

Ημερίδα

**Η έρευνα των αρχαίων συστημάτων ύδρευσης του Πειραιά
στο πλαίσιο των έργων του ΜΕΤΡΟ.**

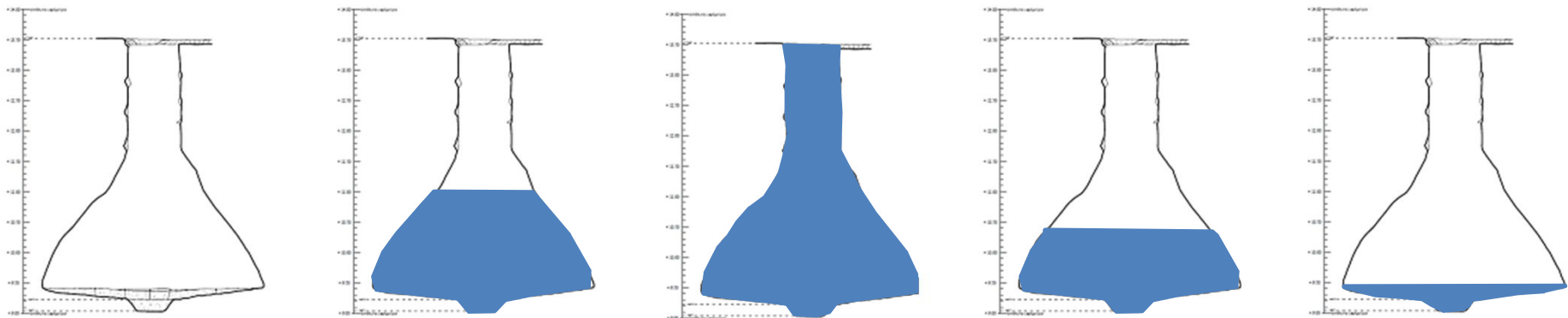
Μια πρώτη θεώρηση.

Αθήνα 15 Μαΐου 2015

Συνδιοργάνωση

Εφορεία Αρχαιοτήτων Δυτικής Αττικής, Πειραιώς και Νήσων
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Αναπαράσταση λειτουργίας των δεξαμενών συλλογής ομβρίων



Ν. Μαμάσης, Π. Δευτεραίος, Ν. Ζαρκαδούλας και Δ. Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος,
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αναπαράσταση λειτουργίας αρχαίων έργων ύδρευσης Πειραιά

Κύρια αντικείμενα προς διερεύνηση

Δυνατότητα απόληψης από όμβρια ύδατα μέσω της αποθήκευσης τους στις υπόγειες δεξαμενές

Κατάρτιση ημερησίου υδρολογικού μοντέλου που για διαφορετικά σεναρία:

- ζήτησης νερού
- όγκου δεξαμενής
- επιφάνειας τροφοδοσίας

Εκτιμά:

- εισροή ομβρίων υδάτων
- απόθεμα
- υπερχείλιση
- αστοχία κάλυψης της ζήτησης

Υδραυλική λειτουργία των έργων

Διερεύνηση της λειτουργίας:

- των επεκτάσεων των δεξαμενών και των έργων επικοινωνίας με τα πηγάδια
- των ιδιαίτερων υδραυλικών κατασκευών

Ποιότητα νερού

- καθαρισμός νερού στις δεξαμενές
- πιθανότητα υφαλμύρισης

Δυνατότητα απόληψης από υπόγεια ύδατα μέσω πηγαδιών

Προσδιορισμός περιοχών τροφοδοσίας και των χαρακτηριστικών των υπόγειων υδροφορέων με στόχο την εκτίμηση:

- της ετήσιας απολήψιμης ποσότητας νερού
- της αποθηκευτικότητας των υδροφορέων

Υδραγωγείο

- πηγή τροφοδοσίας
- σχετικά έργα διαχείρισης και αποθήκευσης

Χρονική εξέλιξη των έργων

Σύνδεση της εξέλιξης και διαχείρισης των έργων στο χρόνο και ειδικότερα των

- πηγών υδροληψίας (υπόγεια νερά, όμβρια ύδατα, μεταφορά)
- επεκτάσεων στα προϋπάρχοντα έργα
- αλλαγών στη λειτουργία

με τις

- αλλαγές στην οικιστική ανάπτυξη
- αλλαγές στις υδατικές ανάγκες
- κλιματικές διακυμάνσεις
- βελτιώσεις σε τεχνικές και υλικά

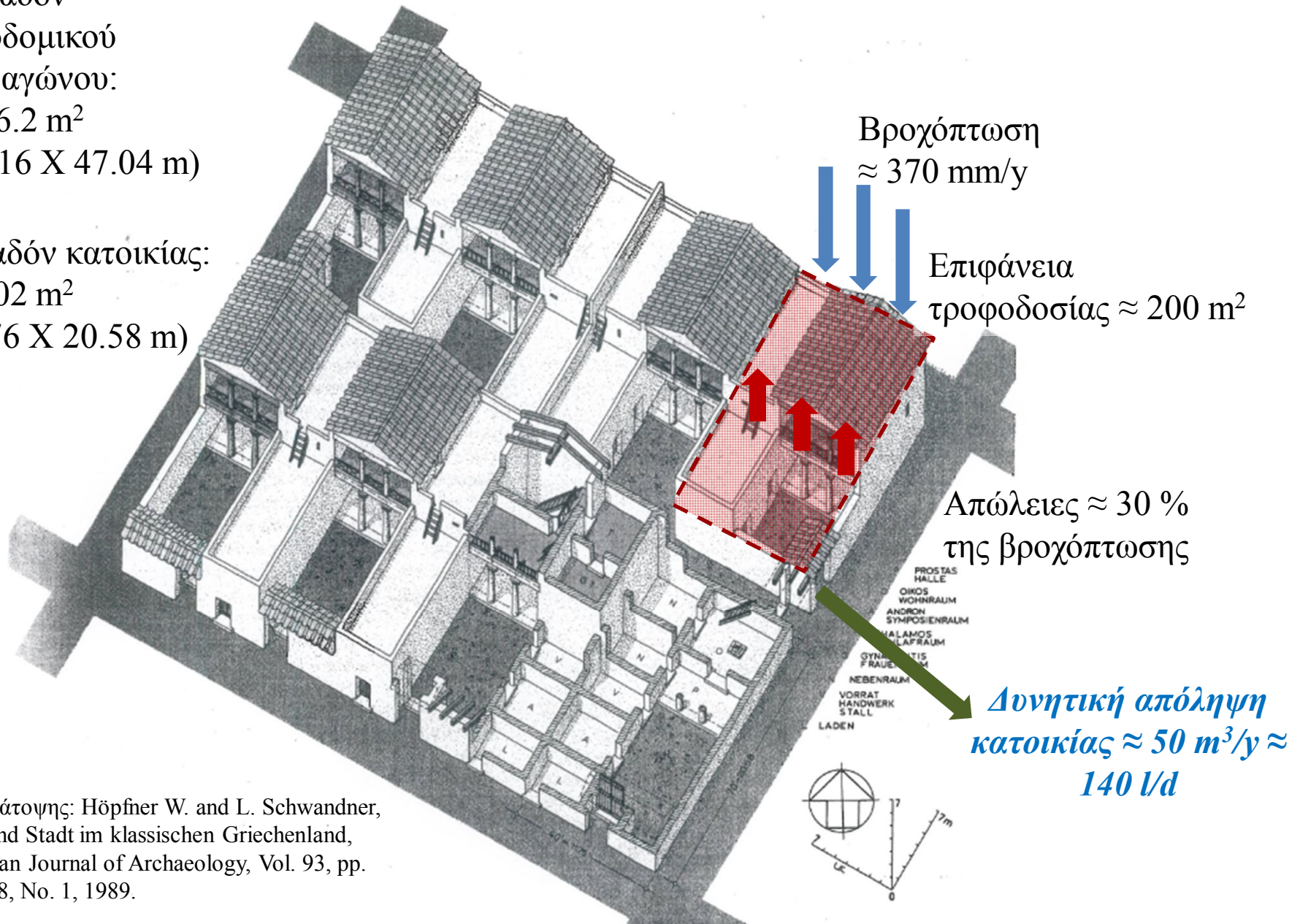
Σε όλες τις εκτιμήσεις υπάρχουν αβεβαιότητες, οι οποίες δεν αλλοιώνουν την συνολική εικόνα. Δίνεται έμφαση στην κατανόηση όλων των πτυχών (τεχνικών, κοινωνικών, πολιτισμικών)

