

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Π. Κανάκης*, Δ. Παπαμιχαήλ, Π. Γεωργίου

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας
Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

*Στοιχεία επικοινωνίας: kanakisp@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται εφαρμογή ενός Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών, για την ελαχιστοποίηση του κόστους των αγωγών δύο υπό πίεση ακτινωτών αρδευτικών δικτύων βαρύτητας. Οι ευρετικοί και μεθευρετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν τύχει μεγάλης αναγνώρισης και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια σε πολλούς τομείς έρευνας. Όμως, η εφαρμογή τους σε υπό πίεση δίκτυα άρδευσης είναι πολύ περιορισμένη. Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Στον κώδικα προγραμματισμού ενσωματώθηκαν όλοι οι απαραίτητοι υδραυλικοί υπολογισμοί και ο έλεγχος της υδραυλικής συνέπειας των αποτελεσμάτων. Για την καλύτερη αξιολόγηση της μεθόδου πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση, Οικονομική βελτιστοποίηση, Αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών

ANT COLONY ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS

P. Kanakis*, D. Papamichail, P. Georgiou

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, School of Agriculture,
A.U.Th., 54124 Thessaloniki

*Corresponding author: kanakisp@gmail.com

ABSTRACT

The present paper deals with the application of an Ant Colony Optimization Algorithm for the cost minimization of pipes of two branched pressurized gravity irrigation networks. Heuristic and meta-heuristic optimization algorithms have received much recognition and growth in recent years in many fields of research. However, their applications in pressurized irrigation networks are very limited. For the development of the algorithm the programming language Fortran was used. In the programming code all the necessary hydraulic calculations and the control of hydraulic consistency of the results are integrated. To better evaluate the method, a comparative analysis of the results with the method of Linear Programming was made.

KEY WORDS: Pressurized irrigation networks, Cost optimization, Ant colony algorithm

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της οικονομικής βελτιστοποίησης της επιλογής των διαμέτρων ενός αρδευτικού δικτύου διανομής νερού περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων διαμέτρων των αγωγών, με τρόπο τέτοιο, ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελάχιστο και η υδραυλική συμπεριφορά του δικτύου επαρκής. Ειδικότερα, για τα υπό πίεση δίκτυα ελεύθερης ζήτησης η πίεση σε όλα τα υδροστόμια πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη πίεση που καθορίζεται στο στάδιο του σχεδιασμού.

Για την επίλυση του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί αρκετές μαθηματικές μέθοδοι, όπως είναι η ασυνεχής μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού (Karmeli et al., 1968; Kanakis et al., 2014), η συνεχής μέθοδος του μη γραμμικού προγραμματισμού (Swamee et al., 1973), η ασυνεχής μέθοδος του Labye (Labye et al., 1988), η ασυνεχής μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού (Liang, 1971) και η μέθοδος του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού (Κανάκης κ.α., 2012; Kanakis et al., 2014).

Από τη δεκαετία του 1990 άρχισε μία προσπάθεια να εφαρμοστούν στο πρόβλημα νέοι ευρετικοί και μεθευρετικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από φυσικές διεργασίες, οι λεγόμενοι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms, EAs). Από τις πρώτες εφαρμογές οι ερευνητές απέδειξαν την ανωτερότητα και τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής των EAs, για τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης του κόστους δικτύων διανομής νερού, σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους (Murphy and Simpson, 1992; Simpson et al., 1994; Tolson et al., 2004; Zecchin et al., 2005; Farmani et al., 2007; Kargouzos, 2012). Οι εφαρμογές των αλγορίθμων έγιναν κυρίως σε αστικά αλλά και σε αρδευτικά δίκτυα διανομής νερού με βρόχους και πολύ σπάνια σε ακτινωτά. Οι κυριότεροι ευρετικοί αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βελτιστοποίηση δικτύων είναι οι: Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) (GA), Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing) (SA), Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution) (DE), Αλγόριθμος Αναζήτησης Διασποράς (Scatter Search) (SS), Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) (PSO) και ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization Algorithm) (ACO), ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Περισσότερες πληροφορίες για την εφαρμογή των παραπάνω αλγορίθμων δίνονται από τους De Corte and Sörensen (2013).

Η χρήση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (για συντομία θα αναφέρονται ως αλγόριθμοι ACO) στη βιβλιογραφία, για το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους των αγωγών, έχει περιοριστεί σε αστικά δίκτυα με βρόχους. Οι Maier et al. (2003), Zecchin et al. (2005, 2006, 2007), Afshar (2009) και Gil et al. (2011) εφάρμοσαν διάφορους τύπους του αλγορίθμου ACO σε τέτοια δίκτυα, με στόχο τη βέλτιστη επιλογή διαμέτρων για την ελαχιστοποίηση του κόστους ή την αποκατάσταση του δικτύου (δηλαδή αντικατάσταση, καθαρισμό, προσθήκη ή κατάργηση αγωγών), με ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα. Οι Ostfeld and Tubaltzev (2008) πρόσθεσαν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης το κόστος λειτουργίας των αντλιών, το κόστος κατασκευής των αντλιών και το κόστος της δεξαμενής νερού. Σε άλλες εφαρμογές, οι Afshar and Marino (2006) χρησιμοποίησαν αλγορίθμους ACO για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού (χάραξη) ακτινωτών δικτύων, οι Kumar and Reddy (2006) εφάρμοσαν αλγόριθμο ACO σε πρόβλημα επιλογής της πολιτικής λειτουργίας ενός ταμιευτήρα πολλαπλών χρήσεων, με στόχους την ελαχιστοποίηση των κινδύνων πλημμύρας, την ελαχιστοποίηση στις ελλείψεις αρδευτικού νερού και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας και οι López-Ibáñez et al. (2008) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο ACO για τη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας αντλητικών συγκροτημάτων δικτύων διανομής νερού, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Κανάκης κ.ά. (2015) εφάρμοσαν έναν αλγόριθμο ACO για τη βελτιστοποίηση ακτινωτών αρδευτικών δικτύων βαρύτητας και ο Κανάκης (2015) ανέπτυξε έναν αλγόριθμο ACO με εισαγωγή νέων μηχανισμών για εφαρμογή σε αρδευτικά

δίκτυα ελεύθερης ζήτησης με αντλιοστάσιο. Σε απλά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, όλοι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.

