

Δύο Μέθοδοι Βέλτιστου Σχεδιασμού Απλών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση

I. Βαλιάντζας, Ν. Δέρκας

Τμήμα ΑΦΠ & ΓΜ, ΓΠΑ, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα
lhyd2vay@aua.gr, ndercas1@aua.gr

Περίληψη

Οι περισσότεροι μελετητές απλών δικτύων μεταφοράς και διανομής του νερού υπό πίεση σε συστήματα άρδευσης εφαρμόζουν εμπειρικές μεθόδους για τον σχεδιασμό τους (μέθοδος της προκαθορισμένης τιμής των απωλειών ανά μονάδα μήκους αγωγού, μέθοδος της προκαθορισμένης τιμής της ταχύτητας μετατόπισης, μέθοδος της προκαθορισμένης τιμής του ποσοστού των απωλειών) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη καθόλου οικονομικά κριτήρια. Στην εργασία αυτή προτείνονται δύο μέθοδοι βέλτιστου οικονομικού σχεδιασμού απλών δικτύων μεταφοράς και διανομής του νερού υπό πίεση σε συστήματα άρδευσης και συγκριτική εφαρμογή τους για τις οικονομικές συνθήκες του ελληνικού χώρου. Η πρώτη μέθοδος επιτρέπει, με την χρήση μιας απλής αναλυτικής σχέσης, τον καθορισμό 'κρίσιμων' παροχών όπου είναι οικονομικά βέλτιστο να γίνει η αλλαγή της διαμέτρου. Η δεύτερη μέθοδος προσδιορίζει την βέλτιστη οικονομική διάμετρο σε κάθε τμήμα του δικτύου. Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών χρησιμοποιήθηκε νέα ρητή σχέση προσέγγισης της εξίσωσης των Darcy-Weisbach.

Two Explicit Optimum Design Methods for Simple Irrigation Delivery Systems

I. Valiantzas, N. Dercas

Dep. of Nat. Res. Man. & Agr. Eng., AUA, Iera Odos 75, 11855 Athens
lhyd2vay@aua.gr, ndercas1@aua.gr

Abstract

Most designers of simple pressure water delivery systems for irrigation purposes use very simple empirical pipe selection methods based on arbitrary concepts (unit head loss, velocity, and percent head loss methods), without taking into account economic criteria. In this article two explicit optimum design methods for simple irrigation delivery systems and its application for Greek conditions are presented. In the first method, a simple equation allows to calculate the critical values of discharges

corresponding to the available pipe diameters. The second method calculates the optimum economic diameter for every pipeline of the network. For the calculation of the friction losses was used a new explicit formula proposed for Darcy-Weisbach equation.

1. Εισαγωγή

Κατά τον σχεδιασμό δικτύων υπό πίεση που τροφοδοτούνται από αντλητικό συγκρότημα ο μελετητής πρέπει να λάβει υπόψη του τόσο το κόστος των αγωγών (αγορά και εγκατάσταση) όσο και το κόστος άντλησης (αγορά, εγκατάσταση και λειτουργία του αντλιοστασίου). Τα προαναφερθέντα κόστη είναι αλληλοσυνδεδεμένα. Μείωση των διαμέτρων σ' ένα δίκτυο, που έχει δεδομένες παροχές μελέτης ανά αγωγό, έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση των απωλειών και μείωση του κόστους των αγωγών. Συγχρόνως η αύξηση των απωλειών φορτίου οδηγεί σε αυξημένο κόστος άντλησης. Στόχος του μελετητή είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετησίου κόστους (ετησίου κόστους απόσβεσης των αγωγών, του αντλιοστασίου, και του κόστους άντλησης).

Όπως αναφέρουν οι Keller and Bliesner (1990) σε απλά αρδευτικά δίκτυα οι μελετητές δεν δείχνουν ιδιαίτερη προσοχή κατά την διαστασιολόγηση τους. Συνήθως χρησιμοποιούν απλές εμπειρικές μεθόδους όπως: την μέθοδο της προκαθορισμένης τιμής των απωλειών φορτίου (καθορίζοντας εκ των προτέρων μια συγκεκριμένη τιμή απωλειών φορτίου ανά τρέχον μέτρο), την μέθοδο της ταχύτητας (προκαθορίζοντας μια τιμή της ταχύτητας), την μέθοδο του ορισμένου ποσοστού απωλειών (καθορίζοντας εκ των προτέρων μια τιμή απωλειών στον κεντρικό αγωγό του συστήματος σαν ποσοστό του ελάχιστου αναγκαίου φορτίου πίεσης).

Για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού των απλών αρδευτικών συστημάτων διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί. Ο Keller (1975) πρότεινε την μέθοδο κατασκευής νομογραφήματος επιλογής βέλτιστης οικονομικής διαμέτρου σε αγωγούς απλών αρδευτικών δικτύων. Η μέθοδος αυτή όπως απέδειξαν οι Keller and Bliesner (1990) οδηγεί σε λύσεις μικρότερου κόστους από τις προαναφερθείσες εμπειρικές μεθόδους. Οι Benami and Ofen (1984) τροποποίησαν την μέθοδο του Keller προτείνοντας την κατασκευή πινάκων. Και οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι βασίζονται στην παραδοχή ότι το κόστος άντλησης είναι ανάλογο των απωλειών ενέργειας κατά μήκος των αγωγών.

Επίσης πολλές αναλυτικές μέθοδοι προτάθηκαν Wu and Gitlin (1975), Solomon and Keller (1978), Wu (1992, 1997), Valiantzas (1998, 2002a) όπως και αριθμητικές με τη χρήση H/Y Bratls and Segerling (1985), Bratls at al (1993), Kang and Nishiyama (1996a, 1996b) που στοχεύουν στον βέλτιστο σχεδιασμό ενός απλού δικτύου-

αγωγού. Οι μέθοδοι αυτές συνήθως βασίζονται σε υδραυλικά κριτήρια και όχι σε οικονομικά. Ο Valiantzas (2002b, 2003b) πρότεινε μια απλή μέθοδο για την επιλογή διαμέτρων σε τηλεσκοπικό αγωγό άρδευσης. Και στην μέθοδο αυτή το ενεργειακό κόστος δεν ελήφθη υπόψη. Επίσης ο Valiantzas (2003a) πρότεινε μια απλή εξίσωση για τον απευθείας υπολογισμό του κατάλληλου μήκους των διαφόρων διαμέτρων κατά μήκος ενός δευτερεύοντα αγωγού (τηλεσκοπικού αγωγού) σταθερής κλίσης με στόχο να ελαχιστοποιηθεί το κόστος απόσβεσης και το κόστος άντλησης (ενέργειας), ενώ δύο διαφορετικά υδραυλικά κριτήρια ελήφθησαν υπόψη (ομοιομορφία παροχής κατά μήκος του αγωγού, και εκ των προτέρων καθορισμός της μέσης παροχής των καταναμητών). Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει καταναμητές σταθερής παροχής και τοποθετημένους σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος αγωγού σταθεράς κλίσης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το ελάχιστο φορτίο επιτυγχάνεται στο κατάντη άκρο του τηλεσκοπικού αγωγού.