Εκμετάλλευση βρόχινου νερού σε κατοικία

Προσεγγιστική εκτίμηση ετήσιας δυνητικής απόληψης

Εμβαδόν
οικοδομικού
τετραγώνου:
 1936.2 m^2
($41.16 \times 47.04 \text{ m}$)

Εμβαδόν κατοικίας:
 242.02 m^2
($11.76 \times 20.58 \text{ m}$)



Πηγή κάτοψης: Höpfner W. and L. Schwandner,
Haus und Stadt im klassischen Griechenland,
American Journal of Archaeology, Vol. 93, pp.
146-148, No. 1, 1989.

Υδατικοί πόροι στην περιοχή της αρχαίας πόλης

Έκταση χερσονήσου 4.4 km²



Έκταση αρχαίας πόλης 1.0 km²



Μέση ετήσια βροχόπτωση ≈ 370 mm

Μέση ετήσια δυνητική εξάτμιση ≈ 1600 mm

Ο μέσος ετήσιος όγκος βροχής στην χερσόνησο του Πειραιά (έκτασης **4.4 km²**) εκτιμάται σε **1.6 hm³**.

Με τη χρήση **ημερήσιου υδρολογικού μοντέλου** η μέση ετήσια επιφανειακή απορροή στην αστική επιφάνεια εκτιμήθηκε σε **255 mm** (συντελεστής απορροής 70%) που σημαίνει απόληψη **255 l το έτος ανά m²** επιφάνειας συλλογής.

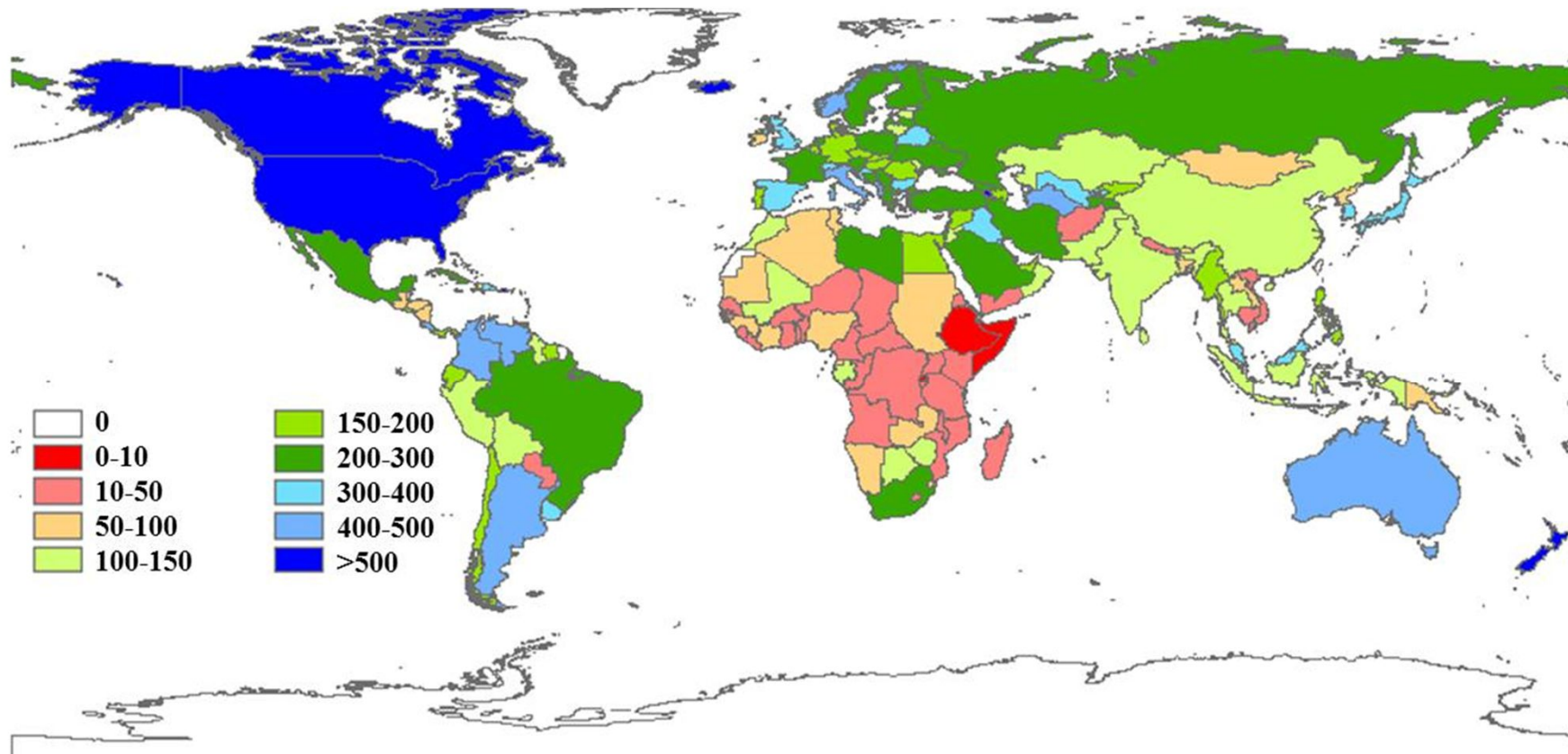
Η συλλογή του βρόχινου νερού σε επίπεδο κατοικίας (έκτασης 200 m²) θα απέφερε περίπου **50 m³ ετησίως**, ενώ στο σύνολο της έκτασης της αρχαίας πόλης (έκτασης 1.0 km²) θα απέφερε περίπου **250.000 m³ ετησίως**.

