

Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων

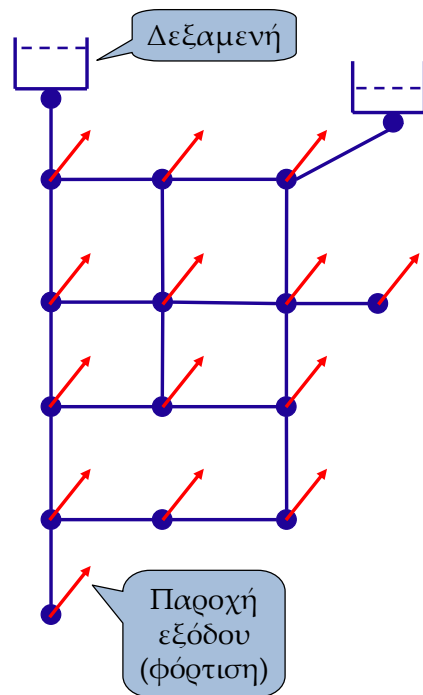
Δημήτρης Κουτσογιάννης & Ανδρέας Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τοποθέτηση του προβλήματος

- Για την ομαλή υδραυλική λειτουργία ενός δικτύου διανομής θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι σε κάθε σημείο, εκατέρωθεν του οποίου αναπτύσσονται κτήρια έως n ορόφων, ισχύει $p > 4(n + 1)$, σε συνθήκες αιχμής της κατανάλωσης.
- Σε κάθε σημείο με γνωστό απόλυτο υψόμετρο z , το ύψος πίεσης είναι $p = h - z$, όπου h το ενεργειακό υψόμετρο, το οποίο εξαρτάται από τη διάταξη του δικτύου, τα χαρακτηριστικά των αγωγών (μήκος, διάμετρος, τραχύτητα) και των ειδικών συσκευών, τις στάθμες των δεξαμενών και την κατανάλωση.
- Για τον υπολογισμό των ενεργειακών υψομέτρων απαιτείται υδραυλική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου του δικτύου, που προϋποθέτει τη σχηματοποίηση του φυσικού συστήματος σε μοντέλο γράφου και τον επιμερισμό της συνολικής κατανάλωσης σε παροχές εξόδου των κόμβων.
- Επειδή, γενικά, δεν μπορεί εκ των προτέρων να καθοριστεί ο πλέον δυσμενής κόμβος για κάθε συνδυασμό καταναλώσεων στους κόμβους, ούτε, αντίστροφα, ο πλέον δυσμενής συνδυασμός για κάθε κόμβο, διερευνώνται πολλαπλά σενάρια παροχών εξόδου, που αναφέρονται σε συνθήκες αιχμής της ζήτησης, με ταυτόχρονη εκδήλωση πυρκαγιάς (σενάρια φόρτισης δικτύου).
- Ζητούμενο είναι η κατασκευή της περιβάλλουσας της πιεζομετρικής γραμμής, για διάφορα δυσμενή αλλά ρεαλιστικά σενάρια, που αναφέρονται στον χρονικό ορίζοντα μελέτης του δικτύου.

Θεμελιώδεις έννοιες μοντέλων δικτύων

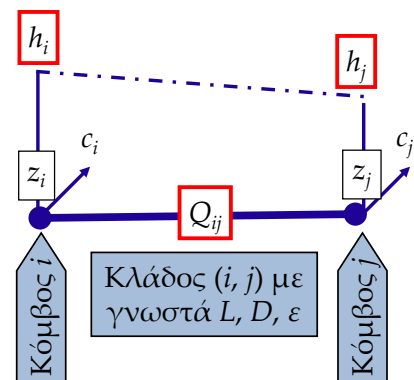
- ❑ **Σχηματοποίηση:** δικτυακή απεικόνιση των συνιστωσών του φυσικού συστήματος ως συνιστώσες ενός εννοιολογικού μοντέλου γράφου (κόμβοι, κλάδοι)
- ❑ **Μαθηματική περιγραφή:** διατύπωση εξισώσεων που αναφέρονται στην υδραυλική λειτουργία των συνιστωσών του δικτύου
- ❑ **Περιγραφικά δεδομένα:** τοπολογία δικτύου, υψόμετρα κόμβων, χαρακτηριστικά αγωγών, δεξαμενών και ειδικών διατάξεων
- ❑ **Αρχικές συνθήκες:** στάθμες δεξαμενών
- ❑ **Φόρτιση δικτύου:** κατανάλωση νερού (σταθερή ή μεταβαλλόμενη), επιμερισμένη στους κόμβους του δικτύου (= παροχές εξόδου)
- ❑ **Επίλυση δικτύου:** υπολογισμός υδραυλικών χαρακτηριστικών ροής σε συνθήκες σταθερής (στιγμιαίας) κατανάλωσης
- ❑ **Προσομοίωση δικτύου:** επίλυση δικτύου σε συνθήκες μεταβαλλόμενης κατανάλωσης



Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 3

Συνιστώσες μαθηματικών μοντέλων δικτύων

- ❑ **Κόμβος:** Σημείο εισροής ή εκροής νερού ή αλλαγής της γεωμετρίας του δικτύου ή μεταβολής των χαρακτηριστικών των αγωγών, με γνωστό απόλυτο υψόμετρο z και γνωστή παροχή εξόδου c , και άγνωστο ενεργειακό υψόμετρο h .
- ❑ **Κλάδος (αγωγός):** Στοιχείο μεταφοράς νερού μήκους L , που αποτελείται από σύστημα σωλήνων σε σειρά, ομοιόμορφης διαμέτρου D , κλάσης και τραχύτητας ε , κατά μήκος του οποίου θεωρείται ενιαία (άγνωστη) παροχή Q .
- ❑ **Δεξαμενή:** Διάταξη αποθήκευσης νερού, ωφέλιμου όγκου V , με γνωστή αρχική στάθμη z_0 , και άγνωστη εκροή νερού y .
- ❑ **Φρεάτιο:** Διάταξη μηδενισμού της πίεσης, με αμελητέα αποθηκευτική ικανότητα, που διατηρεί σταθερή στάθμη z_0 .
- ❑ **Βαλβίδα:** Διάταξη ρύθμισης της πίεσης ή της παροχής (π.χ. δικλείδα, μειωτής πίεσης, βαλβίδα αντεπιστροφής, κτλ.), η λειτουργία της οποίας περιγράφεται από γνωστή σχέση παροχής-ενεργειακών απωλειών.
- ❑ **Αντλία:** Διάταξη ανύψωσης της πιεζομετρικής γραμμής, με γνωστή χαρακτηριστική καμπύλη.



Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 4

Σχηματοποίηση κόμβων δικτύου

- Οι κόμβοι του δικτύου τοποθετούνται:
 - στα σημεία τροφοδοσίας (δεξαμενές, υδατόπυργοι)·
 - στα σημεία διακλαδώσεων (όχι όμως απαραίτητα σε στροφές αγωγών)·
 - στα σημεία αλλαγής υλικού, τραχύτητας ή διαμέτρου αγωγού·
 - στα σημεία αλλαγής των χρήσεων νερού (αστική, ημιαστική, τουριστική)·
 - στα σημεία αλλαγής της πυκνότητας του πληθυσμού και της δόμησης·
 - στις θέσεις των ειδικών καταναλωτών (π.χ. βιομηχανίες, ξενοδοχεία)·
 - στις θέσεις των πυροσβεστικών κρουσμών·
 - στις θέσεις των ειδικών διατάξεων (φρεάτια, βαλβίδες, αντλίες).
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, συστήνεται η τοποθέτηση κόμβων σε σημεία όπου είναι επιθυμητός, κατά την κρίση του μηχανικού, ο έλεγχος πιέσεων κατά την επίλυση του μοντέλου (σε πολύ υψηλά ή πολύ χαμηλά σημεία του δικτύου).
- Ειδικοί καταναλωτές και κρουνοί που βρίσκονται σχετικά κοντά σε κόμβους άλλης αιτιολογίας είναι δυνατόν να αναχθούν σε αυτούς (για μείωση υπολογιστικού φόρτου).
- Για λόγους ευστάθειας του αριθμητικού σχήματος επίλυσης, ο σχετικός λόγος των μηκών των κλάδων του ίδιου βρόχου δεν πρέπει να ξεπερνά το 10.

Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 5

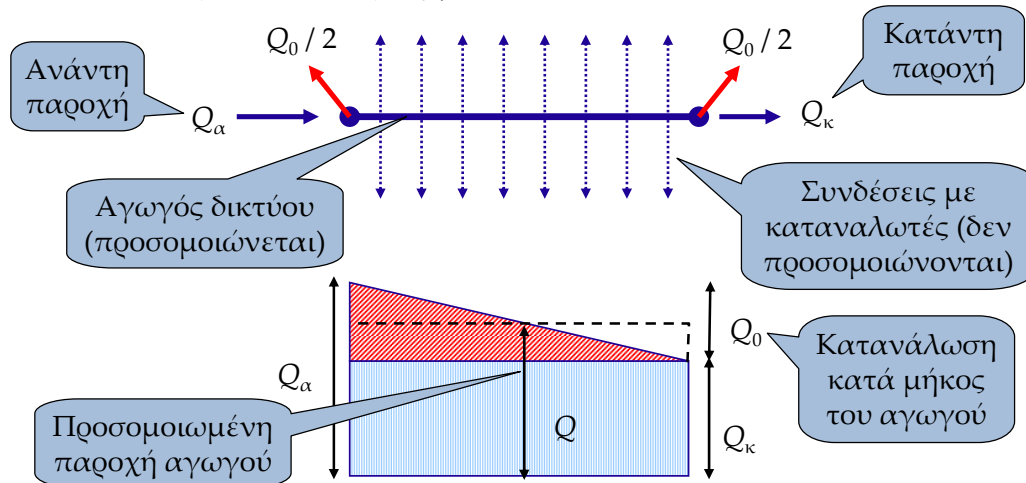
Σημειακές και μη σημειακές φορτίσεις

- Οι εκτίμηση της κατανάλωσης του δικτύου γίνεται ξεχωριστά για κάθε χρήση νερού, για την οποία εκτιμάται η αντίστοιχη μέγιστη ωριαία παροχή.
- Ως σημειακοί χρήστες (ή ειδικοί καταναλωτές) νοούνται βιομηχανίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, πάρκα, πυροσβεστικοί κρουνοί κτλ., και γενικά κάθε μεγάλος καταναλωτής που υδρεύεται από συγκεκριμένη έξοδο του δικτύου.
- Ως μη σημειακοί (κατανεμημένοι) χρήστες νοούνται οι οικιακοί καταναλωτές και οι τουρίστες- παραθεριστές ευρύτερων τουριστικών περιοχών (όχι μεμονωμένων μεγάλων ξενοδοχειακών μονάδων).
- Οι μέγιστες ωριαίες παροχές των ειδικών καταναλωτών μεταφέρονται ως σημειακές φορτίσεις στον εγγύτερο κόμβο.
- Για τους κατανεμημένους καταναλωτές, η αθροιστική μέγιστη ωριαία παροχή q_k ανά χρήση νερού k επιμερίζεται στους κόμβους του δικτύου, με χρήση κατάλληλων συντελεστών κατανομής:
$$c_{jk} = w_{jk} q_k$$
- Ο συντελεστής w_{jk} εκφράζει το ποσοστό της συνολικής ζήτησης κάθε μη σημειακής (κατανεμημένης) χρήσης k που εξυπηρετείται από τον κόμβο j .
- Η παροχή εξόδου κάθε κόμβου προκύπτει ως άθροισμα των παροχών c_{jk} από τις σημειακές και μη σημειακές χρήσεις νερού.

Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 6

Η έννοια της ανηγμένης κατανάλωσης

- Για τις κατανεμημένες χρήσεις νερού, θεωρείται ότι κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει συγκεκριμένο μήκος αγωγού, από τον οποίο εξέρχεται όλη η παροχή των καταναλωτών που αντιστοιχούν στο εν λόγω μήκος.
- Με την υπόθεση ότι η κατανομή της κατανάλωσης κατά μήκος του αγωγού είναι ομοιόμορφη, η συνολική κατανάλωση Q_0 θεωρείται ότι ισομοιάζεται στον ανάντη και κατάντη κόμβο.



Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 7

Εκτίμηση συντελεστών κατανομής

- Υπολογίζονται τα πραγματικά μήκη των κλάδων του δικτύου, L_{ij} .
- Για την συγκεκριμένη χρήση νερού, υπολογίζεται ο συντελεστής μήκους θ_{ij} , που εκφράζει σε τι κλάσμα ή πολλαπλάσιο του μήκους του υπολογιστικού μέλους (i, j) εκδηλώνεται η συγκεκριμένη χρήση. Γενικά, ισχύει:
 - $\theta_{ij} = 0$ αν δεν εκδηλώνεται η χρήση κατά μήκος του κλάδου.
 - $\theta_{ij} = 1$ αν η χρήση εκδηλώνεται ομοιόμορφα κατά μήκος του κλάδου.
 - $\theta_{ij} < 1$ αν η χρήση εκδηλώνεται ανομοιόμορφα ή σε τμήμα του κλάδου.
- Εκτιμάται το ισοδύναμο μήκος επιρροής του κόμβου j προς το μέλος (i, j) ως:

$$L_{ij}^* = 0.5 \theta_{ij} L_{ij}$$
- Το ολικό ισοδύναμο μήκος επιρροής του κόμβου j προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους μηκών όλων των κλάδων που συμβάλλουν στον κόμβο, δηλαδή:

