



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**Βελτιστοποίηση Ενεργειακού Κόστους και Διαρροών σε Δίκτυα
Ύδρευσης**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Μαρίνα Μαριού

Επιβλέπων:

Χρήστος Μακρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Μακρόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος, καθώς και για τη συνεργασία και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον Γιώργο Κοψιάτση, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σχετικά με τη χρήση του λογισμικού Matlab, όπως και τον Ιωάννη Τσουκαλά, επίσης υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την λύση αποριών όποτε του το ζήτησα.

Τέλος, ευχαριστώ πάρα πολύ τους φίλους μου, τα αδέρφια μου και τους γονείς μου που με στηρίζουν πάντα σε κάθε μου επιλογή.

Μαρίνα Μαριού

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε κάθε πόλη, όσο μεγάλη ή μικρή και αν είναι και όπου και αν βρίσκεται, είναι απαραίτητη η παρουσία δικτύου ύδρευσης. Τα δίκτυα ύδρευσης χρησιμεύουν στη μεταφορά του πόσιμου νερού από την εκάστοτε πηγή, η οποία συνήθως βρίσκεται εκτός πόλης, και σε κάποιες περιπτώσεις σε αρκετά μεγάλη απόσταση από αυτή, στις κατοικίες αλλά και σε οποιοδήποτε άλλο δημόσιο ή ιδιωτικό χώρο είναι απαραίτητη η παρουσία του.

Για να εξυπηρετούν τα δίκτυα ύδρευσης τον σκοπό τους, πρέπει ο σχεδιασμός τους να γίνει πολύ προσεκτικά. Η λειτουργία τους πρέπει να είναι τέτοια ώστε το νερό να φτάνει ακόμη και στα πιο ψηλά κτήρια ή και στα πιο απομακρυσμένα σημεία της πόλης και ταυτόχρονα να ικανοποιείται η ζήτηση. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό τα δίκτυα να μην καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, ώστε να είναι συμφέρουσα η λειτουργία τους. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των υπό πίεση δικτύων ύδρευσης είναι ταυτόσημη με την ενέργεια άντλησης του νερού, στην περίπτωση που αυτά δε λειτουργούν με την επίδραση της βαρύτητας. Σημαντικό είναι λοιπόν η λειτουργία του δικτύου, δηλαδή η λειτουργία των αντλιών, να είναι η βέλτιστη δυνατή για την λιγότερη καταναλισκόμενη ενέργεια. Στην περίπτωση μάλιστα που το δίκτυο έχει αστοχίες και υπάρχουν διαρροές σε αυτό, είναι απαραίτητο η λειτουργία του να συμβάλλει στην όσο το δυνατό μεγαλύτερη μείωση των διαρροών αυτών, αλλά και στην ταυτόχρονη βέλτιστη τιμή της απαραίτητης ενέργειας λειτουργίας του, έχοντας όμως ως πρωτεύοντα στόχο την κάλυψη της ζήτησης.

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας που καταναλώνεται από τις αντλίες σε δύο διαφορετικά δίκτυα ύδρευσης, αλλά και η βέλτιστη διαχείριση των διαρροών όταν αυτές υπάρχουν. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται:

- μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας άντλησης στα δίκτυα χωρίς την ύπαρξη διαρροών
- μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση για την ελαχιστοποίηση των διαρροών στην περίπτωση που υπάρχουν
- μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας άντλησης στα δίκτυα με την ύπαρξη διαρροών
- πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της ενέργειας και των διαρροών.

Η διαδικασία πραγματοποιείται με το λογισμικό PaVLOS και κυρίως με τον γενετικό αλγόριθμο του λογισμικού Matlab σε σύνδεση με το πρόγραμμα υδραυλικής επίλυσης EPANET 2.0.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Every city, regardless of its size or its location, is necessary to have a water distribution network. Water distribution networks are useful for the transfer and distribution of potable water from the source to the buildings or any other public or private space in which water is necessary. Usually the water source is outside of the city and too far from it.

It is really important for water supply systems to satisfy the purpose of their existence. This can be assured by their careful planning. Their operation should be such so that the water reaches even the tallest buildings or the remotest parts of the city and at the same time the water demand must be satisfied. However, it is necessary to prevent the networks from consuming large amounts of energy in order to make them profitable to operate. The energy required for the operation of water supply systems is identical to the energy required for the pumping of water. So the network operation, namely the operation of pumps, should be the best possible for the least energy consumption. If the network has faults and there are leaks in it, it is necessary for its operation to contribute to the greatest possible reduction of these leaks, and simultaneously minimize the energy that is necessary for its operation, in order to cover the demand.

The subject of this master thesis is the optimal management of the energy that is consumed by the pumps in two different water distribution networks, and also the optimal management of leaks when they exist.

Analytically, single-objective optimizations are performed in order to:

- minimize pumping energy cost in the networks, if they have no leaks
- minimize leakage in the networks, if they have leaks
- minimize pumping energy cost in the networks, when there are leaks in them

Finally a multi-objective optimization is performed in order to minimize pumping energy cost and leakage at the same time. The procedure is performed by PaVLOS software and mainly by the genetic algorithm of Matlab, in connection with the hydraulic resolving program EPANET 2.0.

Water Distribution Systems

Every water distribution system is constituted of pipes, junctions, tanks, reservoirs, pumps and sometimes of valves. Tanks are useful for the continuous water flow of the city and usually are placed in very high locations.

For the appropriate operation of the system, the following are important (Tsakiris, 2010):

- The network must be designed according to the maximum hourly water flow.

- The pipes must be at least 10 atm, while the minimum nominal diameter should be 90 mm.
- The static pressure should not be above 60 m, between the upper and lower point of the network.
- The water velocity in the pipes should be between 0.5 m/s and 1.5 m/s.

The relationship between the flats of a building and the system pressure is described as follows:

- One flat 12 – 15 m
- Two flats 16 – 19 m
- Three flats 20 – 23 m

Optimization

The solutions that satisfy the problem constraints are considered as feasible and they constitute the feasible space or search space.

Each feasible solution is described by the decision variables, which are evaluated by the objective function; presented below (equation(1)).The optimum solution maximizes or minimizes the objective function, depending on the problem. The objective function is a mathematical expression that constitutes of one or more objectives, so, there is either a single or a multi-objective optimization.

The general expression of an objective function is:

$$\min/ \max f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

For the optimization preprocess, there are some important components:

- The objectives that are expressed as the maximization or minimization of a mathematical expression.
- The decision variables.
- The constraints, if there are any, expressed as equations or inequalities.
- The evaluation method.
- The optimization method.

Genetic Algorithms

Genetic algorithms are part of the evolutionary algorithms and they are a really useful optimization tool in water recourses.

The key features of genetic algorithms to other methods are the following (Goldberg, 1989):

- They are appropriate to optimize functions with discrete control variables or variables that are expressed in a logical way.

- They are suitable for the search of the potential solution space.
- The objective function is the only knowledge that is required.
- For the iterations, probabilistic decision rules are used and not deterministic.

Multi-objective Genetic Algorithms

When the objectives of an optimization problem are more than one, the target of the objective function is to minimize or maximize all of them at the same time.

The main idea of the multi-objective optimization is the concept of Pareto-domination and Pareto front. According to Pareto, a solution is optimal if and only if it is at least as good as other solutions for all the criteria and if it is the best of at least one criterion. In a Pareto set it is impossible to compare one solution to another, because they all can be considered as optimal and this is the reason they are called non-dominated solutions.

Problem Formulation

The subject of this thesis is the energy and leakage optimization in water distribution networks. For this reason, some data are required, which are presented in detail below.

Decision variables

The decision variables for the energy and leakage optimization of a water distribution network are the pumps operating mode for each time step of the total simulation time. The time step has been chosen one hour and the simulation time 24 hours.

The pumps operation in a 24hour basis is represented by a binary system, with values 0 and 1. When a pump is not in service, it takes the value of 0 and when it is in service it takes the value of 1.

The objective of the simulation model is to find the function of pumps that offers the minimum power consumption and/or the minimum amount of leakage for the particular time simulation.

Constraints

Every water distribution network operates under specific constraints. Constraints are mathematical functions, which are solved and the results are used in the calculation of the objective function. The constraints that are used in this thesis are the following:

- Pressure: pressure at nodes must be greater than 20 m in every time step of the simulation time, so the water reaches at least the third floor of the buildings.

$$P_{it} \geq 20 \text{ m} \quad (2)$$

Where i , is the number of nodes and t is the time step.

- Water velocity: must be between 0.5 and 1.5 m/s:

$$0.5 \leq v_{jt} \leq 1.5 \text{ (m/s)} \quad (3)$$

Where j is the name of each pipe and t is the time step.

- Water level in tanks: Water level in a tank in the end of a simulation time must be at least as in the beginning. Furthermore, the water level must remain between the maximum and minimum levels of each tank for every time step.

$$S_{k(24h)} \geq S_{k(0h)} \quad (4)$$

$$S_{\min k} \leq S_{kt} \leq S_{\max k} \quad (5)$$

Where k is the tank, t is the time step, $S_{\min k}$ and $S_{\max k}$ are the minimum and maximum water level respectively, $S_{k(24h)}$ and $S_{k(0h)}$ are the water levels in the end and in the beginning of the simulation respectively.

- Negative demand: in the leakage optimization process, an additional constraint is imposed, because in some cases after the end of the optimization process there are negative pressures in nodes which do not receive water from any source.

$$D_{it} \geq 0 \quad (6)$$

Where i, is each node and t is the time step.

Whenever a constraint is violated, a penalty is imposed, which increases greatly the value of objective function (here the target is the minimization of the objective functions), so the solution that violates a constraint is ignored and the process is repeated until a feasible and optimal solution is find that satisfies all the constraints.

Objective function

The objective function for the energy minimization is equal to the sum of energy that is consumed in the simulation time, which is calculated by the EPANET, and the penalties for the constraint violation.

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N C_n^t + P_{P_i} + P_{P_v} + P_{S_k} \quad (7)$$

Where t is the time step, T the simulation time, n is each pump, N the number of pumps, C_n^t , each pump operation cost for every time step, P_{P_i} , P_{P_v} and P_{S_k} , the penalties for pressure, velocity and water level in tanks respectively, for the total simulation time.

The objective function for the leakage minimization is the sum of leakages for each node for the total simulation time and the penalties for the constraints.

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I L_i^t + P_{P_i} + P_{P_v} + P_{S_k} + P_{D_i} \quad (8)$$

Where t is the time step, T the simulation time, i is each node and I the number of nodes, L_i^t the leaks in each node for every time step, P_{Pi} , P_{vi} , P_{Sk} , and P_{Di} the penalties for the pressure, the velocity, the water level in tanks and the negative demand for the total simulation time.

The leaks for each node and for every time step of the simulation time are equal to:

$$L_i^t = \text{Node Demand} - \text{Base Demand} \times \text{Demand Multiplier} \times \text{Pattern Demand} \quad (9)$$

Where Node Demand is the demand of each node in every time step, Base Demand is the baseline or average demand in each node for every time step, Demand Multiplier is a global multiplier applied to all demands to make total system consumption vary up or down by a fixed amount, it is usually equal to 1. Pattern Demand is a coefficient that defines the variance of the demand in the simulation time.

The objective function for the multi-objective optimization is the following:

$$\min \{f_1, f_2\} \quad (10)$$

Where f_1 and f_2 are the functions that are minimized in the two single-objective optimizations, that presented in previous paragraphs.

This is subject to the same constraints, as the single-objective optimizations.

Evaluation of Solutions

For this thesis, the optimization is mainly performed by the genetic algorithm of Matlab and for the hydraulic solution of the networks, EPANET 2.0 is used. For this procedure it is necessary to create an interface between the two programs. For this reason, a code was developed in Matlab, which is based on reading and writing files.

Briefly, the steps that are performed in the evaluation of each solution are the followings:

- Creation of the EPANET input file with the new pump mode
- Call of the executable file (batch file), which in turn calls the executable EPANET file and creates the two files of the results
- Reading of the two files which contain the results
- Calculation of the objective function

The total number of steps equals the product of the population times the number of generations.

Application

For the application, two networks are studied, the “Anytown” and the “ky5 Jolly 2013”. The first one is not a real network, but the second one is part of Kentucky’s water distribution network. Three single-objective optimizations and one multi-objective are

performed for each network. For the minimization of pumping cost in networks with and without leaks, and minimization of leakages is applied single objective optimization. For the minimization of pumping cost and leakages in the same time, multi-objective optimization is applied in the networks. Some brief results are shown in this section.

Optimization of pumping cost in “Anytown” network with no leaks

The first network was optimized by PaVLOS software and by genetic algorithm of Matlab for cost minimization for the same number of population and generations. The network has no leaks.

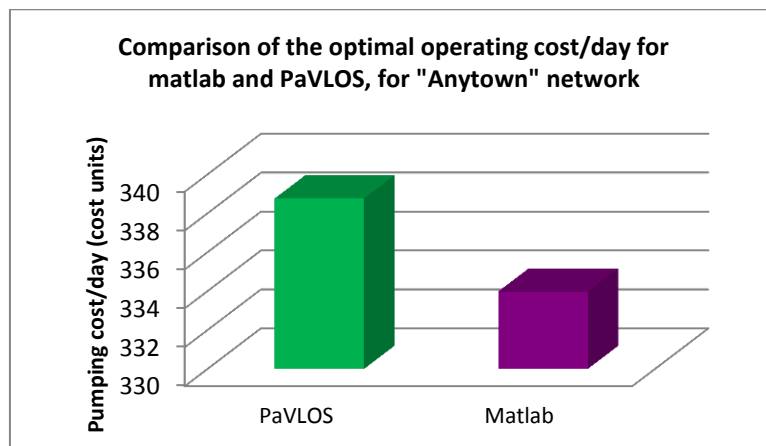


Figure 1 – Comparison of the optimal operating cost/day for Matlab and PaVLOS, for “Anytown” network

The results from genetic algorithm of Matlab are better than the results from PaVLOS optimization, as shown in Figure 1.

Optimization of leakage in “Anytown” network

For the leakage optimization process, three scenarios were studied for the first network and two for the second one, by the application of an emitter coefficient in selected nodes. For “Anytown” network, leaks were chosen to constitute about 7.5, 15 and 27% of total demand, and for “ky5” network were chosen to constitute about 18 and 28% of total demand. These are the three and two scenarios for the networks. The results for the first network are displayed in Figure 2. The optimization was performed by the genetic algorithm of Matlab.

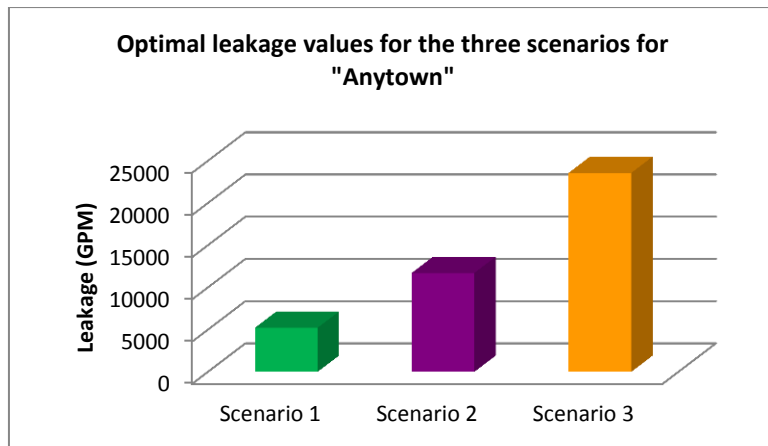


Figure 2 – Optimal leakage for the three scenarios of the network “Anytown”

As shown in Figure 2, the leakage is increasing as the emitter coefficient increases and more specifically the leakage in scenario 3 is five times greater than the leakage in scenario 1.

Optimization of pumping cost in “Anytown” network with leaks

Single-objective optimization was performed for the minimization of pumping cost in the two networks with the existence of leaks. The results for the “ky5” network are shown in Figure 3. The optimization was performed by the genetic algorithm of Matlab.

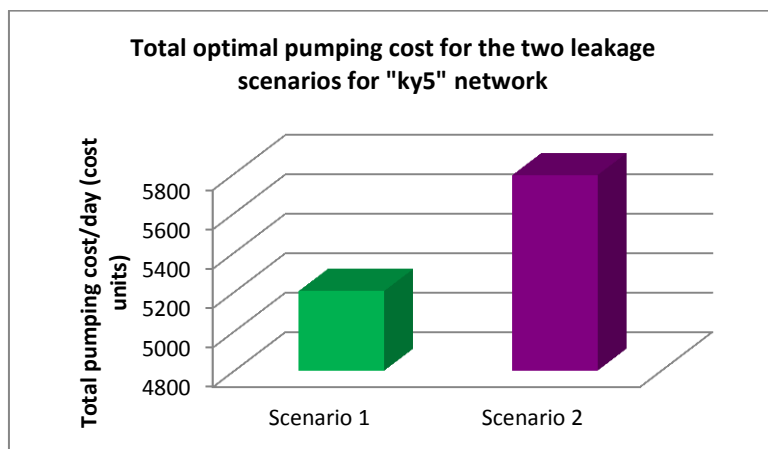


Figure 3 – Total optimal pumping cost for the two leakage scenarios of “ky5” network

As expected, the total pumping cost in 24h is greater in scenario 2 than in scenario 1. This is a logical result, because when the rate of leakage is big the pumps consume large amounts of energy in order to satisfy the demand overcoming the losses.

Specifically in scenario 2, the pumping cost increased by 11%, compared to scenario 1. Also, it is noticed that for the network with the first leakage scenario, the optimal operating cost in 24h increased by 17%, while for the second scenario, the cost increased by 25%, compared to the network without the presence of leaks.

Multi-objective optimization of pumping cost and leakage

Multi-objective optimization was performed in two networks by the genetic algorithm of Matlab, for the cost and leakage minimization and for every scenario. The results of “ky5” network and for the leakage scenario 2 are shown in Figure 4.

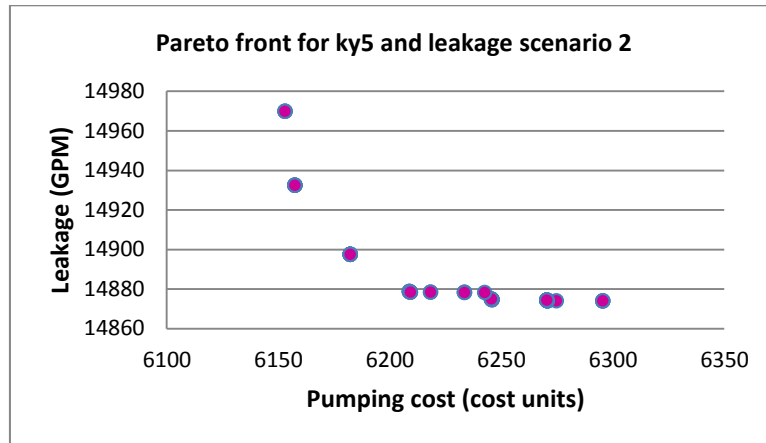


Figure 4 – Pareto front for the leakage scenario 2 in “ky5” network

In this case, all the solutions of the optimization are equivalent and acceptable, so only one optimal solution cannot be chosen.

For both of the networks, the minimum prices for costs and losses were collected, without necessarily constitute a pair of solution. The aim was for these prices to be compared with the corresponding minimum values of the single-objective optimization. Here, the results for the “ky5” network are summarized in the Table 1.

Table 1 - Optimal values of the two criteria in the single-objective and multi-objective optimization for leakage scenario 2, for “ky5” network

<i>Criteria</i>	Scenario 2	
	Single-objective	Multi-objective
Minimum cost (c.u.)	5791.92	6153.02
Minimum leakages (GPM)	14715.34	14873.89

As expected, in all cases, the results of multi-objective optimization are greater than those of single-objective. Specifically in the case of leakage, the difference is very small.

Conclusion

- The genetic algorithm of Matlab provides better results than the PaVLOS software in energy optimization.
- For networks without leaks, the energy optimization suggests the operation of a small number of pumps and not the total number of them, regardless how many times the optimization is repeated.

- For the networks with leaks, the energy optimization suggests similar pump operation to the network with no leaks, but with increased pumping cost.
- When the objective is only the leakage optimization, the pumps operation is much different, compared to the energy optimization. In the second case study, all pumps are operating when the objective is the leakage minimization.
- Operating cost is increased by leakage increase.
- The minimum cost and leakage are greater in multi-objective optimization than in single-objective optimization. Nevertheless, in “Anytown” network the optimal leakage value was greater for single-objective optimization compared to multi-objective optimization. Respective results were exported for the minimum cost in “ky5” network.
- High pressures were observed only in “Anytown” network.
- For the leakage optimization, negative demands were found by the leakage rate increase, so an additional constraint was imposed.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1	Στόχος Εργασίας	5
1.2	Δομή.....	6
2	ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ	7
2.1	Δίκτυα Ύδρευσης Πόλεων – Εσωτερικό Υδραγωγείο.....	7
2.1.1	Αντλίες	8
2.1.2	Βαλβίδες.....	9
2.1.3	Δεξαμενές αποθήκευσης.....	10
2.1.4	Πηγές νερού	11
2.1.5	Δίκτυο αγωγών.....	11
2.2	Συνιστώσες της Αστικής Χρήσης	12
2.3	Απώλειες Νερού στα Δίκτυα Ύδρευσης.....	13
2.4	Η Πίεση στα Δίκτυα Ύδρευσης	13
2.4.1	Διαχείριση πίεσης	13
2.4.2	Λύσεις για τη διαχείριση της πίεσης στα δίκτυα ύδρευσης.....	14
2.5	Προσομοίωση Δικτύων Ύδρευσης – Μοντέλα.....	16
2.5.1	Απλοποίηση	17
2.5.2	Τοπολογία του δικτύου	18
2.5.3	Είδη προσομοίωσης	19
2.5.4	Βαθμονόμηση μοντέλων.....	20
2.5.5	Πηγές σφαλμάτων.....	21
2.5.6	Μέθοδοι βαθμονόμησης	22
2.5.7	Κριτήρια προσαρμογής μη γραμμικών μοντέλων στην πραγματικότητα ...	24
2.6	Αλληλεξάρτηση Νερού – Ενέργειας (Water – Energy Nexus).....	24
3	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	27
3.1	Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.....	27
3.1.1	Μέθοδοι τοπικού ακρότατου	28
3.1.2	Μέθοδοι ολικού ακρότατου	28
3.2	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	28
3.3	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	30

3.3.1	Κωδικοποίηση.....	31
3.3.2	Αρχικός πληθυσμός	32
3.3.3	Τελεστής επιλογής	32
3.3.4	Τελεστής διασταύρωσης.....	33
3.3.5	Τελεστής μετάλλαξης	34
3.4	Πολυκριτηριακοί Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	35
3.4.1	Ο ταχύς και εκλεκτικός γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (NSGA-II).....	36
3.5	Βελτιστοποίηση Ενέργειας σε Δίκτυα Ύδρευσης.....	39
3.5.1	Εκτίμηση ενέργειας στα δίκτυα ύδρευσης με τη χρήση δεικτών	40
3.5.2	Βέλτιστη διαχείριση ενέργειας στα δίκτυα ύδρευσης.....	42
3.5.3	Οι διαρροές και η ενέργεια στα δίκτυα ύδρευσης	44
4	ΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ EPANET ΚΑΙ PaVLOS	47
4.1	EPANET.....	47
4.1.1	Τα πλεονεκτήματα του προγράμματος	47
4.1.2	Τα Είδη Ανάλυσης.....	48
4.1.3	Στοιχεία Προσομοίωσης στο EPANET	48
4.1.4	Υδραυλική προσομοίωση του συστήματος	56
4.1.5	Υδραυλική Επίλυση στο EPANET	56
4.1.6	Προβλήματα κατά την ανάλυση του δικτύου	57
4.1.7	Επιφάνεια Εργασίας EPANET	58
4.2	Το λογισμικό PaVLOS.....	60
4.2.1	Στόχοι βελτιστοποίησης.....	60
4.2.2	Μεταβλητές απόφασης	61
4.2.3	Περιορισμοί βελτιστοποίησης	61
4.2.4	Μέθοδος βελτιστοποίησης.....	62
5	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	63
5.1	Μεταβλητές Απόφασης.....	63
5.2	Περιορισμοί.....	63
5.3	Στοχική Συνάρτηση.....	65
5.4	Αξιολόγηση των Λύσεων.....	66
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	69
6.1	Τα Υπό Εξέταση Δίκτυα	69
6.1.1	Το δίκτυο Anytown.....	70

6.1.2	Το δίκτυο ky5 Jolly 2013	73
6.2	Βελτιστοποίηση του Δικτύου Anytown	75
6.2.1	Ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης με το λογισμικό PaVLOS – δίκτυο χωρίς διαρροές	76
6.2.2	Ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab – Δίκτυο χωρίς διαρροές.....	77
6.2.3	Βελτιστοποίηση διαρροών	79
6.2.4	Βελτιστοποίηση ενέργειας άντλησης στο δίκτυο με διαρροές	81
6.2.5	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο Anytown	82
6.3	Βελτιστοποίηση του Δικτύου ky5 Jolly 2013	85
6.3.1	Ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab – Δίκτυο χωρίς διαρροές.....	85
6.3.2	Βελτιστοποίηση διαρροών	87
6.3.3	Βελτιστοποίηση ενέργειας άντλησης στο δίκτυο με διαρροές	88
6.3.4	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο ky5 Jolly 2013	91
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	95
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	97

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειτουργία των δικτύων διανομής νερού απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας, οι οποίες εξαρτώνται από το ίδιο το σύστημα και τους περιορισμούς του, την προοριζόμενη χρήση, την περιοχή που πρόκειται να καλύψει, αλλά και τις επιλογές διαχείρισής του. Με βάση τα παραπάνω τα δίκτυα διανομής νερού και η ενέργεια αποτελούν δυο αλληλένδετες έννοιες.

Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια χρησιμοποιείται για την άντληση, την επεξεργασία του νερού, καθώς και τη διανομή του σε επαρκή πίεση. Σε περιπτώσεις μη επαρκούς συντήρησης και ελέγχου των συστημάτων οι διαρροές μπορεί να είναι έντονες, με αποτέλεσμα την απώλεια μεγάλων ποσοτήτων νερού μέσω των σωληνώσεων, κάτι που με τη σειρά του οδηγεί στην σπατάλη των υδατικών πόρων, αλλά ταυτόχρονα και της ενέργειας δημιουργώντας κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ότι κάθε χρόνο χάνονται παγκοσμίως 32 δισεκατομμύρια m³ πόσιμου νερού μέσω των δικτύων ύδρευσης, ενώ έχει υπολογιστεί ότι απαιτείται 2% - 3% της παγκόσμιας ενέργειας για την λειτουργία των δικτύων (Xu et al., 2014).

Τα τελευταία χρόνια απασχολεί όλο και περισσότερο τους επιστήμονες η σωστή διαχείριση της ενέργειας και των διαρροών, όταν αυτές υπάρχουν, στα συστήματα διανομής νερού, ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητά τους με ταυτόχρονη μείωση των ενεργειακών και κατά συνέπεια των οικονομικών απωλειών (πάντα συναρτήσει των κατασκευαστικών περιορισμών των δικτύων). Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν και τα αστικά υδρευτικά δίκτυα.

Το παραπάνω πρόβλημα, αν και δύσκολο, παρουσιάζει έντονο επιστημονικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον έχοντας ως απώτερο στόχο την εύρεση μιας «σωστής» ή αλλιώς βέλτιστης λύσης. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι αυτή που προσπαθεί να δώσει λύση σε αυτό το διαχειριστικό πρόβλημα, θέτοντας κάθε φορά τους κατάλληλους περιορισμούς, ώστε να βρεθεί η καλύτερη δυνατή λύση για την εκάστοτε περίπτωση.

1.1 Στόχος Εργασίας

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξοικείωση με την έννοια της βελτιστοποίησης και η εφαρμογή της για την διαχείριση της ενέργειας και των διαρροών στα δίκτυα ύδρευσης των πόλεων. Αρχικά όμως είναι απαραίτητη η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τα δίκτυα διανομής νερού, τον τρόπο λειτουργίας τους, τα προβλήματα που παρουσιάζουν και τη σχέση τους με την έννοια της ενέργειας, καθώς οι ενεργειακές απώλειες είναι ένα συχνό πρόβλημα των δικτύων.

Έπειτα, σκοπός είναι η εξοικείωση με λογισμικά διαχείρισης δικτύων όπως το EPANET, με εργαλεία προγραμματισμού όπως είναι το Matlab, αλλά και βελτιστοποίησης όπως

είναι το PaVLOS (Pump and Valve Logic Optimal Scheduling) (Morley et al., 2013) και ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab. Τελικός και βασικός στόχος είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από τη διαδικασία αυτή σχετικά με τη διαχείριση των ενεργειακών απωλειών και των διαρροών στα δίκτυα διανομής νερού.

Συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας για την εύρεση πληροφοριών σχετικά με τα δίκτυα ύδρευσης, τα οποία αφορούν στον τρόπο λειτουργίας τους, τα χαρακτηριστικά τους και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς. Τις σχέσεις δικτύων – πίεσης – ενέργειας και διαρροών και τις απώλειες των δύο τελευταίων λόγω κακής διατήρησης ή και λανθασμένων διαχειριστικών αποφάσεων. Τέλος, η εξοικείωση με την έννοια της βελτιστοποίησης και η μελέτη εφαρμογών της σε δίκτυα σε παγκόσμιο επίπεδο από επιστημονικά άρθρα.
- Εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης για την ενεργειακή διαχείριση και τη διαχείριση των διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης πόλεων, με τη χρήση του εργαλείου βελτιστοποίησης PaVLOS, του λογισμικού EPANET σε σύνδεση με το Matlab και τον γενετικό αλγόριθμο που χρησιμοποιεί.
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

1.2 Δομή

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο που μελετάται, με έμφαση στα κύρια στοιχεία του. Περιγράφεται ο στόχος της εργασίας η δομή της και τα επιμέρους βήματα που ακολουθούνται.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στο θέμα, ξεκινώντας από τα βασικά στοιχεία, όπως είναι τα δίκτυα ύδρευσης, από τι αποτελούνται και πώς λειτουργούν, μέχρι την ανάγκη για τη βέλτιστη διαχείριση της λειτουργίας τους.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται βιβλιογραφία πάνω στο αντικείμενο της βελτιστοποίησης και πιο συγκεκριμένα στη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας και των διαρροών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφονται τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση της εργασίας. Το EPANET, το Matlab και το λογισμικό βελτιστοποίησης PaVLOS.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προβλήματος, οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί και η αξιολόγηση των λύσεων.

Στο κεφάλαιο 6, περιγράφεται η εφαρμογή, παρουσιάζονται οι περιπτώσεις που εξετάζονται, όπως επίσης και τα αποτελέσματά τους μαζί με σχολιασμό.

Στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

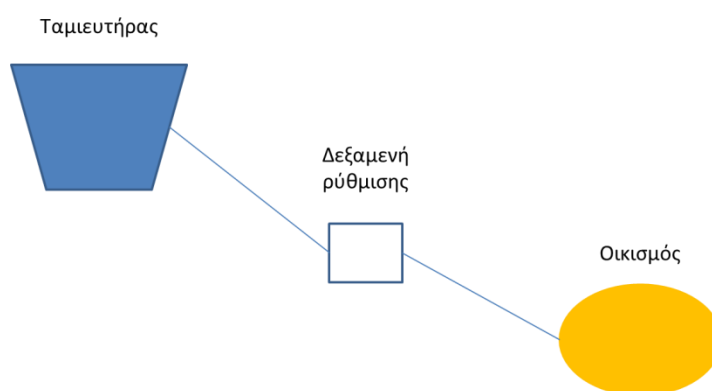
Κεφάλαιο 2

ΔΙΚΤΥΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

2.1 Δίκτυα Ύδρευσης Πόλεων – Εσωτερικό Υδραγωγείο

Τα δίκτυα ύδρευσης των πόλεων είναι σχεδιασμένα για τη μεταφορά πόσιμου νερού από μια πηγή η οποία είναι συνήθως μια ειδικά σχεδιασμένη εγκατάσταση, στην απαραίτητη ποσότητα, ποιότητα και σε ικανοποιητική πίεση σε κάθε καταναλωτή και σε κάθε περιοχή εξυπηρέτησης (Rossman, 2000). Τα εσωτερικά υδραγωγεία, όπως ονομάζονται αλλιώς τα δίκτυα ύδρευσης των πόλεων, αποτελούνται από τον κεντρικό τροφοδοτικό αγωγό και το δίκτυο των αγωγών για τη μεταφορά του νερού στους καταναλωτές.

Το εσωτερικό υδραγωγείο συνήθως ξεκινάει από μια δεξαμενή ρύθμισης, η οποία είναι ταυτόχρονα και το τέλος του εξωτερικού υδραγωγείου, μεταφέροντας το νερό στα σημεία σύνδεσης των καταναλωτών. Η δεξαμενή ρύθμισης αποτελεί σημαντικό στοιχείο των δικτύων ύδρευσης των πόλεων, καθώς εξασφαλίζει τη συνεχή υδροδότηση του εκάστοτε οικισμού, ακόμη και σε περιπτώσεις βλαβών. Επίσης τοποθετείται σε κατάλληλο υψόμετρο ώστε να παρέχει σταθερή πίεση στο εσωτερικό υδραγωγείο, ενώ λειτουργεί με τρόπο εξισορροπητικό μεταξύ του εξωτερικού και εσωτερικού υδραγωγείου.



Σχήμα 2.1-Η δεξαμενή ρύθμισης

Για τη σωστή και ομαλή λειτουργία του δικτύου ύδρευσης μιας πόλης, έχουν προκύψει κάποιες εμπειρικές παραδοχές οι οποίες πρέπει να ακολουθούνται (Τσακίρης, 2010):

- Το δίκτυο σχεδιάζεται βάσει της μέγιστης ωριαίας παροχής.
- Οι σωληνώσεις που επιλέγονται πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 atm, ενώ η ελάχιστη ονομαστική διάμετρος πρέπει να είναι 90 mm.
- Η στατική πίεση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60 m, μεταξύ του ανώτερου και κατώτερου σημείου στο δίκτυο.

Ο σχεδιασμός των δικτύων ύδρευσης των πόλεων είναι πολύ σημαντικός και καθορίζεται από το ανάγλυφο της περιοχής. Αν οι υψομετρικές διαφορές είναι μεγάλες ανάμεσα στο

υψηλότερο και χαμηλότερο σημείο τότε είναι απαραίτητος ο χωρισμός του δικτύου σε ζώνες πίεσης, με στόχο τη διατήρησή της μεταξύ των ορίων 20 – 60 m. Η διαστασιολόγηση του δικτύου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την εξασφάλιση των απαιτούμενων παροχών και της διατήρησης της πίεσης στα αποδεκτά όρια, για όλο το χρόνο λειτουργίας. Για το λόγο αυτό οι ταχύτητες ροής στα δίκτυα ύδρευσης κυμαίνονται από 0.5 m/s έως 1.5 m/s, κάτι το οποίο όμως δεν επιτυγχάνεται πάντα.

Όσον αφορά στα κτίρια, ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα ύψη πίεσης ανάλογα με τον όροφο είναι τα εξής:

- Μονώροφα 12 – 15 m
- Διώροφα 16 – 19 m
- Τριώροφα 20 – 23 m

Για κτίρια με περισσότερους ορόφους (v) η απαιτούμενη πίεση υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:

$$p = 4 \times (v + 1) \quad (2.1)$$

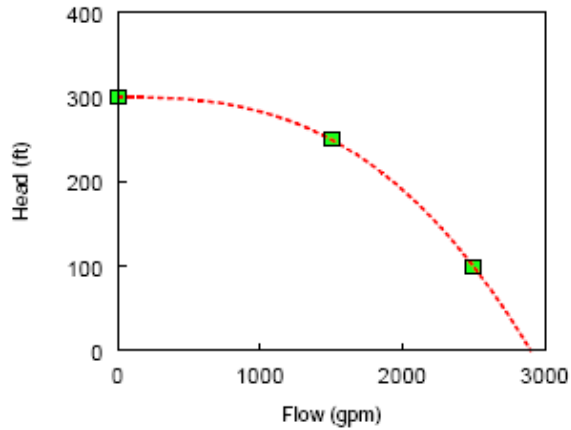
Για την εξασφάλιση της αξιόπιστης και συνεχούς μεταφοράς του νερού από την πηγή στους καταναλωτές, τοποθετούνται διάφορα απαραίτητα στοιχεία στο σύστημα, όπως είναι αποθηκευτικά μέσα (δεξαμενές), βαλβίδες, αντλίες κ.α.

Το σύνολο που απαρτίζουν τα παραπάνω στοιχεία μαζί με τους κανόνες που τα διέπουν και το σκοπό που εξυπηρετούν αποτελούν τα συστήματα διανομής νερού, τμήμα των οποίων είναι και τα δίκτυα ύδρευσης πόλεων.

2.1.1 Αντλίες

Στόχος των αντλιών είναι η εισαγωγή ενέργειας στο σύστημα υδροδότησης ώστε να αυξηθεί το υδραυλικό φορτίο. Ουσιαστικά ενισχύεται το υδραυλικό φορτίο σε περιοχές του συστήματος όπου δεν βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα, κάτι το οποίο οφείλεται σε ενεργειακές απώλειες. Ένας επιπλέον στόχος των αντλιών είναι να ξεπεραστούν οι υψομετρικές διαφορές όταν το νερό πρέπει να μεταφερθεί σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Η μόνη περίπτωση που σε ένα σύστημα υδροδότησης δε χρησιμοποιούνται αντλίες είναι όταν αυτό λειτουργεί με τη βαρύτητα. Στα πραγματικά δίκτυα υδροδότησης οι αντλίες βρίσκονται σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος του δικτύου έχοντας δύο διαφορετικά υδραυλικά φορτία, ένα στην πλευρά που εισέρχεται το νερό και ένα διαφορετικό στην πλευρά που το νερό εξέρχεται.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των αντλιών είναι το μανομετρικό ύψος, το οποίο είναι ουσιαστικά η ενέργεια που πρέπει να αποδοθεί στο νερό για να ανέλθει σε μεγαλύτερα υψόμετρα, υπερνικώντας τη δύναμη της βαρύτητας, λαμβάνοντας υπόψη όμως και τις απώλειες της ενέργειας κατά την κίνησή του. Το μανομετρικό ύψος μετράται σε μονάδες μήκους. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των αντλιών είναι οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, οι οποίες δίνονται από τον κατασκευαστή και παρέχουν την απόδοση της αντλίας μέσω του υδραυλικού φορτίου συναρτήσει της παροχής.

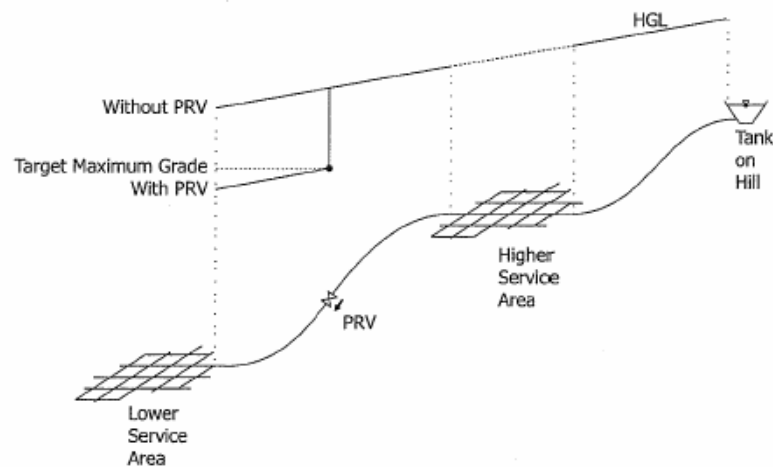


Σχήμα 2.2-Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας

Πηγή: Rossman, 2000

2.1.2 Βαλβίδες

Οι βαλβίδες είναι στοιχεία των δικτύων διανομής νερού, που χρησιμεύουν στον περιορισμό της πίεσης ή της ροής σε ένα συγκεκριμένο σημείο του δικτύου. Οι δύο κύριες κατηγορίες των βαλβίδων είναι οι βαλβίδες ελέγχου και οι βαλβίδες απομόνωσης. Οι βαλβίδες ελέγχου είναι αυτές που διατηρούν και αυτές που μειώνουν την πίεση, όπως είναι οι πιεζοθραυστικές (throttling). Οι βαλβίδες αυτές κλείνουν αυτόματα ρυθμίζοντας τη ροή και προφυλάσσοντας έτσι το κατάντη τμήμα από το να αυξηθεί το υδραυλικό φορτίο πέρα από μια καθορισμένη τιμή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία βλαβών από την αυξημένη πίεση, όπως είναι η παρουσία διαρροών ή και το σπάσιμο των σωληνώσεων. Αντίστοιχα, οι βαλβίδες απομόνωσης χρησιμοποιούνται για την αποκοπή τμημάτων του δικτύου για αποκατάσταση ή συντήρησή τους προκαλώντας μια μικρή ανωμαλία σε άλλες περιοχές εξυπηρέτησης. Οι βαλβίδες μείωσης της πίεσης έχουν δύο υδραυλικά φορτία, ανάντη και κατάντη, όπως και οι αντλίες.