Από τη δημιουργία του πρώτου αλγορίθμου ACO και μετά, έχουν προστεθεί διάφορες τροποποιήσεις και διορθώσεις που οδήγησαν σε νέους τύπους του αλγορίθμου. Ο πρώτος αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών ονομάστηκε Σύστημα Μυρμηγκιών (Ant System, AS) και αναπτύχθηκε από τους Dorigo et al. (1996). Η πρώτη βελτίωσή του ήταν το Elitist Ant System (EAS), το οποίο παρουσιάστηκε ταυτόχρονα με τον αρχικό αλγόριθμο από τους ίδιους ερευνητές. Αργότερα, οι Bullnheimer et al. (1999) παρουσίασαν το Rank-Based Ant System (AS_{Rank}) και οι Stützle and Hoos (2000) παρουσίασαν το Max-Min Ant System (MMAS).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών σε δύο μικρά υπό πίεση ακτινωτά αρδευτικά δίκτυα βαρύτητας και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της σε σύγκριση με αυτά της μεθόδου του Γραμμικού Προγραμματισμού.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το πρόβλημα που καλείται να λυθεί μπορεί να περιγραφεί από μία αντικειμενική συνάρτηση, της οποίας ζητείται να βρεθεί η ελάχιστη τιμή και έχει τη μορφή:

$$F(\varphi) = \min \sum_{i=1}^n DC_{\varphi_j} \times L_i \quad (2.1)$$

όπου: n είναι ο αριθμός των αγωγών και των κόμβων απόφασης, DC_{φ_j} είναι το κόστος ανά m μήκους της πιθανής διαμέτρου φ_j σε €/m, L_i είναι το μήκος σε m του αγωγού i .

Οι περιορισμοί που καλούνται να ικανοποιηθούν για τη σωστή υδραυλική λειτουργία του δικτύου που προκύπτει από την παραγόμενη λύση είναι:

- Η ταχύτητα ροής του νερού στους αγωγούς, V_i , πρέπει να είναι εντός των ορίων που θέτουν η μέγιστη, V_{max} , και η ελάχιστη, V_{min} , επιτρεπόμενες ταχύτητες

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (2.2)$$

- Οι αγωγοί του δικτύου πρέπει να ακολουθούν μία τηλεσκοπική διάταξη, δηλαδή το μέγεθος των διαμέτρων των αγωγών, D_i , πρέπει να μειώνεται από τα ανάντη προς τα κατόντη

$$D_i \leq D_{i-1} \quad (2.3)$$

- Το υπολειπόμενο φορτίο στους κόμβους πέρατος των αγωγών, H_i , δεν πρέπει να παίρνει αρνητικές τιμές

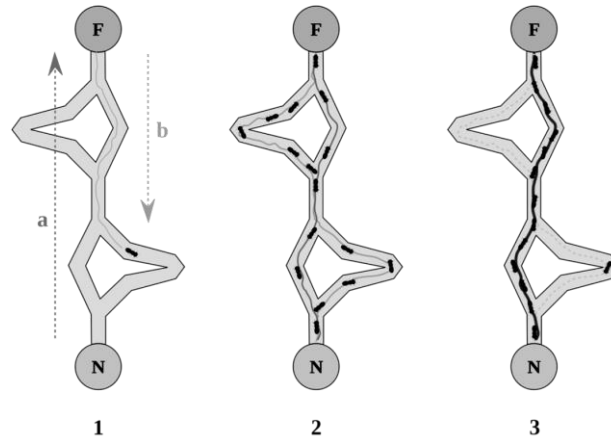
$$H_i = Z_0 - Z_i - H_{min,i} - \sum_{i=1}^r \Delta H_i \geq 0 \quad (2.4)$$

όπου: Z_0 το υψόμετρο της δεξαμενής σε m, Z_i το υψόμετρο του κόμβου i σε m, $H_{min,i}$ το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο στον κόμβο i σε m, $\sum_{i=1}^r \Delta H_i$ οι συνολικές απώλειες φορτίου στους αγωγούς από την αρχή του δικτύου μέχρι τον κόμβο $i=r$ σε m.

2.2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ (ACO)

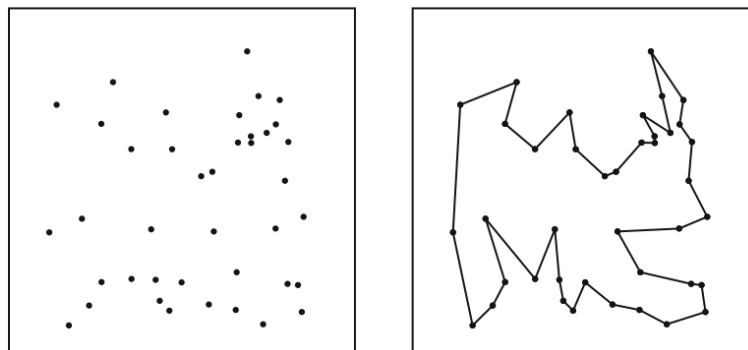
Η βελτιστοποίηση με τη χρήση των Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών έχει εμπνευστεί από τη μέθοδο που χρησιμοποιούν τα μυρμήγκια για να βρουν την πιο

κοντινή διαδρομή για την τροφή τους. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ίχνη φερομόνης σαν μια μορφή έμμεσης επικοινωνίας. Τα μυρμήγκια εναποθέτουν ίχνη φερομόνης ταξιδεύοντας προς την πηγή της τροφής. Αλλα μυρμήγκια ακολουθούν αυτό το μονοπάτι της φερομόνης. Τα μυρμήγκια που τυχαίνει να ακολουθήσουν τη συντομότερη διαδρομή προς την τροφή θα δημιουργήσουν ένα ισχυρό μονοπάτι με υψηλή συγκέντρωση φερομόνης γρηγορότερα από αυτά που επέλεξαν μια μακρύτερη διαδρομή. Αφού η περισσότερη φερομόνη προσελκύει καλύτερα τα μυρμήγκια, όλο και περισσότερα επιλέγουν την πιο σύντομη διαδρομή, μέχρι τελικά όλα ή σχεδόν όλα να την ακολουθούν. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η διαδικασία εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή των μυρμηγκιών με την υψηλή συγκέντρωση φερομόνης.



Σχήμα 1. Απεικόνιση της διαδικασίας εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή των πραγματικών μυρμηγκιών.