Στο άρθρο αυτό προτείνονται δύο μέθοδοι βέλτιστου οικονομικού σχεδιασμού απλών δικτύων-αγωγών λαμβάνοντας υπόψη το κόστος άντλησης. Επίσης γίνεται συγκριτική διαστασιολόγηση ενός δικτύου-αγωγού με τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους.

Η πρώτη μέθοδος προσδιορίζει τις κρίσιμες παροχές στον υπό μελέτη αγωγό. Οι κρίσιμες αυτές παροχές επιτρέπουν να προσδιοριστούν οι διατομές όπου πρέπει να γίνει αλλαγή διαμέτρου (διατομή όπου μια εμπορική διάμετρος D_i πρέπει να αλλάξει στην επομένη εμπορική διάμετρο D_{i+1}) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος του δικτύου. Η διάμετρος στη μέθοδο αυτή είναι μια διακριτή μεταβλητή που μπορεί να λάβει ορισμένες τιμές (αυτές των διαμέτρων της εμπορικής σειράς που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί).

Η δεύτερη μέθοδος προσδιορίζει την βέλτιστη διάμετρο σε κάθε τμήμα του δικτύου βελτιστοποιώντας την συνάρτηση συνολικού κόστους (κόστος απόσβεσης αγωγών και αντλιοστασίου όπως και κόστος άντλησης). Στη δεύτερη αυτή μέθοδο η διάμετρος είναι μια συνεχής μεταβλητή.

Βασιζόμενοι στην διαφορετική συμπεριφορά της μεταβλητής που εκφράζει την διάμετρο στις δύο μεθόδους μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την πρώτη μέθοδο σαν μία Ασυνεχή μέθοδο και την δεύτερη σαν Συνεχή μέθοδο βελτιστοποίησης.

Οι δύο μέθοδοι που παρουσιάζονται βασίζονται σε προγενέστερες εργασίες των συγγραφέων Valiantzas et al. (2007) και Valiantzas (2008) οι οποίες παρουσιάζονται και εφαρμόζονται συγκριτικά για τις οικονομικές συνθήκες του ελληνικού χώρου. Οι προτεινόμενες μέθοδοι δεν απαιτούν την χρήση νομογραφημάτων και μπορούν να εφαρμοστούν σε απλό αγωγό ή σε ένα απλό ακτινωτό δίκτυο με υδροστόμια διαφόρου ονομαστικής πίεσης και παροχής, με τμήματα αγωγών διαφόρου μήκους, με αγωγούς διαφόρων υλικών (χάλυβα, αλουμίνιο, πολυαιθυλένιο, PVC) και ποικίλουςας τοπογραφίας (οριζόντια, ομοιόμορφη ή μη ομοιόμορφη κλίση). Για τον υπολογισμό

των γραμμικών απωλειών χρησιμοποιήθηκε η νέα ρητή σχέση που προτάθηκε από τον Valiantzas (2008) για την εξίσωση Darcy-Weisbach.

Τέλος έγινε συγκριτική παρουσίαση της οικονομικής βελτιστοποίησης του προαναφερθέντος δικτύου βάσει της ασυνεχούς μεθόδου προσδιορισμού των κρίσιμων παροχών βασιζόμενοι στη νέα ρητή σχέση του Valiantzas (2008) και εναλλακτικά στον εμπειρικό τύπο των Hazen-Williams. Στόχος της σύγκρισης αυτής είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο η νέα αυτή ρητή σχέση (που είναι διαστατικά ομοιογενής) μπορεί να οδηγήσει σε δίκτυα χαμηλότερου κόστους σε σχέση με αυτά που διαστασιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τον τύπο των Hazen-Williams.

2. Κόστος άντλησης

Οι ετήσιες ανάγκες σε ενέργεια ενός συστήματος διανομής αρδευτικού νερού εξαρτώνται από τις ώρες λειτουργίας και από την ισχύ της αντλίας που τροφοδοτεί το σύστημα. Η ισχύς της αντλίας που τροφοδοτεί με νερό το σύστημα δίνεται από την σχέση:

$$P_p = \frac{Q_{in} h_p}{0.102 n_e} \quad (1)$$

όπου P_p = απαιτούμενη ισχύς από την αντλία (kW),
 Q_{in} = παροχή αντλίας στη κεφαλή του δικτύου (m^3/s),
 h_p = απαιτούμενο μανομετρικό από την αντλία (m), και
 n_e = συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας.

Το απαιτούμενο μανομετρικό της αντλίας μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

$$h_s + h_p = H_{in} + Z_{in} + \frac{V_{in}^2}{2g} + h_{fs} \quad (2)$$

όπου h_s = υδραυλικό φορτίο στη πηγή του νερού (m) (συμπίπτει με την ελεύθερη στάθμη Z_s της πηγής του νερού),
 H_{in} = φορτίο πίεσης στην κεφαλή του συστήματος διανομής (m),
 Z_{in} = υψομετρική στάθμη στην κεφαλή του συστήματος διανομής (m),
 $V_{in}^2/(2g)$ = ύψος κινητικής ενέργειας στην κεφαλή του συστήματος (m) που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο στην περίπτωση των συστημάτων υπό πίεση (Scaloppi and Allen, 1993, Valiantzas, 2002a), και
 h_{fs} = συνολικές απώλειες ενέργειας από το σημείο αναρρόφησης μέχρι την κεφαλή του συστήματος διανομής (m).

Το συνολικό κόστος ενέργειας για άντληση δίνεται από

$$C_{EN.T} = C_{fu} P_p O_t E_{ae} \quad (3)$$

όπου C_{fu} = κόστος ενέργειας (Ευρώ/kW-hr),

O_t = ετήσιες ώρες λειτουργίας της αντλίας (hr),

E_{ae} = συντελεστής ετήσιας ισοδύναμης αύξησης του κόστους της ενέργειας (Keller and Bliesher, 1990)

$$E_{ae} = \frac{r[(1+e)^t - (1+r)^t]}{(e-r)[(1+r)^t - 1]} \quad (4)$$

όπου e = ετήσιο ισοδύναμο ποσοστό αύξησης του κόστους ενέργειας,

r = ετήσιο επιτόκιο, και

t = διάρκεια ζωής του έργου.