Σχήμα 2.3-Λειτουργία δικτύου ύδρευσης με και χωρίς την παρουσία βαλβίδας μείωσης της πίεσης

Πηγή: Walski et al., 2003

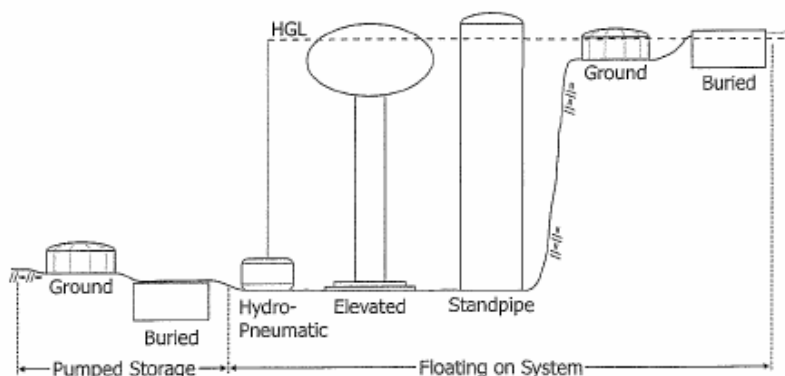
Παρόλα αυτά υπάρχουν και άλλες κατηγορίες βαλβίδων, όπως είναι οι κατευθυντήριες, αυτές που συμβάλλουν στην απελευθέρωση αέρα και στην εξάλειψη του κενού που δημιουργείται στις σωληνώσεις και στις βαλβίδες ελέγχου, κ.α.

Η συντήρηση των βαλβίδων, είναι πολύ σημαντική. Για το λόγο αυτό πολλές εγκαταστάσεις έχουν ένα πρόγραμμα για το άνοιγμα και κλείσιμο κάποιων βαλβίδων ώστε να προστατεύονται από τη συνεχή χρήση και συνεπώς από τη διάβρωση. Σε γενικές γραμμές, αν και δεν είναι τόσο πρακτικό, είναι απαραίτητο κάθε βαλβίδα να κλείνει τουλάχιστον μια φορά το χρόνο.

2.1.3 Δεξαμενές αποθήκευσης

Για τη συγκέντρωση και αποθήκευση του νερού για μετέπειτα χρήση, για την αντιμετώπιση διακυμάνσεων της ζήτησης, όπως επίσης και για πυροσβεστική χρήση, αλλά και για την εξισορρόπηση της πίεσης στα δίκτυα, είναι υπεύθυνες οι δεξαμενές (Rossman, 2000). Οι δεξαμενές αποθήκευσης, μπορεί να είναι ανοιχτές ή κλειστές, με ελεύθερη επιφάνεια ή υπό πίεση, να βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο ή και θαμμένες στο χώμα (Rossman, 2000).

Μεγάλο τμήμα του αποθηκευτικού όγκου του νερού στις δεξαμενές, προορίζεται μόνο για πυροσβεστική χρήση. Το νερό που μένει στις δεξαμενές και δεν ανακυκλώνεται συχνά, δημιουργεί ζώνες όπου αυτό παραμένει στάσιμο, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ανάμιξη του παλιού με το νέο νερό που εισέρχεται στη δεξαμενή, δημιουργώντας προβλήματα στην ποιότητά του.



Σχήμα 2.4-Διαφορετικοί τύποι δεξαμενών αποθήκευσης βάσει πίεσης

Πηγή: Walski et al., 2003

Το νερό στις δεξαμενές αποθηκεύεται σε συγκεκριμένο όγκο, κάτι το οποίο δημιουργεί διακυμάνσεις στο υδραυλικό τους φορτίο. Επιπλέον ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, υπάρχει ο κίνδυνος να φτάσουν σε οριακές καταστάσεις, ειδικά στις περιπτώσεις που δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά.

2.1.4 Πηγές νερού

Συνήθως τα πηγάδια, οι λίμνες, οι υπόγειοι υδροφορείς θεωρούνται πηγές νερού για το σύστημα ύδρευσης. Τα δυο βασικά στοιχεία των πηγών είναι το ύψος της επιφάνειας του νερού και η ποιότητά του, ενώ θεωρείται ότι μπορούν να διαχειριστούν οποιαδήποτε ποσότητα νερού χωρίς να φτάνουν σε οριακές συνθήκες, με το υδραυλικό τους φορτίο να μην επηρεάζεται από το ρυθμό κατανάλωσης του νερού.

Οι πηγές απεικονίζονται ως ρεζερβουάρ στα μοντέλα κάτι το οποίο θα αναλυθεί στο κεφάλαιο περιγραφής του EPANET.

2.1.5 Δίκτυο αγωγών

Τα δίκτυα των σωληνώσεων, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά του νερού από την πηγή στους καταναλωτές, χωρίζονται στους αγωγούς μεταφοράς, διανομής και εξυπηρέτησης.

Σε ένα σύστημα διανομής νερού οι αγωγοί μεταφοράς, διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις μεταφέροντας μεγάλες ποσότητες νερού, οι οποίες καταλήγουν στις δεξαμενές αποθήκευσης. Οι αγωγοί διανομής ακολουθούν κυρίως τους δρόμους των πόλεων, ενώ έχουν μικρότερη διάμετρο από τους αντίστοιχους αγωγούς μεταφοράς. Τέλος, οι αγωγοί εξυπηρέτησης, μεταφέρουν νερό από τους αγωγούς μεταφοράς στα κτήρια και σε οποιοδήποτε άλλο σημείο εξυπηρέτησης. Ανάλογα με την ποσότητα του νερού που είναι απαραίτητη για την εξυπηρέτηση των καταναλωτών και τη διατήρηση των επιπέδων πίεσης που έχουν σχεδιαστεί για τις επιθυμητές ροές, οι γραμμές εξυπηρέτησης του δικτύου σε μια πόλη έχουν συγκεκριμένο μέγεθος.

Τα υλικά των αγωγών σήμερα είναι PVC, αλουμίνιο, προεντεταμένο σκυρόδεμα, ενισχυμένο πλαστικό, όλκιμος σίδηρος, χάλυβας, γλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), ενώ παλιότερα γινόταν χρήση τσιμεντένιων αγωγών. Στα δίκτυα ύδρευσης οι αγωγοί κατασκευάζονται σε μήκος των 6m συνήθως και στη συνέχεια ενώνονται σε σειρές, για να εξυπηρετήσουν την εκάστοτε περιοχή.

Το βασικότερο πρόβλημα των αγωγών είναι η στένωση και η διάβρωση, που προκαλούνται από υλικά που επικάθονται στα τοιχώματά τους (Σχήμα 2.5), με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τραχύτητά τους. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της αρχικής χωρητικότητας των σωληνώσεων, αλλά και την αμφισβητούμενη τελική ποιότητα του νερού. Η απόλυτη τραχύτητα των αγωγών αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο, σύμφωνα με τους Colebrook και White, βάσει της σχέσης:

$$k = k_0 + at \quad (2.2)$$

όπου k_0 είναι η τραχύτητα της νέας επιφάνειας και t ο χρόνος, ενώ a ο ρυθμός αύξησης που προσδιορίζεται με πειράματα. Είναι εμφανές λοιπόν ότι η γήρανση των αγωγών παίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση του νερού στο εσωτερικό τους.



Σχήμα 2.5-Διάβρωση αγωγού με σοβαρή μείωση της διαμέτρου

Σε γενικές γραμμές οι φθαρμένοι ή οι αγωγοί στους οποίους εντοπίζεται διαρροή νερού, θα πρέπει να επισκευάζονται για αντιμετώπιση του προβλήματος. Παλιότερα η μεταφορική ικανότητα (carrying capacity) των αγωγών διατηρούταν στα υψηλότερα δυνατά επίπεδα, ώστε να επιτυγχάνεται η αρχική ροή σχεδιασμού αλλά και για να διατηρηθεί το κόστος άντλησης σε χαμηλά επίπεδα. Αυτή η τακτική όμως αποδείχτηκε λανθασμένη, καθώς το νερό δεν ανανεωνόταν πλήρως με αποτέλεσμα την παραμονή κάποιας ποσότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα στους αγωγούς επηρεάζοντας τελικά την ποιότητά του.

Γενικά, για την αποφυγή αποθέσεων των φερτών υλικών στα τοιχώματα των αγωγών, έχει οριστεί μια κατώτατη τιμή ταχύτητας ίση με 0.5 m/s. Αντίστοιχα, η ανώτερη τιμή ώστε να αποφεύγονται υπερπιέσεις λόγω πλήγματος αλλά και μεγάλες απώλειες ενέργειας είναι τουλάχιστον 2 m/s. Για τα ελληνικά δεδομένα, τα όρια των ταχυτήτων στους αγωγούς, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι τα εξής (Τσακίρης, 2010):

$$0.5 \leq V \leq 1.5 \text{ (m/s)} \quad (2.3)$$

Τέλος, η ελάχιστη διάμετρος των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα για δίκτυα ύδρευσης, είναι 90 mm.

2.2 Συνιστώσες της Αστικής Χρήσης

Οι πολλές και διαφορετικές δραστηριότητες μιας πόλης είναι αυτές που καθορίζουν τη χρήση του νερού σε αυτές. Οι κυριότερες χρήσεις σε ένα αστικό κέντρο είναι:

- Η οικιακή
- Η εμπορική
- Η βιομηχανική
- Οι δημόσιες υπηρεσίες
- Οι μεταφορές
- Οι απώλειες και το ατιμολόγητο νερό, που οφείλονται σε διαρροές, εσφαλμένες μετρήσεις, κλοπή του νερού και πιθανή εξάτμιση από ανοιχτές δεξαμενές.

2.3 Απώλειες Νερού στα Δίκτυα Ύδρευσης

Οι απώλειες νερού στα δίκτυα ύδρευσης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες διαχείρισής του ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές και κατά συνέπεια οι οικονομικές απώλειες. Οι λόγοι που υπάρχουν απώλειες στα δίκτυα διανομής νερού είναι κυρίως οι αστοχίες στην κατασκευή των δικτύων και η μετέπειτα έλλειψη συντήρησής τους.

Οι πραγματικές απώλειες οφείλονται σε υπερχειλίσεις δεξαμενών, θραύσεις σωληνώσεων καθώς και σε διαρροές και μπορούν να συμβούν σε όλο το μήκος και την έκταση του δικτύου. Οι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στις πραγματικές απώλειες των δικτύων είναι (Τσακίρης, 2010):

- Το πλήθος και το μήκος των συνδέσεων των καταναλωτών (κόμβοι).
- Το πλήθος των υπόλοιπων ενώσεων και στοιχείων του δικτύου.
- Η πίεση λειτουργίας του δικτύου.
- Το μήκος, η διάμετρος, το υλικό και η ηλικία των σωληνώσεων.
- Οι μέθοδοι εντοπισμού των διαρροών, ακόμη και αυτών που δεν είναι εμφανείς και η επιδιόρθωση των βλαβών.

Οι επεμβάσεις οι οποίες μπορούν να μειώσουν δραματικά τις απώλειες είναι οι εξής:

- Η διαχείριση της πίεσης.
- Η ταχύτητα και η ποιότητα επιδιόρθωσης των βλαβών.
- Ο ενεργός έλεγχος των διαρροών (active leakage control).

Πέρα από τις πραγματικές απώλειες υπάρχουν και οι φαινομενικές, οι οποίες οφείλονται σε ανακρίβειες στην καταμέτρηση αλλά και σε παράνομες συνδέσεις.

2.4 Η Πίεση στα Δίκτυα Ύδρευσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δίκτυα ύδρευσης είναι σχεδιασμένα για να μεταφέρουν νερό στα σημεία ζήτησης σε επαρκή ποσότητα και ποιότητα, όπως επίσης και σε κατάλληλη πίεση με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος. Η ύπαρξη πολύ υψηλών πιέσεων είναι αναπόφευκτη στα δίκτυα ύδρευσης, ακόμη και σε ημερήσια κλίμακα, επιβαρύνοντας έτσι το σύστημα με αποτέλεσμα να υπάρχουν συχνά απώλειες νερού από αστοχίες του συστήματος, αυξάνοντας ταυτόχρονα την πιθανότητα ύπαρξης θραύσεων σε αυτό. Υπολογίζεται ότι το 25% του νερού χάνεται από τα συστήματα ύδρευσης λόγω των διαρροών. Συνεπώς είναι σκόπιμο όπως φαίνεται, η εύρεση λύσεων για τη διαχείριση της πίεσης, ώστε να διατηρηθεί σε κατάλληλα επίπεδα, που δε θα επηρεάζουν το στόχο λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης.

2.4.1 Διαχείριση πίεσης

Η σωστή διαχείριση της πίεσης στα δίκτυα μπορεί να αποφέρει σημαντικές μειώσεις στις διαρροές, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στη μείωση των ενεργειακών και οικονομικών απωλειών.

Τα βασικά προβλήματα πίεσης στα δίκτυα ύδρευσης σχετίζονται με τα υψηλά και χαμηλά επίπεδα αλλά και με τις διακυμάνσεις της πίεσης. Τα υψηλά επίπεδα πίεσης στα συστήματα ύδρευσης μπορεί να επιταχύνουν τη δημιουργία προβλημάτων στα μηχανικά μέρη του συστήματος, όπως είναι η θραύση σωληνώσεων, με αποτέλεσμα την απώλεια νερού.

Η χαμηλή πίεση στα δίκτυα συμβάλλει στην ανεπαρκή διανομή του νερού στους καταναλωτές με αποτέλεσμα τη δυσαρέσκειά τους, ενώ αυξάνει τον κίνδυνο μόλυνσης του νερού λόγω του μικρού ρυθμού ανανέωσής του.

Τέλος, οι διακυμάνσεις της πίεσης με τη σειρά τους μπορούν να συμβάλλουν στην δημιουργία παρόμοιων προβλημάτων με την υψηλή πίεση, όπως είναι η καταστροφή των σωληνώσεων, των αντλιών και άλλων στοιχείων του συστήματος.

Είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός ότι τα επίπεδα των πιέσεων στα συστήματα διανομής νερού διαφέρουν ανάλογα με την κοινωνία. Παρόλα αυτά, σε κατοικήσιμες περιοχές που οι τιμές των πιέσεων πρέπει να είναι μέτριες, υπάρχουν τυπικές τιμές οι οποίες θεωρούνται κοινώς αποδεκτές (Mays, 2000) και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 2.1 - Τυπικές τιμές πίεσης σε κατοικήσιμες περιοχές

Συνθήκες πίεσης	Πίεση συστήματος (m)
Μέγιστη πίεση	46 – 53
Ελάχιστη πίεση κατά τη διάρκεια ημέρας με υψηλές πιέσεις	21 – 28
Ελάχιστη πίεση στην ώρα αιχμής	18 – 25
Ελάχιστη πίεση κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς	14

Πηγή: Mays, 2000

Για την σωστή λειτουργία των δικτύων διανομής νερού, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση συστημάτων καταγραφής και παρακολούθησης της πίεσης σε κρίσιμα σημεία του δικτύου, όπως είναι οι κόμβοι. Να σημειωθεί ότι συνήθως κόμβοι με υψηλές πιέσεις είναι αυτοί που βρίσκονται σε σημεία με χαμηλότερο υψόμετρο από το υπόλοιπο σύστημα, αλλά και αυτοί που βρίσκονται κοντά στην πηγή, στα σημεία διανομής και σε σταθμούς άντλησης. Ενώ οι κόμβοι με χαμηλές πιέσεις βρίσκονται συνήθως σε μεγαλύτερα υψόμετρα από το υπόλοιπο σύστημα ή στο τέλος του δικτύου.

2.4.2 Λύσεις για τη διαχείριση της πίεσης στα δίκτυα ύδρευσης

Διάφορες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για τη σωστή διαχείριση της υδραυλικής πίεσης στα δίκτυα ύδρευσης, ώστε να επιτευχθεί η σωστή λειτουργία τους και να αποφευχθούν τα πιθανά προβλήματα. Κάποιες από αυτές τις λύσεις είναι οι εξής:

- Ο σχεδιασμός ή ο επανασχεδιασμός του δικτύου διανομής νερού χωρίζοντάς το σε ζώνες πίεσης.
- Η χρήση βαλβίδων μείωσης της πίεσης (πιεζοθραυστικών) (PRV), σε σημεία όπου απαιτείται.

- Η χρήση βαλβίδων διατήρησης της πίεσης (PSV), διατηρώντας έτσι τις τιμές της σταθερές στο ανάντη κομμάτι από αυτή, ενώ στο κατόντη η πίεση βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα.
- Η χρήση αντλιών ενίσχυσης για την αύξηση της παρεχόμενης πίεσης σε σημεία όπου κρίνεται απαραίτητο, όπως είναι κατοικίες σε μεγάλα υψόμετρα.
- Η ανακατανομή της αυξημένης ζήτησης σε γειτονικές ζώνες αυξημένης πίεσης, ώστε να εξυπηρετηθεί η αρχική περιοχή.
- Η αποκατάσταση των βλαβών του συστήματος θα μπορούσε να ωφελήσει τη διαχείριση της πίεσης.
- Ο βέλτιστος επιχειρησιακός έλεγχος για τη διαχείριση της πίεσης και τη μείωση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας.
- Η χρήση συσκευών για την προστασία του συστήματος από τις πολύ χαμηλές και υψηλές τιμές της πίεσης και τις πιθανές διακυμάνσεις της.

Η εφαρμογή χαμηλότερων πιέσεων οι οποίες διατηρούνται πάνω από τα επίπεδα των απαιτήσεων του συστήματος, ελλοχεύει τον κίνδυνο αντιδράσεων από τους καταναλωτές. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη σταδιακή μείωση των πιέσεων στο σύστημα.

Η εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων δύναται να οδηγήσει στη μείωση:

- των απωλειών

Η παροχή του νερού στις σωληνώσεις περιγράφεται από τη σχέση:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gP} \quad (2.4)$$

όπου Q η παροχή (m³/sec), A η διατομή των σωληνώσεων (m²), C_d συντελεστής παροχής, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και P η πίεση (m).

Για την προσομοίωση των διαρροών λόγω θραύσης δεν ισχύει η παραπάνω σχέση, λόγω του ότι ο συντελεστής παροχής εξαρτάται από το αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης, όπως και για το ότι η διατομή εξαρτάται από την πίεση (Lambert, 2001).

Η παγκόσμια ένωση υδάτων (IWA) υποστηρίζει ότι η μείωση των διαρροών στα δίκτυα ύδρευσης είναι μια συνάρτηση του υλικού των αγωγών και της μεταβολής της πίεσης, σύμφωνα με τη σχέση (Lambert, 2001):

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{M_1} \quad (2.5)$$

όπου L₁ είναι η απώλεια που προκύπτει μετά την μείωση της πίεσης, L₀ η αρχική διαρροή πριν τη μείωση της πίεσης, P₁ η νέα πίεση λειτουργίας του δικτύου και P₀ η αρχική πίεση

λειτουργίας του δικτύου, τέλος N_1 συντελεστής που λαμβάνει τιμές 0.5 – 1.5 ανάλογα με το υλικό κατασκευής των αγωγών, για άκαμπτους και εύκαμπτους αγωγούς αντίστοιχα.

➤ της κατανάλωσης

Η σχέση που ακολουθεί δίνει τη μεταβολή στην κατανάλωση του νερού σε σχέση με τη μεταβολή της πίεσης (Fantozzi and Lambert, 2007):

$$\frac{C_1}{C_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_3} \quad (2.6)$$

Όπου C_1 και C_0 τμήμα της ζήτησης του νερού πριν και μετά τη μείωση της πίεσης στο σύστημα και N_3 ένας εμπειρικός συντελεστής με τιμές 0.1 – 0.5 για εσωτερική οικιακή κατανάλωση και εξωτερική κατανάλωση αντίστοιχα, με προτεινόμενη μέση τιμή 0.3.

➤ των αστοχιών των αγωγών και κατά συνέπεια των επισκευών στο δίκτυο

Η μείωση της πίεσης στα δίκτυα ύδρευσης οδηγεί στη μείωση της συχνότητας των αστοχιών στις σωληνώσεις. Η μείωση αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\frac{BF_1}{BF_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_2} \quad (2.7)$$

Όπου BF_0 και BF_1 η συχνότητα των αστοχιών πριν και μετά τη μείωση της πίεσης και N_2 ένας εμπειρικός συντελεστής στον οποίο έχουν αποδοθεί διάφορες τιμές από πολλές μελέτες λαμβάνοντας υπόψη τη μέση υδραυλική πίεση. Η πιο πρόσφατη μελέτη, στην οποία εξετάστηκαν δίκτυα σε διάφορες χώρες με βάση τις μέγιστες υδραυλικές πιέσεις, έδωσε την τιμή 1.4 (Thornton and Lambert, 2007).

2.5 Προσομοίωση Δικτύων Ύδρευσης – Μοντέλα

Πολλές φορές η εξέταση ενός πραγματικού δικτύου ύδρευσης και τα πειράματα σε αυτό δεν είναι εφικτά, όπως η μελέτη του δικτύου για το πώς ανταποκρίνεται σε ποικίλες καταστάσεις, χωρίς όμως να διαταραχτεί το ίδιο το σύστημα. Επίσης πολλές φορές απαιτείται η αξιολόγηση ενός δικτύου πριν την κατασκευή του, η λύση σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η απεικόνιση των δικτύων αυτών σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η προσομοίωση των δικτύων, τόσο της μορφής τους, της λειτουργίας τους αλλά και της συμπεριφοράς τους, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Με τον όρο προσομοίωση εννοείται η μαθηματική αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος, η οποία εναλλακτικά ονομάζεται μοντέλο. Η προσομοίωση συμβάλει σημαντικά στην πρόβλεψη προβλημάτων αλλά και στην εκτίμηση και αξιολόγηση λύσεων σε ήδη υπάρχοντα ή σε υπό κατασκευή συστήματα υδροδότησης, εξοικονομώντας χρήμα και χρόνο, παίζοντας το ρόλο ενός χρήσιμου εργαλείου για τη

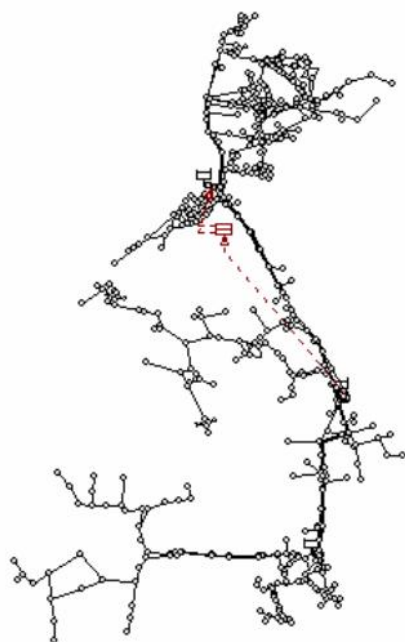
λήψη αποφάσεων από τους μηχανικούς. Η αξιολόγηση γίνεται μέσω κάποιων μέτρων επίδοσης.

Ο χρήστης δίνει πληροφορίες για το δίκτυο, όπως είναι η ζήτηση, οι οριακές συνθήκες, και η στάθμη των δεξαμενών. Το μοντέλο στη συνέχεια με χρήση μαθηματικών σχέσεων επιλύει το σύστημα δίνοντας αποτελέσματα για τις πιέσεις και τις ροές κατά μήκος του συστήματος.

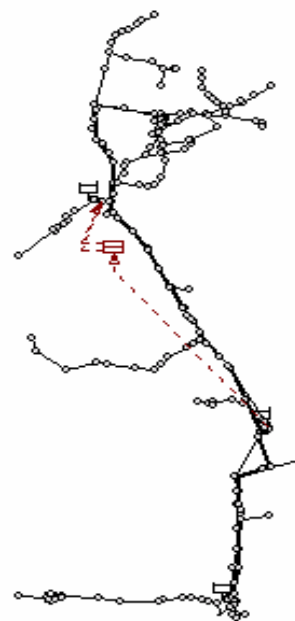
Τα μοντέλα προσομοίωσης, ανάλογα με το πρόβλημα, μπορεί να είναι γραμμικά αλλά και μη γραμμικά, με τα δεύτερα να είναι η συνηθέστερη περίπτωση.

2.5.1 Απλοποίηση

Για την προσομοίωση του εκάστοτε δικτύου, δεν είναι απαραίτητα όλα τα στοιχεία που το αποτελούν, παρά μόνο εκείνα τα τμήματα που καθορίζουν και περιγράφουν επαρκώς και ολοκληρωμένα τη λειτουργία του. Το να συμπεριληφθεί και το παραμικρό στοιχείο του δικτύου χωρίς να προσφέρει κάποια σημαντική πληροφορία, θα οδηγούσε σε μεγάλο όγκο δεδομένων και πιθανότατα σε σφάλματα, ενώ θα ήταν επίζημιο χρηματικά, καθώς η διαχείρισή του θα ήταν αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα.



Σχήμα 2.6-Μοντέλο δικτύου ύδρευσης με όλα τα στοιχεία



Σχήμα 2.7-Απλοποιημένο μοντέλο δικτύου ύδρευσης

Η διαδικασία επιλογής των στοιχείων που θα συμπεριληφθούν σε ένα μοντέλο δεν είναι εύκολη και δεν έχει βρεθεί κάποιος γενικός κανόνας ή κριτήρια για την επιλογή τους, ενώ εξαρτάται κυρίως από το εκάστοτε σύστημα που μελετάται και από την κρίση του μηχανικού. Παρόλα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν κάποιες μέθοδοι για την απλοποίηση ενός δικτύου. Στη μέθοδο «element by element» αρχικά απλοποιείται η κατασκευή του δικτύου αντικαθιστώντας αγωγούς που ενώνονται, με ένα ισοδύναμο αγωγό. Επίσης απαλείφονται αγωγοί μικρής διαμέτρου και η ζήτηση που εξυπηρετούν κατανέμεται

στους ανάντη κόμβους μεγαλύτερων αγωγών. Αν όμως οι αγωγοί μικρής διαμέτρου είναι σημαντικοί για το δίκτυο διατηρούνται. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου.

Άλλη μια μέθοδος είναι η μείωση των μεταβλητών (variable elimination) του δικτύου μέσω μαθηματικών σχέσεων και αλγορίθμων, με πιθανό αποτέλεσμα να μην ανταποκρίνεται το μοντέλο στην πραγματικότητα. Τέλος, απλοποίηση μπορεί να γίνει με αυθαίρετο τρόπο (approximation), γνωρίζοντας όμως εξαρχής τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, ενώ η ακρίβεια των αγωγών μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος. Δοκιμές μπορούν να γίνουν για να αποφασιστεί τελικά σε τι βαθμό θα απλοποιηθεί ένα σύστημα, χωρίς να πάψει να είναι λειτουργικό.

Για παράδειγμα, σε ένα μικρό δίκτυο ύδρευσης, για την μοντελοποίηση του η αφαίρεση κάποιων αγωγών θα μπορούσε να επηρεάσει τη λειτουργία του, ενώ σε ένα μεγάλο δίκτυο θα μπορούσαν να μη συμπεριληφθούν όλοι οι αγωγοί, παρά μόνο οι απαραίτητοι, χωρίς να διαφέρει η λειτουργία του και η κατάσταση των πιέσεων στο εσωτερικό του από το πραγματικό σύστημα. Ενώ η αντικατάσταση δεξαμενών που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις από μια ενιαία, είναι μια άλλου είδους αντιμετώπιση.

Παρόλα αυτά κάποια στοιχεία θεωρούνται γενικά σημαντικά για τα δίκτυα, όπως είναι οι αγωγοί μεγάλης διαμέτρου, οι χρήστες που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες νερού, κρίσιμα σημεία που δεν είναι γνωστή η κατάστασή τους, όλα τα στοιχεία ελέγχου, όπως είναι οι βαλβίδες ελέγχου, οι αντλίες και αγωγοί που βρίσκονται σε βρόγχους.

Ανάλογα με την προσέγγιση διαφέρουν και τα δεδομένα εισόδου για την απλοποίηση, σε άλλες περιπτώσεις απαιτείται ολόκληρο το δίκτυο, ενώ σε άλλες, μετρήσεις υδραυλικού φορτίου και ροών σε σημεία ελέγχου και δεδομένα της γεωμετρίας του δικτύου. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας της απλοποίησης είναι ένα δίκτυο με λιγότερα στοιχεία, λιγότερους κόμβους, και ίσως διαφορετικά κατανομημένες τις ροές που εξυπηρετούν τη ζήτηση.

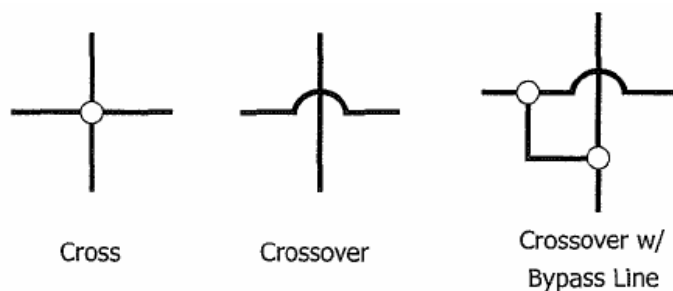
Σε γενικές γραμμές, η απλοποίηση του δικτύου και οι παράμετροι που τελικά αποφασίζεται να περιέχει το μοντέλο δεν πρέπει να είναι ούτε λιγότερες (υπο-παραμετροποίηση) ούτε περισσότερες (υπερ-παραμετροποίηση) από αυτές που μπορούν να υποστηρίξουν τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο δεν περιέχει σημαντικά στοιχεία του δικτύου τα οποία είναι καθοριστικά για τη λειτουργία του, ενώ στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει το ενδεχόμενο παραπλανητικά καλής προσαρμογής του μοντέλου στην πραγματικότητα.

2.5.2 Τοπολογία του δικτύου

Πολύ σημαντικό για τη σωστή προσομοίωση και λειτουργία του μοντέλου, είναι η ακριβής αναπαράσταση του πραγματικού δικτύου, τα σωστά στοιχεία που περιλαμβάνει και το πώς αυτά συνδέονται μεταξύ τους.

Οι χάρτες των συστημάτων είναι συνήθως η πηγή για τη σχέση των στοιχείων που συνιστούν το δίκτυο ύδρευσης. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις που η απεικόνιση

στους χάρτες δεν είναι κατάλληλη, με αποτέλεσμα την θεώρηση λανθασμένων σχέσεων. Για παράδειγμα ενώ σε χάρτες μπορεί να φαίνεται ότι οι αγωγοί τέμνονται, αυτό πιθανό να μην ισχύει στην πραγματικότητα καθώς μπορεί να διασταυρώνονται με τον ένα να περνάει πάνω από τον άλλο. Συνεπώς το να απεικονιστεί η σχέση των δύο αγωγών ως τομή θα ήταν λάθος και θα επέφερε σφάλματα στην προσομοίωση. Η κατάσταση που περιγράφηκε φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.8-Σχέσεις μεταξύ αγωγών δικτύου

Πηγή: Walski et al., 2003

Στα μοντέλα προσομοίωσης όπως αναφέρθηκε, πρέπει να απεικονιστούν τα στοιχεία των πραγματικών δικτύων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι δεξαμενές απεικονίζονται ως σημεία – κόμβοι, ενώ οι αντλίες σε κάποιες περιπτώσεις απεικονίζονται με παρόμοιο τρόπο με τους αγωγούς, κάτι το οποίο δε θεωρείται ρεαλιστικό. Επίσης, αν και στην πραγματικότητα το σύστημα των αγωγών αποτελείται από ένα σύνολο επιμέρους αγωγών συγκεκριμένου μήκους, στις προσομοιώσεις απεικονίζονται ενιαίοι αλλά διατηρώντας τα πραγματικά στοιχεία των σωληνώσεων του δικτύου, όπως είναι η διάμετρος, το υλικό και το συνολικό μήκος από ένα κόμβο σε ένα άλλο.

Περισσότερο αναλυτικά οι τρόποι προσομοίωσης των στοιχείων από τα οποία αποτελείται ένα δίκτυο διανομής νερού και τα δεδομένα που απαιτούνται, θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο στο οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο λογισμικό EPANET που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία.

2.5.3 Είδη προσομοίωσης

Η προσομοίωση των δικτύων ύδρευσης είναι δύο ειδών, της σταθερής κατάστασης και της παρατεταμένης περιόδου. Στην πρώτη περίπτωση αναπαριστάται ουσιαστικά ένα στιγμιότυπο της λειτουργίας του δικτύου υποθέτοντας ότι η ζήτηση και οι οριακές συνθήκες δεν αλλάζουν στο χρόνο, δηλαδή το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, ενώ χρησιμοποιείται για να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος κάτω από σταθερές συνθήκες ροής, πιέσεων, θέσεις των βαλβίδων, στάθμης των δεξαμενών κ.α. Αν και τα πραγματικά δίκτυα ύδρευσης είναι σπάνιο να βρεθούν σε σταθερές υδραυλικές συνθήκες, η μελέτη αυτής της κατάστασης είναι πολύ χρήσιμη για την ανάλυση συγκεκριμένων, πολύ δυσμενών συνθηκών και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη μετέπειτα μελέτη περισσότερο πολύπλοκων θεμάτων.

Στη δεύτερη περίπτωση, μελετάται η συμπεριφορά του συστήματος μέσα στο χρόνο, σε διαφορετικές συνθήκες ζήτησης αλλά και οριακές συνθήκες. Για τη μελέτη της προσομοίωσης παρατεταμένης περιόδου σε ένα σύστημα, είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων μελέτη του συστήματος σε σταθερές συνθήκες. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της παρατεταμένης περιόδου μπορεί να θεωρηθεί ως μια ακολουθία προσομοιώσεων σταθερής κατάστασης, οι οποίες είναι τα υδραυλικά χρονικά βήματα της παρατεταμένης περιόδου.

Απαραίτητα στοιχεία για την προσομοίωση εκτεταμένης περιόδου είναι η διάρκεια της προσομοίωσης και το χρονικό βήμα. Η διάρκεια εξαρτάται από το σκοπό της ανάλυσης, αν και συνήθως επιλέγονται οι 24 ώρες. Παρόλα αυτά, σε περιπτώσεις που οι μεταβολές σε ημερήσια βάση είναι αμελητέες, είναι απαραίτητη η διάρκεια να αυξηθεί και να γίνει 48 ώρες ή και περισσότερο. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η πτώση στάθμης σε μια δεξαμενή, η οποία μπορεί να είναι τόσο μικρή που να μην είναι αντιληπτή στην 24ωρη προσομοίωση. Επίσης υπάρχουν περιπτώσεις που η διάρκεια μερικών ωρών είναι αρκετή για τον εντοπισμό άμεσων μεταβολών στο σύστημα.

Όσον αφορά στο υδραυλικό χρονικό βήμα, αυτό είναι πολύ σημαντικό και αντιπροσωπεύει τη διάρκεια των επιμέρους προσομοιώσεων σταθερής κατάστασης από τις οποίες αποτελείται η προσομοίωση εκτεταμένης περιόδου. Δεν υπάρχει κανόνας για το πώς επιλέγεται το βήμα αυτό, αν και συνήθως προτιμάται η μια ώρα. Αν το χρονικό βήμα είναι πολύ μεγάλο, μπορεί να προκληθούν απότομες αλλαγές στο σύστημα και τελικά το μοντέλο να μη δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

2.5.4 Βαθμονόμηση μοντέλων

Βασική προϋπόθεση για τη χρήση των μοντέλων προσομοίωσης πραγματικών δικτύων, είναι να παρέχουν αποτελέσματα τα οποία ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Αν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, τα αποτελέσματα και κατά συνέπεια το ίδιο το μοντέλο δεν είναι κατάλληλα για χρήση και λήψη αποφάσεων.

Η βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία η οποία πρέπει να προηγηθεί της χρήσης του μοντέλου. Η βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία εκτιμώνται οι παράμετροι του μοντέλου έτσι ώστε τα αποτελέσματά του (αποκρίσεις) y_i' , σε σχέση με ένα σύνολο παρατηρημένων δεδομένων που έχουν εισαχθεί στο σύστημα x_i , να ανταποκρίνονται όσο το δυνατό καλύτερα σε ένα αντίστοιχο σύνολο πραγματικών αποτελεσμάτων (αποκρίσεων) y_i του φυσικού συστήματος που προσομοιώνει το μοντέλο (Ευστρατιάδης και Μακρόπουλος, 2001).

Η AWWA (1999) έδωσε έναν παρόμοιο ορισμό για τη βαθμονόμηση των μοντέλων, υποστηρίζοντας ότι είναι η διαδικασία κατά την οποία οι παράμετροι που περιγράφουν το μαθηματικό μοντέλο που έχει δημιουργηθεί, προσαρμόζονται έτσι ώστε τα αποτελέσματά του να είναι όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικά και κοντά στις πραγματικές παρατηρήσεις, υπό οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας και μέσα στα όρια της ακρίβειας των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι κυρίως η κατανάλωση στους κόμβους και οι συντελεστές τριβής των αγωγών, αλλά γενικότερα όποια δεδομένα

εισέρχονται στο μοντέλο και έχουν μια αβεβαιότητα ως προς την ακρίβειά τους είναι εν δυνάμει παράμετροι βαθμονόμησης.

Η ακρίβεια της βαθμονόμησης ενός μοντέλου εξαρτάται από το σκοπό για τον οποίο προορίζεται και αυτός που το αποφασίζει είναι ο σχεδιαστής και ο μηχανικός που θα το χρησιμοποιήσει. Δεν είναι δηλαδή σωστό να θεωρηθεί ότι ένα μοντέλο είναι καθόλα βαθμονομημένο, ενώ κάθε μοντέλο θα πρέπει να βαθμονομείται ξανά όταν καλείται να επιλύσει νέα προβλήματα.

Για να διαπιστωθεί αν το μοντέλο λειτουργεί σωστά, γίνεται η επαλήθευσή του με δεδομένα διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για να βαθμονομηθεί. Η εξέταση του κατά πόσο οι παράμετροι ενός μοντέλου είναι ευαίσθητες στις μεταβολές του συστήματος, ονομάζεται ανάλυση ευαισθησίας και είναι ίσως ο καλύτερος τρόπος για να διαπιστωθεί εάν το μοντέλο είναι επαρκώς βαθμονομημένο. Συγκεντρωτικά η διαδικασία που ακολουθείται για τη βαθμονόμηση των μοντέλων είναι η εξής:

- Καθορισμός του σκοπού χρήσης του μοντέλου.
- Καθορισμός εκτιμήσεων των παραμέτρων.
- Συλλογή δεδομένων βαθμονόμησης.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με τις αρχικές εκτιμήσεις των παραμέτρων.
- Εκτέλεση μιας πρόχειρης ανάλυσης της βαθμονόμησης.
- Εκτέλεση ανάλυσης ευαισθησίας.
- Εκτέλεση λεπτομερούς ανάλυσης της βαθμονόμησης με χρήση των παραμέτρων που επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου.

2.5.5 Πηγές σφαλμάτων

Η απόκλιση ανάμεσα στις πραγματικές παρατηρήσεις και στα αποτελέσματα των μοντέλων, καλείται σφάλμα ή υπόλοιπο του μοντέλου. Οι πηγές των σφαλμάτων αυτών είναι ποικίλες (AWWA, 1999) και περιγράφονται στη συνέχεια.