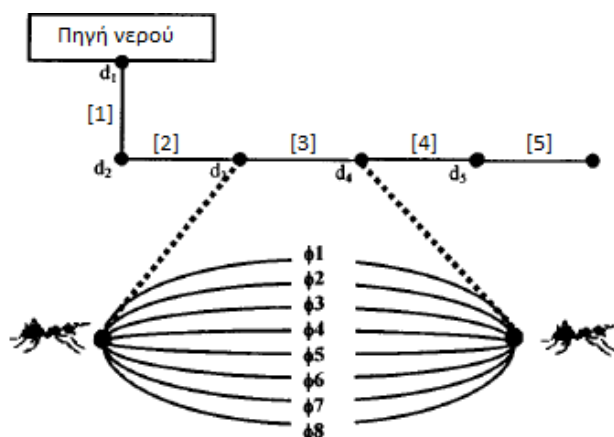
Οι πρώτοι αλγόριθμοι βασισμένοι στις αποικίες των μυρμηγκιών σχεδιάστηκαν για να λύσουν το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (the traveling salesman problem, TSP), ένα πάρα πολύ γνωστό πρόβλημα στη βιβλιογραφία, επειδή αυτό ομοιάζει αρκετά με την αναζήτηση της πιο σύντομης διαδρομής προς την τροφή (Dorigo and Maria, 1997). Συνοπτικά, είναι το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ένας πωλητής, ο οποίος ξεκινώντας από την πόλη του, θέλει να βρει το συντομότερο ταξίδι που θα τον περάσει μέσα από ένα συγκεκριμένο σύνολο πόλεων και μετά θα τον επιστρέψει στην αφετηρία του, περνώντας από κάθε πόλη ακριβώς μία φορά. Στο Σχήμα 2 δίνεται μία αναπαράσταση του προβλήματος, όπου στην αριστερή εικόνα αναπαριστώνται οι πόλεις με κουκίδες και στη δεξιά η συντομότερη διαδρομή.



Σχήμα 2. Αναπαράσταση του Προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου ACO στο πρόβλημα βελτιστοποίησης των υπό πίεση δικτύων διανομής νερού απαιτεί την προσαρμογή του στο είδος και στα δεδομένα του προβλήματος. Η αναπαράσταση του προβλήματος δίνεται στο Σχήμα 3. Τη θέση των πόλεων λαμβάνουν οι

κόμβοι του δικτύου, ενώ για τη μετάβαση από τον ένα κόμβο στον επόμενο, τη θέση του μήκους παίρνει το κόστος κάθε πιθανής διαμέτρου.



Σχήμα 3. Γραφική αναπαράσταση του προβλήματος βέλτιστης επιλογής διαμέτρων υπό πίεση δικτύων διανομής νερού (Maier et al., 2003).

Η μέθοδος βελτιστοποίησης με αλγόριθμο ACO είναι μία επαναληπτική μέθοδος. Οι βασικές διαδικασίες ενός αλγορίθμου ACO, ανεξάρτητα από το πρόβλημα το οποίο καλείται να λύσει, είναι η επιλογή μίας εκ των πιθανών εναλλακτικών επιλογών σε κάθε σημείο απόφασης, η διαδικασία ενημέρωσης της φερομόνης των πιθανών επιλογών, η οποία διαχωρίζεται στις διαδικασίες εξάτμισης και προσθήκης φερομόνης και η διαδικασία υπολογισμού της καλύτερης λύσης του προβλήματος βάσει των τιμών φερομόνης. Στο παρόν πρόβλημα οι πιθανές εναλλακτικές επιλογές είναι οι πιθανές διάμετροι των αγωγών και σημεία απόφασης είναι οι κόμβοι που ορίζουν την αρχή κάθε αγωγού.

Η επιλογή μίας εκ των πιθανών διαμέτρων για κάθε αγωγό γίνεται μέσω μίας πολιτικής απόφασης. Η πιθανότητα να επιλεγεί κάθε μία από τις πιθανές διαμέτρους υπολογίζεται με τη σχέση (Dorigo et al., 1996):

$$p_{i,j}^k(t) = \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot (\eta_{i,j})^\beta}{\sum_{i,j} [\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot (\eta_{i,j})^\beta} \quad (2.5)$$

όπου: $p_{i,j}^k(t)$ η πιθανότητα να επιλεγεί η πιθανή διάμετρος j για τον αγωγό i στην επανάληψη t από το μυρμήγκι k , $\tau_{i,j}(t)$ η συγκέντρωση φερομόνης της πιθανής διαμέτρου j του αγωγού i στην επανάληψη t , $\eta_{i,j}$ ένας ευρετικός παράγοντας που ευνοεί επιλογές χαμηλότερου κόστους, α και β είναι εκθετικές παράμετροι πολιτικής απόφασης που ελέγχουν τη σχετική σημαντικότητα της φερομόνης και του ευρετικού παράγοντα στην τυχαία επιλογή.

Σύμφωνα με τους Dorigo et al. (1996), ο ευρετικός παράγοντας $\eta_{i,j}$ είναι ανάλογος με το να παρέχει στα αληθινά μυρμήγκια όραση και ονομάζεται ορατότητα ή οπτικό εύρος (visibility). Η τιμή της υπολογίζεται ως το αντίστροφο του κόστους, $c_{i,j}$, της πιθανής διαμέτρου:

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{c_{i,j}} \quad (2.6)$$

Οι παράμετροι πολιτικής απόφασης, α και β , ελέγχουν το πόσο σημαντικό ρόλο παίζουν η ποσότητα της φερομόνης και η ορατότητα αντίστοιχα, για την απόφαση κάθε μυρμηγκιού. Αν $\alpha \gg \beta$ τότε ο αλγόριθμος θα επιλέγει βασισμένος κυρίως στις πληροφορίες που αντιπροσωπεύει η φερομόνη, ενώ αν $\beta \gg \alpha$, τότε ο αλγόριθμος θα δρα ως ένας ακόρεστος («λαίμαργος») ευρετικός, που επιλέγει κυρίως τις φθηνότερες εναλλακτικές αδιαφορώντας για τις επιπτώσεις που αυτές οι επιλογές έχουν στην ποιότητα της τελικής λύσης (Zecchin et

al., 2005). Είναι προφανές ότι στην εκκίνηση της διαδικασίας όλες οι πιθανές διαμέτροι έχουν την ίδια πιθανότητα επιλογής από τα μυρμήγκια.

Η εξάτμιση φερομόνης σε όλες τις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού λαμβάνει χώρα με το πέρας της επανάληψης, όταν δηλαδή θα έχουν κατασκευάσει λύση όλα τα μυρμήγκια. Αυτή γίνεται με τη βοήθεια της παραμέτρου ρ και με τη σχέση (Dorigo et al., 1996):

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) \quad (2.7)$$

όπου: $\tau_{i,j}(t+1)$ είναι η νέα τιμή φερομόνης μετά την εφαρμογή της εξάτμισης, $\tau_{i,j}(t)$ είναι η προηγούμενη τιμή φερομόνης πριν την εξάτμιση, ρ είναι ο παράγοντας εξάτμισης ή επιμονής φερομόνης.