Το συνολικό κόστος ενέργειας μπορεί επίσης να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση (Valiantzas, 2002a, Valiantzas and Derkas, 2004)

$$C_{EN.T} = C_{Eh} \cdot h_p \quad (5)$$

όπου

$$C_{Eh} = \frac{Q_{in}}{0.102n_e} (C_{fu} O_t E_{ae} + CRF \cdot C_{Pf}) \quad (6)$$

C_{Eh} = το ετήσιο κόστος άντλησης ανά μέτρο μανομετρικού στη κεφαλή του συστήματος (Ευρώ/m) (συμπεριλαμβανομένου του κόστους απόσβεσης του αντλιοστασίου),

C_{Pf} = το αρχικό κόστος του αντλιοστασίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος (Euros/kW) και CRF συντελεστής κάλυψης του αρχικού κεφαλαίου που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$CRF = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (7)$$

Στη διαστασιολόγηση του έργου η παράμετρος C_{Eh} είναι μια σταθερά, καθώς και από τις παραμέτρους της Εξ. (6) δεν επηρεάζεται από τις παραμέτρους σχεδιασμού. Αντικαθιστώντας στην Εξ. (5) το h_p , από την αντίστοιχη παράσταση που υπολογίζεται βάσει της Εξ. (2), και θεωρώντας ότι η κινητική ενέργεια στη κεφαλή του συστήματος είναι αμελητέα, η έκφραση του συνολικού κόστους ενέργειας γίνεται

$$C_{EN.T} = C_{Eh} \cdot (H_{in} + Z_{in} + h_{fs} - h_s) \quad (8)$$

Στην παρένθεση της Εξ. (8) ο μόνος παράγοντας που επηρεάζεται από αλλαγές στο σχεδιασμό του συστήματος είναι η παράμετρος H_{in} . Έτσι λοιπόν, το τμήμα του ενεργειακού κόστους που επηρεάζει το σχεδιασμό του συστήματος είναι

$$C_{EN} = C_{Eh} \cdot H_{in} \quad (9)$$

Τελικά, εξετάζοντας τις διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού, το ετήσιο κόστος ενέργειας για άντληση στο σύστημα διανομής εξαρτάται αποκλειστικά από το φορτίο στη κεφαλή του έργου.

Στην περίπτωση οριζοντίου η ανερχομένου δικτύου, εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας μεταξύ του σημείου εισόδου και του τελικού σημείου διανομής του συστήματος προκύπτει

$$H_{in} = S_f L + \Delta Z + h_r \quad (10)$$

όπου S_f οι απώλειες φορτίου ανά τρέχον μέτρο (m/m) κατά μήκος του δικτύου-αγωγού,

L το μήκος του αγωγού (m),

ΔZ η υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου εισόδου του συστήματος και του τελικού σημείου διανομής (m) και

h_r το απαιτούμενο φορτίο πίεσης στο τελευταίο κατάντη σημείο διανομής (τελευταίο υδροστόμιο).

Στην περίπτωση κατερχομένου δικτύου η σχέση (10) ισχύει μεταξύ του σημείου εισόδου και του σημείου υδροδότησης με το ελάχιστο φορτίο πίεσης.

Οι απώλειες φορτίου S_f (m/m) δίνονται από την νέα σχέση που πρότεινε ο Valiantzas (2008)

$$S_f = \left(\frac{k_0 Q^2}{D^{5.3}} \right)^m \quad (11)$$

όπου $k_0 = 0.0126\varepsilon^{0.3}$, ε είναι η απόλυτη τραχύτητα των αγωγών σε m

$m = 1 - 0.133(1 + \varepsilon/\varepsilon_0)^{-1}$, $\varepsilon_0 = 0.0439 * 10^{-3}$ σε m και

Q η παροχή του αγωγού σε m^3/s ,

D η διάμετρος σε m.

Οι τοπικές απώλειες που οφείλονται σε συνδέσεις αγωγών, σε αλλαγές διαμέτρου, σε γωνίες θεωρούνται ότι ενσωματώνονται στις γραμμικές απώλειες φορτίου.

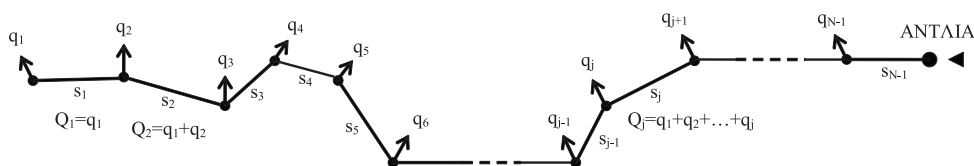
Το ετήσιο κόστος απόσβεσης του αντλιοστασίου εκφράζεται από την παρακάτω σχέση

$$C_P = CRF \cdot C_{PF} \frac{Q_{in} (S_f L + \Delta Z + h_r)}{0.102n_e} \quad (12)$$

Στην προαναφερθείσα Εξ. (12) έγινε η παραδοχή ότι το ύψος κινητικής ενέργειας στην κεφαλή του συστήματος είναι αμελητέο.

3. Ασυνεχής μέθοδος βελτιστοποίησης

Έστω ένα οριζόντιο δίκτυο διανομής νερού που αποτελείται από ένα αγωγό με $N-1$ τμήματα, χωρίς διακλαδώσεις, του οποίου η ονομαστική παροχή των υδροστομίων λαμβάνει διάφορες τιμές q_j , $j=1, 2, 3, \dots, N-1$, η δε απόσταση μεταξύ των υδροστομίων s_j , $j=1, 2, 3, \dots, N-1$ δεν είναι σταθερή (Σχήμα 1). Το τελευταίο υδροστόμιο έχει αριθμηθεί με το αριθμό 1 ενώ αυτό που βρίσκεται πλησιέστερα στην κεφαλή με το αριθμό $N-1$. Κάθε υδροστόμιο υδροδοτεί ένα αρδευτικό σύστημα υπό πίεση (σύστημα μικροάρδευσης ή σύστημα καταιονισμού). Αρχικά, ας δεχθούμε ότι το ονομαστικό φορτίο πίεσης h_j κάθε υδροστομίου είναι σταθερό $h_j = h_r$.