Τα σφάλματα από τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο, προκαλούνται είτε λόγω λανθασμένων μετρήσεων είτε λόγω τυπογραφικών λαθών. Συγκεκριμένα, μια συχνή πηγή σφαλμάτων είναι η διάμετρος των αγωγών, και αν εισάγεται τελικά η πραγματική ή η ονομαστική τιμή της. Συνήθως σε παλιές σωληνώσεις η διάμετρος διαφέρει κατά μήκος των αγωγών λόγω της διάβρωσης, έτσι γενικά ενδείκνυται να χρησιμοποιείται η ονομαστική διάμετρος και να προσαρμόζονται οι τιμές της τραχύτητας του αγωγού για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Η διάμετρος των σωληνώσεων είναι σημαντική καθώς η απώλεια φορτίου εξαρτάται από αυτή.

Παρόλα αυτά η τραχύτητα των αγωγών είναι ένα θέμα που δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως, καθώς υπάρχουν διάφοροι τρόποι καθορισμού της, οι οποίοι βασίζονται στο υλικό, την ηλικία και το μέγεθος τους, ένας εξ' αυτών είναι ο παράγοντας C από τους Hazen-Williams.

Επίσης, η ζήτηση είναι μια πηγή σφάλματος, καθώς στην πραγματικότητα είναι κατανεμημένη κατά μήκος του δικτύου και όχι μόνο στους κόμβους του, όπως πολύ συχνά προσομοιώνεται στα μοντέλα για λόγους απλούστευσης. Η χρήση του νερού όπως τελικά υπολογίζεται από το μοντέλο μπορεί να απέχει από την πραγματική με αποτέλεσμα τη δημιουργία σφαλμάτων.

Σφάλματα μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο και από τις πηγές των αρχικών δεδομένων, όπως είναι οι χάρτες των συστημάτων διανομής νερού, λόγω έλλειψης ενημέρωσής τους και χαμηλής ακρίβειας. Από αυτούς τους χάρτες λαμβάνονται πληροφορίες για τα φυσικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως είναι η γεωμετρία του, τα μήκη των αγωγών, οι συνδέσεις μεταξύ των αγωγών και των κόμβων κ.α.

Επίσης η επίδραση που έχει ο χρόνος στις παραμέτρους του δικτύου μπορεί να είναι μια αιτία εισαγωγής σφαλμάτων στο μοντέλο, καθώς για την βαθμονόμησή του θα πρέπει να συνυπολογιστεί η μεταβολή των συνθηκών της λειτουργίας του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα η στάθμη του νερού σε μια δεξαμενή.

Η απλοποίηση επίσης, αν γίνει σε μεγάλο βαθμό είναι πηγή σφαλμάτων. Ενώ και η γεωμετρία του δικτύου, αν δεν ερμηνευθεί σωστά μπορεί να εισάγει σφάλματα.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των μοντέλων συνήθως αποκτούνται με μετρήσεις στο δίκτυο, οι οποίες αφορούν την πίεση και τη ροή. Οι συσκευές όμως οι οποίες χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις πρέπει να είναι πλήρως βαθμονομημένες και αυτές, ενώ ακόμη και τα συστήματα ελέγχου των μετρήσεων πρέπει να έχουν βαθμονομηθεί. Παρόλα αυτά, ακόμη και αν είναι βαθμονομημένος ο εξοπλισμός των μετρήσεων, και πάλι μπορεί να υπάρξουν άλλοι παράγοντες οι οποίοι θα επηρεάσουν την ποιότητα των μετρήσεων.

2.5.6 Μέθοδοι βαθμονόμησης

Διάφορες μέθοδοι βαθμονόμησης για τα μοντέλα των δικτύων ύδρευσης και γενικότερα των μοντέλων των υδραυλικών συστημάτων, έχουν μελετηθεί και έχουν προταθεί. Η βαθμονόμηση που ακολουθείται εξαρτάται από το σενάριο προσομοίωσης και τη μετέπειτα χρήση του μοντέλου. Για παράδειγμα αν η προσομοίωση αφορά στη μέση κατανάλωση, αυτό που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι κυρίως οι οριακές συνθήκες, ενώ αν προσομοιώνεται η μέγιστη κατανάλωση, λόγω της έντονης μείωσης του υδραυλικού φορτίου σημαντική είναι η τραχύτητα των αγωγών. Τέλος, αν αφορά την ενέργεια βασική παράμετρος αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας ανά αντλία. (lesson 8, WDS model calibration)

Μια κλασική μέθοδος η οποία εφαρμόζεται συχνά είναι η χειροκίνητη βαθμονόμηση με διαδοχικές δοκιμές, για την προσαρμογή των παραμέτρων ώστε να επιτευχθεί η καταλληλότερη αντιστοιχία μεταξύ μοντέλου και πραγματικότητας. Αυτή η διαδικασία είναι χρονοβόρα και επίπονη και μπορεί να μην επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Η αυτόματη διαδικασία βαθμονόμησης είναι η λιγότερο χρονοβόρα και γίνεται με χρήση αλγορίθμων οι οποίοι βασίζονται σε τεχνικές βελτιστοποίησης. Μια πρώτη προσέγγιση

της αυτόματης βαθμονόμησης είναι η επαναληπτική διαδικασία, η οποία εφαρμόζεται σε μικρά δίκτυα, ενώ είναι κοντά στη λογική της χειροκίνητης βαθμονόμησης. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τεχνικές επίλυσης εξισώσεων, όπου για κάθε παράμετρο και μέτρηση διατυπώνεται μια νέα εξίσωση, ενώ τα σφάλματα των μετρήσεων δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη. Στην τρίτη προσέγγιση, χρησιμοποιούνται μέθοδοι βελτιστοποίησης με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων κριτηρίων, κάτι που θα αναλυθεί περισσότερο στην ενότητα της βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία της αυτόματης βαθμονόμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου ως πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι η εξής (Ευστρατιάδης και Μακρόπουλος, 2011):

- Αρχικά επιλέγεται το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο και διαμορφώνονται οι παράμετροί του με τρόπο ρεαλιστικό.
- Επιλέγεται ένα δείγμα αποτελεσμάτων του πραγματικού συστήματος σε σχέση με ένα δείγμα μεταβλητών που εισάγονται στο σύστημα, κοινό για το πραγματικό σύστημα και το μοντέλο.
- Από τις ελεύθερες μεταβλητές του μοντέλου, κάποιες θεωρούνται γνωστές δίνοντάς τους τιμές, ενώ οι υπόλοιπες θεωρούνται άγνωστες παράμετροι (μεταβλητές ελέγχου).
- Επιλέγεται ένα μέτρο σφάλματος, το οποίο συνάδει στατιστικά με τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων του μοντέλου (σφάλματα).
- Ορίζονται τα όρια μέσα στα οποία θα λαμβάνουν τιμές οι παράμετροι, αλλά και περιορισμοί της στατιστικής δομής των σφαλμάτων.
- Επιλέγεται αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος.

Μια άλλη μέθοδος, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι απλοποιεί τη διαδικασία της βαθμονόμησης, είναι ο απευθείας υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου, όπου όμως υπεισέρχεται η κρίση του μηχανικού για τον εντοπισμό μη ρεαλιστικών τιμών των παραμέτρων. Και πάλι είναι πιθανή η εισαγωγή σφαλμάτων (AWWA, 1999).

Ίσως η καλύτερη λύση θεωρείται η βαθμονόμηση του μοντέλου για διαφορετικές συνθήκες της ζήτησης, τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της που μπορεί να παρατηρηθεί σε μια μέρα, καθώς τα φυσικά χαρακτηριστικά του δικτύου διατηρούνται ενώ μεταβάλλονται οι οριακές συνθήκες όπως είναι η μέγιστη και ελάχιστη στάθμη των δεξαμενών, κ.α. (AWWA, 1999).

Σε προσομοίωση σταθερών συνθηκών, προκειμένου να βαθμονομηθεί το μοντέλο, διατηρούνται σταθερές κάποιες από τις παραμέτρους του μοντέλου όπως είναι οι οριακές του συνθήκες (στάθμες δεξαμενών, υδραυλικές κλίσεις κ.α.) και γίνεται η βαθμονόμησή του ως προς τις υπόλοιπες μεταβλητές του (Walski et al., 2003). Στη βιβλιογραφία συνιστάται για τη βαθμονόμηση αυτή να χρησιμοποιούνται δεδομένα ροών και πιέσεων.

Σε προσομοιώσεις παρατεταμένης περιόδου, για να διαπιστωθεί κατά πόσο το μοντέλο είναι ακριβές, γίνονται συγκρίσεις της στάθμης του νερού στις δεξαμενές από μετρήσεις και από τα αποτελέσματα του μοντέλου, όπως επίσης και της κατανάλωσης της ενέργειας. Αν μπορούν να αναπαραχθούν οι διακυμάνσεις της στάθμης από το μοντέλο,

εντός ενός συγκεκριμένου ορίου που έχει τεθεί, τότε το μοντέλο θεωρείται επαρκώς βαθμονομημένο.

2.5.7 Κριτήρια προσαρμογής μη γραμμικών μοντέλων στην πραγματικότητα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα μοντέλα των δικτύων ύδρευσης που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως μη γραμμικά. Για να διαπιστωθεί κατά πόσο ένα μη γραμμικό μοντέλο ανταποκρίνεται στο πραγματικό σύστημα, χρησιμοποιούνται κάποια κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να είναι τα εξής (Ευστρατιάδης και Μακρόπουλος, 2011):

- Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2} \quad (2.8)$$

Όπου y_i η παρατηρημένη τιμή και y_i' η τιμή του μοντέλου.

- Αποτελεσματικότητα (EFF)

Η αποτελεσματικότητα συγκρίνει τη διασπορά του μοντέλου με αυτή των σφαλμάτων, με τιμές που κυμαίνονται από $-\infty$ έως 1.

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2} \quad (2.9)$$

Όπου y_i η παρατηρημένη τιμή, y_i' η τιμή του μοντέλου και μ_y η μέση τιμή των παρατηρήσεων.

- Μέσο σφάλμα ή μεροληψία (BIAS)

Η μεροληψία συγκρίνει τη μέση τιμή του μοντέλου μ_y' με τη μέση τιμή των παρατηρήσεων μ_y (%).

$$BIAS = \frac{\mu_y' - \mu_y}{\mu_y} \quad (2.10)$$

2.6 Αλληλεξάρτηση Νερού – Ενέργειας (Water – Energy Nexus)

Το νερό και η ενέργεια είναι δυο αλληλένδετες έννοιες, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπίζονται από κοινού. Το νερό διαθέτει ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για την αποθήκευση και μεταφορά της ενέργειας, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και καυσίμων. Αντίστοιχα, η ενέργεια είναι αναπόσπαστο κομμάτι για την άντληση, επεξεργασία, μεταφορά, διανομή και διάθεση κατάλληλης ποιότητας νερού σε περιοχές ανθρώπινης δραστηριότητας για τη χρήση του σε διάφορους

τομείς. Επίσης, η ενέργεια είναι απαραίτητη για την επεξεργασία των λυμάτων πριν την απόρριψή τους ξανά στο περιβάλλον, για την αφαλάτωση, αλλά και για άλλες διεργασίες που σχετίζονται με το νερό. Οι ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται για τις παραπάνω διεργασίες εξαρτώνται από την κάθε περίπτωση, για παράδειγμα στην άντληση του νερού εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά στην οποία πρέπει να μεταφερθεί το νερό. Η σύνδεση των δύο εννοιών έγινε πρώτη φορά στις Η.Π.Α., ενώ ακολούθησαν μελέτες και σε άλλες χώρες, όπως η Ισπανία και η Αυστραλία.

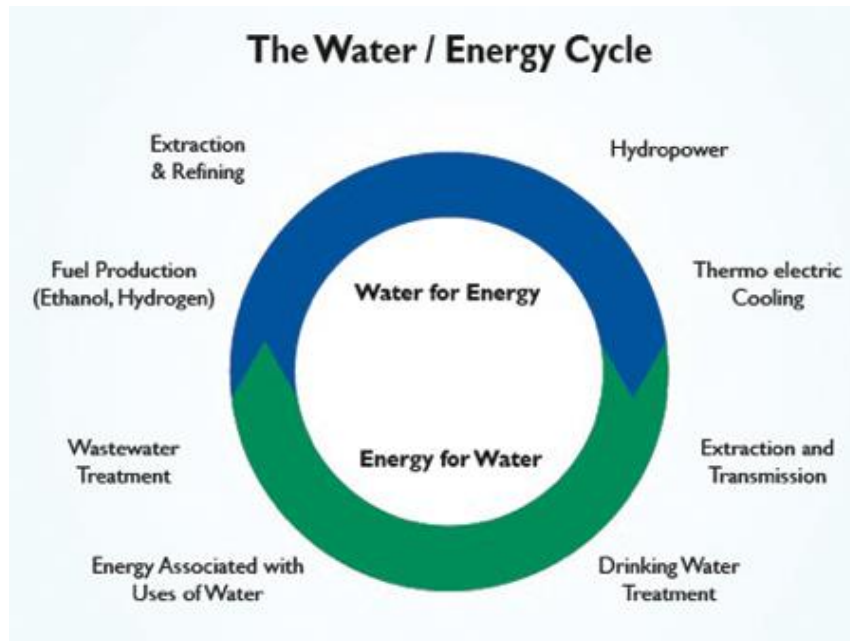
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μεγάλη ποσότητα νερού για ψύξη και δαπανά τεράστιες ποσότητες πρωτογενούς ενέργειας, εξαιτίας της ανεπαρκούς μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική (U.S. Department of Energy, 2014).

Πολλές φορές η έλλειψη νερού επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας, επιβεβαιώνοντας τη σχέση ανάμεσα στις δύο έννοιες. Η αβεβαιότητα, η έλλειψη του νερού και η ποικιλομορφία του κάνουν επιρρεπή τα συστήματα παραγωγής ενέργειας, τα οποία εξαρτώνται από αυτό (Siddiqi et al., 2011, U.S. Department of Energy, 2014). Ειδικά με τις αυξανόμενες απαιτήσεις πλέον σε ενέργεια και με τον κίνδυνο μείωσης του διαθέσιμου νερού, οι ισορροπίες επηρεάζονται άμεσα. Αυτό έχει οδηγήσει σε μια νέα από κοινού τακτική αντιμετώπισης, ενώ επίσης γίνεται προσπάθεια εύρεσης νέων πηγών νερού και παραγωγής ενέργειας.

Η σχέση ενέργειας – νερού δεν είναι ισοδύναμη, συνήθως τα συστήματα νερού εξαρτώνται περισσότερο από την ενέργεια και λιγότερο το αντίθετο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στη Σαουδική Αραβία το 9% της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται για άντληση νερού και την αφαλάτωση, ενώ στον Περσικό κόλπο το αντίστοιχο ποσοστό κυμαίνεται στο 5-12% (Siddiqi et al., 2011). Αντίστοιχα στις Η.Π.Α., η πτώση στάθμης της λίμνης Mead αύξησε τον κίνδυνο συσκότισης του Las Vegas, ενώ η Γαλλία το 2009 αναγκάστηκε να εισάγει ενέργεια από την Αγγλία, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας του νερού που δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της. Τέλος στην Αίγυπτο, το 25% της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στην ψύξη του φρέσκου νερού.

Η σχέση της ενέργειας και του νερού συνεχώς επηρεάζεται από νέα δεδομένα. Η διαθεσιμότητα του νερού και τώρα αλλά και στο μέλλον συμβάλλει στην αβεβαιότητα για την παραγωγή ενέργειας. Ενώ η αύξηση του πληθυσμού είναι ένα ακόμη στοιχείο το οποίο καθορίζει τις ανάγκες και συνεπώς τη σχέση ανάμεσα στους δύο πόρους. Στόχος είναι λοιπόν η μέγιστη ενεργειακή απόδοση των συστημάτων νερού, αλλά και η αποτελεσματικότερη χρήση της ενέργειας στα συστήματα αυτά. Για παράδειγμα η παραγωγή ενέργειας από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας νερού ή από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας του είναι μια δυνατή λύση. Οι σχέσεις που διέπουν τις δύο έννοιες, εξαρτώνται από οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, και φυσικά από τον εκάστοτε υπεύθυνο διαχείρισής τους και από τις απαιτήσεις και προσδοκίες που αναμένει.

Για την πρόβλεψη αλλά και τη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με το νερό και την ενέργεια και με ό,τι η μεταξύ τους σχέση συνεπάγεται, είναι απαραίτητη η δημιουργία μοντέλων, τα οποία όμως συμπεριλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επηρεάζουν τη σχέση αυτή. Αυτά που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι απαιτήσεις σε ενέργεια και νερό, οι χρήσεις τους, ο πληθυσμός, τα διαθέσιμα τεχνολογικά μέσα, η πολιτική και τα οικονομικά συμφέροντα, το κλίμα κ.α. (U.S. Department of Energy, 2014).



Σχήμα 2.9-Η σχέση Ενέργειας-Νερού

Πηγή: <http://uimonline.com/index/webapp-stories-action/id.647/archive.yes/Issue.2012-02-01/title.water-management.-energy-efficiency>

Κεφάλαιο 3

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η βελτιστοποίηση είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων, σε οποιονδήποτε τομέα. Για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας σειράς εναλλακτικών λύσεων – επιλογών ενώ κάθε πιθανή λύση αξιολογείται ως προς το αποτέλεσμά της. Οι λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς του εκάστοτε προβλήματος θεωρούνται εφικτές, και αποτελούν τον εφικτό χώρο ή τον χώρο αναζήτησης.

Κάθε εφικτή λύση περιγράφεται από τις μεταβλητές ελέγχου, οι οποίες αξιολογούνται βάσει της στοχικής συνάρτησης, η οποία θεωρείται ένα μέτρο επίδοσής τους. Η λύση που θεωρείται βέλτιστη για το κάθε πρόβλημα είναι αυτή που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί τη στοχική συνάρτηση. Η στοχική συνάρτηση είναι μια μαθηματική έκφραση η οποία αποτελείται από ένα ή περισσότερα κριτήρια. Στην πρώτη περίπτωση η βελτιστοποίηση ονομάζεται μονοκριτηριακή και στη δεύτερη πολυκριτηριακή.

Η γενική μορφή μιας συνάρτησης στόχου είναι η εξής:

$$\min/ \max f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

Συγκεντρωτικά τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης σε ένα πρόβλημα είναι τα παρακάτω:

- Ο στόχος ή οι στόχοι που εκφράζονται ως η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση μιας μαθηματικής έκφρασης
- Οι μεταβλητές απόφασης
- Οι περιορισμοί, αν υπάρχουν, συμπεριλαμβανομένων των ορίων των μεταβλητών απόφασης, που εκφράζονται ως ισότητες ή ανισότητες
- Μια μέθοδος αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων
- Μία μέθοδος βελτιστοποίησης

3.1 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Υπάρχουν πολλές γνωστές μέθοδοι βελτιστοποίησης, και ανάλογα με το πρόβλημα χρησιμοποιείται η αντίστοιχη. Ο διαχωρισμός των μεθόδων μπορεί να γίνει βάσει πολλών κριτηρίων. Ένας βασικός διαχωρισμός που μπορεί να γίνει είναι στην τοπική και την ολική βελτιστοποίηση, ανάλογα με το αν αναζητείται το τοπικό ή το ολικό ακρότατο μιας συνάρτησης. Η αναζήτηση του καθολικά βέλτιστου είναι το ζητούμενο και ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται αυτό μπορεί ή όχι να εξασφαλιστεί. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να εντοπιστεί η καθολικά βέλτιστη λύση είναι συνήθως να χρησιμοποιηθεί ο εκάστοτε αλγόριθμος βελτιστοποίησης πολλές φορές με διαφορετικά σημεία εκκίνησης.

3.1.1 Μέθοδοι τοπικού ακρότατου

Αυτές οι μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι επαναληπτικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούν κανόνες μετάβασης, ξεκινώντας από μια αρχική λύση βελτιώνουν την τιμή της στοχικής συνάρτησης παράγοντας τελικά μια βελτιωμένη λύση. Με αυτή τη διαδικασία γίνεται σύγκλιση στο τοπικό ακρότατο που βρίσκεται κοντά στη λύση εκκίνησης (Ευστρατιάδης, 2001).

Δύο είναι οι κατηγορίες των μεθόδων εύρεσης τοπικού ακρότατου ανάλογα με το αν κάνουν χρήση των παραγώγων της συνάρτησης. Η πρώτη κατηγορία είναι οι τεχνικές έμμεσης αναζήτησης ή αλλιώς μέθοδοι κλίσης, στις οποίες ανήκουν η μέθοδος Newton και quasi-Newton, η μέθοδος συζυγών κλίσεων και η μέθοδος της πλέον απότομης κατάβασης, η οποία θεωρείται η απλούστερη τεχνική αυτής της κατηγορίας.

Η δεύτερη κατηγορία είναι οι τεχνικές άμεσης αναζήτησης. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ένα γεωμετρικό ανάλογο της κλίσης, εξερευνώντας το χώρο σε γραμμικά ανεξάρτητες διευθύνσεις (Ευστρατιάδης, 2001). Σε αυτή ανήκουν οι μέθοδοι του κατερχόμενου απλόκου, η μέθοδος μεταβλητών διευθύνσεων αναζήτησης και η αναζήτηση με πρότυπο.

3.1.2 Μέθοδοι ολικού ακρότατου

Συνήθως οι τεχνικές τοπικής αναζήτησης δεν εγγυώνται την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης, ειδικά σε συναρτήσεις που δεν είναι κυρτές και έχουν περισσότερα του ενός ακρότατα, καθώς σε αυτή την περίπτωση είναι πιθανό να εντοπιστεί το ακρότατο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο εκκίνησης και να αγνοηθούν τα υπόλοιπα.

Το πλεονέκτημα των μεθόδων ολικής βελτιστοποίησης έγκειται στην τυχαιότητα και στο γεγονός της εφαρμογής συνδυαστικών μεθόδων μετάβασης από το ένα σημείο στο άλλο και της αποδοχής κινήσεων που δεν είναι βέλτιστες, συνεπώς είναι και πιο δύσκολο να εγκλωβιστεί η λύση σε τοπικό ακρότατο.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν πέντε μέθοδοι βελτιστοποίησης. Συνοπτικά, αυτές είναι οι προσδιοριστικές μέθοδοι συστηματικής αναζήτησης, οι μέθοδοι προσομοιωμένης απόπτησης, οι ευρετικές και οι στοχαστικές μέθοδοι και τέλος οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Οι στοχαστικές μέθοδοι πιο συγκεκριμένα αποτελούνται από τις τεχνικές τυχαίας αναζήτησης, προσαρμοστικής αναζήτησης και από τη μέθοδο των δύο φάσεων.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, στους οποίους ανήκουν και οι γενετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια.

3.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών μεθόδων και έχουν βασιστεί στη θεωρία της εξέλιξης του Δαρβίνου, η οποία αναπτύχθηκε το 1858. Ως εξέλιξη, θεωρείται η αυτόματη διαδικασία της προσαρμογής του εκάστοτε συστήματος

στο περιβάλλον του, στο οποίο περιβάλλον περιλαμβάνονται οι εξωτερικές συνθήκες που επηρεάζουν το σύστημα.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι μοντέλα υπολογισμού τα οποία λειτουργούν με αντίστοιχο τρόπο με τη διαδικασία εξέλιξης και προσαρμογής ενός φυσικού πληθυσμού στο περιβάλλον, με σκοπό την επίλυση διαφόρων προβλημάτων. Σύμφωνα με τον Δαρβίνο τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την τροφή, τη στέγη και άλλους πόρους ώστε να επιβιώσουν στον περιβάλλον που ζουν. Τα άτομα που τελικά τα καταφέρνουν έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να αναπαραχθούν και να διαιωνιστούν. Ουσιαστικά πραγματοποιείται μια φυσική διαλογή των ατόμων, τα γονίδια των οποίων θεωρούνται ισχυρά και μεταφέρονται σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων στις επόμενες επαναλήψεις ή γενιές.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι γνωστοί για το ότι έχουν τη δυνατότητα χειρισμού πολλών πληθυσμών υποψήφιων λύσεων (population-based methods) και όχι μιας λύσης σε κάθε επανάληψη, όπως γίνεται με άλλες στοχαστικές μεθόδους, όπως είναι η μέθοδος προσομοιωμένης απόκτησης.

Αρχικά οι αλγόριθμοι αυτοί σχεδιάστηκαν για την επίλυση μονοκριτηριακών προβλημάτων. Παρόλα αυτά εφαρμόζοντας κατάλληλες μετατροπές μπορούν να εφαρμοστούν και σε πολυκριτηριακά προβλήματα, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα ως προς άλλες μεθόδους.

Βασικό πλεονέκτημα των αλγορίθμων αυτών είναι το μη μαθηματικό τους υπόβαθρο και η δυνατότητά τους να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Αντίστοιχα ένα βασικό μειονέκτημα των εξελικτικών αλγορίθμων είναι ότι συνήθως απαιτείται μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων για την επιλογή της βέλτιστης λύσης.

Για να χαρακτηριστεί ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ως εξελικτικός πρέπει να έχει κάποια βασικά γνωρίσματα. Αυτά είναι τα εξής (Γιαννάκογλου, 2012):

- Αρχικά να χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων και όχι μεμονωμένα άτομα.
- Η εξέλιξη του πληθυσμού στις επόμενες γενιές να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Η διαδοχή των πληθυσμών να γίνεται με τη δημιουργία νέων ατόμων και την εξάλειψη άλλων και πάλι βάσει της τιμής καταλληλότητας τους.
- Να υπάρχει κληρονομικότητα στα καλά χαρακτηριστικά από τη μια γενιά στην επόμενη αλλά και εμφάνιση νέων.

Η τυπική διαδικασία ενός εξελικτικού αλγορίθμου είναι η εξής (Ευστρατιάδης, 2001):

- Αρχικά δημιουργείται ένας πληθυσμός ο οποίος αποτελείται από σημεία του εφικτού χώρου και βάσει αυτού υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Στον αρχικό πληθυσμό εφαρμόζεται ο τελεστής διασταύρωσης ή ανασυνδυασμού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέα μέλη τα οποία ονομάζονται διαφορετικά απόγονοι.
- Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας ακόμη τελεστής, αυτός της μετάλλαξης σε κάποια από τα άτομα του πληθυσμού.
- Σε αυτό το στάδιο με χρήση του τελεστή επιλογής δημιουργείται η επόμενη γενιά που περιλαμβάνει τα καλύτερα μέλη της προηγούμενης γενιάς.
- Στην περίπτωση που τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου δεν ικανοποιούνται επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το δεύτερο στάδιο.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, την εξελικτική στρατηγική, τον εξελικτικό προγραμματισμό και τους γενετικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία, και είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μορφή εξελικτικών αλγορίθμων. Αν και οι τρεις κατηγορίες μπορούν να χωριστούν διακριτά μεταξύ τους, πλέον δεν έχει τόση σημασία καθώς μπορούν να μοιραστούν στοιχεία όπως είναι ο τρόπος κωδικοποίησης ή κάποιοι τελεστές.

3.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν πολλές εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης αποτελεί και για τους υδατικούς πόρους, όπου εφαρμόζονται σε προβλήματα τόσο με διακριτές όσο και με συνεχείς μεταβλητές ελέγχου. Ο Holland (1975) ήταν αυτός που πρώτος τους ανέπτυξε και ακολούθησε ο Michalewicz (1999).

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δεν έχουν μαθηματική απόδειξη για το ότι υπολογίζουν τη βέλτιστη λύση και αυτός είναι ο λόγος που χαρακτηρίζονται ως ευρετικές μέθοδοι (heuristic). Συγκεκριμένα, οι γενετικοί αλγόριθμοι βασίζονται στο θεώρημα των σχημάτων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων έναντι άλλων μεθόδων είναι τα εξής (Goldberg, 1989):

- Είναι κατάλληλοι για βελτιστοποιήσεις συναρτήσεων διακριτών μεταβλητών ελέγχου ή μεταβλητών οι οποίες εκφράζονται με λογικές εκφράσεις.
- Είναι κατάλληλοι για την ταυτόχρονη διερεύνηση του χώρου των πιθανών λύσεων και συγκεκριμένα πολλών διαφορετικών περιοχών με την πιθανή βέλτιστη λύση.
- Απαιτείται μόνο η γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Για τις επαναλήψεις γίνεται χρήση πιθανοτικών κανόνων λήψης αποφάσεων και όχι ντετερμινιστικών.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων είναι:

- Βασίζονται σε μια απλή ιδέα
- Επιλύουν δύσκολα προβλήματα
- Δίνουν πάντα μια λύση η οποία είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η προηγούμενη

- Λύνουν πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση
- Μπορούν να συνδεθούν με ήδη υπάρχοντα μοντέλα
- Εξελίσσονται χωρίς δυσκολία
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης
- Έχουν πολλούς τομείς εφαρμογής καθώς είναι γενικής φύσεως

Οι γενετικοί αλγόριθμοι πέρα από το όνομά τους έχουν δανειστεί την ορολογία αλλά και τις ιδιότητές τους από τη γενετική. Οι διεργασίες που ακολουθούνται επίσης είναι από την επιστήμη αυτή. Συγκεκριμένα, ως άτομο θεωρείται κάθε πιθανή λύση του προβλήματος, ενώ τα γενετικά χαρακτηριστικά του ατόμου ονομάζονται χρωμοσώματα και αφορούν στις τιμές των μεταβλητών ελέγχου του εκάστοτε σημείου. Αντίστοιχα, τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια, το σύνολο των οποίων σχηματίζει τον γονότυπο του ατόμου. Ως φαινότυπος χαρακτηρίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που θεωρείται και εξωτερικό χαρακτηριστικό του ατόμου. Ακόμη, τα διαφορετικά στάδια στα οποία εκτελούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι ονομάζονται γενιές, ενώ σε κάθε γενιά πραγματοποιούνται οι διαδικασίες της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, κατά τις οποίες δημιουργείται ο νέος πληθυσμός που αντικαθιστά τον προηγούμενο βάσει ενός κριτηρίου επίδοσης, ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

3.3.1 Κωδικοποίηση

Αρχικά είναι απαραίτητη η κωδικοποίηση των γονότυπων με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι διαχειρίσιμοι. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης είναι ο δυαδικός, όπου οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου παρουσιάζονται ως ακολουθίες των τιμών 0 και 1. Στο δυαδικό σύστημα κάθε αριθμός είναι μια αύξουσα δύναμη του 2, ξεκινώντας από το 2^0 .

Για παράδειγμα $1011 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 11$.

Η μεταβλητή ελέγχου, η οποία είναι πραγματικός αριθμός μετατρέπεται σε ακέραιο και στη συνέχεια αυτός ο ακέραιος μετατρέπεται σε δυαδική μορφή.

Αν $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου με N συνιστώσες, η δυαδική κωδικοποίηση απαιτεί τον καθορισμό ενός ανώτατου $x_{i,U}$ και ενός κατώτατου ορίου $x_{i,L}$, όπως επίσης και τον αριθμό n_i των δυαδικών ψηφίων ανά μεταβλητή i , $i \in N$ (Γιαννάκογλου, 2012). Το πλήθος n_i καθορίζει την ακρίβεια της μεταβλητής σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta x_i = \frac{x_{i,U} - x_{i,L}}{2^{n_i} - 1} \quad (3.2)$$

Κάθε διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου x απεικονίζεται ως συμβολοσειρά v , η οποία αποτελείται από μια ακολουθία της δυαδικής μορφής των μεταβλητών (χρωμόσωμα) που περιγράφει συνολικά μια λύση.

Για παράδειγμα αν $N=3$, $n_1=5$, $n_2=7$ και $n_3=6$ ένα χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι το

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & \underbrace{\hspace{2em}} & \underbrace{\hspace{2em}} & & & & & \underbrace{\hspace{2em}} & & & & & \\ & & & & & & x_1 & x_2 & & & & & x_3 & & & & & \end{array}$$

Όπου η τιμή που αντιστοιχεί στο x_1 είναι:

$$x_1 = x_{1,L} + \frac{x_{1,U} - x_{1,L}}{2^n - 1} \text{int}(10010) \quad (3.3)$$

όπου $\text{int}(10010)$ ο ακέραιος που αντιστοιχεί στη δυαδική συστοιχία 10010.

3.3.2 Αρχικός πληθυσμός

Το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού εξαρτάται από τον αριθμό των μεταβλητών ελέγχου και εκφράζει το πλήθος των χρωμοσωμάτων που αποτελούν τον πληθυσμό σε κάθε γενιά. Ένας αποδεκτός αριθμός χρωμοσωμάτων σε κάθε γενιά είναι 20-30, αν και σε κάποιες περιπτώσεις τα 50-100 θεωρούνται καλύτερα. Το μέγεθος του πληθυσμού είναι πολύ βασικό για την απόδοση του γενετικού αλγορίθμου, καθώς αν είναι πολύ μεγάλος μπορεί να βρει το ολικό βέλτιστο με μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, ενώ αν είναι πολύ μικρός μπορεί να εγκλωβιστεί σε τοπικά βέλτιστα, αν και έτσι λύνεται πιο γρήγορα το πρόβλημα.

Ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από ένα πλήθος s τυχαίων συμβολοσειρών στις οποίες η σειρά των δυαδικών ψηφίων είναι τυχαία. Παρόλα αυτά υπάρχουν και μέθοδοι για μη τυχαία σειρά των δυαδικών ψηφίων.

3.3.3 Τελεστής επιλογής

Η διαδικασία της επιλογής του πληθυσμού που αναφέρθηκε και προηγουμένως, ουσιαστικά ορίζει την πιθανότητα αναπαραγωγής κάθε ατόμου στις επόμενες γενιές. Αρχικά δημιουργείται ένας βοηθητικός πληθυσμός ο οποίος περιέχει αντίγραφα των ατόμων από τον πρωτότυπο, με στόχο να επιβιώνουν-αντιγράφονται τα περισσότερο ικανά άτομα πάνω από μια φορά στις επόμενες γενιές.

Ο τελεστής επιλογής γονέων δημιουργεί το σύνολο των γονέων της επόμενης γενιάς επιλέγοντας άτομα από τα σύνολα απογόνων και γονέων της τρέχουσας γενιάς. Οι επόμενες γενιές περιέχουν άτομα τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τα άτομα του βοηθητικού με εφαρμογή των τελεστών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η ικανότητα επιβίωσης ενός ατόμου σε επόμενη γενιά μετράται με το βαθμό καταλληλότητας (φ_i), ο οποίος συμπίπτει με την τιμή της στοχικής συνάρτησης στην περίπτωση που σκοπός είναι η μεγιστοποίησή της, διαφορετικά ο βαθμός καταλληλότητας είναι ίσος με τη μεγιστοποίηση της στοχικής συνάρτησης ($f(x_i)$) αφού αφαιρεθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και προστεθεί ένας μικρός θετικός αριθμός (φ_{\min}) που εκφράζει την καταλληλότητα της χειρότερης λύσης (Ευστρατιάδης, 2001).

$$\varphi_i = \max \{ f(x_i) \} - f(x_i) + \varphi_{\min} \quad (3.4)$$

Ο τελεστής της επιλογής έχει καθοριστικό ρόλο στους γενετικούς αλγορίθμους καθώς καθορίζει την ποικιλία του πληθυσμού αλλά και την επιλεκτική πίεση των καλύτερων ατόμων. Η επιλεκτική πίεση των ατόμων, όταν είναι ισχυρή οδηγεί στη δημιουργία πολλών αντιγράφων των ατόμων αυτών, και κατά συνέπεια στην επικράτησή τους σε επόμενες γενιές, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποικιλίας του πληθυσμού και τη γρηγορότερη σύγκλιση σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Το τελευταίο δεν είναι επιθυμητό, καθώς σκοπός είναι η διασπορά των λύσεων και η διερεύνηση του χώρου των πιθανών λύσεων, ώστε να μην εγκλωβιστεί η λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο (Ευστρατιάδης, 2001).

Οι κυριότεροι μηχανισμοί επιλογής είναι ο τροχός της ρουλέτας, ο οποίος είναι ο πιο απλός και περισσότερο συνήθης, το ελιτίστικο μοντέλο, το μοντέλο αναμενόμενης τιμής και η επιλογή μέσω διαγωνισμού.

Στην περίπτωση του τροχού της ρουλέτας οι εγκοπές του τροχού ισούνται με το μέγεθος του πληθυσμού και το πλάτος κάθε εγκοπής είναι ανάλογο με την πιθανότητα επιλογής κάθε ατόμου. Στη μέθοδο αυτή συνήθως εντοπίζονται στοχαστικά σφάλματα. Το πλεονέκτημα του ελιτίστικου μοντέλου είναι το γεγονός ότι δε χάνεται κάποια λύση που ίσως βρίσκεται κοντά στο ολικό βέλτιστο, εξαιτίας της τυχειότητας του μηχανισμού επιλογής. Η μέθοδος της αναμενόμενης τιμής σχεδιάστηκε για τη μείωση των στοχαστικών σφαλμάτων του τροχού της ρουλέτας, ενώ η μέθοδος της επιλογής μέσω διαγωνισμού θεωρείται περισσότερο αποτελεσματική συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους, καθώς παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα πρόωρης σύγκλισης σε τοπικό ακρότατο.

3.3.4 Τελεστής διασταύρωσης

Με τον τελεστή της διασταύρωσης ανταλλάσσεται γενετική πληροφορία ανάμεσα σε δύο τυχαία επιλεγμένα άτομα – γονείς του πληθυσμού, αν και στη βιβλιογραφία συναντώνται και διασταυρώσεις στις οποίες συμμετέχουν περισσότερα των δύο ατόμων. Ο τελεστής αυτός μπορεί να εφαρμοστεί σε μία ή και περισσότερες θέσεις της δυαδικής συμβολοσειράς. Οι θέσεις της διασταύρωσης επιλέγονται τυχαία αν και έχουν προταθεί μέθοδοι επιλογής συγκεκριμένων θέσεων. Κατά τη διασταύρωση δύο ατόμων – γονέων εναλλάσσονται τα δύο μέρη εκατέρωθεν της θέσης της διασταύρωσης, παράγοντας έτσι δύο απογόνους.

Ένα παράδειγμα σε μια διασταύρωση απλού σημείου για δύο γονείς είναι το εξής:

10110001011001

00101101110101

Όπου έστω το σημείο διασταύρωσης είναι το τέλος του έκτου δυαδικού ψηφίου, δηλαδή:

101100 || 01011001

001011 || 01110101

Τότε τα δύο άτομα που προκύπτουν από τη διασταύρωση είναι:

10110001110101

00101101011001

Η συχνότητα της διασταύρωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του πληθυσμού. Η πιθανότητα της διασταύρωσης είναι συνήθως κοντά στη μονάδα αλλά ποτέ ίση με αυτή, καθώς έτσι επιτρέπεται μια μικρή πιθανότητα μεταφοράς αναλλοίωτων χαρακτηριστικών των γονέων στους απογόνους. Επιπλέον τεχνικές έχουν παρουσιαστεί με τη συχνότητα να προσαρμόζεται κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση αρχικά δίνεται μικρότερη συχνότητα διασταύρωσης για τα πιο ισχυρά άτομα ώστε να μην υπάρξει γρήγορη σύγκλιση και τερματιστεί η αναζήτηση σε κάποιο τοπικό ακρότατο.

3.3.5 Τελεστής μετάλλαξης

Ο τελεστής μετάλλαξης συμβάλλει την αλλαγή της τιμής κάποιων γονιδίων του πληθυσμού από την τιμή 1 στην τιμή 0 και το αντίστροφο. Ουσιαστικά εφαρμόζεται σε κάθε νέο απόγονο ο οποίος έχει προκύψει από τη διασταύρωση και στόχο έχει την εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον πληθυσμό (Γιαννάκογλου, 2012). Η συχνότητα με την οποία πραγματοποιείται η μετάλλαξη είναι πολύ μικρή (0.001 – 0.01), ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος του πληθυσμού. Παρόλα αυτά όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα της μετάλλαξης τόσο μεγαλύτερη είναι και η τυχαιότητα του γενετικού αλγορίθμου.