Η παράμετρος ρ παίρνει τιμές $0 \leq \rho \leq 1$. Η εξάτμιση δίνει τη δυνατότητα στην αποικία να ξεχάσει τις κακές ή λιγότερο καλές λύσεις και αυξάνει την πιθανότητα να επιλέγονται οι καλύτερες λύσεις, μιας και σε αυτές θα αυξάνεται η ποσότητα της φερομόνης. Για τιμές του $\rho \rightarrow 1$, μικρή ποσότητα φερομόνης εξατμίζεται, και η ταχύτητα σύγκλισης είναι μικρότερη. Για τιμές $\rho \rightarrow 0$, εξατμίζεται μεγάλη ποσότητα με αποτέλεσμα γρηγορότερη σύγκλιση. Όμως, μεγαλύτερες τιμές του ρ αυξάνουν την ικανότητα του αλγορίθμου να εξερευνεί, καθώς δεν επιτρέπουν μεγάλη ποσότητα φερομόνης να εξατμιστεί και μη ενημερωμένες με φερομόνη επιλογές παραμένουν «ενεργές» για περισσότερες επαναλήψεις, ενώ μικρές τιμές του συντελεστή επιφέρουν γρήγορη σύγκλιση σε μη βέλτιστες λύσεις (Zecchin et al., 2005).

Η προσθήκη φερομόνης στον αρχικό αλγόριθμο ACO, τον AS, γίνεται στις διαμέτρους της λύσης κάθε ενός μυρμηγκιού που συμμετέχει στη διαδικασία. Οι νεότεροι αλγόριθμοι άλλαξαν αυτή την τακτική. Η προσθήκη μπορεί να γίνει επιπρόσθετα ή και μόνο στις επιλεγμένες διαμέτρους του μυρμηγκιού που έδωσε την καλύτερη λύση στην τρέχουσα επανάληψη, στις επιλογές που έχουν δώσει την καλύτερη λύση συνολικά έως την τρέχουσα επανάληψη, στις επιλεγμένες διαμέτρους των n καλύτερων λύσεων, όπως επίσης μπορεί να γίνει και συνδυασμός των παραπάνω.

Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για την παρούσα εργασία, μόνο το μυρμήγκι που κατασκεύασε την καλύτερη λύση της επανάληψης συμμετέχει στη διαδικασία της προσθήκης φερομόνης. Η προσθήκη φερομόνης υπολογίζεται από τη σχέση (Dorigo et al., 1996; Stützle and Hoos, 2000; Maier et al., 2003):

$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{R}{f(\varphi)^k}, & \text{αν η πιθανή διάμετρος ανήκει στη λύση του μυρμηγκιού } k \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.8)$$

όπου: R είναι ο παράγοντας προσθήκης φερομόνης και έχει σταθερή τιμή, $f(\varphi)^k$ είναι το κόστος της λύσης του μυρμηγκιού k σε ϵ .

Όσο καλύτερη είναι η λύση που υπολογίζεται, τόσο περισσότερη φερομόνη αφήνεται από το μυρμήγκι που την κατασκεύασε. Η τιμή του παράγοντα R δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική από μόνη της, καθώς σύμφωνα με τους Zecchin et al. (2005) σχετίζεται με την αρχική τιμή φερομόνης, τ_0 . Η σχέση που συνδέει αυτούς τους δύο παράγοντες είναι:

$$\tau_0 = \frac{R}{f(\varphi)^{n^*}} \sqrt{n \times NO_{avg}} \quad (2.9)$$

όπου: $\frac{R}{f(\varphi)^{n^*}}$ είναι η αλλαγή στη συγκέντρωση φερομόνης, $f(\varphi)^{n^*}$ είναι το κόστος μίας

τυχαίας λύσης σε ϵ , n είναι ο αριθμός των αγωγών, NO_{avg} είναι ο μέσος αριθμός πιθανών επιλογών για κάθε αγωγό.

Σύμφωνα με τους Zecchin et al. (2005), ο αριθμός των μυρμηγκιών που συμμετέχουν στην κατασκευή της λύσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$m = n \sqrt{NO_{avg}} \quad (2.10)$$

2.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η ανάπτυξη του κώδικα έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Για την εκκίνηση της διαδικασίας επίλυσης με χρήση του αλγορίθμου ACO απαιτούνται τα δεδομένα του δικτύου. Αυτά είναι οι παροχές στους αγωγούς, οι απαιτούμενες πιέσεις στους κόμβους, οι διαθέσιμες διάμετροι του εμπορίου και το κόστος τους ανά μέτρο μήκους, οι απώλειες φορτίου κάθε πιθανής διαμέτρου σε κάθε αγωγό, η μέγιστη και η ελάχιστη ταχύτητα ροής στους αγωγούς, από τις οποίες προκύπτουν η ελάχιστη και μέγιστη διάμετρος, τα μήκη των αγωγών και τα υψόμετρα των κόμβων.

Οι παροχές των αγωγών, όταν δεν είναι γνωστές, υπολογίζονται από το πρόγραμμα με τον πρώτο τύπο του Clemént. Με τις γνωστές παροχές υπολογίζεται η ταχύτητα ροής για κάθε πιθανή διάμετρο σε κάθε αγωγό. Επίσης, υπολογίζονται οι απώλειες φορτίου που αντιστοιχούν στις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού με χρήση της σχέσης των Hazen-Williams (Liou, 1998), η οποία στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε με τη μορφή (Παπαμιχαήλ και Μπαμπατζιμόπουλος, 2014):

$$H_f = 1,13 \times 10^{11} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} D^{-4,87} \quad (2.11)$$

όπου: H_f οι απώλειες φορτίου σε m/100 m αγωγού, Q η παροχή του αγωγού σε m^3/hr , D η εσωτερική διάμετρος του αγωγού σε mm, C συντελεστής τραχύτητας που εξαρτάται από το υλικό και την ηλικία των αγωγών.

Για την ενσωμάτωση και των τοπικών απωλειών φορτίου, οι απώλειες που υπολογίζονται με τη σχέση των Hazen-Williams προσαυξάνονται κατά 10%.

Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι η εισαγωγή μίας αρχικής τιμής φερομόνης τ_0 σε όλες τις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού και ο αριθμός των μυρμηγκιών που θα αποτελέσουν την αποικία με τις σχέσεις (2.9) και (2.10). Στη συνέχεια υπολογίζεται η πιθανότητα $p_{i,j}^k$ να επιλεγεί κάθε μία από τις πιθανές διαμέτρους με τη σχέση (2.5). Στην εκκίνηση της διαδικασίας αυτή η πιθανότητα είναι ίδια για όλες τις πιθανές επιλογές. Σύμφωνα με αυτές τις πιθανότητες, τα μυρμηγκία επιλέγουν τυχαία διαμέτρους για κάθε αγωγό κατασκευάζοντας το καθένα μία λύση.