Σχήμα 1. Κάτοψη ενός απλού οριζοντίου αρδευτικού δικτύου διανομής

Ας υποθέσουμε ότι $C_{f1}, C_{f2}, \dots, C_{fNP}$ (Ευρώ/μ) είναι το αρχικό κόστος ανά μέτρο (συμπεριλαμβανομένου του κόστους αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης) που αντιστοιχεί στις NP διαθέσιμες διαμέτρους των αγωγών D_1, D_2, \dots, D_{NP} . Τότε το ετήσιο κόστος απόσβεσης ανά μονάδα μήκους των αγωγών, C_{Pi} ($i=1, 2, \dots, NP$) (Ευρώ/μ) υπολογίζεται αν πολλαπλασιαστεί το κόστος C_{fi} ($i=1, 2, \dots, NP$) με το συντελεστή κάλυψης του αρχικού κεφαλαίου (CRF)

$$C_{Pi} = C_{fi} \cdot CRF \quad (13)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας μεταξύ του σημείου εισόδου και του τέλους του προαναφερθέντος αρδευτικού δικτύου οδηγεί στη σχέση

$$H_{in} = h_r + \sum_{j=1}^{N-1} S_{fj} s_j \quad (14)$$

όπου S_{fj} = απώλειες φορτίου ανά τρέχον μέτρο στο τμήμα j του δικτύου μήκους s_j .

Το κόστος ενέργειας για την άντληση στο οριζόντιο αυτό αρδευτικό σύστημα είναι

$$C_{EN} = C_{Eh} \left(h_r + \sum_{j=1}^{N-1} S_{fj} s_j \right) \quad (15)$$

Το συνολικό ετήσιο κόστος του αρδευτικού συστήματος δίνεται από την σχέση

$$C_{TOT} = C_{EN} + C_{PIP} \quad (16)$$

όπου C_{PIP} είναι το ετήσιο κόστος των αγωγών και

$$C_{PIP} = \sum C_{Pi} s_j \quad (17)$$

με C_{Pi} το ετήσιο κόστος απόσβεσης ανά μέτρο για την διάμετρο D_i που χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα j (συνολικού μήκους s_j).

Σε κάθε τμήμα αγωγού $j=1, 2, \dots, N-1$ το συνολικό κόστος (κόστος ενέργειας και αγωγών), $C_{T,i}^j$, που αντιστοιχεί σε κάθε διάμετρο i ($i=1, \dots, NP$) είναι

$$C_{T,i}^j = C_{Eh} \left(\frac{k_0 Q^2}{D_i^{5.3}} \right)^m s_j + C_{Pi} s_j \quad (18)$$

Χρησιμοποιώντας το μοναδιαίο μήκος αντί του συνολικού μήκους σε κάθε τμήμα αγωγού (είναι εξίσου ακριβές και πλέον εύκολο), η Εξ.(18) γίνεται:

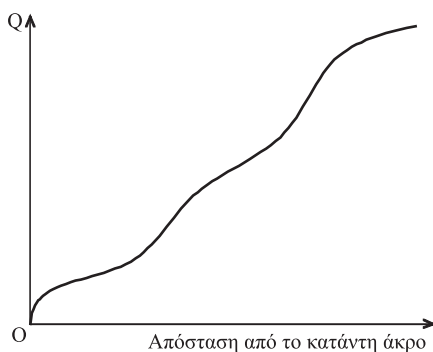
$$c_i^j = \frac{C_{T,i}^j}{s_j} = C_{Eh} \left(\frac{k_0 Q^2}{D_i^{5.3}} \right)^m + C_{Pi} \quad (19)$$

Το κόστος C_{TOT} του αρδευτικού συστήματος θα γίνει ελάχιστο όταν σε κάθε τμήμα αγωγού j , c_i^j γίνεται ελάχιστο με μία από τις διαθέσιμες διαμέτρους D_i , $i=1, 2, \dots, NP$. Οι Valiantzas et al. (2007) απέδειξαν ότι το ελάχιστο ετήσιο κόστος για κάθε τμήμα του αγωγού επιτυγχάνεται με μία ενιαία διάμετρο και όχι με τον συνδυασμό περισσότερων διαμέτρων (λύση τηλεσκοπικού τύπου).

3.1. Κρίσιμες παροχές

Με στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμέτρου σε κάθε τμήμα του δικτύου α ς υποτεθεί ότι το προαναφερθέν αρδευτικό δίκτυο διανομής (Σχήμα 1) διαθέτει ένα

άπειρο αριθμό από υδροστόμια. Σε αυτή την περίπτωση, η μεταβολή της παροχής Q κατά μήκος του συστήματος μπορεί να προσεγγιστεί με μία συνεχή, μονότονο, αύξουσα συνάρτηση (Σχήμα 2). Συνεπώς, η μεταβολή της $C_{T,i}^j$ κατά μήκος του συστήματος-αγωγού διανομής προσεγγίζεται με μια συνεχή, μονότονη και αύξουσα συνάρτηση. Τότε ο αντικειμενικός στόχος είναι να προσδιοριστούν οι κρίσιμες τιμές της παροχής $Q_{n1}, Q_{n2}, \dots, Q_{nNP}$ που αντιστοιχούν στις διατομές n_1, n_2, \dots, n_{NP} όπου η διάμετρος D_1 πρέπει να αλλάξει σε D_2 , η D_2 σε D_3 και ούτω καθεξής.



Σχήμα 2. Μεταβολή της παροχής κατά μήκος του αρδευτικού δικτύου διανομής

Όταν η παροχή Q είναι πολύ μικρή (σχεδόν μηδενική), τότε σύμφωνα με την Εξ. (19) το συνολικό κόστος του πρώτου κατάντη τμήματος, c_1^1 , τείνει στο C_{P1} . Επιπρόσθετα, η οικονομική λύση για αυτό το τμήμα είναι η μικρότερη διαθέσιμη διάμετρος D_1 (λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό της ταχύτητας)