Η χερσόνησος του Πειραιά εκτιμάται ότι είναι υδρογεωλογικά ανεξάρτητη και οι υπόγειοι υδροφορείς δεν τροφοδοτούνται από τις γειτονικές περιοχές.

Δεδομένης της γεωλογίας της περιοχής και υιοθετώντας συντελεστή κατείσδυσης 5%, η μέση ετήσια τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων εκτιμάται σε περίπου **80.000 m³**

Εκτίμηση αναγκών σε νερό

Οικιακή κατανάλωση το 2010, σε λίτρα ανά κάτοικο ανά ημέρα (l/cap/d)



Τον 21^ο αιώνα ως «**εύλογη πρόσβαση**» ενός ατόμου σε νερό θεωρείται η απόληψη **20 l/cap/d** από πηγή που βρίσκεται σε απόσταση **μικρότερη του 1 km** από την κατοικία του.

The Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report, WHO and UNICEF Joint Monitoring Program

Εκτίμηση αναγκών σε νερό

Εκτιμήσεις κατανάλωσης νερού σε αρχαίες κοινότητες

Η κατανάλωση νερού σε κοινότητες που δεν είχαν άμεση πρόσβαση σε πηγή νερού εκτιμάται σε **10-20 l/cap/d**

Η κατανάλωση νερού στην Ιερουσαλήμ το 1000 π.Χ. εκτιμάται σε **20 l/cap/d**

Πηγή: Mays, L. W., M. Sklivaniotis and A. N. Angelakis, Water for human consumption through history, Ch. 2 in *Evolution of Water Supply Through the Millennia* (A. N. Angelakis, L. W. Mays, D. Koutsoyiannis and N. Mamassis, eds.), 19-42, IWA Publishing, London, 2012.

Αρχαία Αθήνα

Οι πρώτοι γνωστοί κανόνες για τη διαχείριση των υδατικών πόρων στον αρχαίο αθηναϊκό πολιτισμό εισήχθησαν από τον Σόλωνα που ήρθε στην εξουσία το 594 π.Χ και διαμόρφωσε ένα νομικό σύστημα το οποίο περιγράφεται από τον Πλούταρχο (47-195 μ.Χ.). Σχετικά με τα υπόγεια νερά αναφέρεται:

ἐπεὶ δὲ πρὸς ὕδωρ οὔτε ποταμοῖς ἐστὶν ἀενάοις οὔτε λίμναις τισὶν οὔτ' ἀφθόνοις πηγαῖς ἡ χώρα διαρκῆς, ἀλλ' οἱ πλεῖστοι φρέασι ποιητοῖς ἐχρῶντο, νόμον ἔγραψεν, ὅπου μὲν ἐστὶ δημόσιον φρέαρ ἐντὸς ἵππικου, χρῆσθαι τούτῳ: τὸ δ' ἵππικὸν διάστημα τεσσάρων ἦν σταδίων: ὅπου δὲ πλεῖον ἀπέχει, ζητεῖν ὕδωρ ἴδιον: ἐὰν δὲ ὀρύξαντες ὀργυῶν δέκα βάθος παρ' ἑαυτοῖς μὴ εὔρωσι, τότε λαμβάνειν παρὰ τοῦ γείτονος ἐξάχουν ὑδρίαν δις ἐκάστης ἡμέρας πληροῦντας: ἀπορία γὰρ ᾧετο δεῖν βοηθεῖν, οὐκ ἀργίαν ἐφοδιάζειν. ὥρισε δὲ καὶ φυτειῶν μέτρα μάλ' ἐμπείρως,

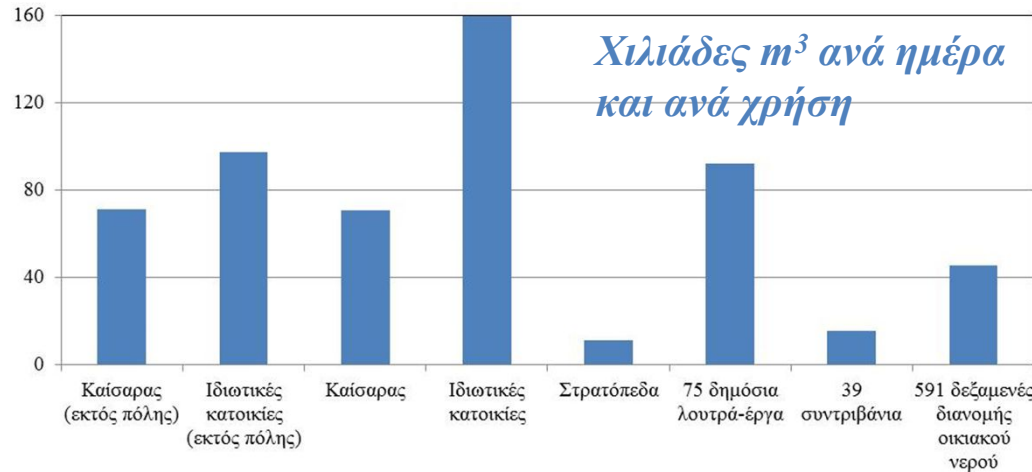
Πλούταρχος, Σόλων, 15.2

Δεδομένου ότι η περιοχή δεν τροφοδοτούταν με αρκετό νερό από ποτάμια, λίμνες και πηγές, οι περισσότεροι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν πηγάδια. Για τον λόγο αυτό (ο Σόλων) έγραψε ένα νόμο κατά τον οποίο:

- *εάν υπήρχε ένα δημόσιο πηγάδι σε απόσταση 4 σταδίων (710 μέτρα) όλοι θα χρησιμοποιούσαν αυτό*
- *εάν το πηγάδι ήταν μακρύτερα θα έπρεπε να ανοιχτεί πηγάδι με ιδιωτικά μέσα*
- *εάν είχαν σκάψει για 18 μέτρα και δεν είχαν βρει νερό είχαν το δικαίωμα να παίρνουν μια υδρία (20 λίτρα) 2 φορές την ημέρα από τους γείτονές τους*

Προκύπτει μια ελάχιστη ανάγκη 40 l/d για κάθε νοικοκυριό, τον 6^ο αιώνα π.Χ.

Εκτίμηση αναγκών σε νερό στην αρχαία Ρώμη



Η συνολική κατανάλωση υπερέβαινε τα 550.000 m³ την ημέρα. Το 25% της ποσότητας πήγαινε στον Καίσαρα και το 45% σε πολυτελείς κατοικίες. Με τις ποσότητες αυτές υδρεύονταν και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες σκλάβοι.

Οι 591 δεξαμενές διανομής νερού στις συνοικίες της μέσης και κατώτερης τάξης εξυπηρετούσαν περίπου 900 κατοίκους η κάθε μία, δηλαδή ένα πληθυσμό 530.000 κατοίκων.