Μόλις ένα μυρμηγκί κατασκευάσει τη λύση του, γίνεται έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν η λύση είναι υδραυλικά συνεπής, μέσω της ικανοποίησης των περιορισμών για την ομαλή υδραυλική λειτουργία του δικτύου σύμφωνα με τις σχέσεις (2.3) και (2.4).

Το κόστος της λύσης που έγινε δεκτή υπολογίζεται ως το άθροισμα του επιμέρους κόστους κάθε αγωγού του δικτύου:

$$TC = \sum_{i=1}^n DC_{\phi_j} \times L_i \quad (2.12)$$

όπου: TC το συνολικό κόστος της λύσης σε €.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το συνολικό αριθμό των m μυρμηγκιών της επανάληψης και αποθηκεύεται η καλύτερη λύση που βρέθηκε στη συγκεκριμένη επανάληψη.

Ακολουθεί η ενημέρωση του ίχνους φερομόνης, που θα επηρεάσει τις επιλογές της επόμενης επανάληψης, στις πιθανές διαμέτρους των αγωγών του δικτύου. Οι διαδικασίες περιλαμβάνουν την εξάτμιση και την προσθήκη φερομόνης. Η εξάτμιση εφαρμόζεται με τη σχέση (2.7) και η προσθήκη με τη σχέση (2.8). Μόνο το μυρμηγκί που κατασκεύασε την καλύτερη λύση της επανάληψης συμμετέχει στη διαδικασία της προσθήκης φερμόνης. Έτσι, η νέα τιμή φερομόνης στις διαμέτρους κάθε αγωγού του δικτύου είναι:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j}^k \quad (2.13)$$

Μετά την ενημέρωση της φερομόνης ξεκινάει η νέα επανάληψη, υπολογίζοντας με τη σχέση (2.5) τις νέες τιμές πιθανότητας επιλογής των διαμέτρων, σύμφωνα με τη νέα τιμή φερομόνης. Έτσι, η τυχαία επιλογή των διαμέτρων θα επηρεάζεται από την τιμή του ίχνους

φερομόνης που υπάρχει στις επιλογές για κάθε αγωγό. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

Με το πέρας των επαναλήψεων ξεκινούν οι διαδικασίες υπολογισμού και εξαγωγής της τελικής λύσης. Επιλέγονται για κάθε αγωγό εκείνες οι διαμέτροι για τις οποίες είναι μεγαλύτερες οι αντίστοιχες ποσότητες φερομόνης. Βάσει αυτών των διαμέτρων υπολογίζεται το τελικό κόστος του δικτύου με τη σχέση:

$$FC = \sum_{i=1}^n DC_{pher_max,i} \times L_i \quad (2.14)$$

όπου: FC είναι το συνολικό κόστος της λύσης σε €, $DC_{pher_max,i}$ είναι το κόστος της διαμέτρου με τη μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης σε €/m, L είναι το μήκος του αγωγού σε m.

Η διαφοροποίηση μεταξύ των βροχοειδών και των ακτινωτών δικτύων όσον αφορά την αντιμετώπισή τους από τον αλγόριθμο, έγκειται στις διαδικασίες ελέγχου της υδραυλικής συνέπειας των παραγόμενων λύσεων. Στα ακτινωτά δίκτυα, η πρόβλεψη της παροχής είναι συγκεκριμένη, μέσω του τύπου του Clément, και η ροή είναι πάντα προς μία κατεύθυνση. Στα δίκτυα βρόχων, τόσο η παροχή όσο και η κατεύθυνση ροής μέσα στους αγωγούς δεν είναι συγκεκριμένες, καθώς το νερό έχει εναλλακτικές διαδρομές. Αυτό αυξάνει πολύ την πολυπλοκότητα και καθιστά δύσκολη την επίλυση. Οι ευρετικοί αλγόριθμοι αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εκτίμησης της ροής του νερού στους αγωγούς των βροχοειδών δικτύων, με χρήση ενός προγράμματος υδραυλικής επίλυσης, το οποίο συνήθως είναι το EPANET 2.0 (Rossman, 2000). Οι αλγόριθμοι δημιουργούν εκατομμύρια λύσεις, συνδυάζοντας τυχαία τις πιθανές διαμέτρους. Έτσι, κάθε λύση είναι μία τυχαία επιλεγμένη διάμετρος για κάθε αγωγό, από τη λίστα πιθανών διαμέτρων. Κατά την επίλυση ενός δικτύου με βρόχους, κάθε μία από αυτές τις λύσεις, αμέσως μόλις παράγεται, στέλνεται στο EPANET το οποίο και ελέγχει αν είναι υδραυλικά σωστή. Αν είναι, επιστρέφει στον αλγόριθμο ως έχει. Διαφορετικά, επιστρέφει στον αλγόριθμο και παίρνει ποινή στη φερομόνη και στο κόστος, ώστε να μικρύνει η πιθανότητα να την επιλέξει ο αλγόριθμος στις επόμενες επαναλήψεις. Έτσι, σταδιακά αποκλείονται οι μη εφικτές λύσεις. Ο έλεγχος των λύσεων επομένως, δεν γίνεται εντός του αλγορίθμου, του οποίου η μόνη διεργασία είναι η τυχαία επιλογή διαμέτρων βάσει ευρετικών κριτηρίων, όπως η ποσότητα φερομόνης και το κόστος της διαμέτρου. Στον αλγόριθμο ACO που αναπτύχθηκε για την επίλυση των ακτινωτών δικτύων άρδευσης, ο υδραυλικός έλεγχος των λύσεων γίνεται εξολοκλήρου εντός των διαδικασιών του, με τις σχέσεις (2.2) – (2.4).

2.4. ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Τα δίκτυα στα οποία έγινε εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης με αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών δεν είναι πραγματικά. Έχουν από 10 αγωγούς και 10 κόμβους με υδροστόμιο. Επειδή είναι μικρά, ως παροχή κάθε αγωγού ορίστηκε το άθροισμα των παροχών των κατάντη υδροστομίων που αυτός τροφοδοτεί. Η λίστα με τους αγωγούς εμπορίου (PVC 10 atm) και το κόστος τους ανά μέτρο μήκους δίνεται στον Πίνακα 1.

Το πρώτο βασίζεται σε ένα δίκτυο που παρουσίασε ο Τζιμόπουλος (1982) και είναι τροποποιημένο έτσι ώστε να γίνει λίγο πιο δύσκολη η επίλυσή του. Τα στοιχεία του δικτύου δίνονται στον Πίνακα 2. Το φορτίο στην κεφαλή είναι 60 m, η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση στα υδροστόμια είναι 35 m και η παροχή τους 6 l/s. Όλοι οι κόμβοι που ορίζουν το τέλος των αγωγών έχουν ένα υδροστόμιο. Το σχέδιο του δικτύου δίνεται στο Σχήμα 4.