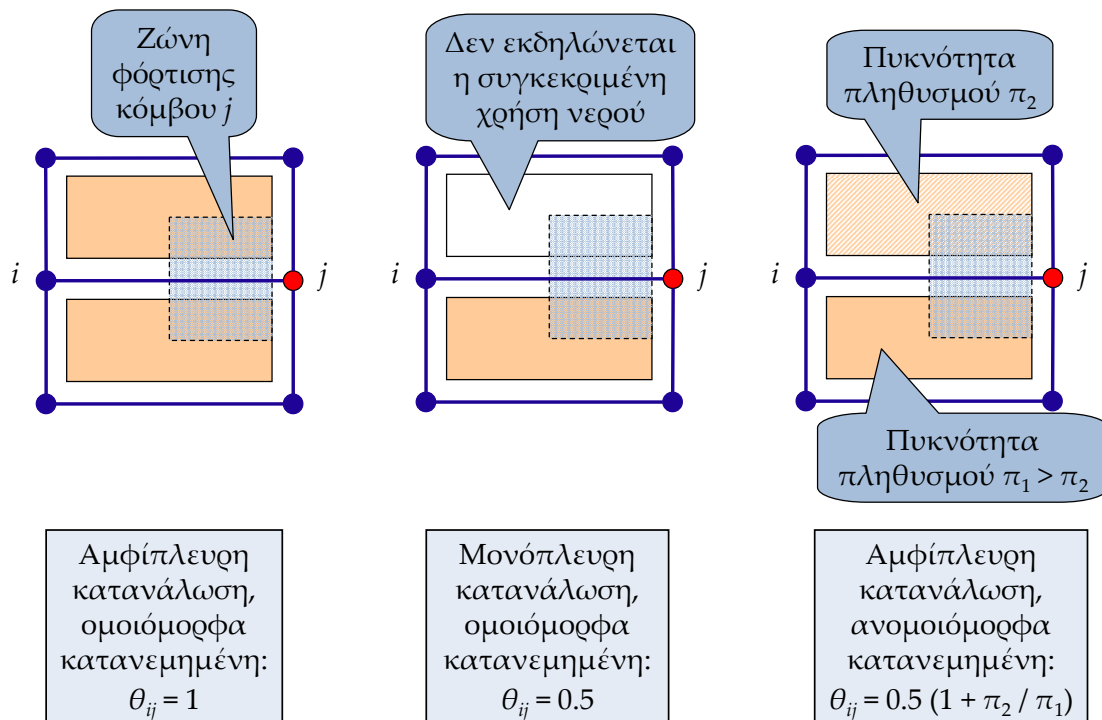
$$L_j^* = \sum L_{ij}^*$$
- Το ολικό ισοδύναμο μήκος της συγκεκριμένης χρήσης προκύπτει ως:

$$L^* = \sum L_j^*$$
- Ο συντελεστής κατανομής της ολικής παροχής της συγκεκριμένης χρήσης στον κόμβο j υπολογίζεται ως το κλάσμα:

$$w_j = L_j^* / L^*$$

Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 8

Εκτίμηση συντελεστών ανομοιομορφίας



Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 9

Διαμόρφωση σεναρίων φόρτισης

- Η ολική παροχή εξόδου κάθε κόμβου υπολογίζεται αθροίζοντας τις επιμέρους φορτίσεις, σημειακές και κατανεμημένες, που αναφέρονται στην κανονική λειτουργία του δικτύου, σε συνθήκες μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης.
- Ο έλεγχος υδραυλικής επάρκειας του δικτύου (= έλεγχος ελάχιστων πιέσεων) γίνεται για έκτακτες καταστάσεις φόρτισης, κατά τις οποίες ζητείται η οριακή ικανοποίηση των περιορισμών ελάχιστων πιέσεων.
- Με εξαίρεση ορισμένες πολύ μεγάλες πόλεις, η τυπική δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας είναι η περίπτωση πυρκαγιάς, οπότε προκύπτουν εξαιρετικά υψηλές σημειακές φορτίσεις εξαιτίας της ενεργοποίησης κρουνών.
- Τα σενάρια πυρκαγιάς διαμορφώνονται κατά την κρίση του μηχανικού, για την κάλυψη δυσμενών περιπτώσεων. Τα σενάρια πρέπει να είναι ρεαλιστικά, ώστε να μην οδηγούν σε υπερβολικά δαπανηρό σχεδιασμό.
- Συστήνεται η κατά προτεραιότητα εξέταση σεναρίων πυρκαγιάς με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - σενάρια με κρουνούς σε ακτινωτές απολήξεις·
 - σενάρια με κρουνούς στα υψηλά σημεία του δικτύου·
 - σενάρια που επιβαρύνουν διαφορετικές ομάδες κλάδων·
 - σενάρια με ενεργοποίηση γειτονικών κρουνών.

Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 10

Σχόλια σχετικά με τους ελέγχους πιέσεων

- Ο έλεγχος ελάχιστων πιέσεων αφορά τόσο στη γενική διάταξη όσο και στη διαστασιολόγηση του δικτύου.
- Η ανεπαρκής πίεση σε μια περιοχή του δικτύου αντιμετωπίζεται με:
 - αύξηση του υψομέτρου τοποθέτησης της δεξαμενής (όχι πάντα εφικτό).
 - αντικατάσταση των κρίσιμων κλάδων ανάντη από αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου (εναλλακτικά, τοποθέτηση παράλληλων αγωγών).
 - τοποθέτηση αντλιών (αν έχουν εξαντληθεί άλλες εναλλακτικές λύσεις).
- Εξαιτίας της τοπογραφίας, στα υψηλά σημεία του δικτύου που βρίσκονται κοντά στις δεξαμενές, είναι ορισμένες φορές αναπόφευκτο η τιμή της πίεσης να είναι μικρότερη της επιθυμητής. Στην περίπτωση αυτή δεν θεωρείται γενική αστοχία του δικτύου, αν οι πιέσεις των υπόλοιπων κόμβων κυμαίνονται στα επιτρεπόμενα όρια.
- Στην πράξη, ζητούμενο του σχεδιασμού είναι η λειτουργία του δικτύου σε ένα μικρό, σχετικά, εύρος πιέσεων, της τάξης των 20-30 m.
- Εκτός των πιέσεων, πρέπει να ελέγχονται και οι ταχύτητες ροής των αγωγών, που, εμπειρικά, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 1.5-2.0 m/s. Διαφορετικά, προκύπτουν ιδιαίτερα μεγάλες κλίσεις της πιεζομετρικής γραμμής, που έχουν ως συνέπεια μεγάλες απώλειες ενέργειας (μη οικονομικός σχεδιασμός).

Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 11

Προσαρμογή μοντέλου υφιστάμενου δικτύου

- Πρόκειται για την συνήθη περίπτωση, που επιβάλλεται για τη διαχείριση ενός υφιστάμενου δικτύου καθώς και τον σχεδιασμό μελλοντικών επεκτάσεών του.
- Απαιτεί απογραφή του υφιστάμενου δικτύου και συλλογή των αρχείων των υδρομετρητών όλων των καταναλωτών, διαδικασία που είναι εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα, εφόσον δεν υπάρχει κατάλληλη υποδομή.
- Ακολουθείται η τυπική διαδικασία σχηματοποίησης του μοντέλου, με τη διαφορά ότι οι παροχές εξόδου προκύπτουν όχι βάσει υποθέσεων αλλά λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές καταναλώσεις.
- Το μοντέλο που διαμορφώνεται πρέπει να προσαρμοστεί στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου (ρύθμιση ή βαθμονόμηση μοντέλου).
- Η ρύθμιση γίνεται με δοκιμές, ώσπου η απόκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με τις πραγματικές (μετρούμενες) τιμές να είναι αποδεκτή. Αποκλίσεις αναμένονται, μεταξύ άλλων, για τους εξής λόγους:
 - ασυνέπεια μεταξύ των αρχικών σχεδίων και της υλοποίησής τους (αβεβαιότητα στον καθορισμό των μηκών και διαμέτρων).
 - θραύσεις αγωγών και παράνομες συνδέσεις (σφάλματα στην εκτίμηση των παροχών εξόδου).
 - δυσκολία εκτίμησης συντελεστών τραχύτητας.

Δ. Κουτσογιάννης & Α. Ευστρατιάδης, Αστικά Υδραυλικά Έργα – Υδρεύσεις – Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων 12