Άρα η οικιακή κατανάλωση στις συνοικίες αυτές εκτιμάται σε **85 l/cap/d**.

Πρόσθετα είχαν πρόσβαση και στις δημόσιες καταναλώσεις νερού (λουτρά, συντριβάνια, ναυμαχίες) που αντιστοιχούσε σε ακόμη **200 l/cap/d**.

78. In the distribution of 14,018 quinariae, there are 771 quinariae which represent transfers from one aqueduct to another; [these have the appearance of being delivered twice, but are in fact reckoned but once in the computation. (2) Of the grand total, 4063 quinariae are delivered outside the City (1718 quinariae in the name of Caesar, 2345 quinariae to private parties). (3) The remaining 9955 quinariae were distributed to 247 delivery-tanks within the City. Of this number, 1707 1/2 quinariae were delivered in Caesar's name, 3847 quinariae to private parties, and 4401 quinariae for public uses. In the latter category the subtotals are: 279 quinariae to ... camps, 2301 quinariae to 95 public works, 386 quinariae to 39 munera, 1335 quinariae to 591 streetside basins. (4) But these same categories of distribution must now be applied to each of the aqueducts, with reference made to the wards of the City.

Sextus Iulius Frontinus, De Aquaeductu Urbis Romae, On the water management of the city of Rome.
Translated by R. H. Rodgers, The University of Vermont

Η Quinaria έχει εκτιμηθεί ότι αντιστοιχούσε σε παροχή 48 l/s ή 41.5 m³/d. Με βάση την αναφορά του Frontinus (έζησε τον 1ο αιώνα μ.Χ.) εκτιμήθηκε η παραπάνω κατανομή νερού στην αρχαία Ρώμη

Εκτίμηση αναγκών σε νερό σε επίπεδο κατοικίας και πόλης

Μέση οικιακή κατανάλωση

- Με βάση τα προηγούμενα η οικιακή κατανάλωση νερού κατά την κλασική περίοδο στον Πειραιά θα πρέπει να μην ξεπερνούσε τα **20 l/cap/d**.
- Κατά την Ελληνιστική περίοδο θα πρέπει οι ανάγκες να αυξήθηκαν λίγο, ίσως σε **30 l/cap/d**.
- Κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο οι ανάγκες θα πρέπει να ήταν της τάξης των **60 l/cap/d** αλλά θα πρέπει να συνυπολογιστεί και η απαιτούμενη ποσότητα για δημόσια χρήση η οποία στην περίπτωση της Ρώμης ήταν υπερδιπλάσια της οικιακής.

Συνολική κατανάλωση της πόλης του Πειραιά

- Η πόλη είχε **500** οικοδομικά τετράγωνα με **οκτώ** κατοικίες το κάθε ένα.
- Εκτιμάται ότι κατοικούσαν **πέντε** άτομα σε κάθε κατοικία.
- Σε πλήρη ανάπτυξη η πόλη θα είχε **20.000** κατοίκους, πλέον **5000** επισκέπτες του λιμανιού.
- Η μέση ετήσια συνολική κατανάλωση της πόλης για 20 l/c/d εκτιμάται σε **180.000 m³**
- Η μέση ετήσια συνολική κατανάλωση της πόλης για 60 l/c/d εκτιμάται σε **540.000 m³**
- Η τελευταία ποσότητα εφόσον αναφέρεται στη Ρωμαϊκή εποχή θα πρέπει να υπερτριπλασιαστεί για να συμπεριλάβει και τις δημόσιες χρήσεις που αποδεδειγμένα υπήρχαν

Εκμετάλλευση βρόχινου νερού σε κατοικία

Λειτουργία δεξαμενής σε ημερήσια βάση

Υδρολογικό μοντέλο

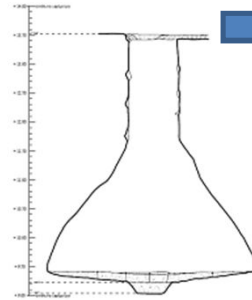
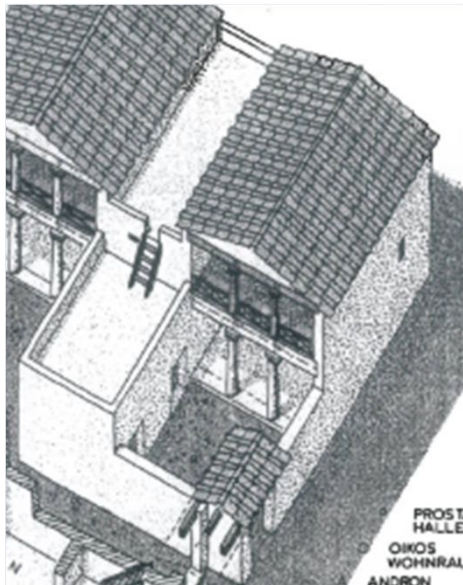
Βροχόπτωση (mm)

Εξάτμιση (mm)

Επιφάνεια τροφοδοσίας (m^2)



Ημερήσια εισροή στη
δεξαμενή (m^3)



Ημερήσια απόληψη από τη δεξαμενή (m^3)

Μοντέλο ισοζυγίου



Απόθεμα δεξαμενής (m^3)

Όγκος ελλείμματος (m^3)

Όγκος υπερχείλισης (m^3)

Όγκος δεξαμενής (m^3)

Προσομοίωση λειτουργίας δεξαμενής ενός οικοπέδου σε υπερετήσια βάση

Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια
δεδομένα βροχόπτωσης και
εξάτμισης μήκους 82 ετών

Η επιφάνεια τροφοδοσίας
οικοπέδου λήφθηκε 200 (m^2)

**Εξετάστηκαν διάφορα
σενάρια**

(α) όγκου δεξαμενής και
(β) ημερήσιας ζήτησης

Προσομοίωση



Ποσοστό ημερών με:

υπερχείλιση (%)