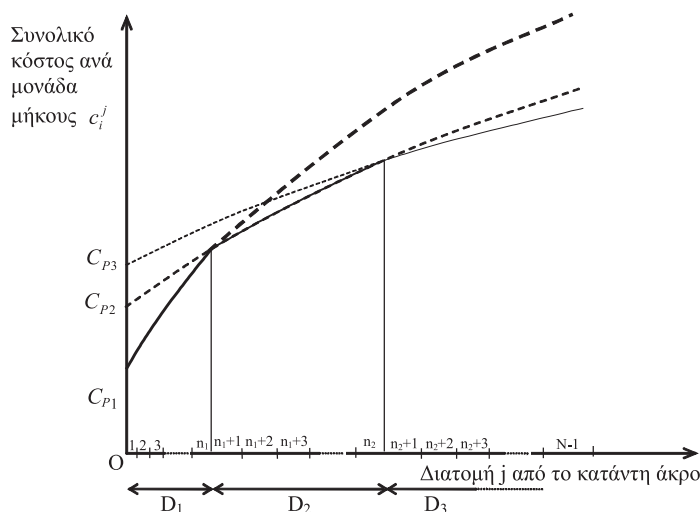
$$\min c_1^1 = c_1^1 \quad (20)$$

Εάν το πρώτο κατάντη τμήμα διαστασιολογηθεί με αμέσως μεγαλύτερη διάμετρο D_2 , το συνολικό ετήσιο κόστος, c_2^1 (το οποίο τείνει στο $C_{P2} > C_{P1}$ όταν $Q \rightarrow 0$), είναι μεγαλύτερο από το κόστος c_1^1 που επιτεύχθηκε με την D_1 ($c_2^1 > c_1^1$) (βλέπε Σχήμα 3). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη την Εξ. (19), την πολύ χαμηλή τιμή της παροχής ($Q \rightarrow 0$) και τα αντίστοιχα κόστη των δύο διαμέτρων ($C_{P2} > C_{P1}$).

Όταν Q αυξάνει, καθώς το j αυξάνει, και τα δύο κόστη c_1^j και c_2^j αυξάνουν, αλλά ο ρυθμός αύξησης του c_1^j είναι μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο ότι η μικρότερη διάμετρος D_1 προκαλεί υψηλότερες απώλειες και υψηλότερο κόστος ενέργειας για την άντληση. Συνεπώς, καθώς το j αυξάνει, υπάρχει μια διατομή n_1 όπου τα δύο κό-

στη εξίσωσώνονται (Σχήμα 3)

$$c_2^{n_1} = c_1^{n_1} \quad (21)$$



Σχήμα 3. Μεταβολή του συνολικού μοναδιαίου κόστους κατά μήκος του αρδευτικού δικτύου διανομής για διάφορες διαμέτρους διαστασιολόγησης

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση Εξ.(19), από την Εξ.(21) προκύπτει

$$C_{Eh} \left(\frac{k_0 Q_{n1}^2}{D_2^{5.3}} \right)^m + C_{P2} = C_{Eh} \left(\frac{k_0 Q_{n1}^2}{D_1^{5.3}} \right)^m + C_{P1} \quad (22)$$

Χρησιμοποιώντας την Εξ.(22), υπολογίζεται η κρίσιμη παροχή Q_{n1}

$$Q_{n1} = \left[\frac{(C_{P2} - C_{P1}) (D_1^{5.3m} D_2^{5.3m})}{C_{Eh} k_0^m (D_2^{5.3m} - D_1^{5.3m})} \right]^{1/2m} \quad (23)$$

Η πλέον οικονομική διάμετρος μεταξύ των διατομών 1 και n_1 είναι η διάμετρος D_1 (Σχήμα 3). Όταν το j γίνει μεγαλύτερο του n_1 , η παροχή Q λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της Q_{n1} και γίνεται πιο οικονομική η χρήση της διαμέτρου D_2 αντί της D_1 . Η παροχή Q_{n1} είναι η κρίσιμη τιμή της παροχής Q όπου πρέπει να γίνει αλλαγή της διαμέτρου D_1 σε D_2 . Παρόμοια, στη διατομή $j=n_2$ όπου $c_2^{n_2}$ γίνεται ίση με $c_3^{n_2}$, η διάμετρος D_2 πρέπει να αλλάξει σε D_3 (Σχήμα 3).

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για $j > n_2$. Γενικά, η κρίσιμη παροχή Q_{ni} (m^3/s) όπου η διάμετρος D_i πρέπει να αλλάξει σε D_{i+1} (στη διατομή n_i) υπολογίζεται από την γενικευμένη μορφή της Εξ.(23)

$$Q_{ni} = \left[\frac{(C_{P(i+1)} - C_{Pi})(D_i^{5.3m} D_{i+1}^{5.3m})}{C_{Eh} k_0^m (D_{i+1}^{5.3m} - D_i^{5.3m})} \right]^{1/2m} \quad (24)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα για τον υπολογισμό των κρίσιμων παροχών, που αντιστοιχούν στα διάφορα ζευγάρια των διατιθεμένων στο εμπόριο διαμέτρων, με στόχο τον υπολογισμό της βέλτιστης διαμέτρου σε κάθε τμήμα του δικτύου γνωρίζοντας την παροχή που διέρχεται από το τμήμα αυτό.

3.2. Γενίκευση της διαδικασίας

Η διαδικασία που παρουσιάστηκε μπορεί επίσης να επεκταθεί για τον καθορισμό της βέλτιστης διαμέτρου σε αγωγούς διανομής νερού που βρίσκονται σε ανωφέρεια ή σε μικρής κλίσης κατωφέρεια. Όπως και στα οριζόντια συστήματα, έτσι και στις προαναφερθείσες περιπτώσεις το ελάχιστο φορτίο πίεσης βρίσκεται στο κατάντη σημείο του συστήματος-αγωγού και συνεπώς η Εξ.(14) μπορεί να εφαρμοστεί.

Το πρόβλημα της επιλογής βέλτιστης διαμέτρου γενικεύεται και για αρδευτικά συστήματα διανομής νερού σε τοπογραφικές συνθήκες όχι ομοιόμορφης κλίσης όπως επίσης και για κύριο ή δευτερεύοντα αγωγό χωρίς διακλαδώσεις με ονομαστική πίεση και παροχή υδροστομίων διαφορετικών τιμών q_j και h_{Tj} , $j=1, 2, 3, \dots, N-1$. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή των διαμέτρων γίνεται ποιο πολύπλοκη.

Το γενικευμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί ως εξής:

Καταρχάς, η προτεινομένη μέθοδος εφαρμόζεται κατά μήκος του υπό μελέτη συστήματος (κύριος ή δευτερεύων αγωγός) υποθέτοντας ότι η διατομή με το ελάχιστο φορτίο βρίσκεται στο κατάντη άκρο του. Πραγματοποιείται ο αρχικός σχεδιασμός και υπολογίζεται η αντίστοιχη κατανομή φορτίου πίεσης (h') κατά μήκος του συστήματος. Στη συνέχεια υπολογίζεται το πλεόνασμα ή το έλλειμμα φορτίου πίεσης ΔH_j , $j=1, 2, \dots, N-1$, σε κάθε υδροστόμιο. Ο υπολογισμός του ΔH_j γίνεται ως εξής

$$\Delta H_j = h_{Tj} - h'_j \quad (25)$$

όπου h'_j = φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο j ,

ΔH_j = πλεόνασμα ή έλλειμμα φορτίου στο ίδιο υδροστόμιο και

h_{Tj} = απαιτούμενο φορτίο πίεσης στο υδροστόμιο.