Για παράδειγμα, αν επιλεγεί να εφαρμοστεί ο τελεστής της μετάλλαξης για το πέμπτο ψηφίο του πρώτου από τους δύο απογόνους που προέκυψαν στο παράδειγμα της διασταύρωσης, δηλαδή του

10110001110101

Ο απόγονος που θα προκύψει από την εφαρμογή του τελεστή της μετάλλαξης είναι ο:

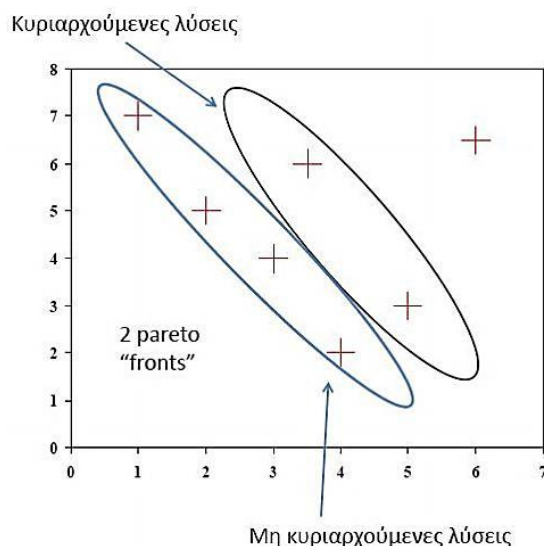
10111001110101

Το βασικό πλεονέκτημα της μετάλλαξης είναι η αποφυγή εγκλωβισμού της λύσης σε τοπικά ακρότατα, καθώς προσδίδει μεγαλύτερη τυχαιότητα στη διαδικασία της εξέλιξης. Παρόλα αυτά η μετάλλαξη δε συμβάλλει στην ταχύτητα και την αξιοπιστία των γενετικών αλγορίθμων συγκριτικά με την επιλογή και τη διασταύρωση.

Τα παραπάνω στάδια επαναλαμβάνονται έως ότου επιτευχθεί η βέλτιστη λύση. Κάθε επανάληψη ή αλλιώς γενιά που προκύπτει είναι καλύτερη από την προηγούμενη, ενώ με αυτό τον τρόπο μεταφέρονται στην επόμενη γενιά οι καλύτερες λύσεις ενώ η απόλυτα καλύτερη λύση κάθε γενιάς μεταφέρεται ως έχει στην επόμενη γενιά. Ο γενετικός αλγόριθμος σταματάει όταν με τις επαναλήψεις δεν βελτιώνεται περαιτέρω η λύση, χωρίς όμως να είναι βέβαιο εάν η τελική λύση είναι και η ολικά βέλτιστη.

3.4 Πολυκριτηριακοί Γενετικοί Αλγόριθμοι

Για περισσότερα του ενός κριτήρια, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης στοχεύει στην ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των συνιστωσών της στοχικής συνάρτησης ενός προβλήματος.

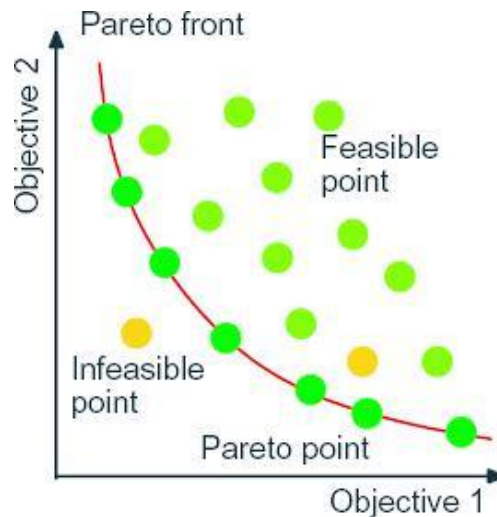


Σχήμα 3.1-Δύο σύνολα Pareto

Πηγή: Διαφάνειες μαθήματος «Υδροπληροφορική»

Ένας γενετικός αλγόριθμος ενός στόχου μπορεί να μετασχηματιστεί για την βελτιστοποίηση πολυκριτηριακού προβλήματος. Η βασική ιδέα κατά την οποία προσαρμόζεται ένας μονοκριτηριακός γενετικός αλγόριθμος ώστε να επιλύει προβλήματα πολλών στόχων, είναι η έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto και η έννοια του μετώπου Pareto (Pareto front). Η έννοια των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων συμβάλλουν καθοριστικά στο πρόβλημα της ιεράρχησης των λύσεων στον πολυδιάστατο χώρο. Ο Vilfredo Pareto, ένας Γαλλο-ιταλός οικονομολόγος και κοινωνιολόγος, είναι αυτός που όρισε την έννοια του μετώπου αυτού.

Σύμφωνα με τον Pareto, μια λύση είναι βέλτιστη αν και μόνο αν είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο οι υπόλοιπες λύσεις για όλα τα κριτήρια – στόχους και αν είναι καλύτερη από όλες τις άλλες λύσεις σε τουλάχιστον ένα κριτήριο – στόχο. Όπως είναι αναμενόμενο σε ένα σύνολο Pareto είναι αδύνατο να συγκριθεί μια λύση με μια άλλη.



Σχήμα 3.2-Το μέτωπο Pareto

Πηγή: <http://iopscience.iop.org/1367-2630/11/1/013019/fulltext/>

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να υπάρχει μόνο μια κυρίαρχη λύση αλλά πολλές μη κυριαρχούμενες (non – dominated), οι οποίες αποτελούν το σύνολο Pareto. Ο ορισμός για να είναι μια λύση κυρίαρχη είναι ο εξής:

Μια λύση $\vec{x} \in \Omega$ κυριαρχεί μια άλλης λύσης $\vec{y} \in \Omega$, όταν και μόνο όταν ισχύει ότι $f_m(\vec{x}) \leq f_m(\vec{y})$ για όλους τους στόχους m και συγχρόνως υπάρχει ένας τουλάχιστον στόχος για τον οποίο η τελευταία σχέση ισχύει μόνο ως ανισότητα. Να σημειωθεί ότι Ω είναι το σύνολο των αποδεκτών λύσεων και f η στοχική συνάρτηση.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν – όπως έχει ήδη αναφερθεί – εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Στην παρούσα εργασία οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας αλλά και των διαρροών, οι οποίες συμβάλλουν στην ενεργειακή επιβάρυνση των δικτύων ύδρευσης.

3.4.1 Ο ταχύς και εκλεκτικός γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (NSGA-II)

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται συνοπτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας του αλγόριθμου πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Για την επίλυση του προβλήματος της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ο ευρέως διαδεδομένος ταχύς και εκλεκτικός γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II). Ο αλγόριθμος αυτός αναπτύχθηκε από τους Deb et al. (2002) και αποτελεί εξέλιξη και βελτίωση του NSGA που αναπτύχθηκε από τους Srinivas και Deb (1993). Η βασική αρχή πίσω από τον αλγόριθμο, που συμπεριλαμβάνεται και στο όνομά του, είναι η μη κυριαρχούμενη ταξινόμηση. Βάσει αυτής, διαμορφώνονται υποομάδες λύσεων ή μετώπων (fronts), καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τις κατώτερες λύσεις του πληθυσμού, πλην εκείνων που έχουν ήδη συμπεριληφθεί στα προηγούμενα μέτωπα. Σε

κάθε ένα μέτωπο αντιστοιχίζεται ένας αριθμός, που αποτελεί την τάξη του μετώπου και χαρακτηρίζει την καταλληλότητα των μελών του.

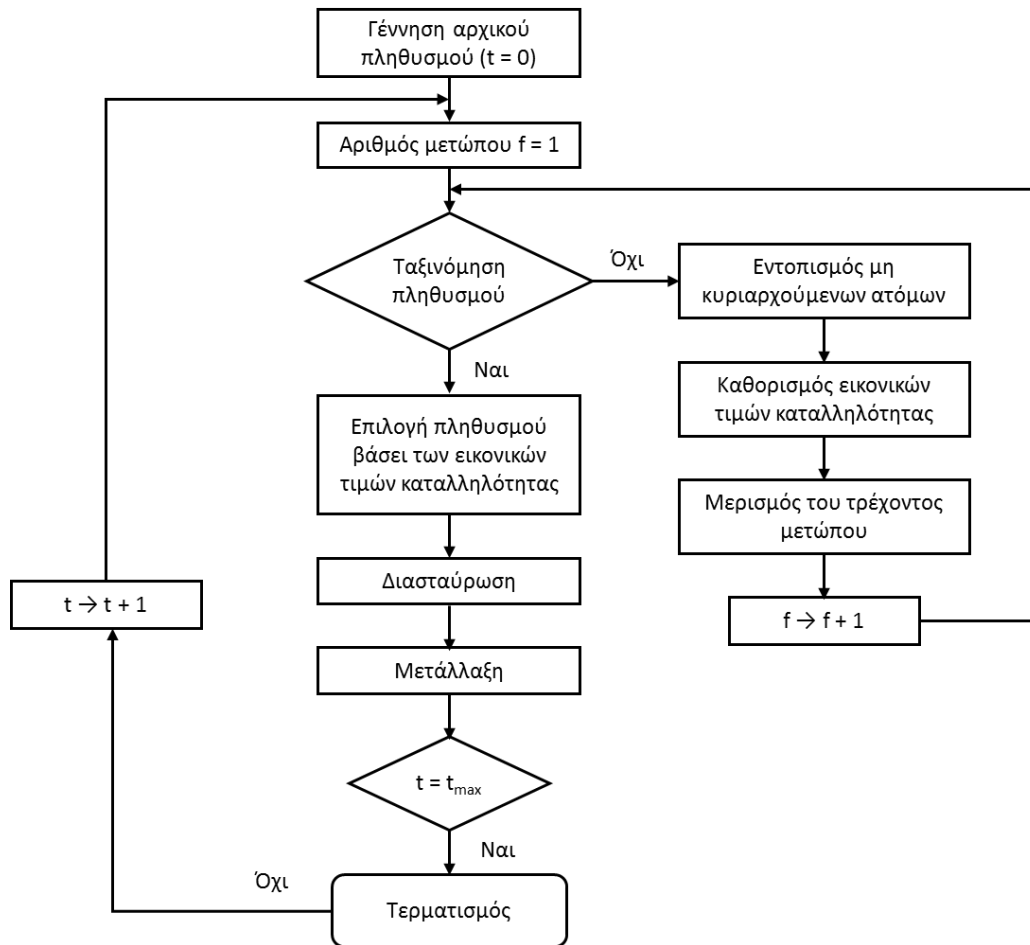
Ένα δεύτερο σημαντικό μέλημα στην επιλογή λύσεων είναι η διασπορά του πληθυσμού και η αποφυγή της δημιουργίας θυλάκων, ώστε τα μέτωπα που προκύπτουν να είναι κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτικά του συνόλου των εφικτών λύσεων. Χρησιμοποιείται ένα μέτρο της διασποράς των λύσεων, που αποτελεί συνάρτηση της απόστασης της κάθε λύσης από τις υπόλοιπες τρέχουσες λύσεις. Με βάση το μέτρο αυτό εισάγεται μια ποινή σε κάθε εξεταζόμενη λύση, που συνυπολογίζεται στην αξιολόγησή της. Σημειώνεται ότι η διασπορά υπολογίζεται είτε στο πεδίο αναζήτησης, είτε στο πεδίο αποτίμησης.

Επομένως, η αξιολόγηση του κάθε ατόμου στους πολυκριτηριακούς εξελικτικούς αλγόριθμους βασίζεται σε ένα σύνθετο μέτρο καταλληλότητας, στο οποίο συνυπολογίζονται τόσο η τάξη του μετώπου, όσο και το μέτρο διασποράς. Με τον τρόπο αυτό, το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης απλοποιείται σε πρόβλημα μονοκριτηριακής και στη συνέχεια ακολουθούνται οι τυπικές διαδικασίες και τελεστές που προαναφέρθηκαν (όπως επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη).

Τα βήματα που ακολουθούνται στον αλγόριθμο NSGA, με τη μορφή διαγράμματος ροής φαίνονται στο Σχήμα 3.3. Στο πρώτο βήμα εξέτασης του πληθυσμού μιας γενιάς, εντοπίζονται τα μη κυριαρχούμενα άτομα του πληθυσμού, τα οποία διαμορφώνουν ένα αρχικό μέτωπο. Στο μέτωπο αυτό ανατίθεται μια τιμή τάξης, συνήθως ίση με το μέγεθος του πληθυσμού. Η τιμή αυτή είναι κοινή για τα όλα τα μέλη του μετώπου. Όσον αφορά τη διασπορά, χρησιμοποιείται μια μέθοδος συσσώρευσης, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό για κάθε μέλος, μιας ποσότητας εξαρτώμενης από τον αριθμό των μελών του ίδιου μετώπου που βρίσκονται στη γειτονιά του εκάστοτε μέλους που εξετάζεται.

Οι δύο τιμές που υπολογίζονται (τάξη, μέτρο διασποράς) καθορίζουν την τιμή καταλληλότητας του κάθε μέλους του πρώτου μετώπου. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι κατώτερες λύσεις του πληθυσμού που απομένει, οι οποίες εντάσσονται σε δεύτερο μέτωπο. Τα μέλη του δεύτερου μετώπου αξιολογούνται με τη σειρά τους με βάση την παραπάνω διαδικασία. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την αξιολόγηση του συνόλου του πληθυσμού. Ακολούθως χρησιμοποιείται τελεστής στοχαστικής επιλογής για τη δημιουργία του νέου πληθυσμού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται εξαρχής.

Η μέθοδος NSGA κατά τους Srinivas και Deb (1994) έχει το πλεονέκτημα της απλοποίησης του εξεταζόμενου προβλήματος από πολυκριτηριακό σε μονοκριτηριακό, ανεξάρτητα από τον αριθμό των κριτηρίων. Η σύγκλιση του αλγόριθμου είναι γρήγορη, διατηρώντας παράλληλα την ομοιόμορφη διασπορά των λύσεων στο χώρο αναζήτησης.



Σχήμα 3.3 - Λογικό διάγραμμα ροής του αλγόριθμου NSGA

Πηγή: Ευστρατιάδης, 2008

Η μετεξέλιξη του NSGA αντιμετώπισε τα τρία βασικά μειονεκτήματά του και συγκεκριμένα:

- Τον υπολογιστικό φόρτο που απαιτεί η διαδικασία ταξινόμησης
- Την έλλειψη εκλεκτικισμού, που συχνά οδηγεί σε απώλεια βέλτιστων λύσεων
- Την εξάρτηση της επίδοσης του αλγόριθμου από τη μέθοδο υπολογισμού της διασποράς

Στη βελτιωμένη έκδοση NSGA-II χρησιμοποιείται πλέον διαφορετικού τύπου ταξινόμηση, η οποία μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο, αλλάζοντας την τάξη των υπολογισμών. Παράλληλα, αντικαθίσταται η συνάρτηση συσσώρευσης, που χρησιμοποιούνταν ως μέτρο διασποράς, από μια βελτιωμένη εκτιμήτρια της πυκνότητας που καλείται απόσταση συνωστισμού (crowding distance). Τέλος, εισάγεται η έννοια της εκλεκτικότητας ως εξής: σε κάθε γενιά δημιουργείται ένας ενοποιημένος πληθυσμός γονέων και απογόνων, επί του οποίου εφαρμόζεται η βελτιωμένη διαδικασία ταξινόμησης. Από τον ενοποιημένο πληθυσμό επιλέγονται τα καλύτερα μέλη που θα αποτελέσουν το νέο πληθυσμό γονέων, από τον οποίο τελικά θα προκύψουν οι απόγονοι με τις γνωστές διαδικασίες επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης. Στην παρούσα

Βασικός στόχος, όπως φαίνεται από τα παραπάνω, είναι η σωστή διαχείριση της λειτουργίας των δικτύων, βρίσκοντας τη βέλτιστη στρατηγική, ώστε να μην κατασπαταλείται η ενέργεια που χρησιμοποιείται. Το ζήτημα αυτό είναι σύνθετο, καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για τη λειτουργία των αντλιών και ταυτόχρονα η ζήτηση του νερού από τους καταναλωτές, μπορεί να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον οι κατώτατες στάθμες των δεξαμενών αποθήκευσης οφείλουν να βρίσκονται σε ένα επίπεδο ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση, ενώ παράλληλα η λειτουργία των αντλιών πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε το κόστος λειτουργίας τους και κατά συνέπεια η ενέργεια που καταναλώνουν, να είναι όσο το δυνατό πιο χαμηλή.

Διάφορες μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς για τη βέλτιστη λειτουργία των δικτύων ύδρευσης και συγκεκριμένα των αντλιών με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας και των διαρροών σε αυτά. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους είναι ο γραμμικός προγραμματισμός (Puleo et al., 2014), ο μη γραμμικός προγραμματισμός (Yu et al., 1994), ο δυναμικός προγραμματισμός, η μέθοδος της ασαφούς λογικής, η μη γραμμική ευριστική βελτιστοποίηση και οι γενετικοί αλγόριθμοι.

3.5.1 Εκτίμηση ενέργειας στα δίκτυα ύδρευσης με τη χρήση δεικτών

Απαραίτητες θεωρούνται οι ενέργειες για τη μελέτη της συνολικής ενεργειακής απόδοσης των δικτύων ύδρευσης και η λήψη δράσεων σε περιπτώσεις όπως είναι για παράδειγμα η βελτίωση της λειτουργίας των αντλιών ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες της ενέργειας. Έτσι έχουν γίνει μελέτες για τη δημιουργία μετρητικών δεικτών για την εκτίμηση της ενέργειας των δικτύων που λειτουργούν υπό πίεση, ώστε να διαπιστωθεί αν λειτουργούν με τις λιγότερες ενεργειακές απώλειες.

Οι Bolognesi et al. (2014) παρουσίασαν ένα δείκτη εκτίμησης της αποτελεσματικότητας της ενέργειας που καταναλώνεται από τη λειτουργία των αντλιών. Βασιζόμενοι στην «αναγκαία ελάχιστη ενέργεια» όπως ονόμασαν το ελάχιστο υδραυλικό φορτίο που απαιτείται σε κάθε αντλία ώστε να ικανοποιείται η απαιτούμενη ζήτηση, όρισαν ένα δείκτη, τον EEI, ο οποίος είναι το πηλίκο της αναγκαίας ελάχιστης ενέργειας και της ενέργειας που πραγματικά καταναλώνεται σε κάθε αντλία. Ο δείκτης αυτός λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του δικτύου όπως είναι το μήκος του, τα υψόμετρα των κόμβων και το μέγεθος των αγωγών.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τελικά ορίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια (Bolognesi et al., 2014):

$$UME = \gamma \cdot W \cdot \frac{(H_{ref} - H_{ups})}{3600000} \quad (\text{kWh}) \quad (3.5)$$

Όπου UME η αναγκαία ελάχιστη ενέργεια στην αντλία, γ το ειδικό βάρος του νερού (N/m^3), W ο συνολικός όγκος που αντλείται από την αντλία για μια συγκεκριμένη περίοδο (m^3), H_{ref} το υδραυλικό φορτίο αναφοράς στην κατάντη περιοχή της αντλίας (m) και H_{ups} το μέσο υδραυλικό φορτίο ανάντη της αντλίας (m).

Ο δείκτης εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου, ορίζεται από τη σχέση:

$$EEI = \frac{UME}{E_{cons}} \quad (3.6)$$

Όπου E_{cons} η πραγματική ενέργεια που καταναλώνεται (kWh), η οποία υπολογίζεται σε καθημερινή βάση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{cons} = E_{PC} - \Delta E_T = E_{PC} - \frac{\gamma \cdot A \cdot (H_{fin} - H_{ini}) \cdot H_P}{\eta \cdot 3600000} \quad (3.7)$$

Όπου E_{PC} η ενέργεια που καταναλώνεται από την αντλία (kWh), ΔE_T ο όγκος νερού που αποθηκεύεται στη δεξαμενή στο τέλος της μέρας (m^3), A η τομή της δεξαμενής (m^2), H_{fin} και H_{ini} το υδραυλικό φορτίο (m) στη δεξαμενή στις ώρες 0:00 και 24:00 αντίστοιχα, H_P το μέσο υδραυλικό φορτίο (m) της αντλίας και η , η μέση αποτελεσματικότητα της αντλίας.

Αντίστοιχα οι Cabrera et al., (2010) ασχολήθηκαν με τη δημιουργία πέντε δεικτών για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων ύδρευσης. Ο πρώτος δείκτης προκύπτει από το πηλίκο της ενέργειας που εισάγεται σε σύστημα χωρίς διαρροές και της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας. Ο δεύτερος δείκτης είναι εκτιμητής του πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται η ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο. Ο τρίτος δείκτης αντιπροσωπεύει την υδραυλική ικανότητα του δικτύου. Ο τέταρτος δείκτης υπολογίζει την απώλεια ενέργειας, η οποία οφείλεται σε διαρροές και το επιπρόσθετο ποσό ενέργειας που απαιτείται για να υπερνικηθούν αυτές οι απώλειες. Τέλος, ο πέμπτος δείκτης προκύπτει από το πηλίκο της ενέργειας που μεταφέρεται στους καταναλωτές και της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας.

Στη συνέχεια και πάλι οι Cabrera et al., (2014) παρουσίασαν τρεις νέους δείκτες εκτίμησης της αποτελεσματικότητας της ενέργειας σε δίκτυα ύδρευσης που λειτουργούν υπό πίεση. Ο πρώτος δείκτης παρουσιάζει την πραγματική απόδοση του συστήματος και την ενέργεια που πραγματικά καταναλώνεται σε αυτό. Ο δεύτερος δείκτης αφορά στην μέγιστη ενεργειακή απόδοση του συστήματος αν λειτουργούσε υπό ιδανικές συνθήκες, κάτι που δεν είναι εφικτό λόγω της τοπογραφίας του εκάστοτε δικτύου. Τέλος, ο τρίτος δείκτης εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη ένα εφικτό επίπεδο ενεργειακών απωλειών του συστήματος, λόγω της αναποτελεσματικότητάς του και των αστοχιών του (διαρροές, απώλειες λόγω τριβών κ.α.), παρέχοντας ένα περισσότερο ρεαλιστικό στόχο για το πώς θα έπρεπε να λειτουργεί το δίκτυο ύδρευσης.

Οι Arabia et al., (2008) όρισαν δείκτες που συγκρίνουν την ενέργεια που καταναλώνεται με την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια, βασιζόμενοι όμως στη μορφή του δικτύου και στη λειτουργία των αντλιών. Τέλος, οι Boulos & Bros (2010), όρισαν ένα δείκτη για την εκτίμηση της ενέργειας στο δίκτυο, ως το πηλίκο της ισχύος που απαιτείται για την ικανοποίηση του ελάχιστου επιπέδου λειτουργίας του και της συνολικής ισχύος που καταναλώνεται στην πραγματικότητα.

3.5.2 Βέλτιστη διαχείριση ενέργειας στα δίκτυα ύδρευσης

Μετά από την εκτίμηση του κατά πόσο αποτελεσματικά λειτουργούν τα δίκτυα ύδρευσης και πώς αξιολογείται η ενέργεια σε αυτά, μπορεί να ακολουθήσει η βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση τους.

Η εύρεση του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης και κατά συνέπεια της ενέργειας σε αυτά, έχει απασχολήσει πολύ τους επιστήμονες. Οι τρόποι που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί είναι αρκετοί.

Για μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα είναι πολύ σύνηθες να χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους γενετικοί αλγόριθμοι, καθώς συγκλίνουν σχετικά γρήγορα στη βέλτιστη λύση. Παρόλα αυτά, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.3, δεν μπορεί να είναι βέβαιο αν η λύση που έχει βρεθεί είναι η ολικά βέλτιστη.

Οι van Zyl et al. (2004), συνδύασαν ένα γενετικό αλγόριθμο με μια μέθοδο τοπικής αναζήτησης. Συγκεκριμένα, υποστηρίζοντας ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι συγκλίνουν γρήγορα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης αλλά όχι σε αυτή καθεαυτή τη λύση, χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της απότομης κατάβασης (hillclimber strategy) και συγκεκριμένα δύο μεθόδους, την Hooke και Jeeves και τη Fibonacci. Ο συνδυασμός των γενετικών αλγορίθμων με τις παραπάνω μεθόδους αποδείχθηκε περισσότερο αποτελεσματικός. Στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους της λειτουργίας των δικτύων που οφείλεται κυρίως στη λειτουργία των αντλιών, λαμβάνοντας υπόψη τις αστοχίες στις στάθμες των δεξαμενών και θέτοντας ποινές όταν οι περιορισμοί παραβιάζονται και το σύστημα δε βρίσκεται σε ισορροπία.

Χρήση γενετικού αλγορίθμου σε συνδυασμό με δεδομένα για τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο πρότεινε ο Kang (2013) για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός υπό μελέτη δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Η βελτιστοποίηση αφορούσε στην ενέργεια που καταναλώνεται από τη λειτουργία των αντλιών. Φυσικά υπήρχαν περιορισμοί ως προς τη λειτουργία του δικτύου, όπως είναι η ελάχιστη πίεση, οι στάθμες στις δεξαμενές και η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να καταναλωθεί από κάθε αντλία. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ καλύτερη διαχείριση της ενέργειας και σημαντική μείωση του ποσού που καταναλώνεται για τη λειτουργία του δικτύου.

Οι Tricario et al. (2014) με τη σειρά τους προσπάθησαν να διαχειριστούν την πίεση σε δίκτυα ύδρευσης με αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος και κατά συνέπεια τη μείωση του κόστους λειτουργίας, κάνοντας χρήση αντλιών που λειτουργούν ως τουρμπίνες για την παραγωγή ενέργειας. Με γενετικό αλγόριθμο και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση απέδειξαν ότι με την βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση μέσω της λειτουργίας των αντλιών, και τη διαχείριση της πίεσης σε συνδυασμό με την τοποθέτηση αντλιών που λειτουργούν ως τουρμπίνες, η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ μικρότερη από ότι συνήθως με συνέπεια αυξημένο οικονομικό όφελος.

Αντίστοιχα οι Wu et al. (2014), με χρήση γενετικού αλγορίθμου βελτιστοποίησαν τη λειτουργία ενός δικτύου, ώστε να γίνει περισσότερο αποτελεσματικό ως προς την

αξιοποίηση της ενέργειας σε αυτό, τοποθετώντας ένα σύστημα παράλληλων πανομοιότυπων αντλιών. Στόχος τους ήταν η λειτουργία των αντλιών να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις κατασκευαστικές τους προδιαγραφές, ώστε να γίνεται σωστή διαχείριση και χρήση της ενέργειας. Ουσιαστικά βελτιστοποίησαν την ταχύτητα περιστροφής των αντλιών και επιπλέον τις θέσεις των βαλβίδων ελέγχου, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα κάθε αντλίας. Τελικά το μοντέλο παρείχε μια καλή ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας και αξιοπιστίας με την κατάλληλη λειτουργία των αντλιών που πρότεινε.

Πέρα από τους γενετικούς αλγορίθμους, έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες και άλλοι τρόποι βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε και στα εισαγωγικά της ενότητας 3.5. Εδώ αναφέρονται περισσότερο αναλυτικά δύο ενδεικτικές περιπτώσεις.

Οι Zessler et al. (1989), με χρήση του δυναμικού προγραμματισμού και γνωρίζοντας τη διακύμανση της ζήτησης μέσα στο 24ωρο της προσομοίωσης, όπως επίσης τις αρχικές και τελικές συνθήκες των δεξαμενών και με δεδομένες τις ιδιότητες των στοιχείων του δικτύου και του ενεργειακού κόστους κατά τη διάρκεια της ημέρας, πρότειναν ένα βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών του δικτύου.

Οι Puleo et al. (2014), πρότειναν τη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας των αντλιών με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού. Το κόστος μάλιστα που προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης ήταν μικρότερο από το αντίστοιχο με χρήση του αλγορίθμου HD-DDS (Hybrid Discrete Dynamically Dimensioned Search). Η στοχική συνάρτηση ήταν:

$$\min \sum_{t=0}^T c_t Q_t \quad (3.8)$$

Που υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$$

$$Q_{\min} \leq Q_t \leq Q_{\max}$$

$$\sum_{t=0}^T Q_t = \sum_{t=0}^T q_t$$

$$Q_t \times \Delta t + (S_t - S_{t-1}) \times A = q_t \Delta t$$

Όπου Q_t οι άγνωστες ροές των αντλιών, c_t συντελεστής της στοχικής συνάρτησης, q_t οι γνωστές τιμές της ζήτησης, A το εμβαδό της δεξαμενής, S_t, S_{t-1} η στάθμη του νερού στη δεξαμενή τις χρονικές στιγμές t και $t-1$, $\Delta t=1$ ώρα, S_{\min}, S_{\max} το χαμηλότερο και υψηλότερο όριο στη στάθμη του νερού των δεξαμενών και Q_{\min}, Q_{\max} το ελάχιστο και μέγιστο όριο των ροών των αντλιών. Η όλη διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab, το οποίο συνδέθηκε απευθείας με τον πρόγραμμα EPANET, ώστε να εκτιμηθούν οι λύσεις.

3.5.3 Οι διαρροές και η ενέργεια στα δίκτυα ύδρευσης

Οι διαρροές στα δίκτυα ύδρευσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα που απασχολεί πολύ τα τελευταία χρόνια. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα εκτίμησης της θραύσης των αγωγών. Τα μοντέλα αυτά έχουν βασιστεί σε φυσικά χαρακτηριστικά αλλά και στατιστικά. Τα πρώτα χρησιμοποιούν φυσικές και χημικές παραμέτρους για να περιγράψουν πώς η χωρητικότητα των σωληνώσεων μειώνεται με το χρόνο λόγω χημικών διεργασιών, όπως είναι η διάβρωση (Xu et al., 2014).

Τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν δείκτες για την πρόβλεψη της θραύσης χωρίς όμως να λαμβάνουν υπόψη τους το φυσικό μηχανισμό των σωλήνων. Συγκεκριμένα περιλαμβάνουν ιδιότητες των σωληνώσεων, όπως είναι το υλικό, η ηλικία, το μήκος και ο αριθμός των συνδέσεων που εξυπηρετούν, αλλά και παραμέτρους όπως είναι ο τύπος του εδάφους (Xu et al., 2014).

Τα μοντέλα αυτά εξαρτώνται από την εκάστοτε περίπτωση, αλλά έχουν δώσει καλά αποτελέσματα σε πιλοτικούς σωλήνες για την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας και τη δημιουργία διαρροών.

Στα δίκτυα ύδρευσης, οι αστοχίες των σωληνώσεων οδηγούν σε διαρροές που είτε είναι εμφανείς, είτε δεν είναι και δεν μπορούν να εντοπιστούν με τα σύγχρονα μέσα. Οι διαρροές είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις υψηλές πιέσεις του νερού, συνεπώς ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των διαρροών αυτών είναι η μείωση της πίεσης. Μάλιστα η μείωση της πίεσης μπορεί να φέρει άμεσα αποτελέσματα στην ελάττωση των διαρροών, έναντι άλλων μεθόδων. Οι διαρροές του νερού στα δίκτυα ύδρευσης οφείλονται κυρίως στην ηλικία του συστήματος.

Η ρύθμιση της πίεσης μπορεί να συμβάλλει ακόμη και στην πρόληψη των αστοχιών στις σωληνώσεις παρατείνοντας έτσι και τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη της πίεσης και της διαρροής είναι η εξής (Xu et al., 2014):

$$L = k \cdot P^n \quad (3.9)$$

Όπου L το ποσοστό της διαρροής, P μια μέση τιμή της πίεσης στο δίκτυο, και k, n παράμετροι οι οποίοι βαθμονομούνται. Η παράμετρος n παίρνει τιμές από 0.5-2.5 ή και μεγαλύτερες, εξαρτώμενη από τον τύπο της διαρροής.

Για τη ρύθμιση της πίεσης, μια διαδεδομένη λύση είναι η τοποθέτηση κατάλληλων βαλβίδων (PRV) σε συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου που έχουν οριστεί για τη διαχείριση των πιέσεων. Έτσι οι βαλβίδες τοποθετούνται στις εισόδους των τμημάτων αυτών, ρυθμίζοντας αποτελεσματικά αυτή την παράμετρο.

Οι απώλειες νερού στα δίκτυα ύδρευσης θεωρείται ότι μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες 200 εκατομμυρίων ανθρώπων. Παρόλα αυτά η ρύθμιση των διαρροών δε συνεισφέρει μόνο στη μείωση της σπατάλης των υδατικών πόρων, αλλά και στη βελτίωση της

ποιότητας του νερού που επηρεάζεται από τις αστοχίες και στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης που απαιτείται για τη λειτουργία τους.

Οι Giustolisi et al. (2013) εφάρμοσαν πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με χρήση γενετικού αλγορίθμου για τη λειτουργία των αντλιών, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος της ενέργειας που απαιτείται και το κόστος του νερού που χάνεται λόγω των διαρροών. Οι περιορισμοί που έθεσαν είναι τα επίπεδα της πίεσης ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά το δίκτυο, οι ελάχιστες και οι τελικές στάθμες των δεξαμενών οι οποίες πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο οι αρχικές.

Το κόστος των διαρροών σε γενικές γραμμές είναι υψηλότερο κατά τη διάρκεια της νύχτας καθώς τότε οι πιέσεις είναι μεγαλύτερες, ενώ το κόστος άντλησης είναι μικρότερο, συνεπώς η εύρεση μια ισορροπημένης λύσης είναι το ζητούμενο. Το αποτέλεσμα της έρευνας έδειξε ότι είναι προτιμότερο να αντλείται νερό κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να γεμίζουν οι δεξαμενές και να χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας, αλλά και ότι είναι απαραίτητη η μείωση των αντλιών που λειτουργούν ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαρροές.

Μελέτη για την εκτίμηση των διαρροών έγινε από τους Giustolisi et al. (2008), οι οποίοι πρότειναν τη χρήση ενός μοντέλου το οποίο ενσωματώνει πλήρως τις διαρροές στους αγωγούς και τη ζήτηση που σχετίζεται με την πίεση. Με το μοντέλο αυτό και με τη χρήση αλγορίθμων, αποδείχθηκε ότι η πρότασή τους ήταν αρκετά αξιόπιστη για την εκτίμηση και διαχείριση των διαρροών, αφού εφαρμόστηκε σε πραγματικά δίκτυα.

Ακόμη, οι Colombo et al. (2002), εξέτασαν την επίδραση της ζήτησης, των θέσεων των διαρροών αλλά και της πολυπλοκότητας του δικτύου, στο κόστος της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία του. Βασικός στόχος ήταν το δίκτυο να λειτουργεί εντός των προδιαγραφών του, καλύπτοντας τη ζήτηση και τις απαιτούμενες πιέσεις του και στη συνέχεια να εκτιμηθούν οι επιδράσεις των διαρροών του δικτύου στο ενεργειακό κόστος. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα υδραυλικής προσομοίωσης EPANET για να υπολογιστούν τα κόστη της ενέργειας λόγω των διαρροών σε τέσσερα διαφορετικά δίκτυα ύδρευσης, με τις πιέσεις να είναι ίδιες με την περίπτωση που το δίκτυο δεν είχε διαρροές.

Η σχέση που χρησιμοποίησαν για τον υπολογισμό της διαρροής σε ένα αγωγό είναι η:

$$Q_i = C_d A [2g(H_1 - H_{gw})]^a = C_E \Delta H^a \quad (3.10)$$

Όπου A η επιφάνεια της διαρροής, ΔH η διαφορά του φορτίου κατά μήκος της διαρροής, H_1 και H_{gw} το φορτίο του αγωγού και του υπόγειου νερού αντίστοιχα, C_d συντελεστής παροχής, C_E συντελεστής διαρροής του EPANET και a εκθέτης διαρροής που συνήθως παίρνει την τιμή 0.5 και αντιπροσωπεύει τη διαρροή από μια σταθερή οπή στον αγωγό.

Επιπλέον, θεώρησαν ότι η διαφορά μεταξύ της μηχανικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του νερού στο τέλος του αγωγού και της ενέργειας που παρέχεται στην πηγή, υποδηλώνει την ενέργεια που καταναλώνεται για να τροφοδοτηθεί η διαρροή.

Τέλος, η σχέση που χρησιμοποίησαν για τον υπολογισμό του επιπλέον κόστους λειτουργίας του δικτύου λόγω των διαρροών μέσω ενός αγωγού είναι η:

$$P_w = k_w C_E [H_d + (1-x)H_f]^a 3600T \quad (3.11)$$

Όπου kW η μονάδα κόστους του νερού και T η περίοδος προσομοίωσης.

Το επιπλέον ενεργειακό κόστος λόγω των διαρροών είναι προϊόν της μονάδας κόστους (k_E) του ηλεκτρισμού (\$/kWh) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_E = k_E \Delta E_s T \quad (3.12)$$

Όπου ΔE_s είναι η διαφορά στην ενέργεια που παρέχεται σε δίκτυο με και χωρίς διαρροές.

Οι Tricario et al. (2014) αντίστοιχα, προσπάθησαν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος άντλησης, με μείωση της πίεσης στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα και ταυτόχρονη αύξηση των εισροών στις αντλίες που λειτουργούν ως τουρμπίνες. Για τη βελτιστοποίηση έκαναν χρήση εξελικτικών αλγορίθμων, ενώ τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει ένα κατώφλι τιμών στον αριθμό των αντλιών ως τουρμπίνες που θα τοποθετηθούν, ώστε να μεγιστοποιηθεί η εισερχόμενη παραγωγή ενέργειας.

Και άλλες εργασίες έχουν γίνει για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των διαρροών και των επιδράσεών τους στο κόστος λειτουργίας των δικτύων αλλά και στην αποτελεσματικότητά τους. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι η εργασία των Tabesh et al. (2009) οι οποίοι εκτίμησαν το νερό που χάνεται λόγω διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης με χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης, καθορίζοντας τη διαρροή μέσω κόμβων και αγωγών για την περίπτωση που οι διαρροές εξαρτώνται από την πίεση του δικτύου αλλά και όταν είναι ανεξάρτητες από αυτή.

Επίσης οι Fontana et al. (2012), μέσω μιας στρατηγικής διαχείρισης της πίεσης με χρήση βαλβίδων μείωσής της, αλλά και με αντλίες που λειτουργούν ως τουρμπίνες, στόχευσαν στη μείωση των διαρροών και παράλληλα στην παραγωγή ενέργειας. Ακόμη, οι Vairavamoorthy & Lumbers (1995), προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν την ελαχιστοποίηση των διαρροών μέσω αποτελεσματικών ρυθμίσεων των βαλβίδων μείωσης της ροής. Η βελτιστοποίηση επέτρεπε την παραβίαση των περιορισμών της πίεσης σε κάποιες περιπτώσεις, ώστε να μειωθούν οι διαρροές.

Κεφάλαιο 4

ΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ EPANET ΚΑΙ PaVLOS

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιούνται δύο λογισμικά, το EPANET σε συνδυασμό με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab και το PaVLOS, που κάνει χρήση του EPANET για την επίλυση δικτύων υπό πίεση.

4.1 EPANET

Το EPANET είναι ένα πρόγραμμα το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία των υπό πίεση δικτύων ύδρευσης, και συγκεκριμένα την υδραυλική συμπεριφορά τους αλλά και την ποιότητα του νερού που μεταφέρουν. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση των δικτύων ύδρευσης συμβάλλοντας στην κατανόηση της κίνησης του νερού και της ποιότητάς του και στο πώς αυτά μεταβάλλονται με το χρόνο. Αυτό οφείλεται στο ότι το EPANET μπορεί να προσομοιώνει την ροή του νερού στους αγωγούς, το ύψος του νερού στις δεξαμενές αποθήκευσης, όπως και την πίεση στους κόμβους για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο η οποία αποτελείται από διαφορετικά χρονικά βήματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διάφορες μορφές όπως είναι χάρτες, πίνακες, γραφικές παραστάσεις κ.α. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε από το εργαστήριο περιβαλλοντικής προστασίας και διαχείρισης εθνικού κινδύνου των ΗΠΑ.