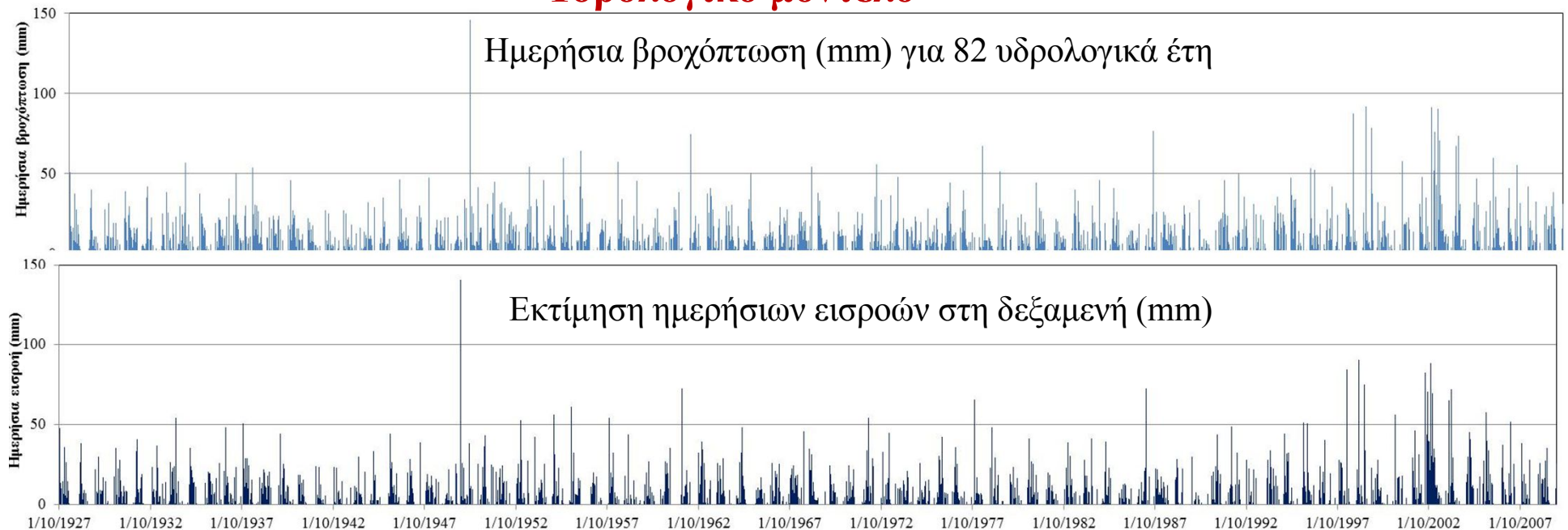
έλλειμμα (%)

Μέσοι ετήσιοι όγκοι:

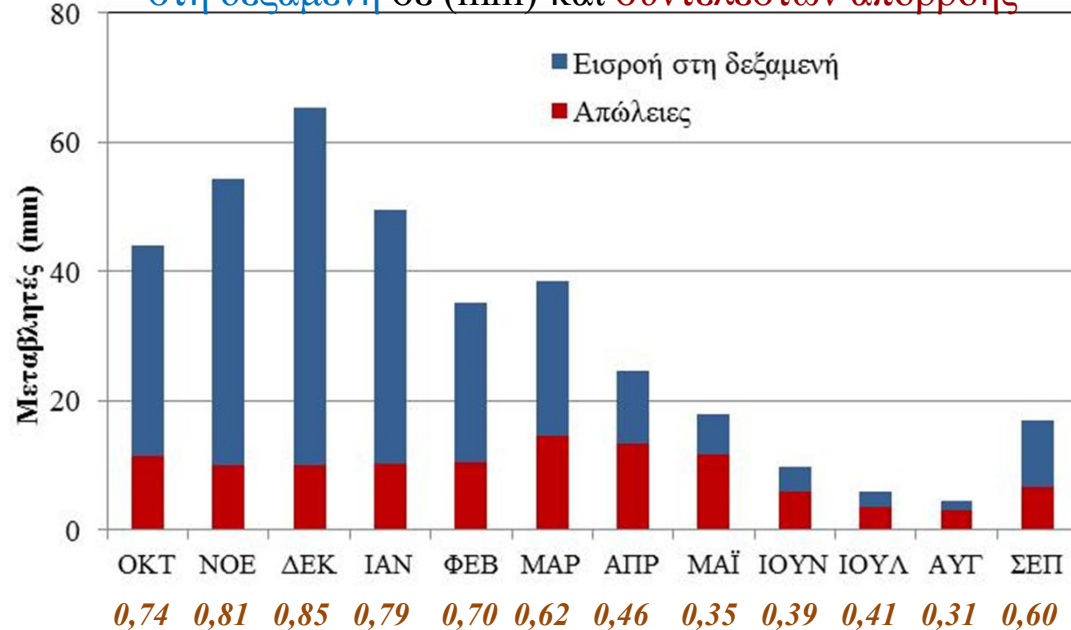
υπερχειλίσεων (m^3)

ελλειμμάτων (m^3)

Υδρολογικό μοντέλο



Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης, απωλειών και εισροής
στη δεξαμενή σε (mm) και συντελεστών απορροής



Μέσα ετήσια μεγέθη

Βροχόπτωση: 366.7 mm

Απώλειες: 111.2 mm

Εισροή στη δεξαμενή: 255.5 mm

Συντελεστής απορροής: 0.70

Για επιφάνεια συλλογής 200 m²
έχουμε μέση ετήσια εισροή στη
δεξαμενή 51 m³ που ισοδυναμεί
με μέση ημερήσια δυνητική
απόληψη 140 l