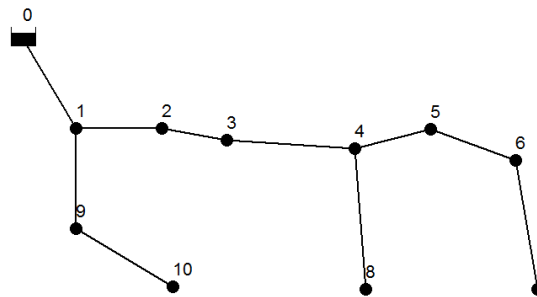
Το δεύτερο δίκτυο σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Τα στοιχεία του δίνονται στον Πίνακα 3. Το φορτίο κεφαλής είναι 74 m, η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση λειτουργίας των υδροστομίων είναι 50 m και η παροχή τους 6 l/s, με κάθε κόμβο να διαθέτει επίσης ένα υδροστόμιο. Το σχέδιο του δικτύου δίνεται στο Σχήμα 5.

Πίνακας 1. Αγωγοί εμπορίου και αντίστοιχο κόστος

a/a	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Εσωτερική διάμετρος (mm)	Συντελεστής τραχύτητας C	Κόστος (€/m)
1	90	81,4	150	6,38
2	110	99,4	150	9,48
3	125	113	150	11,92
4	140	126,6	150	14,92
5	160	144,6	150	19,53
6	200	180,8	150	30,32
7	225	203,4	150	38,48
8	250	226,2	150	47,06

Πίνακας 2. Στοιχεία πρώτου δικτύου εφαρμογής.

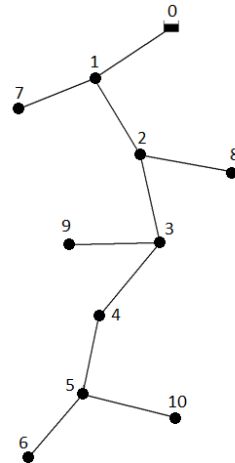
Αγωγός	Μήκος (m)	Κόμβος αρχής	Κόμβος τέλους	Υψόμετρο τέλους (m)	Τροφοδοτούντα υδροστόμια	Παροχή l/s
1	501	0	1	12,1	10	60
2	405	1	2	8,58	7	42
3	195	2	3	6,99	6	36
4	598	3	4	2,97	5	30
5	245	4	5	3,42	3	18
6	455	5	6	3,9	2	12
7	688	6	7	0	1	6
8	709	4	8	0,04	1	6
9	520	1	9	6,54	2	12
10	633	9	10	6,93	1	6



Σχήμα 4. Αναπαράσταση του πρώτου δικτύου εφαρμογής.

Πίνακας 3. Στοιχεία δεύτερου δικτύου εφαρμογής.

Αγωγός	Μήκος (m)	Κόμβος αρχής	Κόμβος τέλους	Υψόμετρο τέλους (m)	Τροφοδοτούντα υδροστόμια	Παροχή l/s
1	300	0	1	20	10	60
2	300	1	2	17,5	8	48
3	300	2	3	15	6	36
4	300	3	4	14,5	4	24
5	300	4	5	13,5	3	18
6	300	5	6	12	1	6
7	300	1	7	19,5	1	6
8	300	2	8	17,5	1	6
9	300	3	9	15,5	1	6
10	300	5	10	13,5	1	6



Σχήμα 5. Αναπαράσταση του δεύτερου δικτύου εφαρμογής.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι απαραίτητη η εκτίμηση των παραμέτρων των σχέσεων που εμπεριέχει, δηλαδή των α , β και ρ . Για αυτό το σκοπό διενεργήθηκε μία μικρής έκτασης παραμετρική ανάλυση. Οι βέλτιστες τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους ήταν $\alpha=0,8$, $\beta=0$ και $\rho=0,98$ και για τα δύο δίκτυα. Επειδή τα δίκτυα είναι μικρά και σχετικά εύκολο να επιλυθούν, η τιμή της παραμέτρου β είναι 0, καθώς δεν είναι απαραίτητη η χρήση του ευρετικού παράγοντα $\eta_{i,j}$. Μεγάλες τιμές της α και μικρές της β βοηθούν την ταχύτητα εκτέλεσης και σύγκλισης. Ο αριθμός των μυρμηγκιών βρέθηκε από τη σχέση (2.10) και είναι $m = 28$. Από τη σχέση (2.9) για $R = 10^6$, η αρχική τιμή φερομόνης είναι $\tau_0 = 90$.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου στο πρώτο δίκτυο έδωσε το βέλτιστο κόστος των **96.916,67 €**. Σε σύνολο 100 εκτελέσεων η βέλτιστη τιμή βρέθηκε στις 99, με μέσο χρόνο εκτέλεσης μόλις 0,039 sec. Η σύγκλιση σε αυτό το κόστος επερχόταν στην επανάληψη 73 κατά μέσο όρο, με πρώτη εμφάνιση της βέλτιστης λύσης στην επανάληψη 23. Οι τελικές διαμέτροι που επιλέχτηκαν σε κάθε αγωγό και τα τελικά φορτία στους κόμβους δίνονται στον Πίνακα 4. Οι τελικές τιμές φερομόνης για κάθε πιθανή διάμετρο σε όλους τους αγωγούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 και αφορούν μία τυχαία εκτέλεση με τις παραπάνω παραμέτρους και 150 επαναλήψεις.

Πίνακας 4. Επιλεγμένες διαμέτροι της βέλτιστης λύσης του πρώτου δικτύου και υπολειπόμενα φορτία στους κόμβους με τη μέθοδο του αλγορίθμου ACO.

Αγωγός	Διάμετρος εξωτερική (mm)	Κόμβος	Υπολειπόμενο φορτίο (m)
1	250	1	8,72
2	200	2	7,04
3	200	3	6,75
4	200	4	6,66
5	160	5	4,26
6	140	6	0,53
7	110	7	0,002
8	110	8	5,02
9	125	9	7,81
10	110	10	3,35

Πίνακας 5. Τιμές ποσότητας φερομόνης κάθε πιθανής διαμέτρου της βέλτιστης λύσης των αγωγών του πρώτου δικτύου σε μία τυχαία εκτέλεση.