Το EPANET έχει πολλές εφαρμογές, όπως είναι η βαθμονόμηση υδραυλικών μοντέλων, ενώ είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση διαφόρων στρατηγικών διαχείρισης των δικτύων με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής τους. Οι στρατηγικές αυτές μπορούν να αφορούν στη μεταβολή χρονοδιαγραμμάτων για την άντληση, την πλήρωση και κένωση των δεξαμενών, στην αλλαγή της πηγής σε περίπτωση που υπάρχει σύστημα διαφορετικών πηγών, ενώ όσον αφορά στην ποιότητα του νερού, οι αλλαγές μπορεί να σχετίζονται με τον στοχευμένο καθαρισμό και την αντικατάσταση των αγωγών.

Στο EPANET ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει ένα δίκτυο διανομής νερού ή να εισάγει το αρχείο που το περιγράφει, να ορίσει και να επεξεργαστεί τις ιδιότητες των στοιχείων που το απαρτίζουν, να περιγράψει τον τρόπο λειτουργίας του, να ορίσει τις επιλογές ανάλυσης του δικτύου, να προσομοιώσει μια υδραυλική ανάλυση του δικτύου και τέλος να δει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής.

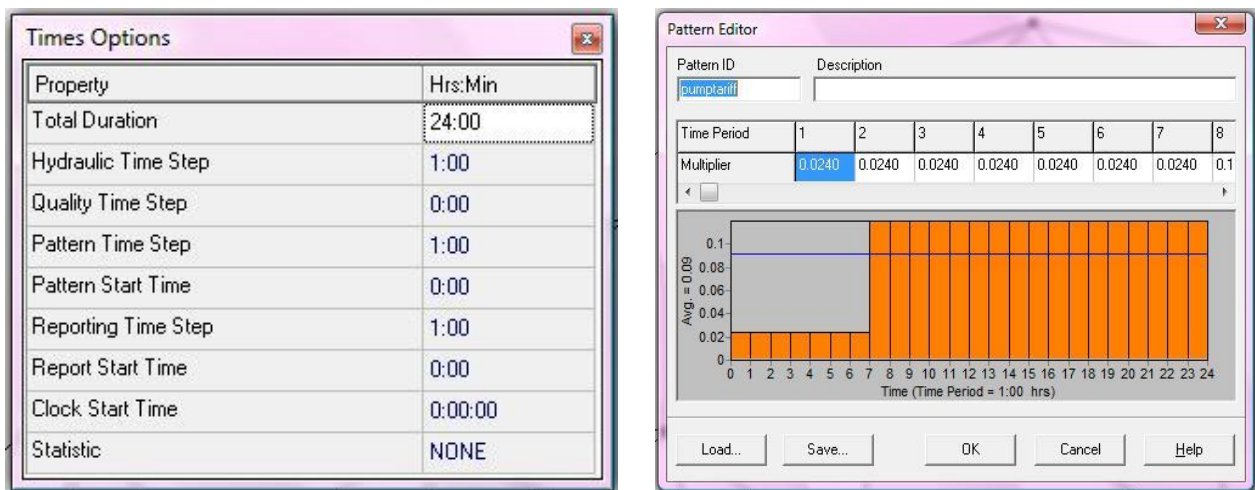
4.1.1 Τα πλεονεκτήματα του προγράμματος

Τα βασικά πλεονεκτήματα του προγράμματος είναι η δυνατότητά του να προσομοιώνει οποιοδήποτε μέγεθος δικτύου, διάφορα είδη βαλβίδων και ταχύτητες άντλησης, ενώ μπορεί να υποστηρίξει οποιοδήποτε σχήμα δεξαμενής. Επίσης μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικές τιμές ζήτησης στους κόμβους, οι οποίες να χαρακτηρίζονται και από διαφορετικά χρονικά μοτίβα (pattern demand), ενώ μπορεί να υπολογίσει την ενέργεια και το κόστος που απαιτείται για άντληση. Επίσης, προσομοιώνει την ποιότητα του νερού

μέσα στο δίκτυο. Τέλος, έχει τη δυνατότητα να βασίσει την λειτουργία του δικτύου σε διάφορες υποθέσεις, όπως είναι το επίπεδο του νερού σε μια δεξαμενή, τον χρονικό έλεγχο ή σε περισσότερο πολύπλοκους κανόνες λειτουργίας.

4.1.2 Τα Είδη Ανάλυσης

Η ανάλυση στο EPANET μπορεί να γίνει για μια μεμονωμένη περίοδο (single period analysis) κατά την οποία ουσιαστικά παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της λειτουργίας του δικτύου. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ανάλυσης για μια παρατεταμένη περίοδο, η οποία ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματική λειτουργία του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός χρονικού μοτίβου (Σχήμα 4.1 (β)) το οποίο καθορίζει τη διακύμανση της ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας, η οποία μεταβάλλεται με περιοδικό τρόπο. Για παράδειγμα το χρονικό μοτίβο μπορεί να έχει χρονικό βήμα τεσσάρων ωρών και κατά συνέπεια να επαναλαμβάνεται έξι φορές μέσα στην ημέρα. Παρόλα αυτά το ωριαίο χρονικό βήμα είναι πιο ρεαλιστικό και είναι αυτό που προτιμάται στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης μπορεί να οριστεί η συνολική διάρκεια προσομοίωσης η οποία μπορεί να είναι είτε μια μέρα ή περισσότερες. Τέλος δίνεται η δυνατότητα καθορισμού του χρονικού βήματος της υδραυλικής λύσης η οποία συνήθως είναι ίση με μία ώρα.



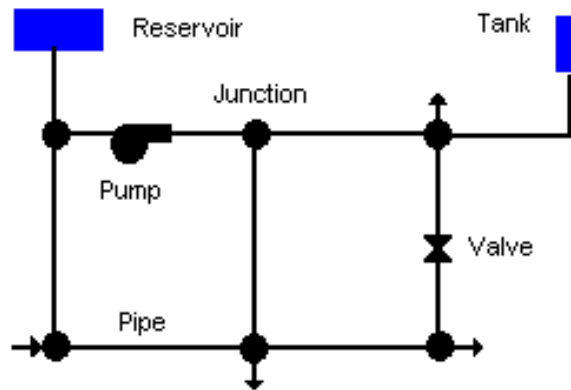
Σχήμα 4.1-Επιλογές χρόνου (α) και χρονικού μοτίβου (β) για την προσομοίωση παρατεταμένης περιόδου στο EPANET

4.1.3 Στοιχεία Προσομοίωσης στο EPANET

Το EPANET έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των φυσικών παραμέτρων των δικτύων, όπως επίσης και των λειτουργικών τους παραμέτρων. Οι τρόποι προσομοίωσης και τα απαραίτητα στοιχεία που πρέπει να εισαχθούν για κάθε στοιχείο περιγράφονται στη συνέχεια.

Φυσικές παράμετροι

Τα δίκτυα ύδρευσης το EPANET τα προσομοιώνει ως ένα σύνολο από κόμβους οι οποίοι ενώνονται με τους συνδέσμους. Ως σύνδεσμοι προσομοιώνονται οι αγωγοί, οι βαλβίδες και οι αντλίες, ενώ ως κόμβοι οι δεξαμενές, οι πηγές και οι διασταυρώσεις.



Σχήμα 4.2-Οι φυσικές παράμετροι των δικτύων ύδρευσης

Πηγή: Rossman, 2000

➤ Κόμβοι

Οι κόμβοι είναι σημεία του δικτύου στα οποία εισέρχεται και εξέρχεται νερό, ενώ ενώνονται μεταξύ τους με τους συνδέσμους. Τα απαραίτητα δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο σύστημα για την προσομοίωση των κόμβων είναι:

- το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται
- η ζήτηση
- η αρχική ποιότητα, όταν απαιτείται η ανάλυσή της

Τα εξαγόμενα που υπολογίζει το λογισμικό για τους κόμβους είναι:

- το υδραυλικό φορτίο, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα βάρους του νερού
- η πίεση
- η ποιότητά του

Φυσικά η ζήτηση μπορεί να κυμαίνεται με το χρόνο, ενώ μπορεί να έχει και αρνητικές τιμές όταν εισέρχεται νερό στο σύστημα. Επιπλέον, οι κόμβοι μπορεί να αποτελέσουν σημεία εισαγωγής ρύπων στο σύστημα.

➤ Ρεζερβουάρ ή πηγές

Οι πηγές ή αλλιώς ρεζερβουάρ προσομοιώνονται στο μοντέλο ως κόμβοι, οι οποίοι έχουν αέναη ροή νερού προς και από το σύστημα. Τα σημεία αυτά είναι τερματικά ή αρχικά σε ένα δίκτυο ύδρευσης, συνεπώς δεν επηρεάζονται από το τι συμβαίνει στο υπόλοιπο δίκτυο.

Τα αρχικά δεδομένα των ρεζερβουάρ που απαιτούνται για την προσομοίωση είναι:

- το υδραυλικό φορτίο, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται στον χρόνο
- και η αρχική του ποιότητα, όταν απαιτείται η ανάλυσή της.

Το αρχικό υδραυλικό φορτίο, αν το ρεζερβουάρ δεν είναι υπό πίεση, είναι ίσο με το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

Εξαγόμενα αποτελέσματα για τα ρεζερβουάρ δεν υπάρχουν, καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω δεν επηρεάζονται από τη λειτουργία του δικτύου.

➤ *Δεξαμενές αποθήκευσης*

Και οι δεξαμενές αποθήκευσης προσομοιώνονται ως κόμβοι στο πρόγραμμα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί έχουν συγκεκριμένη χωρητικότητα με τον όγκο του αποθηκευμένου νερού να μεταβάλλεται στο χρόνο κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης.

Τα αρχικά δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα για τις δεξαμενές είναι:

- η διάμετρος ή το σχήμα
- το αρχικό, το μέγιστο και το ελάχιστο επίπεδο του νερού στο εσωτερικό τους
- το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται.

Επίσης αν απασχολεί και η ποιότητα τότε πρέπει να εισαχθεί και η αρχική κατάσταση του νερού.

Τα εξαγόμενα του προγράμματος από μια προσομοίωση για τις δεξαμενές είναι:

- το υδραυλικό φορτίο
- η τελική ποιότητα του νερού.

Να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα σταματάει τη εκροή νερού από τη δεξαμενή όταν το επίπεδο του νερού φτάσει στο ελάχιστο όριό του, ενώ αντίστοιχα σταματάει την εισροή όταν είναι στο μέγιστο επίπεδο.

➤ *Δίκτυο αγωγών*

Στο EPANET θεωρείται ότι οι αγωγοί είναι συνεχώς γεμάτοι με νερό, ενώ η ροή του νερού είναι από τα υψηλότερα στα χαμηλότερα υδραυλικά φορτία.

Τα στοιχεία που είναι απαραίτητα να εισαχθούν στο πρόγραμμα για τους αγωγούς είναι:

- οι δύο κόμβοι που συνδέουν
- το μήκος
- διάμετρος
- η τραχύτητα
- και η κατάστασή τους, αν είναι δηλαδή ανοιχτοί, κλειστοί ή αν περιέχουν βαλβίδες ελέγχου, ενώ αντίστοιχα εισάγονται στοιχεία για την ποιότητα του νερού, όταν είναι απαραίτητη η μελέτη της.

Η κατάσταση των αγωγών μπορεί να οριστεί όταν συγκεκριμένες καταστάσεις συντελούνται, όπως όταν οι πιέσεις των κόμβων υπερβαίνουν κάποια συγκεκριμένα όρια.

Τα στοιχεία που υπολογίζονται από το πρόγραμμα για τους αγωγούς είναι:

- ο ρυθμός ροής
- η απώλεια φορτίου
- η ταχύτητα
- ο συντελεστής τριβής κατά Darcy-Weibach
- η μέση ποιότητα του νερού.

Η απώλεια φορτίου λόγω τριβών στα τοιχώματα των αγωγών συνήθως υπολογίζεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Τη σχέση Hazen-Williams
- Τη σχέση Darcy-Weibach
- Τη σχέση Chezy-Manning

Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η Darcy-Weibach, η οποία χρησιμοποιείται και από το EPANET, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί για όλα τα είδη ροών και όλα τα υγρά.

Η γενική σχέση με την οποία υπολογίζονται οι απώλειες είναι η εξής (Rossman, 2000):

$$h_L = Aq^B \quad (4.1)$$

Όπου h_L οι απώλειες (σε μονάδες μήκους), A ο συντελεστής αντίστασης, q ο ρυθμός ροής (όγκος/χρόνο), B ο εκθέτης ροής. Οι συντελεστές τραχύτητας που χρησιμοποιούνται από κάθε σχέση καθορίζονται εμπειρικά και εξαρτώνται από το υλικό των σωληνώσεων, ενώ μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά με το χρόνο και τη γήρανση των αγωγών.

Πίνακας 4.1-Συντελεστές τραχύτητας

<i>Material</i>	<i>Hazen-Williams C</i> (unitless)	<i>Darcy-Weisbach ε</i> (feet x 10 ⁻³)	<i>Manning's n</i> (unitless)
Cast Iron	130 – 140	0.85	0.012 - 0.015
Concrete or Concrete Lined	120 – 140	1.0 - 10	0.012 - 0.017
Galvanized Iron	120	0.5	0.015 - 0.017
Plastic	140 – 150	0.005	0.011 - 0.015
Steel	140 – 150	0.15	0.015 - 0.017
Vitrified Clay	110		0.013 - 0.015

Πηγή: Rossman, 2000

Το EPANET χρησιμοποιεί τις εξής μεθόδους για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, σε συνδυασμό με τη σχέση Darcy-Weibach:

- Τη σχέση Hagen-Poiseuille που χρησιμοποιείται για τη στρωτή ροή ($Re < 2000$)
- Τη σχέση Swamee και Jain για την τυρβώδη ροή ($Re > 2000$)
- Και μια κυβική παρεμβολή από το διάγραμμα Moody που χρησιμοποιείται για τις υπόλοιπες περιπτώσεις ($2000 < Re < 4000$)

➤ *Αντλίες*

Οι αντλίες όπως έχει ήδη αναφερθεί εισάγουν ενέργεια στο σύστημα για να αυξήσουν το υδραυλικό φορτίο του νερού. Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τις αντλίες στο πρόγραμμα είναι:

- οι κόμβοι που ενώνει
- και η χαρακτηριστική καμπύλη, η οποία δίνει τη σχέση υδραυλικού φορτίου και παροχής που μπορεί να παραχθεί από την κάθε αντλία.

Επίσης μπορεί να καθοριστεί μια καμπύλη αποτελεσματικότητας κάθε αντλίας, όπως ακόμη και ένα πρόγραμμα κοστολόγησης της ενέργειας. Σε περίπτωση που δεν έχουν καθοριστεί αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιείται ένα παγκόσμιο σύνολο επιλογών ενέργειας για τον υπολογισμό του κόστους.

Αντίστοιχα τα αποτελέσματα του EPANET για τις αντλίες αφορούν στη ροή και στο υδραυλικό φορτίο που έχει προστεθεί από την κάθε αντλία στο σύστημα. Επιπλέον υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας και κατά συνέπεια το κόστος λειτουργίας τους.

Η ροή μέσω των αντλιών είναι μονής κατεύθυνσης, ενώ δεν επιτρέπεται να λειτουργούν εκτός των ορίων που έχουν τεθεί από τις καμπύλες λειτουργίας τους. Αν το σύστημα απαιτεί μεγαλύτερο υδραυλικό φορτίο από αυτό που μπορεί να παραχθεί από την εκάστοτε αντλία το EPANET σταματάει τη λειτουργία της. Αν παρόλα αυτά απαιτείται μεγαλύτερη ροή από τη μέγιστη που μπορεί να δώσει η αντλία τότε το EPANET επεκτείνει την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της, ακόμη και αν αυτό προκαλεί αρνητικό υδραυλικό φορτίο. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πρόγραμμα δημιουργεί ένα προειδοποιητικό μήνυμα.

Οι αντλίες έχουν τη δυνατότητα να σταματούν ή να ξεκινούν τη λειτουργία τους σε καθορισμένες ώρες μέσα σε μια ημέρα σύμφωνα με ένα πρότυπο λειτουργίας ή όταν συγκεκριμένες συνθήκες συντελούνται στο δίκτυο.

➤ *Βαλβίδες*

Τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τις βαλβίδες στο EPANET είναι:

- οι κόμβοι που ενώνει
- η διάμετρος
- η κατάστασή τους
- οι ρυθμίσεις τους.

Αντίστοιχα τα εξαγόμενα στοιχεία είναι ο ρυθμός της ροής και οι απώλειες του φορτίου.

Όπως είναι ήδη γνωστό, οι βαλβίδες ρυθμίζουν τη ροή σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου. Το EPANET υποστηρίζει πολλά είδη βαλβίδων τα οποία είναι τα εξής:

- Βαλβίδες μείωσης της πίεσης (PRV)
- Βαλβίδες διατήρησης της πίεσης (PSV)

- Βαλβίδες διακοπής της πίεσης (PBV)
- Βαλβίδες ελέγχου παροχής (FCV)
- Βαλβίδες ελέγχου θραύσεων (TCV)
- Βαλβίδες γενικής χρήσεως (GPV)

Κάθε τύπος βαλβίδας έχει διαφορετικές παραμέτρους, οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία τους. Για τις βαλβίδες μείωσης, διατήρησης και διακοπής της πίεσης η βασική παράμετρος είναι η πίεση, η ροή για τις βαλβίδες ελέγχου της ροής, ο συντελεστής απωλειών για την βαλβίδες ελέγχου θραύσεων και η καμπύλη απωλειών του υδραυλικού φορτίου για τις βαλβίδες γενικής χρήσεως.

Επιπλέον, υπάρχουν περιορισμοί και κανόνες ως προς την τοποθέτηση των βαλβίδων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα οι PRV, PSV και FCV δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας με πηγές ή δεξαμενές. Οι PRV δεν μπορούν να μοιραστούν τον ίδιο κατάντη κόμβο ούτε να συνδεθούν σε σειρά, ενώ το ίδιο ισχύει για τον ίδιο ανάντη κόμβο και τις PSV. Τέλος, μια PSV δεν μπορεί να συνδεθεί στον κατάντη κόμβο μιας PRV βαλβίδας.

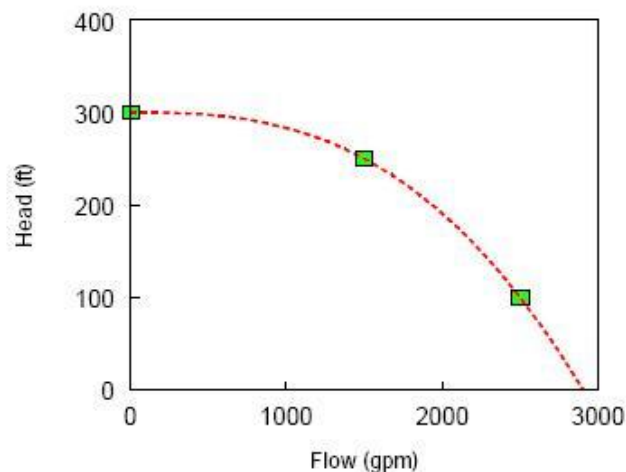
Λειτουργικές παράμετροι

Οι λειτουργικές παράμετροι περιγράφουν τη συμπεριφορά και τη λειτουργία ενός δικτύου ύδρευσης. Υπάρχουν τρία είδη τέτοιων παραμέτρων, οι καμπύλες (curves), τα χρονικά πρότυπα (patterns) και οι έλεγχοι (controls).

➤ Χαρακτηριστικές καμπύλες

Υπάρχουν τέσσερα είδη χαρακτηριστικών καμπυλών, για τη λειτουργία των αντλιών, για την αποτελεσματικότητα των αντλιών, για τον όγκο του νερού στις δεξαμενές και για τις απώλειες του υδραυλικού φορτίου.

Στην πρώτη περίπτωση, η *καμπύλη της λειτουργίας* των αντλιών παρέχει τη σχέση μεταξύ του υδραυλικού φορτίου και της παροχής του νερού που η εκάστοτε αντλία μπορεί να μεταφέρει στην ονομαστική της ταχύτητα. Οι καμπύλες αυτές μπορεί να περιγράφονται από ένα, τρία ή και περισσότερα σημεία – συνδυασμούς φορτίου και παροχής και η μορφή τους φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3-Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας αντλίας τριών σημείων

Πηγή: Rossman, 2000

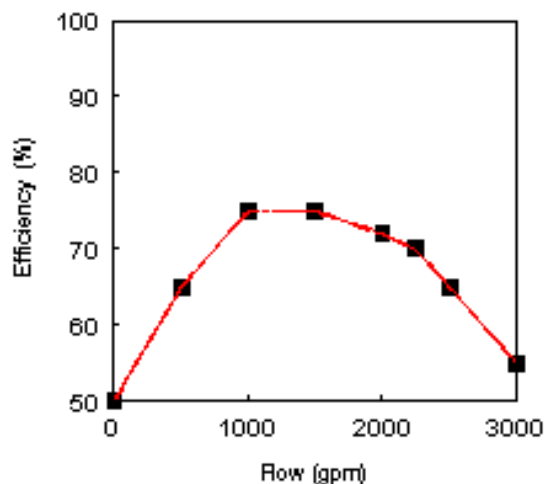
Στην περίπτωση του ενός σημείου το σύστημα δημιουργεί από μόνο του άλλα δύο υποθέτοντας φορτίο σε μηδενική παροχή ίσο με το 133% του φορτίου σχεδιασμού και μέγιστη παροχή στο μηδενικό φορτίο ίση με τη διπλάσια παροχή σχεδιασμού. Αντίστοιχα στην καμπύλη με τρία σημεία τα σημεία αυτά είναι της χαμηλότερης παροχής, της παροχής σχεδιασμού και της μέγιστης παροχής. Στην περίπτωση αυτή η καμπύλη περιγράφεται από μια συνεχή σχέση της μορφής (Rossman, 2000):

$$h_G = A - Bq^C \quad (4.2)$$

όπου h_G το φορτίο που εισήχθη στο σύστημα, q ο ρυθμός παροχής και τα A , B , C είναι σταθερές.

Σε κάποιες περιπτώσεις που το δίκτυο δε διαθέτει καμπύλη λειτουργίας για της αντλίες, τότε αυτές περιγράφονται από μια τιμή ισχύος, συνήθως σε Kw, η οποία υποδηλώνει ότι η αντλία παρέχει την ίδια ποσότητα ενέργειας ανεξάρτητα από την ποσότητα του νερού που περνάει από αυτή.

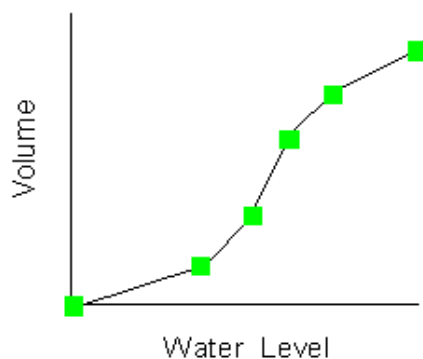
Οι καμπύλες αποτελεσματικότητας των αντλιών περιγράφουν τη σχέση της αποτελεσματικότητας (%) της εκάστοτε αντλίας με το ρυθμό παροχής (GPM), λαμβάνοντας υπόψη της μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες κατά τη λειτουργία της. Οι καμπύλες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κατανάλωσης της ενέργειας. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.4-Χαρακτηριστική καμπύλη αποτελεσματικότητας αντλίας

Πηγή: Rossman, 2000

Οι καμπύλες όγκου του νερού της δεξαμενής αποθήκευσης περιγράφουν το πώς ο όγκος του νερού σε μια δεξαμενή μεταβάλλεται σε σχέση με το ύψος του νερού σε αυτή. Ένα παράδειγμα τέτοιας καμπύλης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.5-Χαρακτηριστική καμπύλη όγκου νερού σε δεξαμενή αποθήκευσης

Πηγή: Rossman, 2000

Η καμπύλη απωλειών του υδραυλικού φορτίου, περιγράφει τις απώλειες σε πόδια ή μέτρα μέσω μια βαλβίδας γενικής χρήσεως συναρτήσει του ρυθμού της ροής. Η καμπύλη αυτή δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης συσκευών και καταστάσεων με μοναδική σχέση απώλειας – ροής.

➤ *Χρονικά πρότυπα*

Τα χρονικά πρότυπα αποτελούνται από μια σειρά αριθμών οι οποίοι πολλαπλασιαζόμενοι με μια ποσότητα δίνουν τη διακύμανσή της στο χρόνο. Τέτοιες ποσότητες είναι η ζήτηση, το πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών, το υδραυλικό φορτίο των δεξαμενών κ.α. Το χρονικό βήμα των διακυμάνσεων είναι σταθερό και συνήθως ίσο με 1 ώρα, ενώ όταν η ώρα προσομοίωσης αυξηθεί το πρότυπο επαναλαμβάνεται.

➤ Έλεγχοι

Οι έλεγχοι είναι προτάσεις που καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου στο χρόνο. Προσδιορίζουν την κατάσταση συγκεκριμένων στοιχείων του δικτύου συναρτήσει του χρόνου, των πιέσεων και του ύψους των δεξαμενών σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου.

Δύο είναι τα είδη των ελέγχων, οι απλοί (simple) και οι βασισμένοι σε κανόνες (rule-based). Οι απλοί έλεγχοι αλλάζουν την κατάσταση βασιζόμενοι της πιέσεις της κόμβους, στο επίπεδο του νερού της δεξαμενής, στο χρόνο της προσομοίωσης και στην ώρα της ημέρας κατά την οποία γίνεται η προσομοίωση λειτουργίας του δικτύου. Της ελέγχους που βασίζονται σε κανόνες, η κατάσταση των στοιχείων του δικτύου καθορίζεται από ένα συνδυασμό συνθηκών που μπορεί να συμβούν στο δίκτυο μετά από τον υπολογισμό της αρχικής υδραυλικής κατάστασης. Ακολουθούν δύο παραδείγματα απλού και ελέγχου βασισμένου σε κανόνες.

Απλός έλεγχος: *“LINK 12 CLOSED IF NODE 23 ABOVE 20”*

Έλεγχος βασισμένος σε κανόνες: *“IF TANK 1 LEVEL ABOVE 19.1 THEN PUMP 335 STATUS IS CLOSED AND PIPE 330 STATUS IS OPEN”*

4.1.4 Υδραυλική προσομοίωση του συστήματος

Το EPANET για δεδομένες τιμές της στάθμης του νερού της δεξαμενής και της πηγής, αλλά και για δεδομένες τιμές ζήτησης της κόμβους, υπολογίζει το υδραυλικό φορτίο και της πιέσεις της κόμβους και τη ροή της αγωγούς, βάσει κάποιων προτύπων για τη διακύμανση της ζήτησης στο χρόνο. Οι ροές και τα υδραυλικά φορτία υπολογίζονται με την ταυτόχρονη επίλυση της εξίσωσης της διατήρησης της ροής για κάθε κόμβο και της σχέσης των απωλειών του φορτίου για κάθε αγωγό του δικτύου. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως «υδραυλική εξισορρόπηση» του δικτύου, η οποία χρησιμοποιεί της αλγόριθμους Gradient για την επίλυση των μη γραμμικών σχέσεων, της αναφέρεται στη συνέχεια.

4.1.5 Υδραυλική Επίλυση στο EPANET

Η υδραυλική προσομοίωση στο EPANET έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό των υδραυλικών φορτίων της διασταυρώσεις και των παροχών/ροών της συνδέσμων. Οι υπολογισμοί αυτοί είναι περίπλοκοι καθώς για κάθε χρονική στιγμή, πρέπει να λύνεται στιγμιαία η εξίσωση διατήρησης της παροχής για της της διασταυρώσεις και η εξίσωση απωλειών για όλους της συνδέσμων του δικτύου, οι οποίες περιέχουν μη γραμμικές σχέσεις. Κατά τη διαδικασία αυτή στόχος είναι η υδραυλική ισορροπία του δικτύου.

Το EPANET για της υπολογισμούς της χρησιμοποιεί μια υβριδική προσέγγιση επαναληπτικής διαδικασίας βασισμένης της κόμβους του δικτύου, γνωστή και ως «node-loop». Η μέθοδος αυτή ονομάστηκε Gradient ή αλγόριθμος Gradient, από της Todini και Pilati (1987). Αν και έχουν προταθεί και της μέθοδοι επίλυσης με της οποίες η μέθοδος Gradient διαφέρει ως της τον τρόπο που οι ροές επαναυπολογίζονται μετά από μια

επίλυση των φορτίων της κόμβους, επιλέχθηκε για το EPANET η συγκεκριμένη μέθοδος ως η περισσότερο απλή.

4.1.6 Προβλήματα κατά την ανάλυση του δικτύου

Κατά την προσομοίωση της ανάλυσης του εκάστοτε δικτύου μπορεί να προκύψουν προβλήματα τα οποία εμφανίζονται με τη μορφή προειδοποίησης στην επιφάνεια εργασίας του EPANET. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να οφείλονται της εξής λόγους (Rossman, 2000):

- Αδυναμία μεταφοράς ποσότητας νερού ή υδραυλικού φορτίου από της αντλίες

Αν μια αντλία πρέπει να λειτουργήσει πέρα από το εύρος της χαρακτηριστικής της καμπύλης για συγκεκριμένη παροχή νερού, τότε το πρόγραμμα εμφανίζει ένα προειδοποιητικό μήνυμα. Συγκεκριμένα το EPANET κλείνει την αντλία σε αυτή την περίπτωση, αποκλείοντας τμήματα του δικτύου από οποιαδήποτε πηγή νερού.

- Όταν το δίκτυο θεωρείται αποσυνδεδεμένο

Το δίκτυο θεωρείται ότι έχει αποσυνδεθεί όταν κάποιοι κόμβοι δεν μπορούν να προμηθευθούν με νερό ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη ζήτηση. Μια πιθανή αιτία για αυτό είναι όταν δεν υπάρχει δίοδος για τη μεταφορά του νερού λόγω κλειστών αγωγών ή αντλιών. Παρόλα αυτά το EPANET επιλύει το πρόβλημα δίνοντας μεγάλες αρνητικές πιέσεις, αν της δεν υπάρχουν αγωγοί που να συνδέονται με της κόμβους τότε το πρόγραμμα δεν μπορεί να δώσει υδραυλική λύση και συνεπώς δεν μπορεί να υπολογίσει της παροχές και της πιέσεις της κόμβους. Της περισσότερες περιπτώσεις υδραυλικής ανάλυσης κάποιοι κόμβοι μπορεί να χαρακτηριστούν ως αποσυνδεδεμένοι λόγω των αλλαγών της κατάστασης των αγωγών και των αντλιών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

- Όταν εντοπίζονται αρνητικές πιέσεις

Στην περίπτωση που οι πιέσεις είναι αρνητικές σε κόμβους με θετική ζήτηση, τότε δημιουργείται ένα προειδοποιητικό μήνυμα. Αρνητικές πιέσεις παρουσιάζονται όταν τμήματα του δικτύου δέχονται νερό μόνο από αγωγούς που έχουν κλείσει. Συνήθως οι πιέσεις αυτές οφείλονται σε σχεδιαστικές αστοχίες του συστήματος ή σε αστοχίες λειτουργίας του.

- Όταν οι υδραυλικές εξισώσεις δεν επιλύονται

Αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση που τμήμα του δικτύου δεν μπορεί να προμηθευτεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού ώστε να καλύψει τη ζήτηση, εξαιτίας της έλλειψης συνδεσιμότητάς του με κάποια πηγή νερού. Στην περίπτωση αυτή το EPANET θα προειδοποιήσει για της κόμβους που έχουν αποσυνδεθεί. Μια ακόμη περίπτωση που οι εξισώσεις δεν επιλύονται είναι όταν έχουν δοθεί σε ιδιότητες του δικτύου μη ρεαλιστικές τιμές.

- Όταν το σύστημα θεωρείται μη ισορροπημένο

Το σύστημα θεωρείται ότι δεν έχει έρθει σε ισορροπία όταν δεν έχει βρεθεί υδραυλική λύση με το μέγιστο αριθμό δοκιμών που έχει οριστεί. Αυτό συνήθως συμβαίνει εξαιτίας των εναλλαγών της κατάστασης των αντλιών, των βαλβίδων ή και των αγωγών μεταξύ των δοκιμών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, μια λύση είναι η επιλογή μεγαλύτερου αριθμού δοκιμών και μια δεύτερη η μείωση της ακρίβειας σύγκλισης των τιμών της υδραυλικής λύσης.

Παρόλα αυτά αν και πάλι δεν υπάρξει λύση και το σύστημα δε βρεθεί σε ισορροπία, υπάρχουν δύο επιπλέον τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος. Στην πρώτη περίπτωση η ανάλυση σταματάει, ενώ στη δεύτερη επεκτείνονται οι δοκιμές σε δέκα επιπλέον μέχρι να βρεθεί λύση, με την κατάσταση όλων των στοιχείων σταθερή στην τελευταία δοκιμή πριν της δέκα επιπλέον δοκιμές. Τελικά είτε η ανάλυση καταλήξει σε κάποια λύση είτε όχι, η διαδικασία συνεχίζεται και στην επόμενη χρονική περίοδο. Παρόλα αυτά ο χρήστης οφείλει να λάβει υπόψη του ότι η λύση είναι ακατάλληλη και μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα και στα επόμενα χρονικά βήματα της ανάλυσης.

4.1.7 Επιφάνεια Εργασίας EPANET

Το EPANET παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής της δικτύου ή σχεδίασής του και επεξεργασίας του, εισαγωγής των απαραίτητων ιδιοτήτων των στοιχείων που το απαρτίζουν, επιλογής των παραμέτρων της υδραυλικής προσομοίωσης και των μονάδων μέτρησης της οποίες θα λειτουργεί το δίκτυο.

Σχεδίαση του δικτύου

Εκτός από τη δυνατότητα εισαγωγής αρχείου που περιγράφει πλήρως το δίκτυο, το EPANET δίνει τη δυνατότητα σχεδίασης του δικτύου με την επιλογή των παρακάτω εικονιδίων:



εισαγωγή κόμβων



εισαγωγή πηγών (reservoir)



εισαγωγή δεξαμενών



εισαγωγή αντλιών



εισαγωγή βαλβίδων



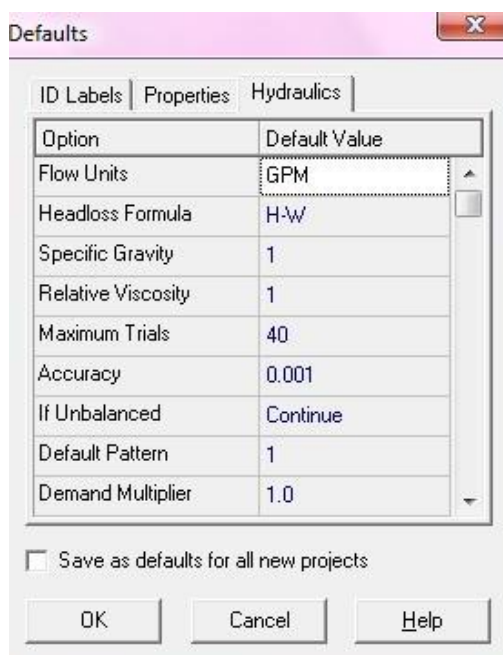
εισαγωγή αγωγών



επιλογή αντικειμένων στον χάρτη

Πριν από αυτή τη διαδικασία είναι απαραίτητο να οριστούν οι υδραυλικές παράμετροι του δικτύου, όπως είναι οι μονάδες μέτρησης και η μέθοδος υπολογισμού των απωλειών,

αλλά και η ακρίβεια των υπολογισμών. Αυτό γίνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.6-Ορισμός των υδραυλικών παραμέτρων του δικτύου

Ορισμός των παραμέτρων των στοιχείων

Τέλος, το EPANET δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής των παραμέτρων των στοιχείων του δικτύου επιλέγοντας το κάθε στοιχείο χωριστά, όπως είναι οι κόμβοι, οι αγωγοί κ.α. Ένα τέτοιο παράδειγμα για κόμβο φαίνεται στο Σχήμα 4.7 που ακολουθεί.

Property	Value
*Junction ID	6
X-Coordinate	3321.19
Y-Coordinate	6696.55
Description	
Tag	
*Elevation	80
Base Demand	200
Demand Pattern	1
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	120.00
Total Head	296.61
Pressure	93.86
Quality	0.00

Σχήμα 4.7-Εισαγωγή παραμέτρων σε κόμβο

4.2 Το λογισμικό PaVLOS

Το PaVLOS (Pump and Valve Logic Optimal Scheduling) (Morley et al., 2013) είναι ένα λογισμικό το οποίο βρίσκει σε ένα δίκτυο ύδρευσης το βέλτιστο πρόγραμμα των αντλιών και των βαλβίδων, όταν αυτές υπάρχουν, ώστε να καταναλώνεται η ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Η διαδικασία βασίζεται σε μια μεθοδολογία διαχείρισης της ενέργειας και της πίεσης σε δίκτυα ύδρευσης. Αυτή η νέα μεθοδολογία προσεγγίζει το πρόβλημα διαχείρισης της λειτουργίας των δικτύων μέσω ενός ενιαίου προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, ενώ δίνεται και η δυνατότητα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης, ανάλογα με την έκδοση του λογισμικού.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του δικτύου και της ελαχιστοποίησης των διαρροών, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί της λειτουργίας του. Η ελαχιστοποίηση των αλλαγών της κατάστασης των βαλβίδων και των αντλιών μπορεί να θεωρηθεί ένας στόχος για την μείωση του κόστους λειτουργίας και των διαρροών.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης καταλήγουν στη μείωση των διαρροών και στην άμεση ή έμμεση εξοικονόμηση ενέργειας από το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών και τη συνολική μείωση της πίεσης στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης μπορεί να μελετηθεί από τον τελικό χρήστη για την επιλογή της καταλληλότερης λύσης.

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο PaVLOS έχει υλοποιηθεί ως μια αυτόνομη εφαρμογή λογισμικού – το εργαλείο του λογικά βέλτιστου προγραμματισμού αντλιών και βαλβίδων – το οποίο συνδυάζει έναν πολυκριτηριακό γενετικό αλγόριθμο με ένα πρόγραμμα επίλυσης του υδραυλικού μοντέλου (EPANET), παρέχοντας τη δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας πολλών πιθανών λύσεων σε διαφορετικούς υπολογιστές/επεξεργαστές. Το EPANET χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει και να ποσοτικοποιήσει τη λειτουργία του συστήματος, όπως έχει ήδη παρουσιαστεί, ενώ ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόζεται για τον εντοπισμό της βέλτιστης στρατηγικής προγραμματισμού των αντλιών και των βαλβίδων, με στόχο την οικονομικά αποδοτική μείωση της διαρροής, εάν αυτή υπάρχει ή την οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση του PaVLOS, η οποία κάνει μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος συναρτήσει της λειτουργίας των αντλιών μόνο. Συνεπώς τα υπό εξέταση δίκτυα δε θα πρέπει να περιέχουν βαλβίδες.

4.2.1 Στόχοι βελτιστοποίησης

Το PaVLOS στην ολοκληρωμένη του μορφή βελτιστοποιεί δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ως συνάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος που απαιτείται για να λειτουργήσουν οι μεμονωμένες αντλίες στο σύστημα. Η δεύτερη συνιστώσα αφορά στη μείωση των διαρροών κατά μήκος του δικτύου. Στην έκδοση που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία μοναδική συνιστώσα είναι η πρώτη.

Η βελτιστοποίηση έτσι διατυπώνεται ως εξής:

$$\min \text{cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_p} P_k^t \times C_k^t \quad (4.3)$$

Όπου T ο αριθμός των χρονικών βημάτων στην προσομοίωση εκτεταμένης περιόδου, N_p ο αριθμός των αντλιών στο δίκτυο, P_k η κατανάλωση ενέργειας των αντλιών k_{th} [kw/h], C_{jk} – η διατίμηση του ενεργειακού κόστους για την k_{th} αντλία [€/kw/h].

4.2.2 Μεταβλητές απόφασης

Το PaVLOS χρησιμοποιεί δύο τύπους μεταβλητών απόφασης, ο πρώτος σχετίζεται με τις αντλίες και ο δεύτερος και τις βαλβίδες. Στην προκειμένη περίπτωση, και στην έκδοση που χρησιμοποιείται, οι μεταβλητές απόφασης σχετίζονται μόνο με τις αντλίες.

