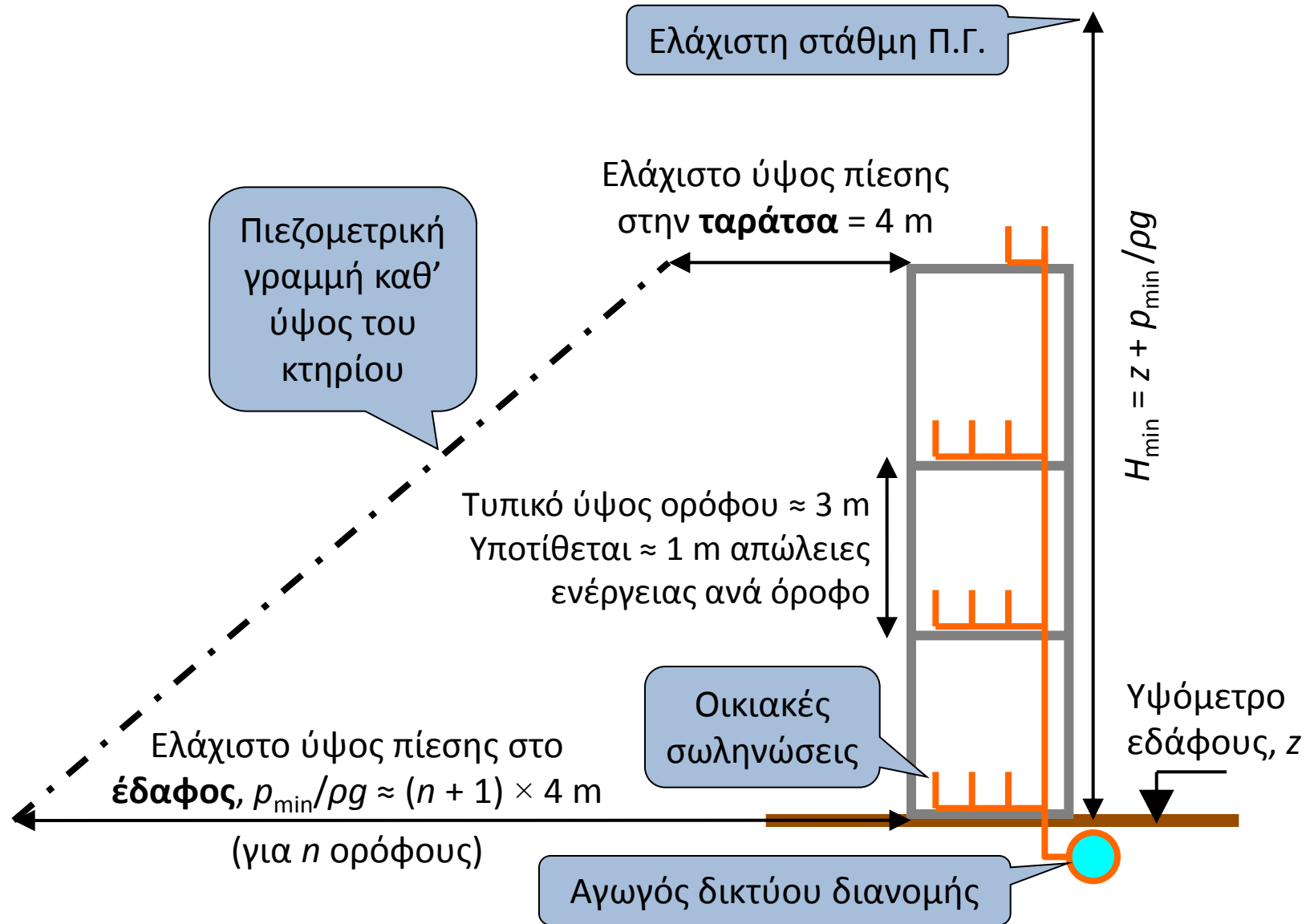


Κύριες λειτουργικές απαιτήσεις στο δίκτυο

- Η μέγιστη πίεση στο δίκτυο διανομής, που αντιστοιχεί σε **μηδενική φόρτιση** (οριζόντια πιεζομετρική γραμμή) και στην **ανώτατη στάθμη ύδατος (ΑΣΥ)** στη δεξαμενή, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60-70 m, ώστε να αποφευχθούν βλάβες στις εσωτερικές υδραυλικές εγκαταστάσεις των κτηρίων.
- Η ελάχιστη πίεση, που αντιστοιχεί στη **μέγιστη παροχή** στο δίκτυο και στην **κατώτατη στάθμη ύδατος (ΚΣΥ)** στη δεξαμενή, δεν πρέπει σε κανένα σημείο ενός τυπικού κτηρίου να είναι μικρότερη των 4 m.
- Τα δύο αυτά κριτήρια καθορίζουν την **υψομετρική τοποθέτηση της δεξαμενής**.
- Σε δίκτυα με σημαντικές νυχτερινές καταναλώσεις, γίνεται δεκτό υψηλότερο όριο μέγιστης πίεσης (π.χ. 120 m στο δίκτυο της ΕΥΔΑΠ).
- Στην περίπτωση οικισμών με μεγάλες υψομετρικές διαφορές, μπορεί να μη συναληθεύουν τα δύο κριτήρια, οπότε γίνεται χωρισμός του δικτύου σε υδραυλικά ανεξάρτητες **πιεζομετρικές ζώνες** (περισσότερες από μία δεξαμενές ή φρεάτια).



Διευκρίνιση για την ελάχιστη πίεση



Τεχνολογία αγωγών συστημάτων υδροδότησης

- Στα υδροδοτικά έργα χρησιμοποιούνται **αγωγοί εμπορίου**, που διατίθενται σε διάφορα υλικά, διαμέτρους και κλάσεις (ονομαστική αντοχή σε πίεση, βλ. παράρτημα)
- Γενικά, ισχύουν τα κάτωθι όρια:
 - Μικρότερη επιτρεπτή κλάση: 10 atm
 - Μικρότερη επιτρεπτή διάμετρος: 90-100 mm
- Συνήθως, για μικρές διαμέτρους (ενδεικτικά, μέχρι 400 mm) προτιμώνται οι πλαστικοί αγωγοί, ενώ για μεγαλύτερες οι χαλύβδινοι.