Προσομοίωση λειτουργίας δεξαμενής

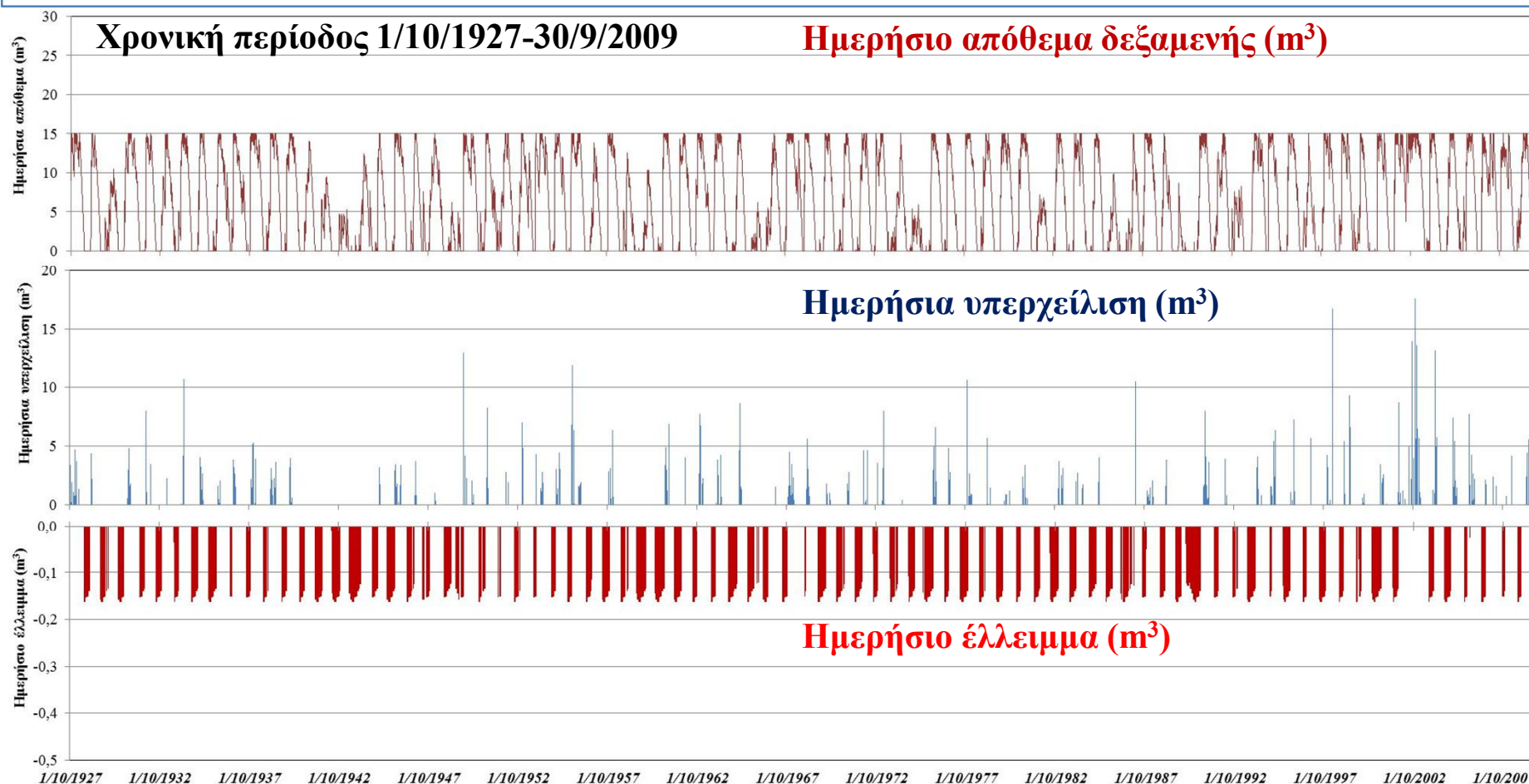
Δεδομένα εισόδου

Επιφάνεια τροφοδοσίας: **200 m^2**

Ανισοκατανομή κατανάλωσης: ***NAI***

Όγκος δεξαμενής: **15 m^3**

Μέση ημερήσια ζήτηση : **0.14 m^3**



Ποσοστό ημερών με:

Υπερχειλίση: **2.2%**

Έλλειμμα: **27.9%**

Αποτελέσματα

Το **31%** του όγκου των
υπερχειλίσεων συμβαίνει
στο **0.16%** των ημερών

Μέσοι ετήσιοι όγκοι:

Εισροής-Ζήτησης: **51.1 m^3**

Υπερχειλίσεων-Ελλειμμάτων: **15.2 m^3**

Πόσο μεγάλη δεξαμενή;

Δεδομένα

Επιφάνεια τροφοδοσίας: **200 m²**

Μέση ετήσια εισροή: **51.1 m³ (≈140 l/d)**

Όγκος δεξαμενής: **15 m³**

Εξετάστηκαν σενάρια ζήτησης από **0.05 έως 0.15 m³/d**

Συμπεράσματα

- Για ζητήσεις μεγαλύτερες από 90 l/d, οι ημέρες αδυναμίας κάλυψής της, είναι πάνω από 10%.
- Για ζήτηση 140 l (δυννητική απόληψη), οι ημέρες αδυναμίας κάλυψής της, είναι πάνω από 25%.
- Ο όγκος υπερχειλίσεων παραμένει ιδιαίτερα υψηλός και πάνω από το 30% της ετήσιας δυνητικής απόληψης

Θεωρούμε ζήτηση 140 l/d και αυξάνουμε τον όγκο της δεξαμενής μέχρι τα 100 m³

Συμπεράσματα

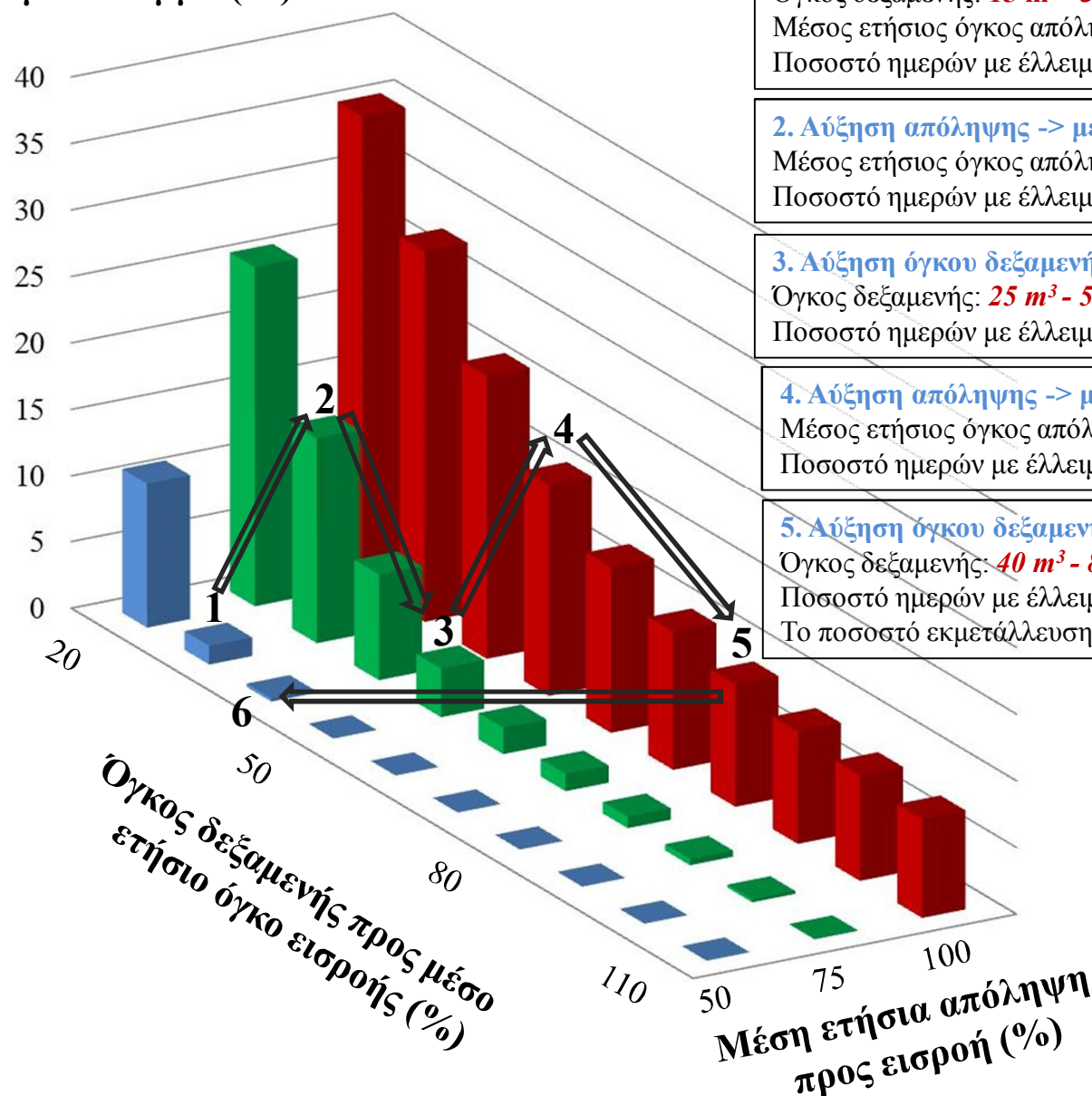
- Για δεξαμενή με όγκο 40 m³, οι ημέρες αδυναμίας κάλυψής της, είναι κάτω από 10%.
- Η περεταίρω αύξηση του όγκου της δεξαμενής δεν μειώνει σημαντικά την πιθανότητα αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης.