Οι μεταβλητές απόφασης των αντλιών ορίζονται ως η άγνωστη κατάσταση της κάθε αντλίας για κάθε ώρα της προγραμματισμένης λειτουργίας. Επιπλέον, πριν τη βελτιστοποίηση, κάθε αντλία μπορεί να έχει την κατάστασή της σταθερή στο “Always on”, “Always off”, δηλαδή πάντα ανοιχτή ή κλειστή αντίστοιχα ή όπως ορίστηκε στο υδραυλικό μοντέλο, για παράδειγμα υπάρχει η δυνατότητα να εξαιρεθεί μια αντλία από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης συνολικά.

Η βελτιστοποίηση ανάλογα με το δίκτυο και το πρόβλημα μπορεί να γίνει πολύ περίπλοκη και χρονοβόρα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μειώνεται ο χώρος αναζήτησης των πιθανών λύσεων, περιορίζοντας τις αλλαγές της κατάστασης των αντλιών μόνο σε διακριτά χρονικά βήματα, όπως είναι τα ωριαία. Αυτό ταυτόχρονα συμβάλλει στη μείωση των δαπανών συντήρησης των αντλιών, που συνήθως σχετίζονται με τις συχνές εναλλαγές της κατάστασής τους.

4.2.3 Περιορισμοί βελτιστοποίησης

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι απαραίτητη η εφαρμογή κάποιων περιορισμών, ώστε να είναι η λύση υδραυλικά εφικτή. Στην περίπτωση που μια λύση δεν είναι εφικτή σύμφωνα με τους περιορισμούς, τότε αυτή εξαιρείται και δεν συμβάλλει στην εξέλιξη της βελτιστοποίησης.

Υδραυλικά εφικτή θεωρείται μια λύση όταν δεν υπάρχουν κόμβοι στο δίκτυο με αρνητικές πιέσεις, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται όλες οι ζητήσεις στο σύστημα. Για το λόγο αυτό ορίζεται μια ελάχιστη πίεση, την οποία όλοι οι κόμβοι θα πρέπει να ικανοποιούν, ώστε να θεωρηθεί η λύση αποδεκτή.

Για να είναι μια λύση βιώσιμη, ώστε το σύστημα να λειτουργεί σωστά με αυτή, ένας επιπλέον περιορισμός εφαρμόζεται ο οποίος σχετίζεται με τη στάθμη του νερού στις δεξαμενές. Στόχος είναι το επίπεδο του νερού στις δεξαμενές του εκάστοτε δικτύου να είναι τουλάχιστον το ίδιο στην αρχή και στο τέλος του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό ορίζεται για κάθε δεξαμενή η μέγιστη και η ελάχιστη στάθμη του νερού σε αυτές, αλλά και η αρχική.

Η βελτιστοποίηση υπόκειται επομένως σε περιορισμούς, σε κάθε χρονικό βήμα ώστε να είναι υδραυλικά εφικτή η λύση (Morley et al., 2013):

- Διατήρηση μάζας και ενέργειας

$$\sum_{j=1}^{N_{j,i}} q_j^t - Q_{D_i}^t = 0, \quad i=1, \dots, N_n, t=1, \dots, T \quad (4.4)$$

$$\Delta H_j^t = r_j q_j^{t^e}, \quad j=1, \dots, N_l \quad (4.5)$$

- Περιορισμοί Λειτουργίας

$$P_i^t \geq P_s, \text{ αν } Q_{D_i}^t > 0, \quad i=1, \dots, N_n, t=1, \dots, T \quad (4.6)$$

$$L_{i,0} - L_{i,T} \geq 0, \quad j=1, \dots, N_s \quad (4.7)$$

Όπου q_j η ροή στον αγωγό j_{th} , Q_{D_i} η ζήτηση στον κόμβο i_{th} , ΔH_j η απώλεια φορτίου κατά μήκος του αγωγού j_{th} , ΔH_{pj} το φορτίο άντλησης κατά μήκος του αγωγού j_{th} , $N_{j,i}$ ο αριθμός των αγωγών που συνδέονται με τον κόμβο i_{th} , N_l ο αριθμός των αγωγών του δικτύου, N_n ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, N_s ο αριθμός των δεξαμενών του δικτύου, P_i η πίεση στον κόμβο i_{th} , P_s η ελάχιστη απαιτούμενη πίεση λειτουργίας, $L_{i,0}$ η αρχική στάθμη του νερού στη δεξαμενή, $L_{i,T}$ η στάθμη της δεξαμενής στο τελευταίο χρονικό βήμα.

4.2.4 Μέθοδος βελτιστοποίησης

Το λογισμικό PaVLOS εφαρμόζει μια υβριδική έκδοση του αλγορίθμου Omni-Optimizer (Deb and Tiwari, 2008) η οποία συμπεριλαμβάνει στοιχεία που προέρχονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Hybrid Discrete, Dynamically-Dimensioned Search (Tolson et al., 2009) και συγκεκριμένα τις αναβαθμισμένες δυνατότητες στη διαχείριση των περιορισμών και την πρόσθετη δυνατότητα τοπικής αναζήτησης.

Ο αλγόριθμος Omni-Optimizer είναι ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος ανήκει στους εξελικτικούς αλγορίθμους που βασίζονται στον πληθυσμό και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για τη βέλτιστη διαχείριση νερού. Επίσης ο αλγόριθμος αυτός είναι κατάλληλος σε δίκτυα που περιλαμβάνουν αντλίες και βαλβίδες, καθώς μπορεί να ανταποκριθεί πολύ ικανοποιητικά σε μεταβλητές απόφασης που έχουν ακέραιες και πραγματικές τιμές.

Κεφάλαιο 5

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της ενέργειας και των διαρροών σε συγκεκριμένα δίκτυα ύδρευσης. Για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης είναι απαραίτητες οι στοχικές συναρτήσεις, οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί λειτουργίας και οι «ποινές» που τίθενται για την επίλυση του προβλήματος. Όλα αυτά τα στοιχεία που είναι απαραίτητα και διαμορφώνουν το πρόβλημα παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

5.1 Μεταβλητές Απόφασης

Η εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας των δικτύων ύδρευσης μιας πόλης, δηλαδή της λειτουργίας των αντλιών, είναι γενικά ένα περίπλοκο πρόβλημα καθώς εμπλέκονται πολλοί παράγοντες και περιορισμοί στη λειτουργία τους.

Οι μεταβλητές απόφασης για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός δικτύου είναι η κατάσταση λειτουργίας των αντλιών για κάθε χρονικό βήμα του συνολικού χρόνου προσομοίωσης που επιλέγεται. Ως χρονικό βήμα επιλέγεται η μία ώρα, ενώ ως χρόνος προσομοίωσης οι 24 ώρες, όπως είναι το σύνθετο για την προσομοίωση δικτύων και όπως διαπιστώθηκε από την βιβλιογραφία (ενδεικτικά, van Zyl et al., 2004).

Η λειτουργία των αντλιών μέσα στην ημέρα, προσομοιώνεται με δυαδικό σύστημα, δηλαδή με τις τιμές 0 και 1. Όταν μια αντλία δε λειτουργεί κάποια ώρα λαμβάνει την τιμή 0, ενώ όταν λειτουργεί την τιμή 1.

Στόχος του μοντέλου προσομοίωσης είναι η εύρεση της λειτουργίας των αντλιών που προσφέρει την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας ή/και την ελάχιστη ποσότητα διαρροών για το συγκεκριμένο χρόνο προσομοίωσης.

5.2 Περιορισμοί

Για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας και των διαρροών, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες σε κάθε χρονικό βήμα. Κάποιοι από αυτούς είναι η διακύμανση της ζήτησης, το πρότυπο κοστολόγησης της ενέργειας, οι καμπύλες αποτελεσματικότητας των αντλιών και η λειτουργία τους, οι στάθμες των δεξαμενών αποθήκευσης κ.α.

Η λειτουργία ενός δικτύου ύδρευσης υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς, συνεπώς για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του οι περιορισμοί αυτοί πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι περιορισμοί είναι σχέσεις οι οποίες επιλύονται και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της στοχικής συνάρτησης. Έπειτα, από την υδραυλική προσομοίωση επιλέγονται οι κατάλληλες μεταβλητές απόφασης οι οποίες έχουν καθοριστεί από τους

περιορισμούς αυτούς. Οι περιορισμοί που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στη συνέχεια:

➤ Πίεση

Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης η πίεση στους κόμβους του δικτύου δεν πρέπει να πέφτει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή η οποία επιλέγεται ίση με 20 m, καθώς με αυτή την τιμή εξασφαλίζεται ότι το νερό θα φτάσει τουλάχιστον μέχρι τον τρίτο όροφο των πολυκατοικιών. Είναι σωστό επίσης να οριστεί και μια μέγιστη τιμή πίεσης, η οποία συνήθως είναι τα 60 m, που εξασφαλίζει ότι δε θα υπάρξουν αστοχίες και θραύσεις των αγωγών. Παρόλα αυτά σε αυτή την εργασία επιλέγεται να μη χρησιμοποιηθεί άνω όριο στην πίεση, καθώς διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης είναι υπερβολικά αυξημένα. Σε αυτή την περίπτωση προτείνεται η τοποθέτηση βαλβίδων για την πρόληψη αστοχιών. Άρα ο περιορισμός της πίεσης είναι ο εξής:

$$P_{it} \geq 20 \text{ m} \quad (5.1)$$

Όπου i ο εκάστοτε κόμβος και t το χρονικό βήμα.

➤ Ταχύτητα στους αγωγούς

Επιπλέον εφαρμόζεται ο περιορισμός της ταχύτητας του νερού στους αγωγούς, που όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι:

$$0.5 \leq v_{jt} \leq 1.5 \text{ (m / s)} \quad (5.2)$$

Όπου j ο εκάστοτε αγωγός και t το χρονικό βήμα. Ο περιορισμός αυτός δεν παραβιάζεται σε καμία περίπτωση που εξετάστηκε.

➤ Στάθμη νερού στις δεξαμενές αποθήκευσης

Για να θεωρηθεί μια προσομοίωση λειτουργίας ενός δικτύου ύδρευσης αξιόπιστη, είναι απαραίτητο στο τέλος της οι στάθμες του νερού στις δεξαμενές να είναι τουλάχιστον όσο και στην αρχή της. Επιπλέον, τα επίπεδα του νερού θα πρέπει να παραμένουν μεταξύ του ελάχιστου και μέγιστου ορίου κάθε δεξαμενής σε κάθε χρονικό βήμα. Συνεπώς:

$$S_{k(24h)} \geq S_{k(0h)} \quad (5.3)$$

$$S_{\min k} \leq S_{kt} \leq S_{\max k} \quad (5.4)$$

Όπου k η εκάστοτε δεξαμενή, t το κάθε χρονικό βήμα, $S_{\min k}$ και $S_{\max k}$ το ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο νερού στην εκάστοτε δεξαμενή, $S_{k(24h)}$ και $S_{k(0h)}$ το ύψος του νερού στην δεξαμενή στο τέλος και στην αρχή της προσομοίωσης αντίστοιχα.

➤ Αρνητική ζήτηση

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης των διαρροών τίθεται ένας ακόμη περιορισμός, αυτός των αρνητικής ζήτησης, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις μετά το τέλος της

βελτιστοποίησης διαπιστώθηκαν αρνητικές τιμές σε κόμβους που δε δέχονταν από κάποια πηγή νερό. Άρα:

$$D_{it} \geq 0 \quad (5.5)$$

Όπου i ο εκάστοτε κόμβος και t το χρονικό βήμα.

Στην περίπτωση που κάποιος από τους περιορισμούς παραβιαστεί, επιβάλλεται μια «ποινή» η οποία αυξάνει πολύ την τιμή της στοχικής συνάρτησης και έτσι δεν επιλέγεται αυτή ως βέλτιστη λύση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί η ελάχιστη δυνατή τιμή που ικανοποιεί το σύνολο των περιορισμών.

5.3 Στοχική Συνάρτηση

Η στοχική συνάρτηση για την περίπτωση της ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας είναι το άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται για τη λειτουργία των αντλιών μέσα στο χρόνο προσομοίωσης και το οποίο υπολογίζεται από το EPANET, και των «ποινών» που επιβάλλονται για την παραβίαση των περιορισμών:

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N C_n^t + P_{Pi} + P_{vj} + P_{Sk} \quad (5.6)$$

Όπου t το χρονικό βήμα και T ο χρόνος προσομοίωσης, n η εκάστοτε αντλία και N ο συνολικός αριθμός τους, C_n^t , το κόστος λειτουργίας της κάθε αντλίας για κάθε χρονικό βήμα, P_{Pi} , P_{vi} και P_{Sk} , οι «ποινές» για τον περιορισμό της πίεσης, της ταχύτητας και της στάθμης του νερού στις δεξαμενές αντίστοιχα, για τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης.

Η στοχική συνάρτηση για την περίπτωση της ελαχιστοποίησης των διαρροών είναι το άθροισμα των διαρροών κάθε κόμβου για τον συνολικό χρόνο της προσομοίωσης και των «ποινών» που επιβάλλονται για την παραβίαση των περιορισμών:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I L_i^t + P_{Pi} + P_{vj} + P_{Sk} + P_{Di} \quad (5.7)$$

Όπου t το χρονικό βήμα και T ο χρόνος προσομοίωσης, i ο εκάστοτε κόμβος και I ο συνολικός αριθμός τους, L_i^t οι διαρροές κάθε κόμβου σε κάθε χρονικό βήμα, P_{Pi} , P_{vi} , P_{Sk} , και P_{Di} οι «ποινές» για τον περιορισμό της πίεσης, της ταχύτητας, του επιπέδου του νερού στις δεξαμενές και των αρνητικών ζητήσεων για τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης, αντίστοιχα.

Οι διαρροές για τον κάθε κόμβο και για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$L_i^t = \text{Node Demand} - \text{Base Demand} \times \text{Demand Multiplier} \times \text{Pattern Demand} \quad (5.8)$$

Όπου Node Demand η ζήτηση στον κάθε κόμβο η οποία εμπεριέχει τις διαρροές, Base Demand η βασική ζήτηση κάθε κόμβου, Demand Multiplier ένας συντελεστής ο οποίος καθορίζει τη ζήτηση κάθε κόμβου και συνήθως είναι ίσος με τη μονάδα και Pattern

Demand συντελεστής που καθορίζει τη διακύμανση της ζήτησης μέσα στο χρόνο προσομοίωσης.

Για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα το κόστος άντλησης και οι διαρροές, δηλαδή οι συναρτήσεις f_1 και f_2 , με την επιβολή των περιορισμών που έχουν ήδη αναφερθεί στις μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις των δύο στόχων.

$$\min \{f_1, f_2\} \quad (5.9)$$

5.4 Αξιολόγηση των Λύσεων

Για τη συγκεκριμένη εργασία η βελτιστοποίηση γίνεται κυρίως με τον γενετικό αλγόριθμο του λογισμικού Matlab και για την επίλυση του δικτύου χρησιμοποιείται το λογισμικό EPANET 2.0. Για την επίλυση αυτή είναι αναγκαίο να δημιουργηθεί μια διεπαφή μεταξύ των δύο προγραμμάτων. Αναπτύχθηκε για το λόγο αυτό κώδικας σε περιβάλλον Matlab, ο οποίος βασίζεται στην ανάγνωση και εγγραφή αρχείων.

Συγκεκριμένα, το βασικό αρχείο του δικτύου που εισάγεται στο EPANET είναι της μορφής *.inp (input file). Πρόκειται για ένα αρχείο τύπου ascii, που περιέχει τόσο τα στοιχεία του δικτύου (όπως ονόματα αγωγών, συντεταγμένες των κόμβων, βασική ζήτηση, κ.α.) όσο και πληροφορίες για τα εξαγόμενα αρχεία και την μορφή των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αρχείο αυτό περιέχει και τη λειτουργία των αντλιών, οι οποίες αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης. Συνεπώς σε κάθε αξιολόγηση δημιουργείται ένα νέο αρχείο που εμπεριέχει και τις νέες τιμές των μεταβλητών αυτών.

Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα αυτά περιέχονται σε δύο αρχεία, σε ένα αρχείο με κατάληξη *.rpt (report file), το οποίο είναι τύπου ascii και περιέχει την τιμή της ενέργειας όπως αυτή έχει υπολογιστεί από το EPANET και ένα αρχείο τύπου binary, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το σύνολο των αποτελεσμάτων, όπως είναι οι πιέσεις στους κόμβους, οι ταχύτητες ροής, οι ζητήσεις κ.α., για τη διάρκεια της προσομοίωσης. Από τα δεδομένα αυτά είναι δυνατό να υπολογιστεί η τιμή των επιμέρους αλλά και των συνολικών διαρροών, που είναι το δεύτερο κριτήριο βελτιστοποίησης το οποίο δεν προκύπτει άμεσα από το EPANET.

Ειδικά σε ότι αφορά το αρχείο binary, σημειώνεται ότι τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε τύπους δεδομένων με μέγεθος 4 byte, επιτρέποντας την εύκολη ανάγνωσή τους. Το binary αρχείο έχει συγκεκριμένη δομή, έτσι ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση στα απαραίτητα δεδομένα. Λεπτομέρειες για τη δομή του αρχείου περιέχονται στο εγχειρίδιο χρήσης του EPANET (EPA, 2000). Σε κάθε βήμα γίνεται ανάγνωση των αρχείων των αποτελεσμάτων της επίλυσης του δικτύου, με βάση τα οποία υπολογίζεται η τιμή της στοχικής συνάρτησης για τις εκάστοτε τιμές.

Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθούνται σε κάθε αξιολόγηση λύσης είναι τα εξής:

- Δημιουργία αρχείου εισόδου του EPANET με το νέο πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών
- Κλήση εκτελέσιμου αρχείου (batch file), το οποίο με τη σειρά του καλεί το εκτελέσιμο αρχείο του EPANET και δημιουργεί τα αρχεία των αποτελεσμάτων
- Ανάγνωση των δύο αρχείων με τα αποτελέσματα
- Υπολογισμός της στοχικής συνάρτησης

Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται τόσες φορές όσο είναι το γινόμενο του πληθυσμού επί των γενιών.

Κεφάλαιο 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της διαχείρισης της ενέργειας και των διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης. Για το σκοπό αυτό, βελτιστοποιείται η λειτουργία των αντλιών, που είναι ο κύριος παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας, ενώ επιπλέον μελετώνται δίκτυα με παρουσία διαρροών και γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησής τους, με απώτερο στόχο και πάλι τη βέλτιστη διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Αρχικά πραγματοποιείται μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης, με χρήση του προγράμματος βελτιστοποίησης PaVLOS που χρησιμοποιεί τον υδραυλικό προσομοιωτή EPANET, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποιείται το πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών στο πρώτο δίκτυο από τα δύο που εξετάζονται, χωρίς την παρουσία διαρροών.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται και πάλι μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης, με χρήση του λογισμικού Matlab και του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιεί (συνάρτηση `ga()`), σε συνδυασμό με το πρόγραμμα υδραυλικής προσομοίωσης EPANET. Βελτιστοποιείται το πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών και στα δύο δίκτυα που εξετάζονται, χωρίς την παρουσία διαρροών. Τα αποτελέσματα των δύο διαδικασιών συγκρίνονται.

Ακολούθως εξετάζονται τα δύο δίκτυα με την παρουσία διαρροών. Με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, πραγματοποιείται μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με στόχο την ελαχιστοποίηση των διαρροών στα δύο δίκτυα. Στα δίκτυα με την ύπαρξη διαρροών εφαρμόζεται ακόμη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση και για την ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης.

Τέλος, βελτιστοποιούνται και τα δύο δίκτυα για την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης και των διαρροών, με τον πολυκριτηριακό αλγόριθμο του Matlab (συνάρτηση `gamultiobj()`).

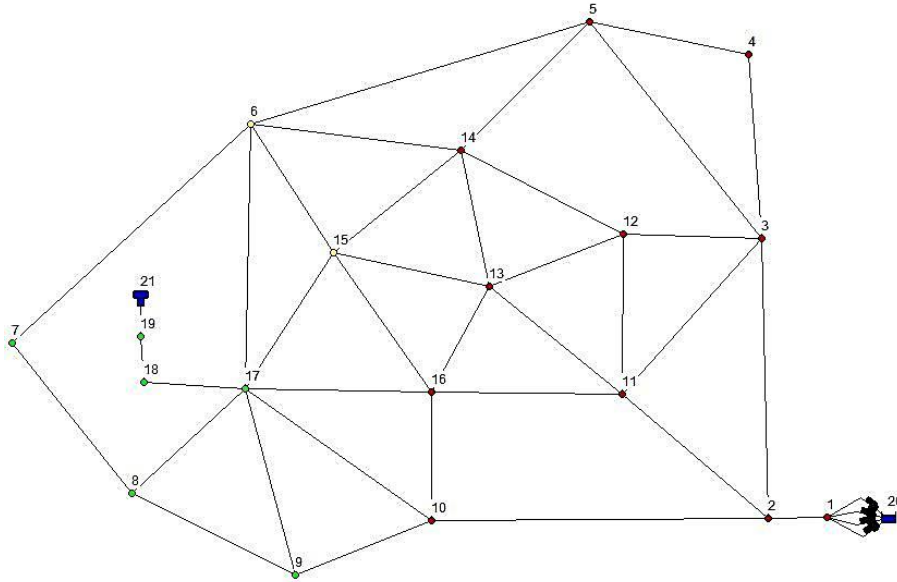
Η διαδικασία παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια.

6.1 Τα Υπό Εξέταση Δίκτυα

Τα δίκτυα που εξετάζονται προήλθαν από το διαδίκτυο και συγκεκριμένα από την ηλεκτρονική διεύθυνση (<http://github.com/KIOS-Research/EPANET-Matlab-Class/tree/master/NETOWORKS>). Επιλέχθηκε ένα μικρό δίκτυο, το *Anytown* και ένα περισσότερο πολύπλοκο, το *ky5_Jolly2013*.

6.1.1 Το δίκτυο Anytown

Το Anytown αποτελείται από 19 κόμβους, 37 αγωγούς, μια δεξαμενή αποθήκευσης, μία πηγή και τέσσερις αντλίες. Οι αντλίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα ενώνοντας την πηγή με τον αγωγό 1, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.1.

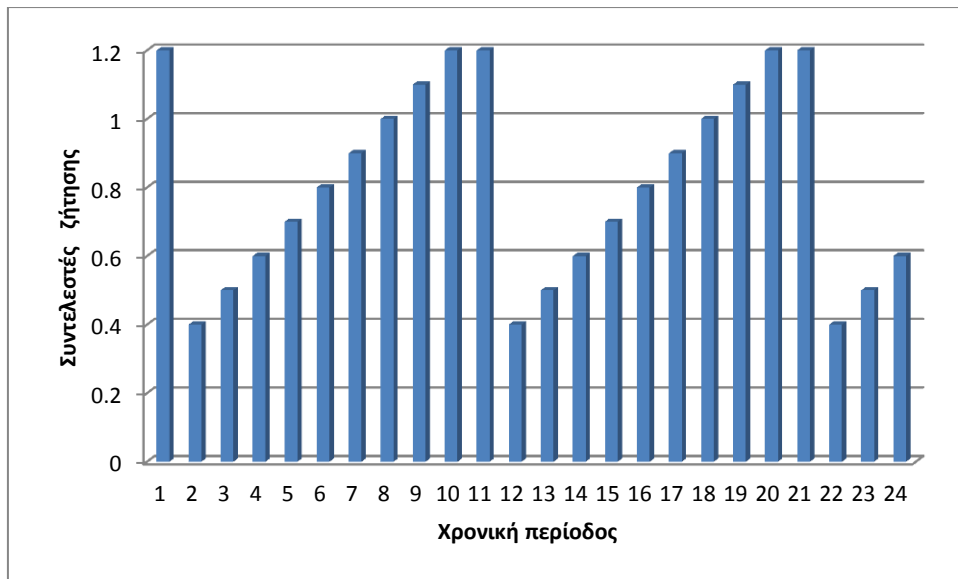


Σχήμα 6.1 - Το δίκτυο ύδρευσης Anytown

Η ζήτηση κάθε κόμβου μέσα στην ημέρα, καθορίζεται από μια σειρά τιμών βασικής ζήτησης (Πίνακας 6.1) οι οποίες πολλαπλασιαζόμενες με ένα πρότυπο τιμών (time pattern), δίνουν τη διακύμανση της ζήτησης μέσα στο 24ωρο. Στο Anytown το πρότυπο αυτό έχει τιμές για τις πρώτες 10 ώρες, το οποίο από την ενδέκατη μέχρι και την 24^η επαναλαμβάνεται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.2.

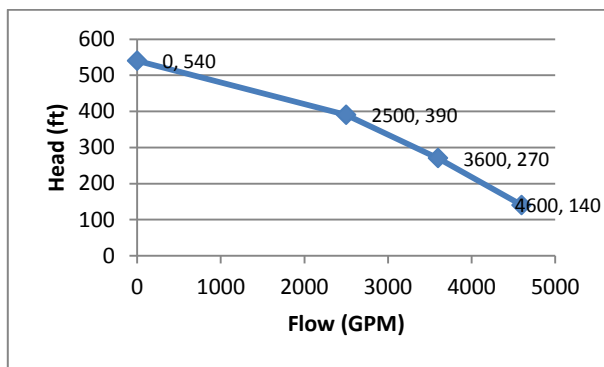
Πίνακας 6.1-Η βασική ζήτηση για κάθε κόμβο του δικτύου Anytown

Κόμβοι	Βασική ζήτηση (GPM)	Κόμβοι	Βασική ζήτηση (GPM)
1	0	11	500
2	500	12	500
3	200	13	1000
4	200	14	500
5	200	15	200
6	200	16	500
7	200	17	800
8	200	18	0
9	200	19	0
10	500		

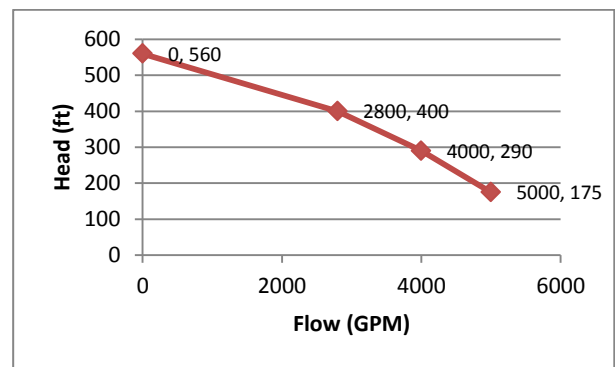


Σχήμα 6.2 - Χρονικό πρότυπο διακόμανσης ζήτησης για το δίκτυο Anytown

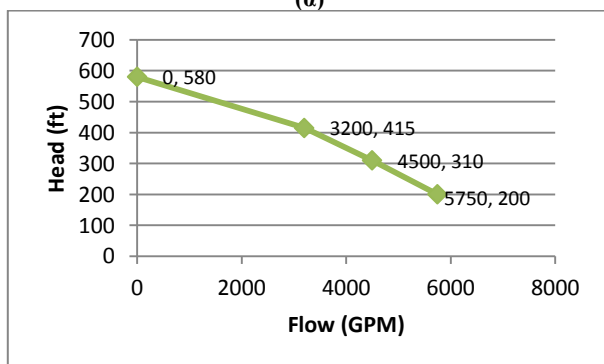
Επίσης, κάθε αντλία πέρα από την καμπύλη λειτουργίας της (Σχήμα 6.3) χαρακτηρίζεται και από την καμπύλη αποτελεσματικότητας (Σχήμα 6.4), η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανάλωσης της ενέργειας. Η καμπύλη αυτή παρέχει τη σχέση μεταξύ του φορτίου σε ποσοστό και της παροχής της αντλίας. Επιπλέον σε κάθε αντλία εφαρμόζεται ένα ωριαίο πρότυπο – πρόγραμμα τιμών ενέργειας (rump tariff), ώστε να καθοριστεί το συνολικό κόστος λειτουργίας τους για ένα 24ωρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5.



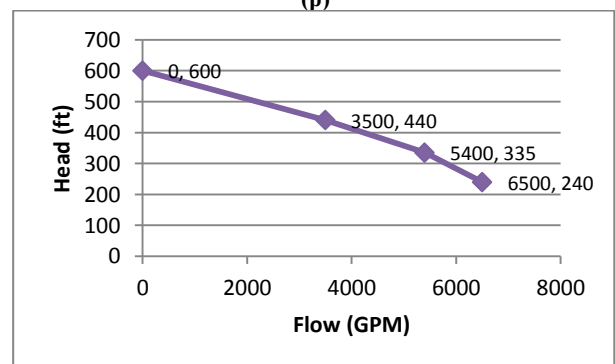
(α)



(β)

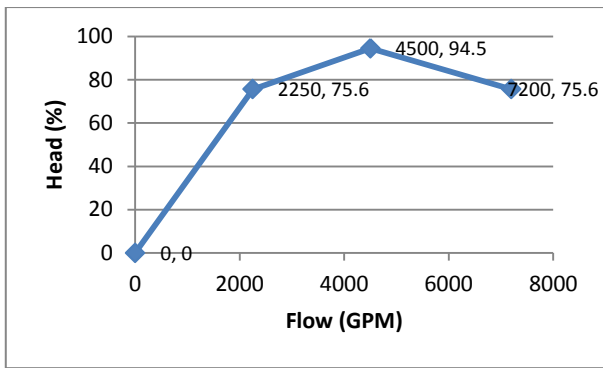


(γ)

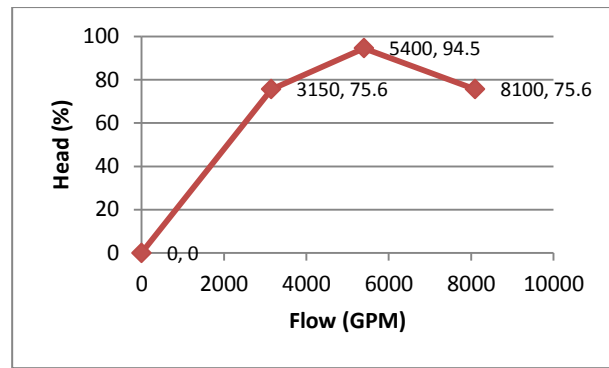


(δ)

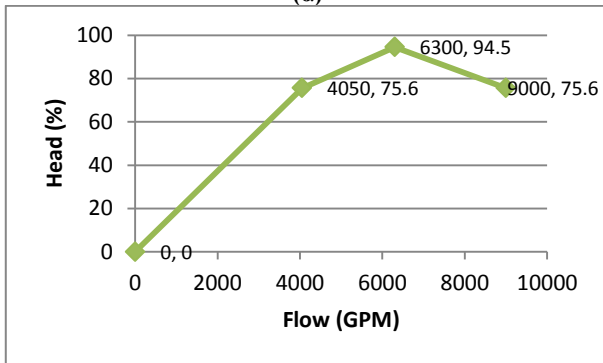
Σχήμα 6.3-Καμπύλες λειτουργίας των τεσσάρων αντλιών του δικτύου Anytown, (α) αντλία 38, (β) αντλία 39, (γ) αντλία 40, (δ) αντλία 41



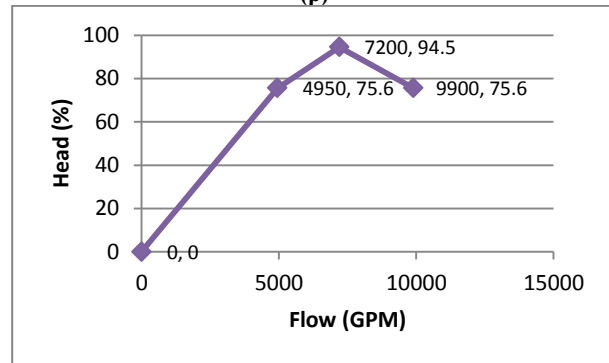
(α)



(β)

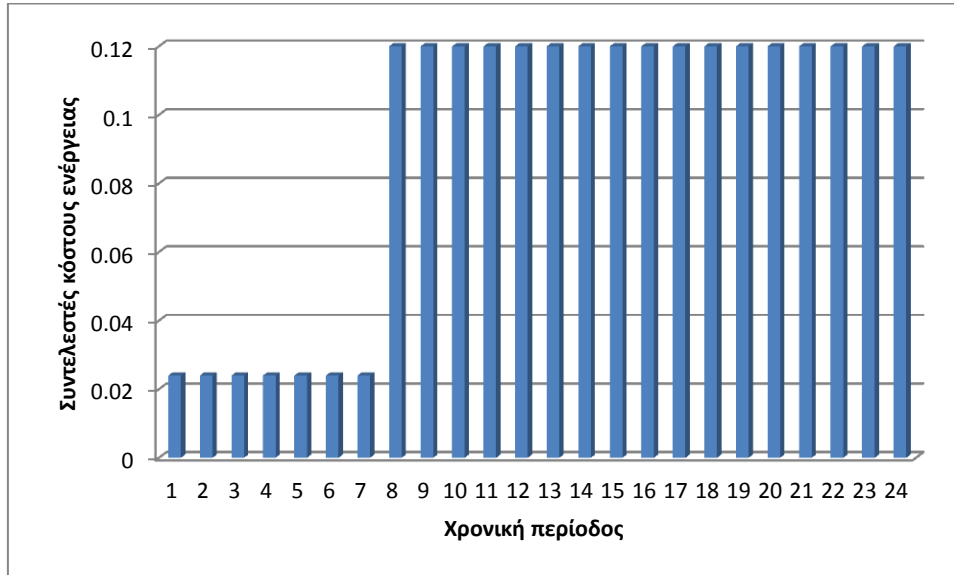


(γ)



(δ)

Σχήμα 6.4-Καμπύλες αποτελεσματικότητας των τεσσάρων αντλιών του δικτύου Anytown, (α) αντλία 38, (β) αντλία 39, (γ) αντλία 40, (δ) αντλία 41



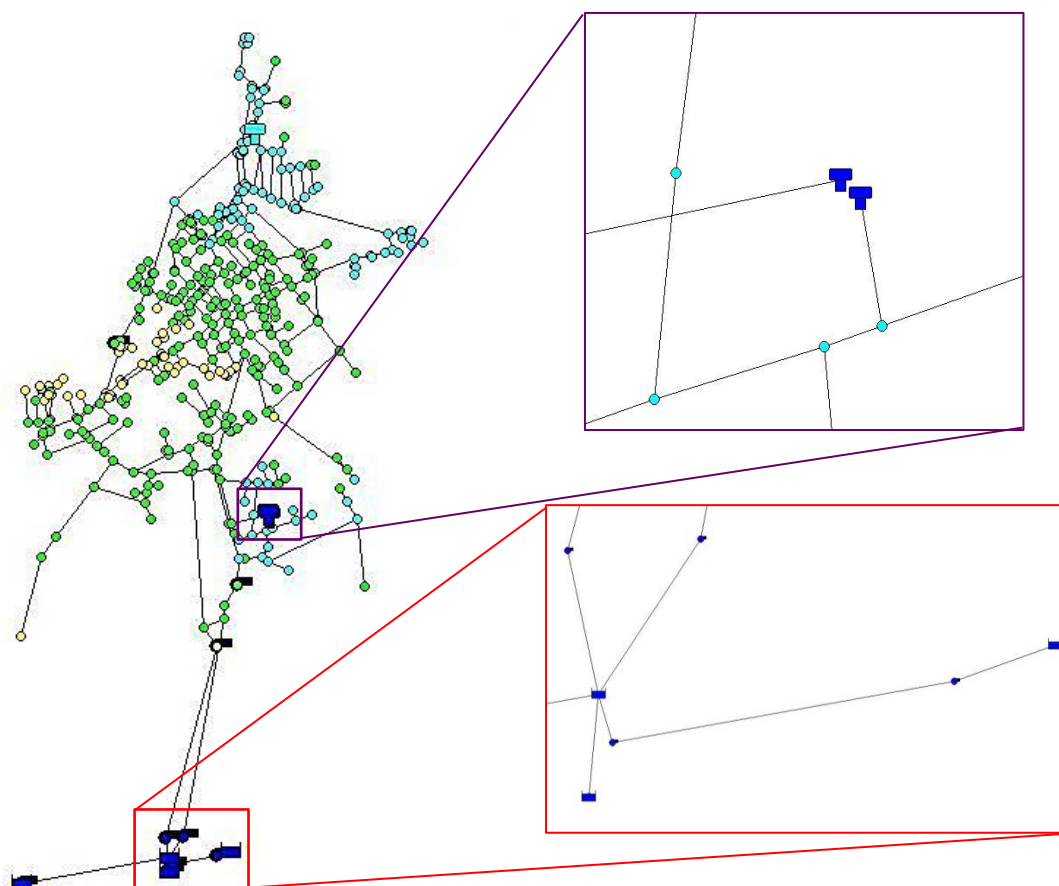
Σχήμα 6.5-Πρόγραμμα τιμών ενέργειας ανά ώρα του 24ώρου για το δίκτυο Anytown (pump tariff)

Όσον αφορά στη δεξαμενή και το ρεζερβουάρ του δικτύου τα στοιχεία τους είναι τα εξής:

- Το ρεζερβουάρ (20) έχει φορτίο 10 ft
- Η δεξαμενή αποθήκευσης (21) έχει υψόμετρο 215 ft, αρχική στάθμη 7 ft, ελάχιστη στάθμη 5 ft, μέγιστη στάθμη 60 ft και διάμετρο 40 ft.

6.1.2 Το δίκτυο ky5 Jolly 2013

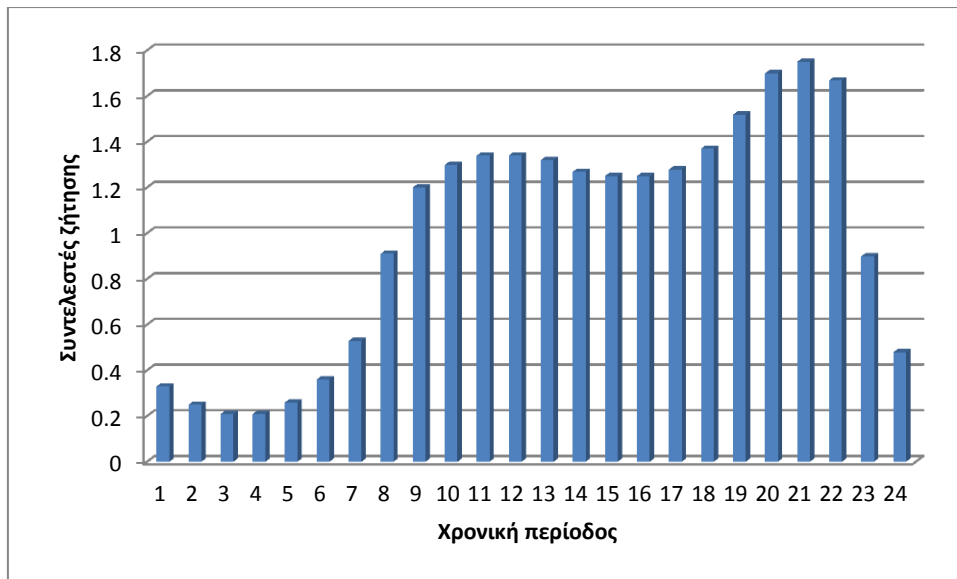
Το δίκτυο Ky5 Jolly 2013, αποτελείται από 401 κόμβους, 496 αγωγούς, 3 δεξαμενές αποθήκευσης, 4 ρεζερβουάρ και 11 αντλίες. Οι αντλίες 1, 7 και 7a συνδέονται με κόμβους, η 2 με το ρεζερβουάρ 2, η αντλία 3 με το ρεζερβουάρ 3 και την αντλία 5 η οποία με τη σειρά της συνδέεται με το ρεζερβουάρ 4. Η αντλία 4 συνδέεται με το ρεζερβουάρ 3, η αντλία 6 με το ρεζερβουάρ 1, όπως και η αντλία 8, ενώ οι αντλίες 9 και 9a συνδέονται με κόμβους και την αντλία 8. Τα προηγούμενα φαίνονται και στο Σχήμα 6.6 που ακολουθεί, το οποίο απεικονίζει το δίκτυο.