- Οι **πλαστικοί αγωγοί** είναι είτε από **PVC** (παλαιότερη τεχνολογία, άκαμπτοι σωλήνες), ενώ οι νέας γενιάς σωλήνες είναι από **HDPE**, που έχουν πολλά κατασκευαστικά πλεονεκτήματα (μικρό βάρος, ευκαμψία, ευκολία τοποθέτησης σε στροφές).
- Οι **χαλύβδινοι αγωγοί** αντέχουν, ανάλογα με το πάχος τους, οποιαδήποτε πίεση.
- Παλαιότερα, είχαν τύχει ευρείας εφαρμογής οι **αμιαντοτσιμεντοσωλήνες**, που ωστόσο σταδιακά αντικαθίστανται για λόγους υγιεινής.
- Οι υδραυλικοί υπολογισμοί γίνονται πάντοτε με την **εσωτερική διάμετρο** και εφαρμόζοντας τη λεγόμενη **ισοδύναμη τραχύτητα**, στην οποία λαμβάνονται υπόψη η γήρανση των αγωγών, οι επικαθήσεις αλάτων και οι τοπικές απώλειες.
- Εξαίρεση: δικλίδες και έργα καταστροφής ενέργειας, όπου οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται αναλυτικά.

Τραχύτητα σχεδιασμού

- Δεδομένου ότι τα υδροδοτικά έργα σχεδιάζονται με χρονικό ορίζοντα 40 ετών, οι τιμές εφαρμογής των συντελεστών τραχύτητας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη **γήρανση των αγωγών**.
- Κατά κανόνα, οι τιμές της τραχύτητας λαμβάνονται προσαυξημένες (**ισοδύναμη τραχύτητα**), ώστε στους υδραυλικούς υπολογισμούς να συμπεριληφθούν και οι τοπικές απώλειες.
- Η ελάχιστη αποδεκτή ισοδύναμη τραχύτητα, με την προϋπόθεση νερού που δεν προκαλεί διάβρωση ή επικαθήσεις αλάτων, λαμβάνεται ίση με $\varepsilon = 0.1 \text{ mm}$.
- Σε μελέτες σχεδιασμού, δεδομένου ότι αναμένονται φαινόμενα **διάβρωσης ή επικαθήσεων αλάτων**, συστήνεται η εφαρμογή ισοδύναμης τραχύτητας $\varepsilon = 1.0$ έως 2.0 mm (η χαμηλή τιμή για πλαστικούς αγωγούς).