- Ο όγκος υπερχειλίσεων για δεξαμενή 40 m³ (80% της ετήσιας δυνητικής απόληψης) φτάνει το 8% της ετήσιας δυνητικής απόληψης.
- Οι υπερχειλίσεις δεν μπορούν να αποφευχθούν ακόμη και με δεξαμενή με όγκο διπλάσιο από την ετήσια δυνητική απόληψη όπου είναι της τάξης του 4%

Αύξηση όγκου δεξαμενής

Ποσοστό ημερών
με έλλειμμα (%)



1. Αρχική κατάσταση

Επιφάνεια τροφοδοσίας: **200 m^2** Μέσος ετήσιος όγκος εισροής: **51 m^3**
 Όγκος δεξαμενής: **15 m^3 - 30%** του όγκου εισροής
 Μέσος ετήσιος όγκος απόληξης: **25.5 m^3 - 70 l/d - 50%** του όγκου εισροής
 Ποσοστό ημερών με έλλειμμα: **1.4%**

2. Αύξηση απόληξης -> μείωση αξιοπιστίας

Μέσος ετήσιος όγκος απόληξης: **38.3 m^3 - 105 l/d - 75%** του όγκου εισροής
 Ποσοστό ημερών με έλλειμμα: **15.5%**

3. Αύξηση όγκου δεξαμενής -> αύξηση αξιοπιστίας

Όγκος δεξαμενής: **25 m^3 - 50%** του όγκου εισροής
 Ποσοστό ημερών με έλλειμμα: **3.6%**

4. Αύξηση απόληξης -> μείωση αξιοπιστίας

Μέσος ετήσιος όγκος απόληξης: **51 m^3 - 140 l/d - 100%** του όγκου εισροής
 Ποσοστό ημερών με έλλειμμα: **15.9%**

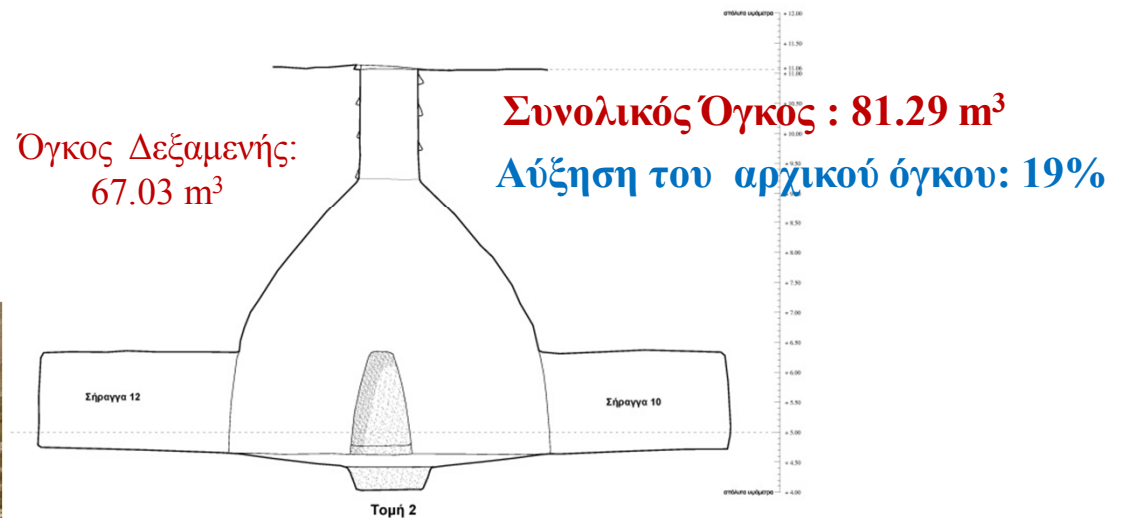
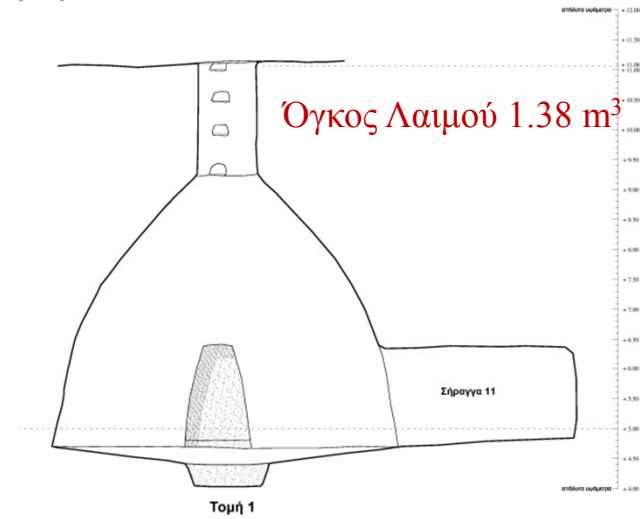
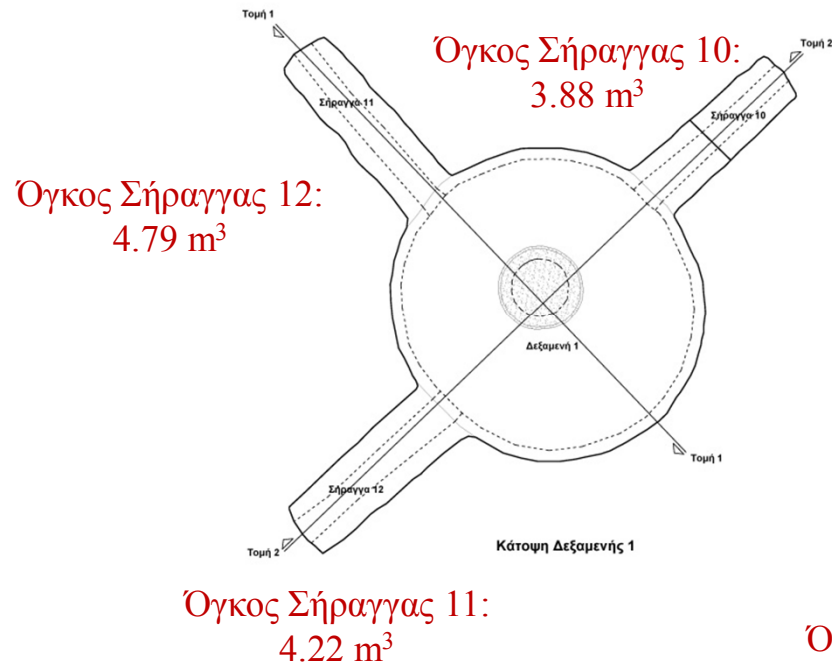
5. Αύξηση όγκου δεξαμενής -> αύξηση αξιοπιστίας