Με τους προαναφερθέντες υπολογισμούς εντοπίζεται το υδροστόμιο k με το μέγιστο έλλειμμα φορτίου πίεσης ΔH_k . Στο υδροστόμιο αυτό εφαρμόζεται το απαραίτητο

φορτίο πίεσης h_{jk} . Στα τμήματα του συστήματος ανάντη του k^{th} υδροστομίου επιλέγονται οι βέλτιστες διάμετροι που υπολογίστηκαν με την προαναφερθείσα μέθοδο. Η μόνη αλλαγή σε κάθε διατομή j αυτού του τμήματος του συστήματος (διατομές από κεφαλή μέχρι το k^{th} υδροστόμιο) είναι μία αύξηση της διαθέσιμης πίεσης κατά ΔH_k

$$h_j = h'_j + \Delta H_k, \quad j = k, k + 1, \dots, N-1 \quad (26)$$

Για το κατάντη τμήμα του συστήματος διανομής (από το k^{th} υδροστόμιο μέχρι το κατάντη άκρο) το κόστος ενέργειας δεν επιδρά και μόνο υδραυλικά κριτήρια χρησιμοποιούνται για τον βέλτιστο σχεδιασμό των αγωγών (ελαχιστοποίηση του κόστους).

Στο τμήμα αυτό του συστήματος, σε κάθε διατομή j , το διαθέσιμο φορτίο πίεσης πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το αναγκαίο φορτίο πίεσης

$$h'_j \geq h_{tj}, \quad j = k-1, k-2, \dots, 1 \quad (27)$$

Σε κάθε τμήμα, επιλέγονται μία ή δύο διαδοχικές διάμετροι έτσι ώστε το φορτίο πίεσης σε κάθε υδροστόμιο να είναι ίσο με το απαιτούμενο φορτίο (Benami and Ofen, 1984)

$$h'_j = h_{tj}, \quad j = k-1, k-2, \dots, 1 \quad (28)$$

Στην περίπτωση ακτινωτών δικτύων (κύριος ή δευτερεύων αγωγός) υπάρχει ένα κρίσιμο υδροστόμιο (υδροστόμιο με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε φορτίο στην αντλία). Η προτεινομένη μέθοδος θα εφαρμοσθεί για διαστασιολόγηση κατά μήκος της κρίσιμης διαδρομής (από την κεφαλή μέχρι το κρίσιμο υδροστόμιο). Στη συνέχεια, η περίσσεια ή το έλλειμμα φορτίου ΔH_j , $j=1, 2, \dots, N-1$, υπολογίζεται για κάθε υδροστόμιο της κρίσιμης διαδρομής, και εντοπίζεται στην προαναφερθείσα διαδρομή το υδροστόμιο k με το μέγιστο έλλειμμα φορτίου πίεσης, ΔH_k . Εφαρμόζεται το αναγκαίο φορτίο πίεσης h_{jk} στο υδροστόμιο k . Για το ανάντη του k^{th} υδροστομίου τμήμα οι διάμετροι που επελέγησαν προηγουμένως διατηρούνται, ενώ κατάντη του k^{th} υδροστομίου κατά μήκος της κρίσιμης διαδρομής και σε όλους τους κλάδους του δικτύου μόνο υδραυλικά κριτήρια χρησιμοποιούνται για την διαστασιολόγηση.

4. Συνεχής μέθοδος βελτιστοποίησης

4.1 Κόστος των αγωγών

Έστω C_{fi} είναι το αρχικό κόστος ανά τρέχον μέτρο αγωγού (Euros/m) (κόστος αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης) εσωτερικής διαμέτρου D_i . Τότε το ετήσιο κόστος απόσβεσης για το τρέχον μέτρο του αγωγού D_i είναι C_{Pi} και υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος C_{fi} με τον συντελεστή κάλυψης του αρχικού κεφαλαίου CRF

$$C_{Pi} = C_{fi} \cdot CRF \quad (29)$$

Το κόστος των αγωγών ανά τρέχον μέτρο C_f και η διάμετρος D , μπορούν να συσχετιστούν με μία εκθετική σχέση της μορφής

$$C_f = w_1 D^{w_2} + w_3 \quad (30)$$

όπου w_1 , w_2 και w_3 είναι συντελεστές συσχέτισης που εξαρτώνται από το υλικό του αγωγού.

4.2. Συνάρτηση κόστους

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (6), (9), (10), (12) και (30) και χρησιμοποιώντας για τις γραμμικές απώλειες φορτίου S_f την νέα ρητή σχέση (Εξ.11) προκύπτει η συνάρτηση συνολικού κόστους C_{TOT} που πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί

$$C_{TOT}(D) = \frac{Q_{in}}{0.102n_e} (C_{fu} O_t E_{ae} + CRF \cdot C_{Pf}) \left[(k_0 Q^2 / D^{5.3})^m L + \Delta Z + h_r \right] + CRF \cdot (w_1 D^{w_2} + w_3) L \quad (31)$$

όπου Q (m^3/s) είναι η παροχή του αγωγού διαμέτρου D (m). Αν το σύστημα αποτελείται από ένα αγωγό που δεν διανέμει κατά μήκος τότε $Q = Q_{in}$.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη διάμετρος (διάμετρος που οδηγεί στο ελάχιστο συνολικό κόστος) ανά τμήμα δικτύου-αγωγού πρέπει η συνάρτηση C_{TOT} να παραγωγιστεί ως προς D και να εξισωθεί με μηδέν.

$$\frac{d(C_{TOT})}{dD} = -\frac{Q_{in}}{0.102n_e} (C_{fu} O_t E_{ae} + CRF \cdot C_{Pf}) 5.3 m k_0^m \frac{Q^{2m}}{D^{5.3m+1}} L + CRF w_1 w_2 D^{w_2-1} L = 0 \quad (32)$$

Η βέλτιστη διάμετρος D_{op} (διάμετρος που οδηγεί στο ελάχιστο κόστος) ευρίσκεται επιλύοντας την εξίσωση (32).