Σχήμα 6.6 - Δίκτυο ky5_Jolly2013 και λεπτομέρειές του

Το δίκτυο βασίζεται σε τμήμα του πραγματικού δικτύου διανομής νερού της πολιτείας του Κεντάκι στις ΗΠΑ. Ο σχεδιασμός του δικτύου επηρεάστηκε από την τοπογραφία της περιοχής και το οδικό δίκτυο, ενώ αποτελείται από ένα αριθμό μικρότερων βρόγχων, οι οποίοι συνδέονται είτε και τους κύριους αγωγούς είτε με άλλους αγωγούς του δικτύου (Jolly et al., 2014). Να σημειωθεί ότι οι ζητήσεις του δικτύου δεν είναι οι πραγματικές ούτε και ο ίδιος ο σχεδιασμός του.

Η βασική ζήτηση για κάθε κόμβο του δικτύου πολλαπλασιάζεται και σε αυτό το δίκτυο με μια σειρά συντελεστών, οι οποίοι καθορίζουν τη διακύμανσή της μέσα στο 24ωρο της προσομοίωσης. Οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7 - Χρονικό πρότυπο διακόμενης της ζήτησης για το δίκτυο ky5 Jolly 2013

Το δίκτυο αυτό δεν περιλαμβάνει καμπύλες λειτουργίας και αποτελεσματικότητας για τις αντλίες ούτε και πρότυπο κοστολόγησης της ενέργειας που καταναλώνουν οι αντλίες ανά ώρα της ημέρας. Συγκεκριμένα η ενέργεια κοστολογείται βάσει ενός διεθνούς προτύπου, το οποίο είναι το *ENRGI*. Επίσης κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από μια τιμή ισχύος σε Kw, η οποία υποδηλώνει ότι η αντλία καταναλώνει την ίδια ποσότητα ενέργειας ανεξάρτητα από την ποσότητα του νερού που αντλεί. Οι τιμές της ισχύος για κάθε αντλία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2 - Τιμές ισχύος για κάθε αντλία

Αντλία	Ισχύς (Kw)
1	25
2	250
3	185
4	50
5	50
6	75
7	100
8	75
9	100
7a	100
9a	100

Επίσης όσον αφορά τα στοιχεία των δεξαμενών και των ρεζερβουάρ του δικτύου, αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.3 και 6.4.

Πίνακας 6.3 - Στοιχεία δεξαμενών αποθήκευσης του δικτύου ky5_jolly2013

Δεξαμενή αποθήκευσης	Υψόμετρο (ft)	Αρχική στάθμη (ft)	Ελάχιστη στάθμη (ft)	Μέγιστη στάθμη (ft)	Διάμετρος (ft)
1	887.40	62.60	57.60	82.60	53
2	901.44	28.56	23.561	58.56	68
3	898.14	51.86	26.86	61.86	68

Πίνακας 6.4 - Στοιχεία ρεζερβουάρ του δικτύου ky5_jolly2013

Ρεζερβουάρ	Φορτίο (ft)
1	623.99
2	611.89
3	609.03
4	659.28

Τέλος σημειώνεται ότι το δίκτυο έχει αρχικούς ελέγχους λειτουργίας, οι οποίοι αφορούν τη λειτουργία των αντλιών 7, 7a, 9 και 9a σε σχέση με τη στάθμη του νερού στις δεξαμενές αποθήκευσης 1 και 3.

6.2 Βελτιστοποίηση του Δικτύου Anytown

Η ενέργεια που απαιτείται από τα δίκτυα είναι συνήθως αυτή που καταναλώνεται για τη λειτουργία των αντλιών. Συνεπώς για την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο πρόγραμμα λειτουργίας των αντλιών. Ουσιαστικά λοιπόν αυτό που βελτιστοποιείται για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας, είναι η λειτουργία των αντλιών του δικτύου.

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται αρχικά το λογισμικό PaVLOS που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και κάνει χρήση του προγράμματος EPANET. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται και ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab ο οποίος συνδέεται με το EPANET για την εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας των αντλιών με τελικό στόχο τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται από αυτές και κατά συνέπεια από το δίκτυο.

Επιπλέον εξετάζεται η περίπτωση ύπαρξης διαρροών στο δίκτυο με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους και τη μελέτη της τελικής επίδρασής τους στο κόστος λειτουργίας του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου γίνεται μόνο με το γενετικό αλγόριθμο του Matlab σε συνδυασμό και πάλι με το EPANET, καθώς το PaVLOS δε δίνει τη δυνατότητα βέλτιστης διαχείρισης των διαρροών σε ένα δίκτυο.

Όπως είναι φανερό η διαδικασία της βελτιστοποίησης αποτελείται από δύο κριτήρια:

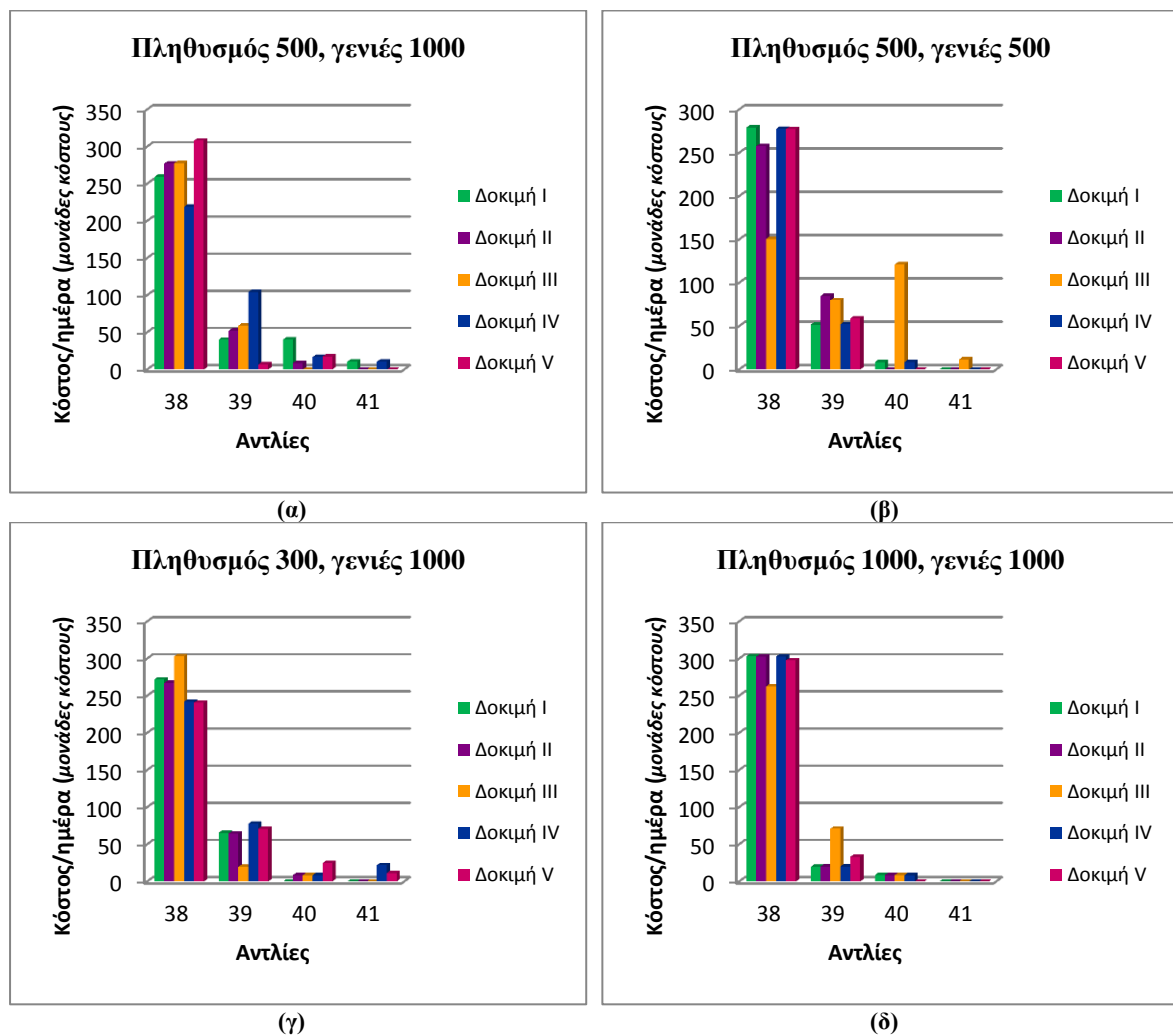
- της ελαχιστοποίησης της ενέργειας άντλησης ή αλλιώς του κόστους λειτουργίας του δικτύου και

- της ελαχιστοποίησης των διαρροών

Αρχικά λοιπόν γίνεται μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με κάθε ένα από τα δύο κριτήρια και στη συνέχεια εφαρμόζεται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με εφαρμογή και των δύο κριτηρίων ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση για την ελαχιστοποίηση του κόστους, πραγματοποιείται τόσο για δίκτυο χωρίς αλλά και με διαρροές. Η διαδικασία παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια και για τα δύο δίκτυα.

6.2.1 Ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης με το λογισμικό PaVLOS – δίκτυο χωρίς διαρροές

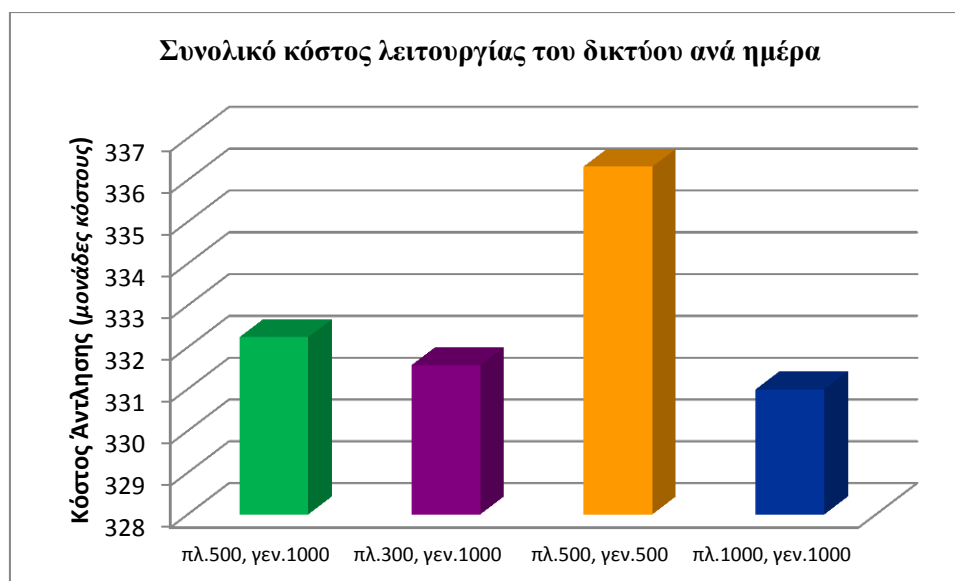
Αρχικά το δίκτυο Anytown βελτιστοποιείται με τη χρήση του προγράμματος PaVLOS για διαφορετικές τιμές πληθυσμού και γενιών, με μόνο περιορισμό την ελάχιστη πίεση του δικτύου η οποία επιλέχθηκε ίση με 20 m ή 28 psi. Το κάθε σενάριο βελτιστοποιείται 5 φορές ώστε να βρεθεί η ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Σε κάθε περίπτωση η λειτουργία των αντλιών αλλάζει, παρόλα αυτά σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι λειτουργούν κυρίως οι δύο από τις τέσσερις αντλίες του δικτύου. Το κόστος λειτουργίας των αντλιών προκύπτει σε μονάδες κόστους.



Σχήμα 6.8-Κόστος λειτουργίας ανά ημέρα των τεσσάρων αντλιών ανά σενάριο βελτιστοποίησης, (α) με πληθυσμό 500, γενιές 1000, (β) με πληθυσμό 500, γενιές 500, (γ) με πληθυσμό 300, γενιές 1000, (δ) με πληθυσμό 1000, γενιές 1000

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω σχήματα, για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνουν οι αντλίες προτιμάται η λειτουργία κυρίως της αντλίας 38, λιγότερο της 39 και από λίγο έως καθόλου η λειτουργία των άλλων δύο αντλιών.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή κάθε σεναρίου βελτιστοποίησης, για το συνολικό κόστος λειτουργίας του δικτύου σε ένα 24ωρο. Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο ελάχιστο κόστος λειτουργίας προκύπτει για πληθυσμό και γενιές ίσες με 500, ενώ το ελάχιστο για πληθυσμό και γενιές 1000, με τιμή 330.99 μονάδες κόστους.



Σχήμα 6.9-Ελάχιστο συνολικό κόστος λειτουργίας του δικτύου για κάθε σενάριο βελτιστοποίησης

6.2.2 Ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab – Δίκτυο χωρίς διαρροές

Για το σκοπό αυτής της εργασίας, έγινε χρήση και του γενετικού αλγορίθμου του λογισμικού Matlab. Το Matlab συνδέεται με το λογισμικό EPANET το οποίο επιλύει υδραυλικά το δίκτυο και υπολογίζει το βέλτιστο κόστος άντλησης.

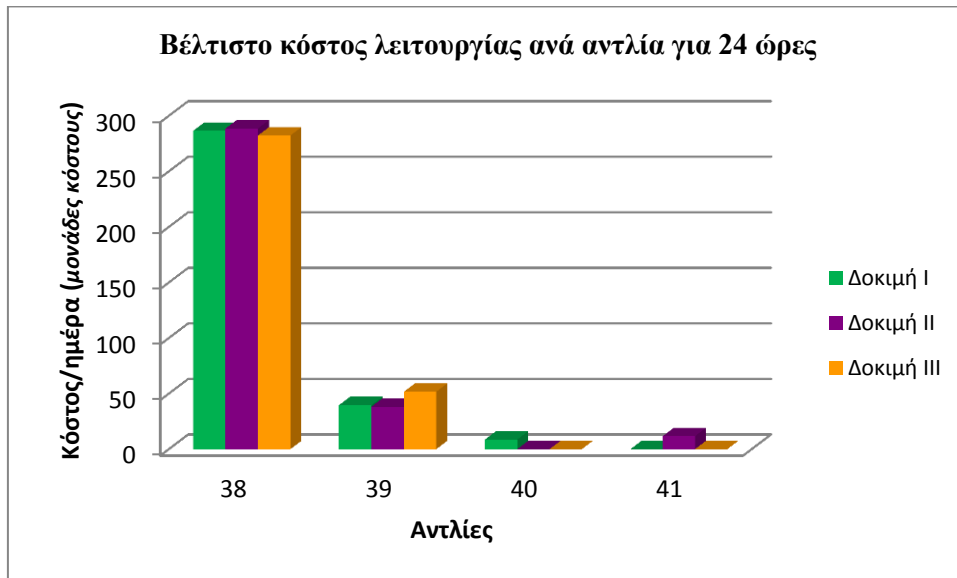
Για την εφαρμογή αυτής της βελτιστοποίησης, αν και θεωρήθηκε σκόπιμο η επιβολή περιορισμού για το άνω όριο της πίεσης του δικτύου, καθώς είχε παρατηρηθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις η πίεση ήταν αρκετά υψηλή, δεν εφαρμόστηκε. Αυτό έγινε για δύο λόγους, πρώτον για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του PaVLOS, καθώς σε αυτό το λογισμικό δεν υπάρχει περιορισμός μέγιστης πίεσης, και δεύτερον γιατί όταν έγινε προσπάθεια επιβολής άνω ορίου μετά τη βελτιστοποίηση το όριο αυτό παραβιαζόταν πολλές ώρες της ημέρας, με το κόστος να προκύπτει τελικά πολύ υψηλό.

Επιπλέον περιορισμοί που επιβάλλονται για τη βελτιστοποίηση, είναι αυτοί που αναφέρθηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.

Για τη συγκεκριμένη διαδικασία επιλέχθηκε πληθυσμός 1000 και γενιές 300, καθώς από διάφορες δοκιμές που έγιναν διαπιστώθηκε ότι για μεγαλύτερο αριθμό γενιών ο

υπολογιστικός χρόνος ήταν πολύ μεγάλος, καθώς επίσης παρατηρήθηκε ότι μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό γενιών η βέλτιστη λύση δεν άλλαζε. Επιπλέον, αποφασίστηκε ότι είναι προτιμότερος ο μεγαλύτερος αριθμός πιθανών λύσεων, καθώς διευρύνεται η δυνατότητα επιλογής της βέλτιστης.

Έτσι έγιναν τρεις δοκιμές για πληθυσμό 1000 και γενιές 300. Τα αποτελέσματα φαίνονται στη συνέχεια.



Σχήμα 6.10 – Βέλτιστο κόστος λειτουργίας ανά ημέρα των τεσσάρων αντλιών με χρήση του γενετικού αλγόριθμου του Matlab

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.10, και όμοια με τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό PaVLOS, λειτουργεί κυρίως η αντλία 38, λιγότερο η 39 και ελάχιστα έως καθόλου οι 40 και 41.

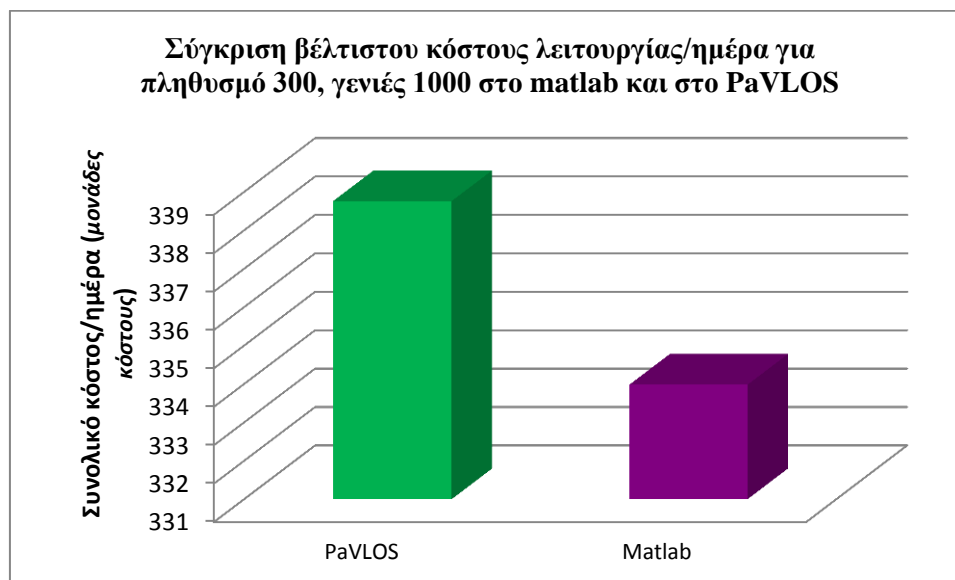
Η μικρότερη ελάχιστη τιμή ενέργειας από αυτή τη διαδικασία προέκυψε ίση με 333.98 μονάδες κόστους για μια ημέρα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί. Αυτή η βέλτιστη τιμή ενέργειας λειτουργίας προέκυψε για την τελευταία δοκιμή όπου λειτουργούν οι αντλίες 38 και 39 και καθόλου οι άλλες δύο.

Πίνακας 6.5 - Βέλτιστο κόστος άντλησης ανά ημέρα με χρήση του γενετικού αλγορίθμου του Matlab

Κόστος άντλησης ανά ημέρα (μ.κ.)			
Αντλίες	Δοκιμή I	Δοκιμή II	Δοκιμή III
38	286.5	288.59	282.27
39	39.69	38.29	51.71
40	8.65	0	0
41	0	11.68	0
Σύνολο	334.84	338.56	333.98

Στο σημείο αυτό θεωρήθηκε απαραίτητο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του PaVLOS και του Matlab. Για να διαπιστωθεί ποιά βελτιστοποίηση από τις δύο έφερε τα καλύτερα

αποτελέσματα, δηλαδή το χαμηλότερο βέλτιστο κόστος λειτουργίας ανά ημέρα, έγινε βελτιστοποίηση του δικτύου και με το λογισμικό PaVLOS, για τον ίδιο αριθμό πληθυσμού και γενιών. Η σύγκριση έγινε για τις μικρότερες τιμές του βέλτιστου κόστους που προέκυψε από τις επαναλήψεις των δύο βελτιστοποιήσεων, οι οποίες είναι 333.98 μ.κ. για το Matlab και 338.76 μονάδες κόστους για το PaVLOS. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11 που ακολουθεί:



Σχήμα 6.11 - Σύγκριση βέλτιστου κόστους λειτουργίας ανά ημέρα για πληθυσμό 1000 και γενιές 300, στο Matlab και το PaVLOS

Παρατηρείται ότι το συνολικό βέλτιστο κόστος άντλησης ανά ημέρα λειτουργίας του δικτύου, προκύπτει χαμηλότερο για την περίπτωση της βελτιστοποίησης με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab σε σχέση με τη βελτιστοποίηση του PaVLOS. Θεωρείται λοιπόν ότι ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στη διαδικασία της βελτιστοποίησης και κατά συνέπεια από εδώ και στο εξής χρησιμοποιείται μόνο αυτός.

6.2.3 Βελτιστοποίηση διαρροών

Σε αυτό το στάδιο γίνεται βελτιστοποίηση του δικτύου Anytown με την ύπαρξη διαρροών. Ο καθορισμός των διαρροών γίνεται με την εισαγωγή ενός συντελεστή (emitter coefficient) σε συγκεκριμένους κόμβους του δικτύου. Ο συντελεστής αυτός καθορίζει τη ροή στον κόμβο για πτώση πίεσης κατά 1 psi ή 1 m (EPA, 2000). Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή αυτού είναι $\rho\dot{q} / \text{psi}^{1/2}$.

Η διαρροή ενσωματώνεται στη ζήτηση των κόμβων και δεν αντιμετωπίζεται χωριστά από το EPANET, ενώ μεταβάλλεται ανάλογα με τη διακύμανση της πίεσης στο δίκτυο.

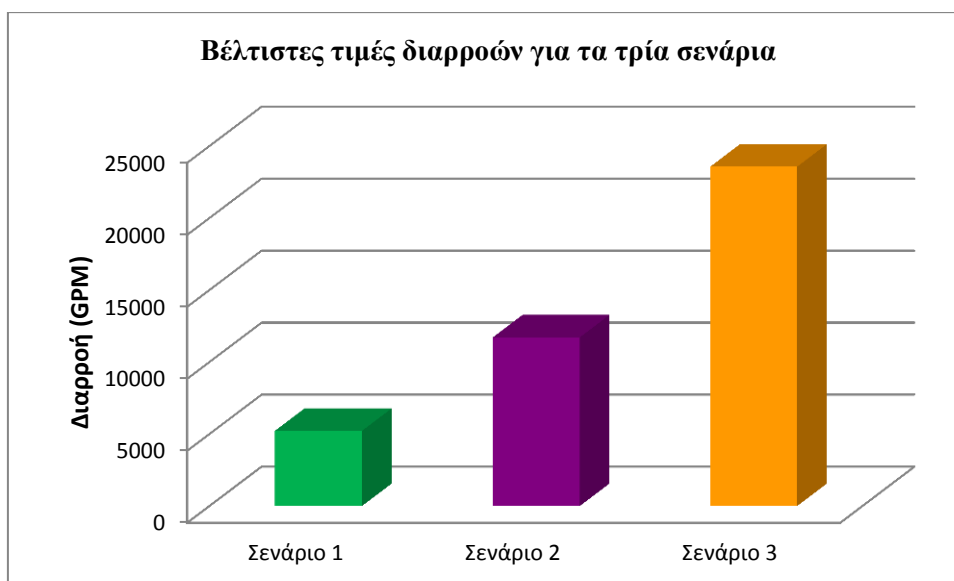
Για το συγκεκριμένο δίκτυο εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια διαρροών:

- *Σενάριο 1*: επιλέχθηκε να υπάρχουν διαρροές στους 13 από τους 19 κόμβους του δικτύου με συντελεστή διαρροής 2. Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες αποτελούν το 7.5% περίπου της συνολικής ζήτησης.
- *Σενάριο 2*: επιλέχθηκε να υπάρχουν διαρροές και στους 19 κόμβους του δικτύου με συντελεστή διαρροής ίσο με 3. Σε αυτή την περίπτωση οι διαρροές αποτελούν το 15% περίπου της συνολικής ζήτησης.
- *Σενάριο 3*: επιλέχθηκε να υπάρχει διαρροή και πάλι στους 19 κόμβους του δικτύου με συντελεστή 6. Σε αυτή την περίπτωση οι διαρροές φτάνουν το 27% περίπου της συνολικής ζήτησης.

Για κάθε περίπτωση βελτιστοποίησης έγιναν τρεις επαναλήψεις ώστε να προκύψει η ελάχιστη δυνατή τιμή διαρροών. Η διαδικασία έγινε με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, με πληθυσμό 1000 και γενιές 200. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στο Σχήμα 6.12:

Πίνακας 6.6 - Βέλτιστες τιμές διαρροών για τα τρία σενάρια και το δίκτυο Anytown

Σενάριο Διαρροής	Βέλτιστη τιμή διαρροής (GPM)
1	5219.36
2	11710.49
3	23567.81



Σχήμα 6.12 - Βέλτιστες τιμές διαρροών για συντελεστή 2 σε 13 κόμβους και συντελεστή 3 και 5 σε 19 κόμβους

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12 και όπως είναι αναμενόμενο, οι απώλειες αυξάνονται με την αύξηση του συντελεστή διαρροής. Συγκεκριμένα οι διαρροές με τον συντελεστή 6 είναι πέντε φορές μεγαλύτερες σε σχέση με τις διαρροές με τον συντελεστή 2.

6.2.4 Βελτιστοποίηση ενέργειας άντλησης στο δίκτυο με διαρροές

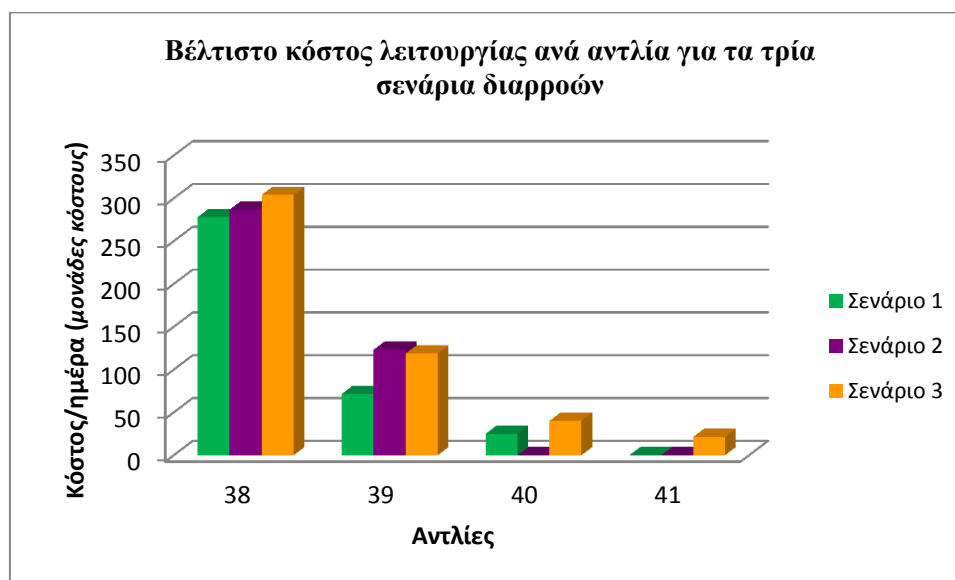
Σε αυτό το στάδιο γίνεται βελτιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται για την άντληση στο δίκτυο για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διαρροών που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση δε βελτιστοποιούνται οι διαρροές του δικτύου αλλά μόνο η ενέργεια που καταναλώνεται για την άντληση, ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση με την ύπαρξη των απωλειών.

Για κάθε σενάριο διαρροών η βελτιστοποίηση επαναλαμβάνεται 3 φορές για την εύρεση της ελάχιστης δυνατής ενέργειας. Η διαδικασία έγινε με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab για πληθυσμό 1000 και γενιές 300. Στον πίνακα και τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Πίνακας 6.7 – Βελτιστοποίηση ενέργειας άντλησης για τα τρία σενάρια διαρροών στο δίκτυο Anytown

Αντλίες	Κόστος/ημέρα (μ.κ.)		
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
38	278.18	286.97	304.04
39	71.57	123.37	118.94
40	25.09	0	40.21
41	0	0	21.32
Σύνολο	374.84	410.34	484.51



Σχήμα 6.13 - Βέλτιστο κόστος λειτουργίας ανά αντλία για τα τρία σενάρια διαρροών

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 6.13 και στην περίπτωση που το δίκτυο έχει διαρροές λειτουργεί περισσότερο η αντλία 38, λιγότερο η 39 και από ελάχιστα έως καθόλου οι άλλες δύο, ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο με την περίπτωση της βελτιστοποίησης της ενέργειας του δικτύου χωρίς διαρροές. Παρόλα αυτά μπορεί να παρατηρηθεί ότι στο

τρίτο σενάριο οι αντλίες 40 και 41 λειτουργούν περισσότερο σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια.



Σχήμα 6.14 - Συνολικό βέλτιστο κόστος λειτουργίας του δικτύου ανά ημέρα για τα τρία διαφορετικά σενάρια διαρροών

Όπως είναι αναμενόμενο το βέλτιστο κόστος λειτουργίας αυξάνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής διαρροών και κατά συνέπεια οι ίδιες οι διαρροές του δικτύου. Συγκεκριμένα στο δεύτερο σενάριο το κόστος λειτουργίας είναι αυξημένο κατά 9% και στο τρίτο κατά 29% σε σχέση με το πρώτο σενάριο που έχει το μικρότερο βέλτιστο κόστος λειτουργίας το οποίο είναι ίσο με 374.84 μονάδες.

Μια επιπλέον παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι σε σχέση με το δίκτυο χωρίς διαρροές και για τη βελτιστοποίηση με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, το συνολικό βέλτιστο κόστος άντλησης για ένα 24ωρο για το πρώτο σενάριο διαρροών είναι περίπου 40 μονάδες μεγαλύτερο, δηλαδή παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 11%, για το δεύτερο σενάριο διαρροών είναι κατά 76 μονάδες μεγαλύτερο, με την αύξηση να αγγίζει το 23% και για το τρίτο σενάριο διαρροών είναι κατά 150 μονάδες πιο αυξημένο, με το ποσοστό της αύξησης να φτάνει το 44%.

Αυτό υποδηλώνει ότι στην περίπτωση διαρροών σε ένα δίκτυο και για να καλυφθεί η ζήτηση, η βέλτιστη λειτουργία των αντλιών και κατά συνέπεια το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του δικτύου αυξάνεται σε σχέση με την απουσία διαρροών σε αυτό. Το εύλογο συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι αν αυτές οι διαρροές φτάσουν ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό τότε μπορεί να γίνει αντιοικονομική η λειτουργία του δικτύου και κατά συνέπεια η επισκευή του να είναι απαραίτητη.

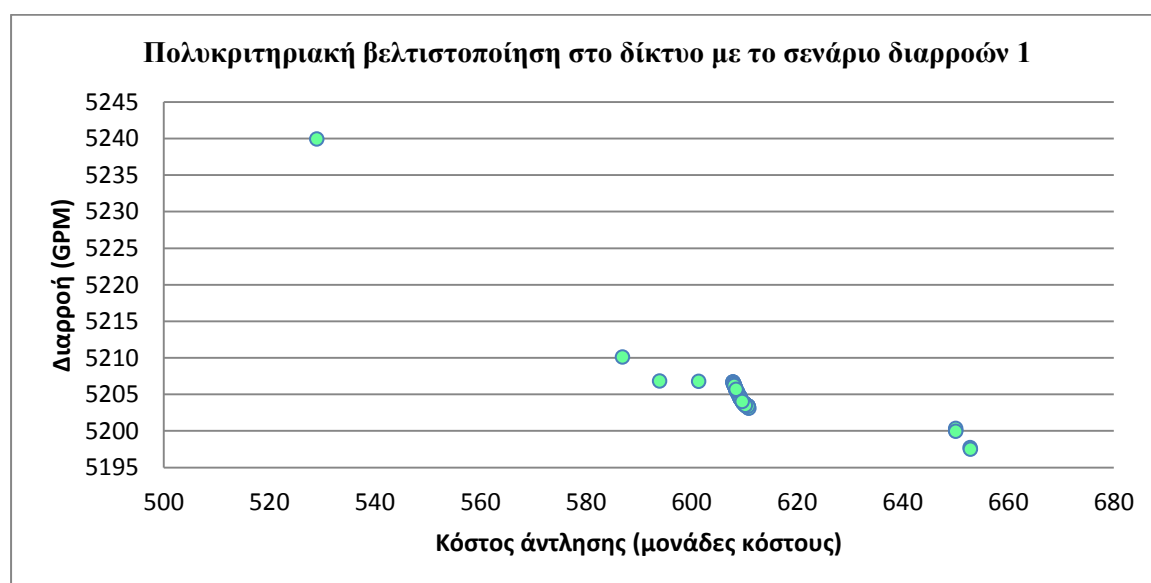
6.2.5 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο Anytown

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τα τρία σενάρια διαρροών που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα δύο κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι τα δύο προηγούμενα για τα οποία έγιναν οι μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις, δηλαδή η

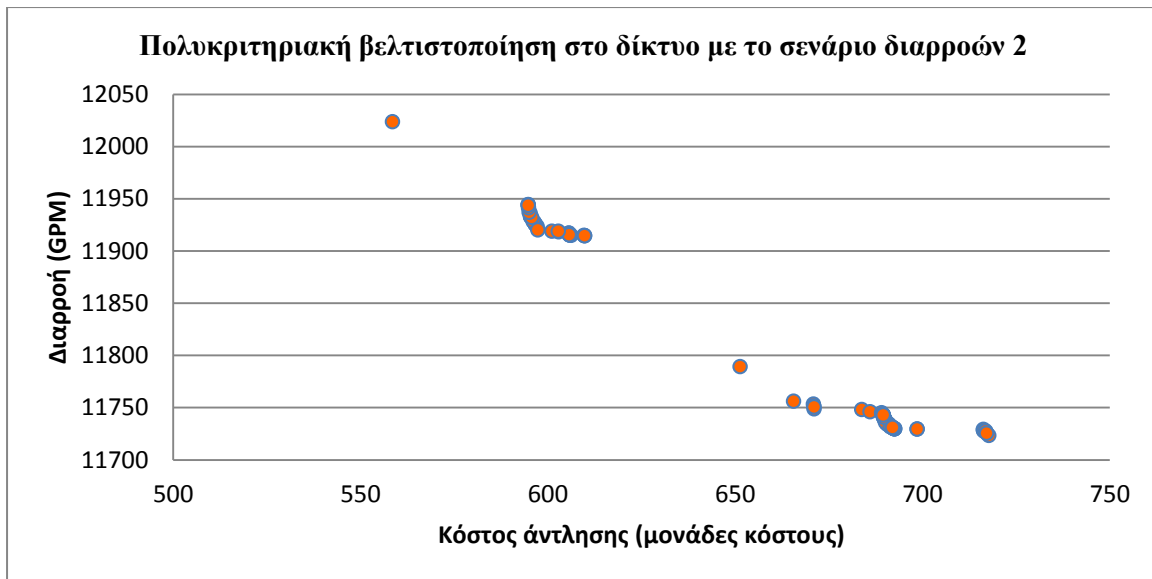
ελαχιστοποίηση του κόστους και η ελαχιστοποίηση των διαρροών. Στόχος είναι η ταυτόχρονη μείωση των δύο κριτηρίων/συνιστωσών της στοχικής συνάρτησης και η εύρεση των βέλτιστων λύσεων.

Όπως είναι ήδη γνωστό κατά την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση δεν προκύπτει μια τιμή αλλά ένα σύνολο τιμών, με κάποιες από αυτές να αποτελούν τα μέτωπα Pareto, στα οποία όλες οι λύσεις είναι ισάξιες και είναι αδύνατο να συγκριθούν μεταξύ τους. Συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της βελτιστοποίησης, μια λύση είναι βέλτιστη κατά τον Pareto αν και μόνο αν είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο οι υπόλοιπες λύσεις για όλα τα κριτήρια – στόχους και αν είναι καλύτερη από όλες τις άλλες λύσεις σε τουλάχιστον ένα κριτήριο – στόχο. Κατά συνέπεια σε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μπορεί να υπάρχει μόνο μια κυρίαρχη λύση αλλά πολλές μη κυριαρχούμενες, οι οποίες αποτελούν το σύνολο Pareto.

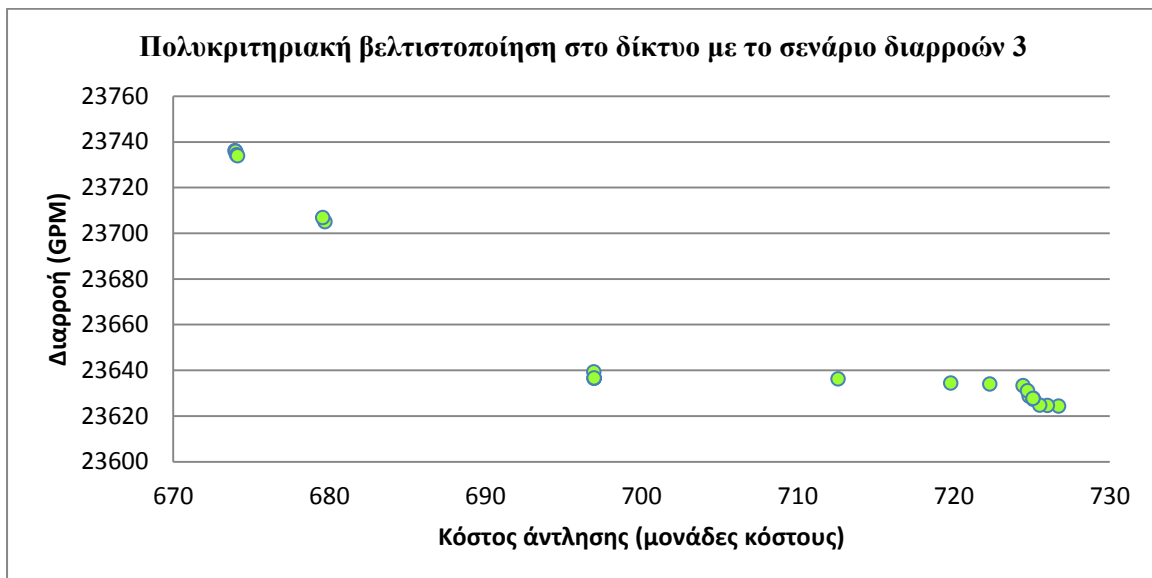
Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για κάθε σενάριο διαρροών παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 6.15 - Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για το δίκτυο Anytown με το σενάριο διαρροών 1



Σχήμα 6.16 - Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο Anytown με το σενάριο διαρροών 2



Σχήμα 6.17 - Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο Anytown με το σενάριο διαρροών 3

Στον επόμενο πίνακα συγκεντρώθηκαν και για τα τρία σενάρια οι τιμές του ελάχιστου κόστους λειτουργίας και των ελάχιστων διαρροών από τις μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις για τα δύο κριτήρια και από την πολυκριτηριακή, χωρίς να αποτελούν απαραίτητα ζεύγος λύσης, ώστε να συγκριθούν σαν απόλυτες τιμές.