Αγωγός	Πιθανές διαμέτροι εμπορίου (mm)							
	90	110	125	140	160	200	225	250
1	0	0	0	0	0	0	13,5	485,4
2	0	0	0	0	0	484	14,9	4,3
3	0	0	0	0	4,3	489,3	9,6	4,3
4	0	0	0	0	4,3	494,5	4,3	4,3
5	0	0	4,3	7,3	486,8	9,2	4,3	0
6	0	4,3	5,2	483,5	14,5	0	0	0
7	4,3	486	12,9	0	0	0	0	0
8	5,7	488,4	9,1	0	0	0	0	0
9	0	4,3	488,9	9,5	4,8	0	0	0
10	4,3	485,9	13	0	0	0	0	0

Η εκτέλεση του αλγορίθμου στο δεύτερο δίκτυο έδωσε το βέλτιστο κόστος των **71.208 €**. Σε σύνολο 100 εκτελέσεων η βέλτιστη τιμή βρέθηκε και στις 100, με μέσο χρόνο εκτέλεσης 0,072 sec. Η σύγκλιση σε αυτό το κόστος επερχόταν στην επανάληψη 24 κατά μέσο όρο, με πρώτη εμφάνιση της βέλτιστης λύσης στην επανάληψη 8. Οι τελικές διαμέτροι που επιλέχθηκαν σε κάθε αγωγό και τα τελικά φορτία στους κόμβους δίνονται στον Πίνακα 6. Οι τελικές τιμές φερομόνης για κάθε πιθανή διάμετρο σε όλους τους αγωγούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 και αφορούν μία τυχαία εκτέλεση με τις παραπάνω παραμέτρους και 80 επαναλήψεις.

Πίνακας 6. Επιλεγμένες διαμέτροι της βέλτιστης λύσης του δεύτερου δικτύου και υπολειπόμενα φορτία στους κόμβους με τη μέθοδο του αλγορίθμου ACO.

Αγωγός	Διάμετρος εξωτερική (mm)	Κόμβος	Υπολειπόμενο φορτίο (m)
1	250	1	1,50
2	250	2	2,34
3	200	3	1,95
4	200	4	1,08
5	200	5	1,28
6	110	6	0,85
7	110	7	0,07
8	110	8	0,41
9	125	9	0,41
10	125	10	0,25

Για την αξιολόγηση της δυναμικής του αλγορίθμου ACO επιλέχτηκε ο γραμμικός προγραμματισμός για σύγκριση, καθώς εξακολουθεί να είναι μία αρκετά ικανοποιητική μέθοδος βελτιστοποίησης κόστους σωληνωτών δικτύων άρδευσης. Η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού (μέθοδος Simplex) δίνει πάντα λύσεις με συνδυασμό δύο διαμέτρων σε κάποιους αγωγούς, έτσι ώστε να εκμεταλλευτεί στο έπακρο το διαθέσιμο φορτίο στους κόμβους του δικτύου. Αυτή η τακτική όμως, επιφέρει δυσκολίες στην κατασκευή των δικτύων και απαιτεί επιπλέον υπολογισμούς για την ορθότερη κατανομή των αντίστοιχων μηκών, καθώς αυτά δίνονται σε δεκαδική μορφή, ενώ πολλές φορές το μήκος της μίας εκ των δύο διαμέτρων είναι μη ρεαλιστικό (πολύ μικρό). Ο διαχωρισμός των διαμέτρων για τη εύρεση της βέλτιστης λύσης είναι μια διαδικασία η οποία κριτικάρεται και απορρίπτεται στη

βιβλιογραφία ως λιγότερο ρεαλιστική (Savic and Walters, 1997; Reca and Martínez, 2006). Η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι ουσιαστικά έχει εγκαταλειφθεί ο διαχωρισμός των αγωγών σε δύο διαμέτρους. Για το λόγο αυτό έγινε μία τροποποίηση στον κώδικα του γραμμικού προγραμματισμού ώστε να δώσει αποτελέσματα ενιαίων διαμέτρων στους αγωγούς. Η εφαρμογή έγινε με χρήση του λογισμικού Lingo. Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν ήταν ίδια με αυτά του αλγορίθμου ACO και για τα δύο δίκτυα, ήτοι **96.916,67 €** για το πρώτο και **71.208 €** για το δεύτερο δίκτυο εφαρμογής. Για το πρώτο δίκτυο η λύση βρέθηκε έπειτα από 129 επαναλήψεις και για το δεύτερο έπειτα από 130 επαναλήψεις.

Πίνακας 7. Τιμές ποσότητας φερομόνης κάθε πιθανής διαμέτρου της βέλτιστης λύσης των αγωγών του δεύτερου δικτύου σε μία τυχαία εκτέλεση.

Αγωγός	Πιθανές διαμέτροι εμπορίου (mm)							
	90	110	125	140	160	200	225	250
1	0	0	0	0	0	0	17,9	579,7
2	0	0	0	0	0	17,9	24,1	573,4
3	0	0	0	0	17,9	561,4	30,3	23,7
4	0	0	0	17,9	17,9	576,8	20,8	17,9
5	0	0	17,9	17,9	26,6	570,9	17,9	0
6	17,9	554,5	43	0	0	0	0	0
7	17,9	567,2	30,4	0	0	0	0	0
8	17,9	553,8	43,7	0	0	0	0	0
9	17,9	24	573,6	0	0	0	0	0
10	17,9	21,1	576,5	0	0	0	0	0

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου ACO και τη σύγκριση με αυτά της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού είναι πολύ ικανοποιητικά, δεδομένου του μεγέθους των δικτύων εφαρμογής, το οποίο δεν επιτρέπει μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις μεθόδους. Συγκεκριμένα, οι βέλτιστες λύσεις που υπολογίστηκαν ήταν όμοιες, με τη μέθοδο αλγορίθμου ACO να υπολογίζει τη λύση με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων των διαδικασιών της έναντι της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού. Στο πρώτο δίκτυο χρειάστηκε κατά μέσο όρο 73 επαναλήψεις έναντι 129 και στο δεύτερο 24 έναντι 130, αντίστοιχα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η μέθοδος βελτιστοποίησης με χρήση του ευρετικού αλγορίθμου αποικίας μυρμηγκιών δεν έχει τύχει εφαρμογής στα υπό πίεση ακτινωτά συλλογικά αρδευτικά δίκτυα. Με την παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο εφαρμογές της μεθόδου σε δύο μικρού μεγέθους δίκτυα. Οι εφαρμογές έδειξαν πως ο αλγόριθμος ACO παράγει λύσεις ισάξιες του γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος με τη σειρά του δίνει παρόμοιες λύσεις με τις υπόλοιπες κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και με δεδομένο ότι η βιβλιογραφία έχει αποδείξει την ανωτερότητα της χρήσης των ευρετικών και μεθευρετικών αλγορίθμων έναντι των κλασικών μεθόδων στη λύση των προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν τα αστικά δίκτυα, προτείνεται η συνέχιση της έρευνας για την εφαρμογή της μεθόδου και σε άλλα μεγαλύτερα αρδευτικά δίκτυα.