Η σχέση που επιτρέπει τον απευθείας υπολογισμό της D_{op} (Valiantzas, 2008) είναι

$$D_{op} = \left(\frac{5.3 m Q_{in} (C_{fu} O_t E_{ae} + CRF \cdot C_{Pf}) k_0^m Q^{2m}}{0.102 n_e CRF w_1 w_2} \right)^{1/(5.3m+w_2)} \quad (33)$$

4.3 Γενίκευση της διαδικασίας

Η χρήση και στη μέθοδο αυτή της Εξ.(10) προκειμένου να εξαχθεί η Εξ.(31) προϋποθέτει ότι το ελάχιστο φορτίο πίεσης βρίσκεται στο κατάντη άκρο του αγωγού. Αυτό ισχύει πάντα σε αγωγό που μόνο μεταφέρει (δεν διανέμει κατά μήκος) και σε οριζό-

ντιο ή σε ανερχόμενο αγωγό που διανέμει κατά μήκος. Στην περίπτωση κατερχομένου αγωγού που διανέμει κατά μήκος το σημείο ελάχιστου φορτίου μπορεί να είναι διαφορετικό από αυτό του κατάντη άκρου του αγωγού. Η συνεχής μέθοδος γενικεύεται με την ίδια διαδικασία όπως και η προαναφερθείσα ασυνεχής μέθοδος με την εύρεση της κρίσιμης διαδρομής, δηλαδή της διαδρομής από το ανάντη άκρο του δικτύου μέχρι το κρίσιμο σημείο υδροδότησης. Σ' αυτό το τμήμα εφαρμόζεται η συνεχής μέθοδος βελτιστοποίησης, ενώ σ' όλα τα υπόλοιπα τμήματα του δικτύου εφαρμόζονται σχεδιασμός που βασίζεται σε υδραυλικά κριτήρια.

5. Παράδειγμα εφαρμογής

Έστω δίκτυο παρόμοιας σχεδίασης με αυτήν του Σχήματος 1 που τροφοδοτεί οκτώ υδροστόμια:

$$q_1=10 \text{ L/s}, \quad q_2=15 \text{ L/s}, \quad q_3=20 \text{ L/s}, \quad q_4=15 \text{ L/s}, \\ q_5=20 \text{ L/s}, \quad q_6=10 \text{ L/s}, \quad q_7=15 \text{ L/s}, \quad q_8=15 \text{ L/s}.$$

Το δίκτυο τροφοδοτείται από αντλία παροχής ίσης με την αθροιστική παροχή των υδροστομίων, $Q_{\text{αντλίας}}=120 \text{ L/s}$, το δε ονομαστικό φορτίο πίεσης στα υδροστόμια είναι 45 m. Τα υδροστόμια επιτρέπεται να λειτουργούν συγχρόνως και συνεπώς η παροχή σχεδιασμού των αγωγών είναι:

$$Q_{1-2}=10 \text{ L/s}, \quad Q_{2-3}=25 \text{ L/s}, \quad Q_{3-4}=45 \text{ L/s}, \quad Q_{4-5}=60 \text{ L/s}, \\ Q_{5-6}=80 \text{ L/s}, \quad Q_{6-7}=90 \text{ L/s}, \quad Q_{7-8}=105 \text{ L/s}, \quad Q_{8-A}=120 \text{ L/s}.$$

Τα μήκη όλων των αγωγών είναι 100 m.

Για την διαστασιολόγηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί PVC 10 atm των παρακάτω διαμέτρων (εξωτερική/εσωτερική διάμετρος):

$$D_1=110/99.4 \text{ mm}, \quad D_2=140/126.6 \text{ mm}, \quad D_3=160/144.6 \text{ mm}, \\ D_4=200/180.8 \text{ mm}, \quad D_5=225/203.4 \text{ mm}, \quad D_6=280/253.2 \text{ mm}, \\ D_7=315/285 \text{ mm}, \quad D_8=355/321.2 \text{ mm}, \quad D_9=400/361.8 \text{ mm}.$$

Τα αντίστοιχα κόστη των αγωγών (αγορά, μεταφορά 100 km, εγκατάσταση) είναι:

$$C_{f1}=22.31 \text{ Ευρώ/m}, \quad C_{f2}=30.03 \text{ Ευρώ/m}, \quad C_{f3}=36.09 \text{ Ευρώ/m}, \\ C_{f4}=49.98 \text{ Ευρώ/m}, \quad C_{f5}=60.16 \text{ Ευρώ/m}, \quad C_{f6}=87.40 \text{ Ευρώ/m}, \\ C_{f7}=106.91 \text{ Ευρώ/m}, \quad C_{f8}=132.85 \text{ Ευρώ/m}, \quad C_{f9}=165.48 \text{ Ευρώ/m}.$$

(Τιμαριθ. Β' Τριμ. 2004).

Η συσχέτιση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ εσωτερικών διαμέτρων και του κόστους των αγωγών οδήγησε στους παρακάτω συντελεστές της Εξ.(30): $w_1=1145.96$, $w_2=1.9678$, $w_3=10.339$. Η απόλυτη τραχύτητα των αγωγών ελήφθη ίση με 0.013mm

και ο συντελεστής τριβών των Hazen-Williams ίσος με 150 (πλαστικοί αγωγοί). Επίσης το κόστος ενέργειας $C_{in}=0.05$ Ευρώ/kW-hr, η απόδοση της αντλίας $\eta_e=0.75$, οι ετήσιες ώρες λειτουργίας της αντλίας $O_t=1000$ (hr), το ετήσιο ισοδύναμο ποσοστό αύξησης του κόστους ενέργειας $e=0.05$, το ετήσιο επιτόκιο $r=0.1$, και η διάρκεια ζωής του έργου $t=20$ έτη. Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του αντλιοστασίου ελήφθη ίσο με 135 Euros/kW.

Το δίκτυο του παραδείγματος διαστασιολογήθηκε με τις δύο προτεινόμενες μεθόδους βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας για τις απώλειες φορτίου την νέα ρητή σχέση της Εξ.(11). Επίσης διαστασιολογήθηκε με την ασυνεχή μέθοδο χρησιμοποιώντας για τον υπολογισμό των απωλειών τον τύπο των Hazen-Williams. Στο Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης ανά τμήμα δικτύου. Στην περίπτωση της συνεχούς μεθόδου παρουσιάζεται η βέλτιστη διάμετρος που προέκυψε από την εφαρμογή της Εξ.(33) και εντός παρένθεσης η τελικά επιλεγείσα εμπορική διάμετρος (πλησιέστερη διάμετρος).