Όγκος δεξαμενής: **40 m^3 - 80%** του όγκου εισροής
 Ποσοστό ημερών με έλλειμμα: **9%**
 Το ποσοστό εκμετάλλευσης είναι **92%**

6. Αύξηση επιφάνειας τροφοδοσίας -> αύξηση αξιοπιστίας

Επιφάνεια τροφοδοσίας: **400 m^2**
 Μέσος ετήσιος όγκος εισροής: **102 m^3**
 Όγκος δεξαμενής: **40 m^3 - 40%** του όγκου εισροής
 Μέσος ετήσιος όγκος απόληξης: **51 m^3 - 140 l/d - 50%** του όγκου εισροής
 Ποσοστό ημερών με έλλειμμα: **< 1%**

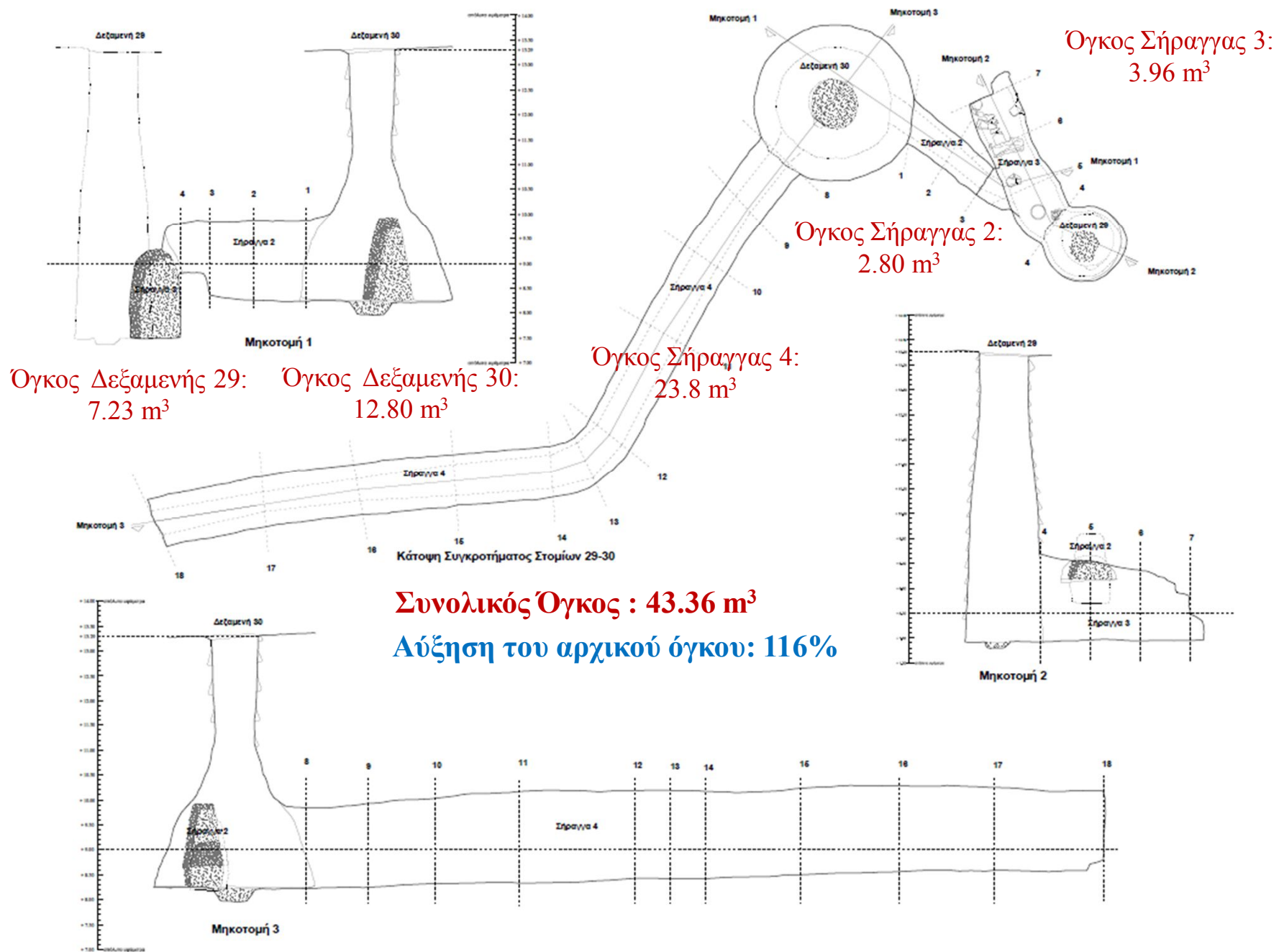
Επέκταση δεξαμενών



Με την επέκταση των δεξαμενών επιτυγχάνεται:

- Μείωση των υπερχειλίσεων και αύξηση του αξιοποιούμενου νερού
- Αύξηση της πιθανότητας κάλυψης της ημερήσιας ζήτησης
- Αύξηση του όγκου της δεξαμενής με καλύτερη στατική επάρκεια

Επέκταση δεξαμενών



Αναπαράσταση λειτουργίας δεξαμενών

- Με την ίδρυση της πόλης το 560 π.Χ. εφαρμόστηκε η (συνήθης για την αρχαία Αθήνα), πρακτική της **διάνοιξης πηγαδιών**. Οι πρώτες **δεξαμενές συλλογής ομβρίων** άρχισαν να κατασκευάζονται αμέσως μετά, στα τέλη 5^{ου} αιώνα π.Χ. λόγω της σχετικά **περιορισμένης δυνατότητας απόληψης από υπογείους υδροφορείς**
- Η δυνητική απόληψη ομβρίων στην περιοχή του Πειραιά εκτιμήθηκε σε περίπου **0.25 m³ το έτος ανά m² της επιφάνειας συλλογής** (σε κατοικία της κλασικής εποχής αντιστοιχεί σε περίπου 50 m³ το έτος). Η ανάλυση δείχνει ότι για την αξιοποίηση του **50% της δυνητικής απόληψης ομβρίων με σημαντική αξιοπιστία, απαιτείται δεξαμενή με όγκο ίσο με το 30% της ετήσιας ποσότητας**
- Από την αρχή της κατασκευής των δεξαμενών και μέχρι και τον 1^ο αιώνα π.Χ. παρατηρείται μια εκτεταμένη και συνεχής προσπάθεια **αύξησης του όγκου τους**, ώστε να μειωθούν οι υπερχειλίσεις και να αυξηθεί η δυνητική απόληψη
- Μια μεγάλη ποικιλία από υδραυλικές κατασκευές που βρέθηκαν, συνδέονται με τη **συνδυασμένη διαχείριση** του νερού από δεξαμενές και πηγάδια καθώς και με **αλλαγές στην κατανάλωση νερού, στο ιδιοκτησιακό καθεστώς** και τις επιφάνειες συλλογής ομβρίων υδάτων