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

Υλικό	ε (mm)
Ορείχαλκος, χαλκός	0.0015
Χάλυβας εμπορίου ή σφυρήλατος σίδηρος	0.045
Χυτοσίδηρος με ασφατική 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

Ειδικές συσκευές υδροδοτικών έργων

- ❑ **Πιεζοθραυστικά φρεάτια:** Έργα αμελητέας ρυθμιστικής ικανότητας, που δημιουργούν συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας ώστε να καταστήσουν την πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Τοποθετούνται σε κρίσιμα σημεία της μηκοτομής (π.χ. σε ψηλά σημεία, για την αποφυγή υποπίεσεων) και στα όρια μεταξύ πιεζομετρικών ζωνών.
- ❑ **Δικλίδες (βάνες):** Επιτυγχάνουν τον έλεγχο αγωγών και δικτύων με σκοπό την απομόνωσή τους, για λόγους συντήρησης ή ρύθμισης της παροχής. Συνήθως είναι χυτοσιδηρές, και διατίθενται σε διάφορους τύπους, ανάλογα και με τη διάμετρο του αγωγού (πεταλούδας, συρταρωτές, κυλινδρικές).
- ❑ **Βαλβίδες αντεπιστροφής:** Εγκαθίστανται κυρίως σε καταθλιπτικούς αγωγούς, ώστε να εξασφαλίσουν ότι η ροή γίνεται μόνο προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.
- ❑ **Εκκενωτές:** Σύστημα τριών δικλίδων μορφής «T», τοποθετούνται σε χαμηλά σημεία του δικτύου, και επιτρέπουν την ελεύθερη εκροή προς ένα φυσικό αποδέκτη, για έκπλυση του δικτύου και απομάκρυνση των φερτών.
- ❑ **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 την αποσυμπίεση του δικτύου.
- ❑ **Μειωτές πίεσης:** Ειδικές αυτόματες βαλβίδες που εξασφαλίζουν σταθερή πίεση εξόδου P_0 , αν η ανάντη πίεση P_α είναι μεγαλύτερη από την P_0 , ενώ σε περίπτωση αντιστροφής της ροής λειτουργούν ως βαλβίδες αντεπιστροφής.

Τυπική διαδικασία για τον πλήρη σχεδιασμό ενός υδροδοτικού συστήματος

- ❑ Ποσοτικοποίηση της ζήτησης νερού
- ❑ Καθορισμός των πηγών νερού
- ❑ Ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού ανά πηγή
- ❑ Καθορισμός της μορφής επεξεργασίας του νερού
- ❑ Καθορισμός βασικών μεγεθών σχεδιασμού (παροχές και όγκοι)
- ❑ Χωροθέτηση των έργων υδροληψίας
- ❑ Χωροθέτηση των έργων επεξεργασίας και των δεξαμενών
- ❑ Χωροθέτηση των έργων εξωτερικού υδραγωγείου
- ❑ Χωροθέτηση του δικτύου διανομής
- ❑ Επιλογή υλικών (σωληνώσεις, Η/Μ εξοπλισμός)
- ❑ Λεπτομερής διαστασιολόγηση και υδραυλικός έλεγχος του συνόλου των έργων, για διάφορα σενάρια καταναλώσεων
- ❑ Οικονομοτεχνική ανάλυση (για αγορά εξοπλισμού και κατασκευή έργων)
- ❑ Διαμόρφωση λεπτομερών κατασκευαστικών σχεδίων

Παράρτημα 1: Εσωτερικές διάμετροι αγωγών 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			

Παράρτημα 2: Εσωτερικές διαμέτροι αγωγών 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	

Λοιποί σωλήνες ύδρευσης:

- Στους σωλήνες από χάλυβα και αμιαντοτσιμέντο η ονομαστική διάμετρος ταυτίζεται με την εσωτερική.
- Αγωγοί από χάλυβα διατίθενται σε διαμέτρους 100-2000 mm, με διαβαθμίσεις ανά 50 mm μέχρι τη διάμετρο των 400 mm, και ανά 100 mm για τις μεγαλύτερες.
- 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.