Πίνακας 1. Διάμετροι που επελέγησαν με τις διάφορες μεθόδους

Τμήμα δικτύου	Διάμετροι (mm)		
	Ασυνεχής μέθοδος Χρήση Εξ.11 για απώλειες φορτίου	Συνεχής μέθοδος Χρήση Εξ.11 για απώλειες φορτίου	Ασυνεχής μέθοδος Χρήση Hazen - Williams για απώλειες φορτίου
1-2	126.6	118.8 (126.6)	126.6
2-3	144.6	151.7 (144.6)	144.6
3-4	180.8	177.5 (180.8)	180.8
4-5	203.4	191.7 (180.8)	203.4
5-6	203.4	207.0 (203.4)	203.4
6-7	203.4	213.6 (203.4)	203.4
7-8	203.4	222.6 (203.4)	253.2
8-Αντλία	253.2	230.6 (253.2)	253.2

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι διάμετροι που επελέγησαν για τους διάφορους αγωγούς με τις δύο μεθόδους βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης με την ασυνεχή μέθοδο και χρήση του τύπου των Hazen-Williams για τις γραμμικές απώλειες. Οι δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης (συνεχής και ασυνεχής) επέλεξαν την ίδια διάμετρο για όλα τα τμήματα των αγωγών

του δικτύου εκτός ενός, του αγωγού (4-5). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνάρτηση κόστους δεν είναι απολύτως συμμετρική όπως φαίνεται στο σχήμα 6 του άρθρου Valiantzas (2008).

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα οικονομικά αποτελέσματα του υπό μελέτη δικτύου διαστασιολογημένου με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Η ασυνεχής και η συνεχής προτεινόμενες μέθοδοι δίνουν πρακτικά ταυτόσημο συνολικό ετήσιο κόστος. Αντίθετα η διαστασιολόγηση με την ασυνεχή μέθοδο και την χρήση του τύπου των Hazen-Williams οδήγησε σε μεγαλύτερο συνολικό κόστος. Οι διαφορές που προκύπτουν από την χρήση της εξίσωσης των Hazen-Williams αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερες για πιο τραχείς αγωγούς όπου η μέθοδος των Hazen-Williams αποκλίνει σημαντικά της γενικής εξίσωσης των Darcy-Weisbach, Valiantzas (2008).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Συγκριτική παρουσίαση κόστους του δικτύου ανάλογα με την διαστασιολόγηση

Μέθοδος	Αρχική επένδυση (Ευρώ)	Ετήσια απόσβεση αγωγών (Ευρώ)	Συνολικές απώλειες φορτίου (m)	Ετήσιο κόστος ενέργειας (Ευρώ)	Συνολικό ετήσιο κόστος (Ευρώ)
Ασυνεχής μέθοδος Χρήση Εξ.11 για απώλειες φορτίου	44414	5196.41	13.32	7957.76	13154.17
Συνεχής μέθοδος Χρήση Εξ.11 για απώλειες φορτίου	43396	5077.30	14.21	8079.20	13156.50
Ασυνεχής μέθοδος Χρήση Hazen-Williams για απώλειες φορτίου	47138	5515.11	12.07	7787.20	13302.31

6. Συμπεράσματα

Οι προτεινόμενες μέθοδοι επιτρέπουν τον βέλτιστο σχεδιασμό απλών δικτύων διανομής νερού ή απλών συστημάτων άρδευσης με την χρήση απλής αναλυτικής σχέσης. Οι μέθοδοι μπορούν να γενικευθούν. Όπως αναμενόταν αλλά και διαπιστώθηκε από

την εφαρμογή που παρουσιάστηκε η ασυνεχής και η συνεχής μέθοδοι βελτιστοποίησης οδηγούν σε πρακτικά ταυτόσημο συνολικό ετήσιο κόστος. Επίσης η χρήση της νέας ρητής σχέσης για τις γραμμικές απώλειες φορτίου που πρότεινε ο Valiantzas [18] οδηγεί σε μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται με τον τύπο των Hazen-Williams.

Βιβλιογραφία

1. Benami, A. and Ofen, A., 1984. *Irrigation Engineering, Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation, Principles, Design and Agricultural Practice.*, Irrigation Engineering Scientific Publications, Haifa, Israel.
2. Bratls, V.F. and Segerling, L.J., 1985. Finite element analysis of drip irrigation submain units. *Trans. ASAE*, 28(3): 809-814.
3. Bratls, V.F., Kelly, S.F., Shayya, W.H., and Segerling, L.J., 1993. Finite element analysis of microirrigation hydraulics using a virtual emitter system. *Trans. ASAE*, 36(3): 717-725.
4. Kang, V. and Nishiyama, S., 1996a. Analysis and design of microirrigation laterals. *J.Irrig.Drain.Eng.*, 122(2): 75-82.
5. Kang, V. and Nishiyama, S., 1996b. Design of microirrigation submain units. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 122(2): 83-89.
6. Keller, J., 1975. Economic pipe selection chart. *Proc., ASCE Irrig. and Drain. Div. Specially Conf.*, 13-15 Aug. 1968, Utah State Univ., Logan, Utah.
7. Keller, J. and Bliesner, R.D., 1990. *Sprinkle and trickle irrigation.* Van Nostrand Reinhold, Chapman and Hall, New York.
8. Scaloppi, E. J. and Allen, R. G., 1993. Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 119(1): 91-115.
9. Solomon, K. and Keller, J., 1978. Trickle irrigation uniformity and efficiency. *J. Irrig. Drain. Div.*, 104(3): 293-306.
10. Valiantzas, J.D., 1998. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(6): 300-305.
11. Valiantzas, J.D., 2002a. Continuous outflow variation along irrigation laterals: Effect of the number of outlets. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 128 (1): 34-42.
12. Valiantzas, J.D., 2002b. Hydraulic analysis and optimum design of multi-diameter irrigation laterals. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 128(2): 78-86.
13. Valiantzas, J.D., 2003a. Inlet pressure, energy cost and economic design of tapered irrigation submains. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 129(2): 100-107.
14. Valiantzas, J.D., 2003b. Explicit hydraulic design of microirrigation submain units with tapered manifold and laterals. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 129(4): 227-236.
15. Valiantzas, J. D., 2008. Explicit power formula for the Darcy-Weisbach pipe flow equation- Application in optimal pipeline design. *J. of Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, (in press).
16. Valiantzas, J. D. and Dercas, N. 2004. Economic design of center-pivot sprinkler laterals. *J. of Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 130(6):491-498.

17. Valiantzas, J. D., Dercas, N. and Karantounias, G., 2007. Explicit optimum design of simple irrigation delivery system. *ASAE Transactions*, 50(2):429-438.
18. Wu, I.P., 1992. Energy gradient line approach for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. *Irrig. Sci.*, 13: 21-29.
19. Wu, I.P., 1997. An assessment of hydraulic design of microirrigation systems. *Agric. Water Manag.*, 32: 275-284.
20. Wu, I.P. and Gitlin, H.M., 1975. Energy gradient line for drip irrigation laterals. *J.Irrig.Drain.Eng.*, 101(4): 323-326.