Βάσει της φύσης του αλγορίθμου, ο οποίος είναι πολύ αποτελεσματικός για λύση πολύπλοκων προβλημάτων, για περαιτέρω επέκταση της έρευνας προτείνεται η ενσωμάτωση στο πρόβλημα επιπλέον κριτηρίων και παραμέτρων βελτιστοποίησης, όπως:

- το κόστος κατασκευής, χρήσης και ενέργειας αντλιοστασίου
- το κόστος κατασκευής δεξαμενής ή ταμιευτήρα και η διατήρηση της στάθμης τους σε συγκεκριμένα όρια

- η βελτιστοποίηση δικτύων με περισσότερες από μία πηγές νερού
- η εισαγωγή διαφορετικών σεναρίων ζήτησεων παροχής από την κεφαλή του δικτύου, με διαφορετικές εκτιμήσεις λόγω του είδους των καλλιεργειών

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής, η οποία ήταν χρηματοδοτούμενη από υποτροφία του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κανάκης, Π., Παπαμιχαήλ, Δ., και Γεωργίου, Π., 2012. *Βελτιστοποίηση υπό πίεση αρδευτικών δικτύων με ασαφή γραμμικό προγραμματισμό και ανάλυση λειτουργίας τους*. Πρακτικά 2ου κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ, Πάτρα, 1162-1173.
- Κανάκης Π., Παπαμιχαήλ Δ., και Γεωργίου Π., 2015. *Βελτιστοποίηση υπό πίεση αρδευτικών δικτύων με τη χρήση Αλγορίθμου Αποικίας Μυρμηγκιών*. Πρακτικά 9ου Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΓΜΕ, Θεσσαλονίκη, 25-33.
- Κανάκης Π., 2015. *Βελτιστοποίηση υπό πίεση ακτινωτών αρδευτικών δικτύων με χρήση αλγορίθμου αποικίας μυρμηγκιών*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας. Α.Π.Θ., 200 σελ.
- Παπαμιχαήλ Δ., και Μπαμπατζιμόπουλος Χ., 2014. *Εφαρμοσμένη Γεωργική Υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 568 σελ.
- Τζιμόπουλος Χ., 1982. *Γεωργική Υδραυλική - Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό, Τόμος II*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 263 σελ.
- Afshar, M., 2006. *Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design*. *Advances in Water Resources*, 29: 1371–1382.
- Afshar M., and Marino M., 2006. *Application of an ant algorithm for layout optimization of tree networks*. *Engineering Optimization*, 38(3): 353-369.
- Bullnheimer B., Hartl R. F., and Strauss C., 1999. *A new rank-based version of the Ant System: A computational study*. *Central European Journal for Operations Research and Economics*, 7(1): 25-38.
- De Corte A., and Sörensen K., 2013. *Optimisation of gravity-fed water distribution network design: A critical review*. *European Journal of Operations Research*, 228: 1-10.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A., 1996. *The Ant System: Optimization by a colony of cooperative agents*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(1): 29-41.
- Dorigo M., and Maria G., 1997. *Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1: 53-66.
- Farmani R., Abadia R., and Savic D., 2007. *Optimum design and management of pressurized branched irrigation networks*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6): 528-537.
- Gil, C., Baños, R., Ortega, J., Márquez, A., Fernández, A., and Montoya, M., 2011. *Ant Colony Optimization for water distribution network design: A comparative study*. *Proceedings 11th IWANN Conference, Part II, Malaga, Spain*, 300-307.
- Kanakis, P., Papamichail, D., and Georgiou, P., 2014. *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation network designed with linear and fuzzy linear programming*. *Irrigation and Drainage*, 63(4): 451-462.
- Karmeli, D., Gadish, Y. and Meyers, S., 1968. *Design of optimal water distribution networks*. *Journal of Pipeline Division*, 94: 1-10.
- Karpouzou D., 2012. *Applications of genetic algorithms to water distribution networks: Optimization of irrigation networks design*. In: K. Katsifarakis (Editor), *Hydrology*,

- Hydraulics and Water Resources Management: A Heuristic Optimization Approach*, WIT Press, Southampton, UK, 39-55.
- Kumar D.N, and Reddy M.J., 2006. *Ant colony optimization for multiple-purpose reservoir operation*. *Water Resources Management*, 20: 879-898.
- Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A. and Tsiourtis, N., 1988. *Design and optimization of irrigation distribution networks*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 44, 247 p.
- Liang, T., 1971. *Design conduit system by dynamic programming*. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(3): 383-393.
- Liou, C., 1998. *Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(9): 951-954.
- López-Ibáñez M., Prasad T.D., and Paechter B., 2008. *Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4): 337-346.
- Maier H., Simpson A., Zecchin A., Foong W., Phang K., Seah H., and Tan C., 2003. *Ant Colony Optimization for design of water distribution systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3): 200-209.
- Murphy, L., and Simpson, A., 1992. *Pipe optimization using genetic algorithms*. Research Report No R93, Department of Civil Engineering, University of Adelaide, Australia.
- Ostfeld A., and Tubaltzev, A., 2008. *Ant Colony Optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2): 107-118.
- Reca, J., and Martínez, J., 2006. *Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks*. *Water Resources Research*, 42(5), W05416, doi:10.1029/2005WR004383.
- Rossman L., 2000. *EPANET 2 User's Manual*. US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, USA, 200 p.
- Savic D.A., and Walters G.A., 1997. *Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2): 67-77.
- Simpson, A., Dandy, G., and Murphy, L., 1994. *Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4): 423-443.
- Stützle T., and Hoos H., 2000. *Max-Min Ant System*. *Future generation computer systems*, 16: 889-914.
- Swamee, P., Kumar, V., and Khanna, P., 1973. *Optimization of dead end water distribution mains*. *Journal of Environmental Engineering Division*, 99(2): 123-134.
- Tolson, B., Maier, H., Simpson, A., and Lence, B., 2004. *Genetic Algorithms for Reliability-Based Optimization of Water Distribution Systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130(1): 63-72.
- Zecchin, A., Simpson, A., Maier, H., and Nixon, J., 2005. *Parametric study for an Ant Algorithm applied to water distribution system optimization*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(2): 175-191.
- Zecchin, A., Maier, H., Simpson, A., Leonard, M., and Nixon, J., 2007. *Ant Colony Optimization applied to water distribution system design: A comparative study of five algorithms*. *Technical Notes, Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1): 87-92.
- Zecchin, A., Simpson, A., Maier, H., Leonard, M., Roberts, A., and Berrisford, J., 2006. *Application of two Ant Colony Optimisation Algorithms to water distribution system optimisation*. *Mathematical and Computer Modelling*, 44: 451-468.