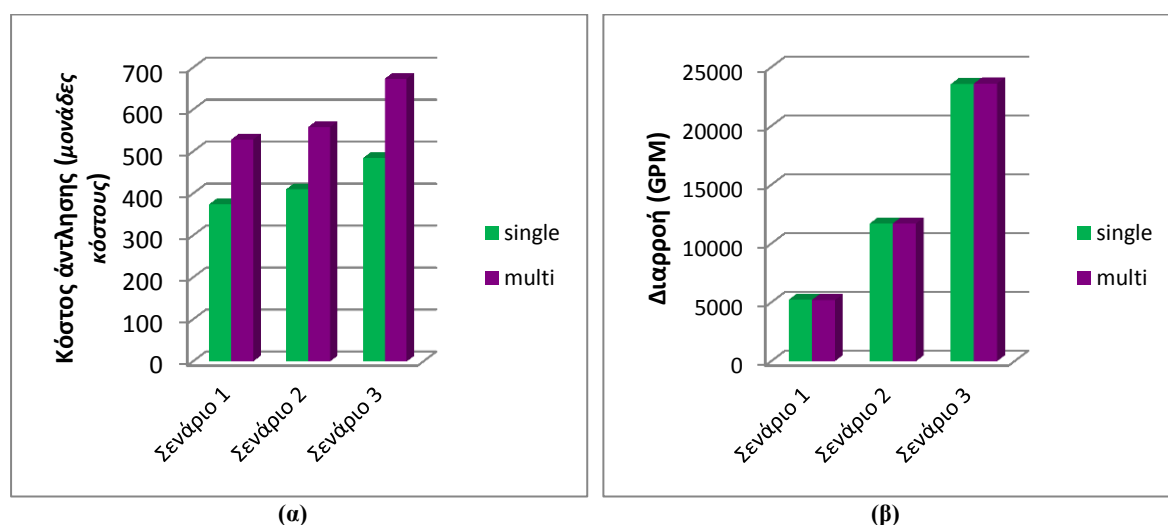
Πίνακας 6.8 - Βέλτιστες τιμές των δύο κριτηρίων στη μονοκριτηριακή και την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τα τρία σενάρια διαρροών

Κριτήρια	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	Μονο-κριτηριακή	Πολύ-κριτηριακή	Μονο-κριτηριακή	Πολύ-κριτηριακή	Μονο-κριτηριακή	Πολύ-κριτηριακή
Βέλτιστο Κόστος (μ.κ.)	374.84	529.02	410.34	558.58	484.51	673.95
Βέλτιστες Διαρροές (GPM)	5219.36	5197.50	11710.49	11723.20	23567.81	23624.21

Όπως παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις διαρροών, το ελάχιστο κόστος στην πολυκριτηριακή προκύπτει μεγαλύτερο σε σχέση με τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς πρέπει να συνδυαστούν ταυτόχρονα τα δύο κριτήρια.

Αντίστοιχα, οι διαφορές στις ελάχιστες διαρροές για τις τρεις βελτιστοποιήσεις είναι μικρές. Παρόλα αυτά στην περίπτωση του δικτύου με συντελεστή διαρροής 2 (σενάριο 1) προκύπτει χαμηλότερη ελάχιστη διαρροή στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση σε σχέση με τη μονοκριτηριακή, κάτι που δε συμβαίνει για τα άλλα δύο σενάρια, όπου οι διαρροές στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι λίγο μεγαλύτερες.

Τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται και στο Σχήμα 6.18 που ακολουθεί.



Σχήμα 6.18 - Ελάχιστη τιμή (α) κόστους και (β) διαρροών στη μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τα τρία σενάρια διαρροών στο δίκτυο Anytown

6.3 Βελτιστοποίηση του Δικτύου ky5 Jolly 2013

Όμοια με το δίκτυο Anytown πραγματοποιείται και για το παρόν δίκτυο η διαδικασία της βελτιστοποίησης για τα δύο κριτήρια, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία. Η μόνη διαφορά είναι ότι σε αυτό το δίκτυο δε χρησιμοποιείται το λογισμικό PaVLOS για τη βελτιστοποίηση της ενέργειας άντλησης.

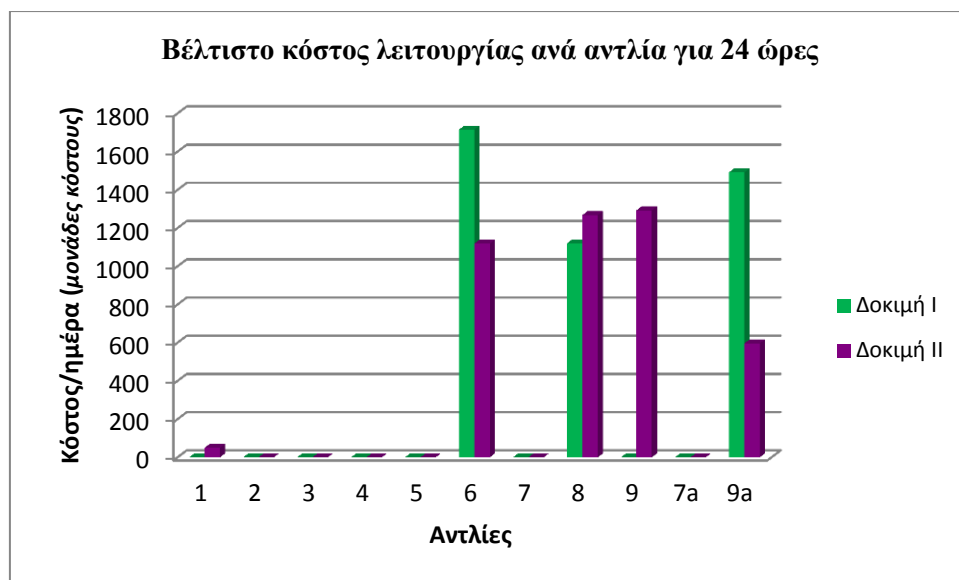
Όλα τα είδη των βελτιστοποιήσεων πραγματοποιούνται με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, για πληθυσμό 1000 και 300 γενιές. Λόγω του όγκου του δικτύου και συνεπώς του μεγάλου χρόνου που απαιτείται για τη βελτιστοποίηση, η κάθε διαδικασία επαναλαμβάνεται δύο αντί για τρεις φορές.

6.3.1 Ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab – Δίκτυο χωρίς διαρροές

Αρχικά το δίκτυο βελτιστοποιείται για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνουν οι 11 αντλίες του. Σε αυτό το στάδιο το δίκτυο δεν παρουσιάζει διαρροές. Η βελτιστοποίηση γίνεται, όπως ήδη αναφέρθηκε, με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, αφού συνδέθηκε με το EPANET το οποίο επιλύει υδραυλικά το δίκτυο.

Οι περιορισμοί του τίθενται για την σωστή λειτουργία του δικτύου είναι ίδιοι με την περίπτωση του Anytown και οι «ποινές» επίσης ίδιες. Και σε αυτή την περίπτωση δεν τίθεται άνω όριο στις πιέσεις καθώς δεν παραβιάζονται σε κανένα στάδιο της ημέρας.

Η διαδικασία πραγματοποιείται για πληθυσμό 1000 και γενιές 300, και στο Σχήμα 6.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 6.19 - Βέλτιστο κόστος λειτουργίας ανά αντλία για 24 ώρες με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, για το δίκτυο ky5 Jolly 2013

Όπως παρατηρείται στην πρώτη δοκιμή λειτουργούν μόνο οι τρεις αντλίες από τις 11 (οι 6, 8 και 9a) και στη δεύτερη λειτουργούν οι 6, 8, 9 και 9a και ελάχιστα η 1. Παρόλα αυτά το συνολικό βέλτιστο κόστος λειτουργίας είναι σχεδόν ίδιο και στις δύο περιπτώσεις, με ελάχιστα πιο μικρό να προκύπτει στη δεύτερη δοκιμή, όπως παρουσιάζεται και στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.9 - Βέλτιστο κόστος άντλησης ανά ημέρα για τις δύο δοκιμές

Κόστος άντλησης ανά ημέρα (μ.κ.)		
Αντλίες	Δοκιμή I	Δοκιμή II
1	0	49.71
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	1715.11	1118.56
7	0	0
8	1119.56	1267.77
9	0.41	1292.55
7a	0	0
9a	1491.81	596.58
Σύνολο	4326.89	4325.17

Συνεπώς θεωρείται ότι το βέλτιστο κόστος λειτουργίας του δικτύου είναι 4325.17 μονάδες κόστους με τις 4 από τις 11 αντλίες σε λειτουργία.

6.3.2 Βελτιστοποίηση διαρροών

Σε αυτό το στάδιο γίνεται βελτιστοποίηση του δικτύου Ky5 Jolly 2013 με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των διαρροών. Όμοια με το δίκτυο Anytown, γίνεται εισαγωγή ενός συντελεστή διαρροής σε επιλεγμένους κόμβους του δικτύου.

Η διαρροή όπως έχει ήδη αναφερθεί ενσωματώνεται στη ζήτηση των κόμβων και δεν αντιμετωπίζεται χωριστά από το EPANET.

Στην περίπτωση του δικτύου ky5 Jolly 2013 εξετάστηκαν δυο διαφορετικά σενάρια διαρροών:

- *Σενάριο 1:* επιλέχθηκε να υπάρχουν διαρροές στους 44 από τους 401 κόμβους του δικτύου με συντελεστή διαρροής 1. Σε αυτή την περίπτωση οι διαρροές αποτελούν το 18% περίπου της συνολικής ζήτησης.
- *Σενάριο 2:* επιλέχθηκε να υπάρχουν διαρροές στους 39 από τους 401 κόμβους του δικτύου με συντελεστή διαρροής ίσο με 2. Σε αυτή την περίπτωση οι διαρροές αποτελούν το 28% περίπου της συνολικής ζήτησης.

Για κάθε περίπτωση βελτιστοποίησης γίνονται δύο επαναλήψεις ώστε να προκύψει η ελάχιστη δυνατή τιμή διαρροών. Η διαδικασία έγινε με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab, με πληθυσμό 1000 και γενιές 300. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στον Πίνακα 6.10 και στο Σχήμα 6.20.

Πίνακας 6.10 - Βέλτιστη τιμή διαρροής για το κάθε σενάριο του δικτύου ky5 Jolly 2013

Σενάριο Διαρροών	Βέλτιστη τιμή Διαρροής (GPM)
1	8303.58
2	14715.34



Σχήμα 6.20 - Βέλτιστες τιμές διαρροής για τα δύο σενάρια του δικτύου ky5 Jolly 2013

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20, και όπως είναι αναμενόμενο, οι απώλειες αυξάνονται με την αύξηση του συντελεστή διαρροής. Συγκεκριμένα οι διαρροές με τον συντελεστή 2 είναι περίπου διπλάσιες σε σχέση με τις διαρροές με τον συντελεστή 1.

6.3.3 Βελτιστοποίηση ενέργειας άντλησης στο δίκτυο με διαρροές

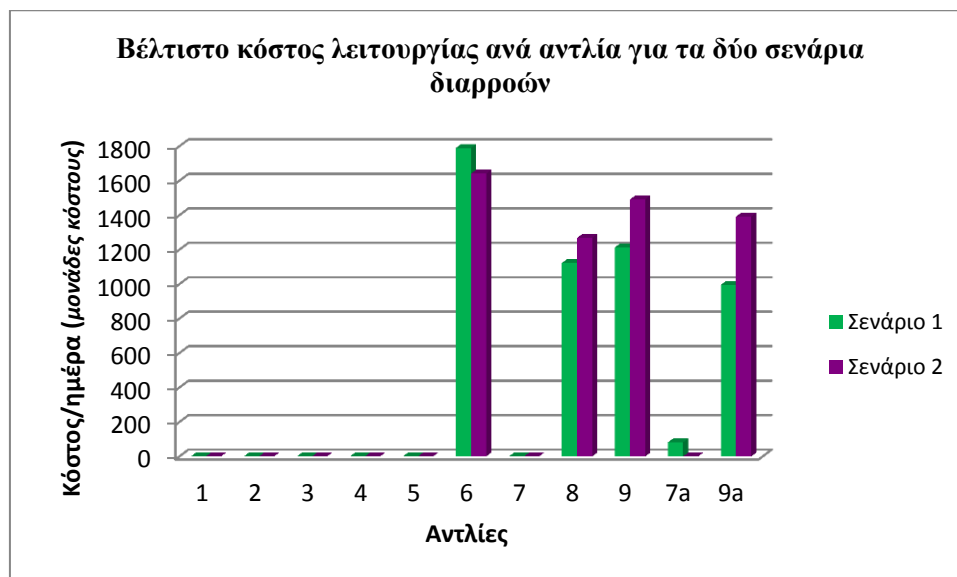
Σε αυτό το στάδιο γίνεται βελτιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται για την άντληση στο δίκτυο για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις διαρροών που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης δεν πραγματοποιείται για την ελαχιστοποίηση των διαρροών αλλά για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται για την άντληση, ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση με την ταυτόχρονη ύπαρξη των απωλειών.

Για κάθε σενάριο διαρροών η βελτιστοποίηση επαναλαμβάνεται 2 φορές για την εύρεση της ελάχιστης δυνατής ενέργειας. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τον γενετικό αλγόριθμο του Matlab για πληθυσμό 1000 και γενιές 300. Στον πίνακα και τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση κάθε σεναρίου.

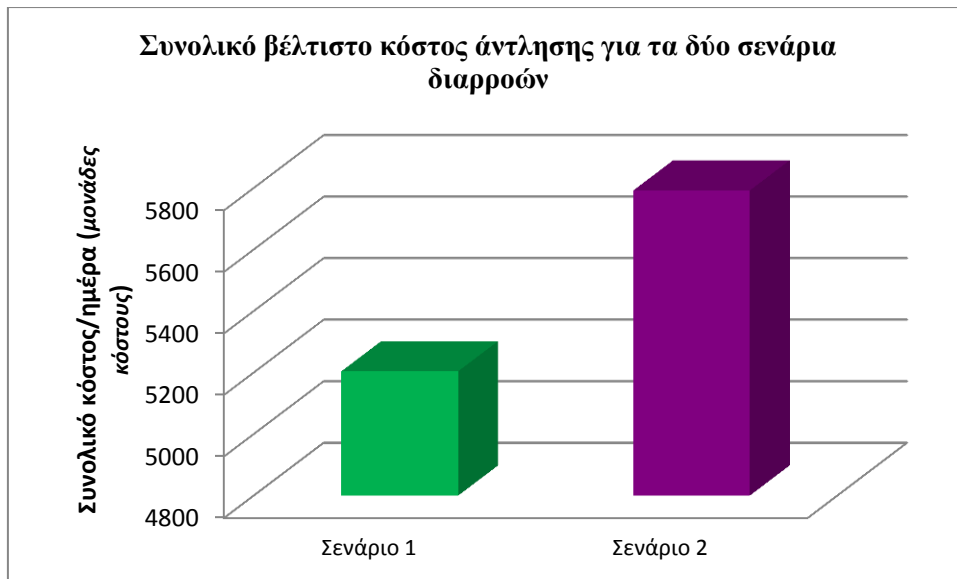
Πίνακας 6.11 - Βελτιστοποίηση ενέργειας άντλησης για τα δύο σενάρια διαρροών στο δίκτυο ky5 Jolly 2013

Βέλτιστο κόστος άντλησης ανά ημέρα (μ.κ.)		
Αντλίες	Σενάριο 1	Σενάριο 2
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	1789.68	1640.54
7	0	0
8	1122.9	1267.83
9	1213.29	1491.58
7a	81.91	0
9a	996.33	1391.97
Σύνολο	5204.11	5791.92



Σχήμα 6.21 - Βέλτιστο κόστος λειτουργίας ανά αντλία για τα δύο σενάρια διαρροών του δικτύου ky5 Jolly 2013

Και στα δύο σενάρια διαρροών λειτουργούν οι αντλίες 6, 8, 9 και 9a, με μόνη εξαίρεση το δεύτερο σενάριο που λειτουργεί ελάχιστα και η αντλία 7a. Η λειτουργία των αντλιών στο δίκτυο με την ύπαρξη διαρροών και χωρίς αυτές είναι πολύ κοντά, δηλαδή λειτουργούν κυρίως οι αντλίες που προαναφέρθηκαν, με κάποιες μικρές εξαιρέσεις αντλιών οι οποίες όμως έχουν πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας.



Σχήμα 6.22 - Συνολικό βέλτιστο κόστος λειτουργίας του δικτύου ανά ημέρα για τα δύο διαφορετικά σενάρια διαρροών του δικτύου ky5 Jolly 2013

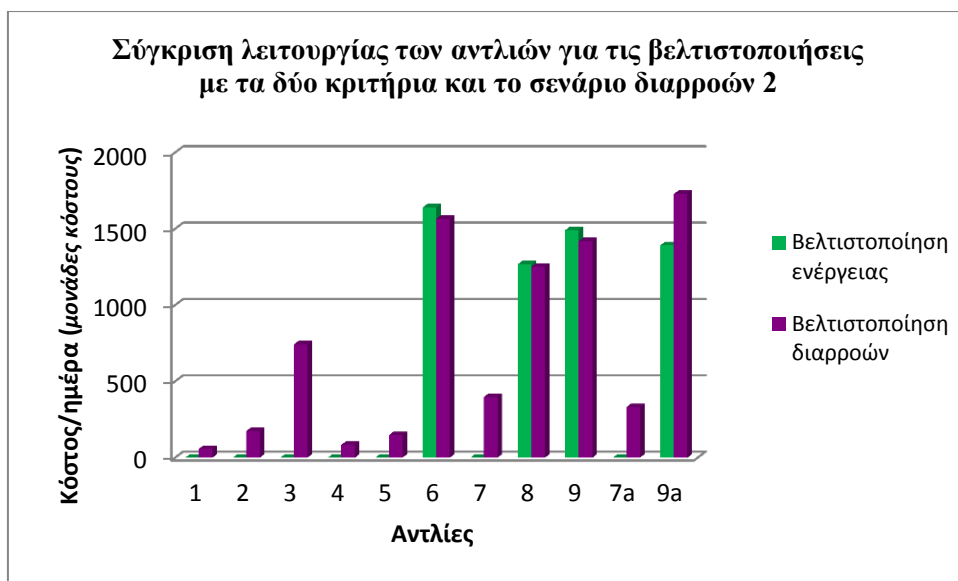
Όπως είναι αναμενόμενο το βέλτιστο κόστος λειτουργίας αυξάνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής διαρροών και κατά συνέπεια οι ίδιες οι διαρροές του δικτύου. Συγκεκριμένα στο δεύτερο σενάριο το κόστος λειτουργίας είναι αυξημένο κατά 11% σε σχέση με το πρώτο σενάριο που έχει το μικρότερο βέλτιστο κόστος λειτουργίας το οποίο είναι ίσο με 5204.11 μονάδες.

Συγκριτικά με το δίκτυο χωρίς την παρουσία διαρροών, παρατηρείται ότι το βέλτιστο κόστος λειτουργίας για ένα 24ωρο για το δίκτυο με το πρώτο σενάριο διαρροών είναι αυξημένο κατά 17%, ενώ για το δεύτερο σενάριο το κόστος είναι αυξημένο κατά 25%.

Συνεπώς, για να καλυφθεί η ζήτηση του δικτύου στην περίπτωση που αυτό παρουσιάζει αστοχίες, το κόστος λειτουργίας του αυξάνεται και μάλιστα σημαντικά αν οι απώλειες λόγω των αστοχιών είναι μεγάλες.

Μια επιπλέον παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ως προς την αλλαγή στη λειτουργία των αντλιών και κατά συνέπεια στο κόστος άντλησης, στο δίκτυο με διαρροές και στις περιπτώσεις που βελτιστοποιούνται οι διαρροές και η ενέργεια. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το ελάχιστο κόστος λειτουργίας ανά αντλία για τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με κριτήριο την ενέργεια και το ελάχιστο κόστος λειτουργίας ανά αντλία για τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με κριτήριο τις διαρροές στο δίκτυο με το σενάριο διαρροών 2 (Σχήμα 6.23).

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι στην περίπτωση που η βελτιστοποίηση γίνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της ενέργειας λειτουργούν μόνο οι 4 από τις 11 αντλίες, ενώ στην περίπτωση που κριτήριο της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των διαρροών λειτουργεί το σύνολο των αντλιών. Αυτό προφανώς έχει ως συνέπεια και το αυξημένο κόστος λειτουργίας του δικτύου στη δεύτερη περίπτωση.

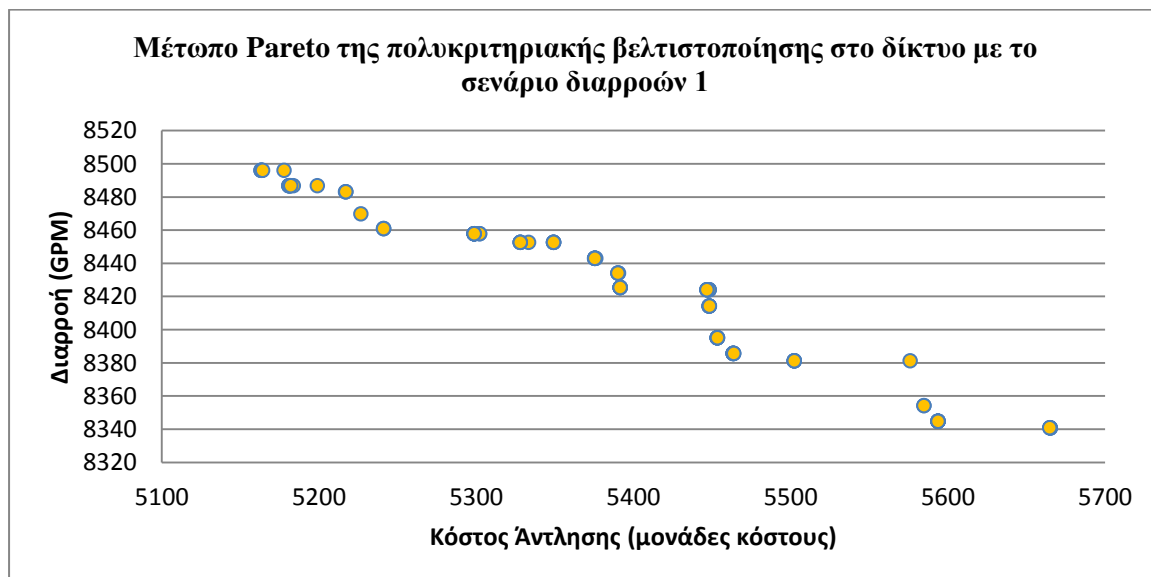


Σχήμα 6.23 - Σύγκριση λειτουργίας των αντλιών για τη βελτιστοποίηση των δύο κριτηρίων και το σενάριο διαρροών 2

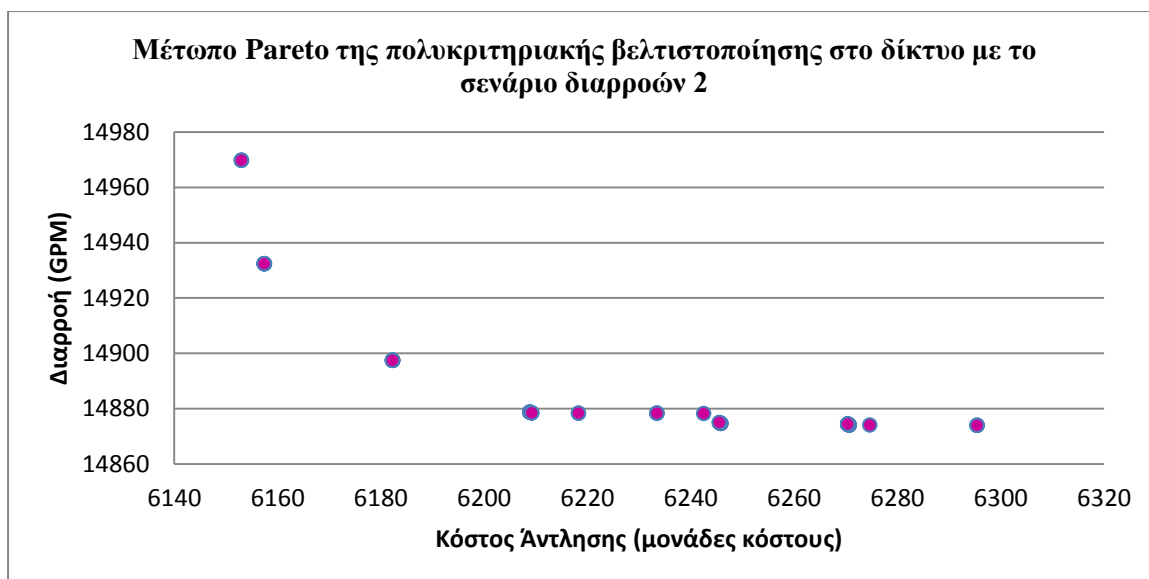
Το ίδιο παρατηρείται και για το πρώτο σενάριο διαρροών.

6.3.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο ky5 Jolly 2013

Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για το δίκτυο ky5 Jolly 2013 και για τα δύο σενάρια διαρροών. Στόχος είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης και των απωλειών. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται για πληθυσμό 1000 και γενιές 300 και το αποτέλεσμα για κάθε σενάριο παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 6.24 - Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο δίκτυο ky5 Jolly 2013 με το σενάριο διαρροών 1



Σχήμα 6.25 – Μέτωπο Pareto της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στο δίκτυο ky5 Jolly 2013 με το σενάριο διαρροών 2

Και στις δύο περιπτώσεις έχει σχηματιστεί μέτωπο Pareto αν και στο δεύτερο σενάριο είναι περισσότερο ευδιάκριτο. Σε αυτή την περίπτωση όλες οι προτεινόμενες λύσεις της βελτιστοποίησης είναι αποδεκτές και ισοδύναμες.

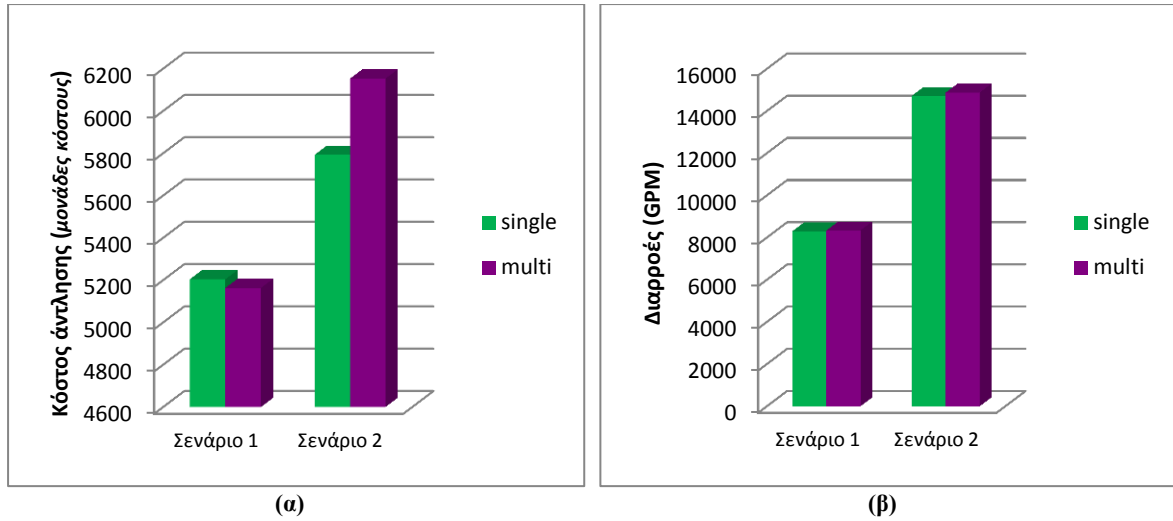
Παρόλα αυτά εντοπίστηκαν οι ελάχιστες τιμές του κόστους και των διαρροών, χωρίς να αποτελούν απαραίτητα ζεύγος λύσης, ώστε να συγκριθούν με τις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές των μονοκριτηριακών βελτιστοποιήσεων. Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.12 - Βέλτιστες τιμές των δύο κριτηρίων στη μονοκριτηριακή και την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τα δύο σενάρια διαρροών

Κριτήρια	Σενάριο 1		Σενάριο 2	
	Μονο-κριτηριακή	Πολύ-κριτηριακή	Μονο-κριτηριακή	Πολύ-κριτηριακή
Ελάχιστο Κόστος (μ.κ.)	5204.11	5163.11	5791.92	6153.02
Ελάχιστες Διαρροές (GPM)	8303.58	8340.67	14715.34	14873.89

Όπως παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις οι ελάχιστες τιμές των πολυκριτηριακών βελτιστοποιήσεων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των μονοκριτηριακών και συγκεκριμένα στην περίπτωση των διαρροών η διαφορά είναι πολύ μικρή. Εξάιρεση αποτελεί το σενάριο 1, καθώς το βέλτιστο κόστος λειτουργίας είναι λίγο μεγαλύτερο στην περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης σε σχέση με την πολυκριτηριακή, κάτι το οποίο δεν είναι αναμενόμενο.

Τα προηγούμενα παρουσιάζονται και στο Σχήμα 6.26 που ακολουθεί.



Σχήμα 6.26 - Ελάχιστη τιμή (α) κόστους και (β) διαρροών στη μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τα δύο σενάρια διαρροών στο δίκτυο ky5 Jolly 2013

Κεφάλαιο 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε η όσο το δυνατόν περισσότερο ολοκληρωμένη μελέτη της βέλτιστης διαχείρισης της ενέργειας και των διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης, αν και κάτι τέτοιο είναι αρκετά περίπλοκο. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων με εφαρμογή των δύο κριτηρίων, δηλαδή της ελαχιστοποίησης του κόστους και των διαρροών. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία είναι τα εξής:

- Ο γενετικός αλγόριθμος του Matlab δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αλγόριθμο (Omni-Optimizer) που είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό PaVLOS στην ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης.
- Στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης του κόστους σε δίκτυα χωρίς διαρροές, κατά τη βελτιστοποίηση προτιμάται η λειτουργία λιγότερων αντλιών και όχι το σύνολό τους και μάλιστα οι αντλίες που επιλέγονται είναι συγκεκριμένες, ανεξάρτητα από το πόσες φορές θα γίνει η βελτιστοποίηση.
- Και για την περίπτωση της ελαχιστοποίησης του κόστους σε δίκτυο με την ύπαρξη διαρροών, προτιμάται ανάλογη λειτουργία αντλιών με την αντίστοιχη περίπτωση του δικτύου χωρίς διαρροές, αλλά με σαφώς πιο αυξημένη τιμή.
- Όταν στόχος είναι μόνο η ελαχιστοποίηση των διαρροών, η λειτουργία των αντλιών διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την περίπτωση της ελαχιστοποίησης του κόστους, καθώς στην περίπτωση του δεύτερου δικτύου, διαπιστώθηκε ότι λειτουργούν σχεδόν όλες οι αντλίες του δικτύου, κάτι το οποίο δικαιολογεί και το αρκετά αυξημένο κόστος λειτουργίας του.
- Όπως είναι αναμενόμενο το κόστος λειτουργίας αυξάνεται με την αύξηση των διαρροών.
- Στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οι ελάχιστες τιμές κόστους και διαρροών είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες των μονοκριτηριακών βελτιστοποιήσεων, παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες μικρές εξαιρέσεις. Οι αυξημένες τιμές της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης πιθανών οφείλονται στο ότι οι στόχοι είναι δύο και ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα. Ενώ η φύση του προβλήματος και ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης δεν επιτρέπουν τον εύκολο υπολογισμό του ολικού βέλτιστου.
- Αυξημένες πιέσεις παρατηρήθηκαν μόνο στο δίκτυο Anytown, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, πιθανότατα γιατί εξ αρχής οι πιέσεις του δικτύου ήταν αυξημένες σε κάποιους κόμβους αλλά και γιατί εκείνες τις ώρες η κατανάλωση του νερού είναι αρκετά μικρή.
- Στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης των διαρροών παρατηρήθηκαν αρνητικές ζητήσεις όσο αυξανόταν το ποσοστό τους, και έτσι τέθηκε ένας επιπλέον περιορισμός για αυτές. Οι αρνητικές τιμές προκύπτουν ως αποτέλεσμα της

υδραυλικής επίλυσης του δικτύου από το EPANET, στην προσπάθεια να ικανοποιηθούν οι ζητήσεις των κόμβων με την ταυτόχρονη ύπαρξη διαρροών.

Σε γενικές γραμμές δεν αντιμετωπίστηκαν προβλήματα, ενώ τα αποτελέσματα θα χαρακτηρίζονταν ως φυσιολογικά. Συνεπώς θεωρείται ότι η σύνδεση που έγινε ανάμεσα στο Matlab και το EPANET ήταν αποτελεσματική και λειτούργησε σωστά.

Παρόλα αυτά, θα μπορούσαν να γίνουν περαιτέρω βελτιώσεις στην όλη διαδικασία. Οι προτάσεις για την βελτίωση και την εξέλιξη του θέματος είναι οι εξής:

- Η διαδικασία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και με τη χρήση άλλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων τους ώστε να επιλεγεί ο πιο αποτελεσματικός.
- Ακόμη θα μπορούσε να εξεταστεί ποικιλία δικτύων, από μικρά έως πολύ μεγάλα με πολλές μεταβλητές ελέγχου, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι αποτελεσματικός ο αλγόριθμος του Matlab αλλά και άλλοι αλγόριθμοι σε διαφορετικές συνθήκες, για την εξαγωγή περισσότερο ασφαλών συμπερασμάτων.
- Ως μεταβλητές απόφασης θα μπορούσαν να είναι εκτός από τη λειτουργία των αντλιών μέσα στον χρόνο προσομοίωσης, η στάθμη των δεξαμενών στο τέλος της προσομοίωσης, η οποία θα πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο στην αρχή της, κάτι που εδώ τέθηκε ως περιορισμός. Επίσης, η τοποθέτηση βαλβίδων θα μπορούσε να αποτελέσει μεταβλητή απόφασης. Τέλος, το μήκος, η διάμετρος και το υλικό των σωληνώσεων, θα μπορούσαν ακόμη να είναι μεταβλητές απόφασης, αλλά στην περίπτωση σχεδιασμού ενός νέου δικτύου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Γιαννάκογλου, Κ. Χ., 2012. Μέθοδοι Αιτιοκρατικής και Στοχαστικής Βελτιστοποίησης και Εφαρμογές, Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., 2001. Διερεύνηση Μεθόδων Ολικού Βέλτιστου σε Προβλήματα Υδατικών Πόρων, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., 2008. Μη γραμμικές Μέθοδοι σε Πολυκριτηριακά Προβλήματα Βελτιστοποίησης Υδατικών Πόρων, με Έμφαση στη Βαθμονόμηση Υδρολογικών Μοντέλων, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., Μακρόπουλος, Χ., 2012. Θεμελιώδεις έννοιες βελτιστοποίησης και κλασικές μαθηματικές μέθοδοι, Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων – Υδροπληροφορική, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μακρόπουλος, Χ., Ευστρατιάδης, Α., 2012. Γενετικοί Αλγόριθμοι, Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων – Υδροπληροφορική, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μπριλάκης, Δ., Νεστορίδου, Ε., Χατζηδάκης, Μ., Ευταξιοπούλου, Β., 2009. Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στα Δίκτυα της ΕΥΔΑΠ: Εμπειρία – Προοπτικές.
- Τσακίρης, Γ., 2010. Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- American Water Works Association, 1999. Calibration Guidelines for Water Distribution Systems, Proceedings ImTech Conference.
- Berardi, L., Liu, S., Laucelli, D., Xu, S., Xu, P., Zeng, W., Giustolisi, O., 2014. Energy Saving and Leakage Control in Water Distribution Networks: A Joint Research Project between Italy and China, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 152-161, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.018>).
- Bolognesi, A., Bragalli, C., Lenzi, C., Artina, S., 2014. Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 181-190, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.021>).
- Boulos, P. F., Bros, C. M., 2010. Assessing the Carbon Footprint of Water Supply and Distribution Systems, *Journal American Water Works Association*, 102(11), 2-13.
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R., Cabrera E., Jr, 2010. Energy Audit of Water Networks, *Journal of Water Resources Planning Management*, 136(6), pp.669-677 ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000077](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077)).

- Cabrera, E., Gomez, E., Cabrera Jr, E., Soriano, J., Espert, V., 2014. Energy Assessment of Pressurized Water Systems, *Journal of Water Resources Planning Management*, ASCE, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000494](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494)).
- Colombo, A. F., Karney B. W., M.ASCE, 2002. Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128:441-450, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128:6\(441\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:6(441))).
- De Marchis, M., Fontanazza, C.M., Freni, G., Messineo, A., Milici, B., Napoli, E., Notaro, V., Puleo, V., Scopa, A., 2013. Energy Recovery in Water Distribution Networks. Implementation of Pumps as Turbine in a Dynamic Numerical Model, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 439-448, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.049>).
- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Deb, K., Tiwari, S., 2008. Omni-Optimizer: A generic evolutionary algorithm for single and multi-objective optimization, *European Journal of Operational Research*, 185(3), pp1062-1087 ([doi:10.1016/j.ejor.2006.06.042](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.042)).
- Fantozzi, M., Lambert, A., 2007. Including the effects of Pressure Management in calculations of Economic Leakage Level, *Proceedings of IWA Special Conference 'Water Loss 2007'*, Bucharest, Romania, 23-26, 256-267.
- Fontana, N., Giugni, M., Portolano, D., 2012. Losses Reduction and Energy Production in Water – Distribution Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 138:237-244, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000179](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000179)).
- Giustolisi, O., Savic, D., Kapelan, Z., 2008. Pressure – Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 5, ISSN 0733-9429/2008/5-626-635, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:5\(626\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(626))).
- Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D., 2013. Supporting Decision on Energy vs. Asset Cost Optimization in Drinking Water Distribution Networks, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 734-743, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.080>).
- Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.

- Jolly, M. D., Lothes, A. D., Bryson, L. S., Ormsbee, L., 2014. Research Database of Water Distribution System Models, *Journal of Water Resources Management*, 140(4), 410–416, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000352](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000352)).
- Kang, D., 2013. Real-time Optimal Control of Water Distribution Systems, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 917-923, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.102>).
- Lambert, A., 2001. What do we know about Pressure: Leakage Relationships in Distribution Systems?, IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management, Brno ISBN 80-7204-197-5.
- Mays, L. W., 2000. Water distribution systems handbook, McGraw-Hill.
- Michalewicz, Z., 1996. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, New York.
- Morley, M., Bello-Dambatta, A., Kapelan, Z., Bolognesi, A., Bragalli, C., 2013. New Technique for Leakage Reduction via Integrated Energy and Pressure Management, Work Package 42: Urban Water Demand Management, Transition to the Urban Services of Tomorrow.
- Panguluri, S., Grayman, W. M., Clark, R. M., Garner, L. M., Haught, R., 2005. Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-06/028.
- Puleo, V., Morley, M., Freni, G., Savić, D., 2014. Multi-stage Linear Programming Optimization for Pump Scheduling, *Procedia Engineering* 70 (2014) 1378 – 1385, ([doi:10.1016/j.proeng.2014.02.152](http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.152)).
- Qiang Xu, Ruiping Liu, Qiuwen Chen, Ruonan Li, 2014. Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 26, Issue 5, Pages 955-961, ISSN 1001-0742, ([http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60569-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60569-0)).
- Rossman, L. A., 2000. Epanet 2 Users' Manual, United States Environmental Protection Energy, EPA/600/R-00/057.
- Siddiqi, A., Anadon, L. D., 2011. The water–energy nexus in Middle East and North Africa, *Energy Policy*, Volume 39, Issue 8, Pages 4529-4540, ISSN 0301-4215, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.023>).
- Srinivas, N., Deb, K., 1993. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, Technical Report, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.

- Tabesh, M., Asadiyani Yekta A. H., Burrows, R., 2009. An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 23:477–492, (DOI 10.1007/s11269-008-9284-2).
- Thornton, J., and Lambert, A., 2007. Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs, Proceedings of IWA Special Conference 'Water Loss 2007', Romania.
- Todini, E., Pilati, S., 1987. A Gradient Method for the Analysis of Pipe Networks, International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK, September 8-10.
- Tolson, B.A., Asadzadeh, M., Maier, H.R., and Zecchin, A., 2009. “Hybrid discrete dynamically dimensioned search (HD-DDS) algorithm for water distribution system design optimization”, *Water Resources Research*, 45(12), (doi:[10.1029/2008WR007673](https://doi.org/10.1029/2008WR007673))
- Tricarico, C., Morley, M. S., Gargano, R., Kapelan, Z., G. de Marinis, Savić, D., Granata, F., 2014. Integrated Optimal Cost and Pressure Management for Water Distribution Systems, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 1659-1668, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.183>)
- Vairavamoorthyl, K., Lumbers, J., Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 11, ISSN 0733-9429/98/0011-1146-1154, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:11\(1146\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:11(1146))).
- van Zyl, J. E., Savic, D. A., Walters, G. A., 2004. Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(160\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(160)))
- Walski T.M., Chase D.V., Savić D., Grayman W., Beckwith S., Koelle E., 2003. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Haested Methods, USA
- Wright, R., Stoianov, I., Pappas, P., 2014. Dynamic Topology in Water Distribution Networks, *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 1735-1744, ISSN 1877-7058, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.191>).
- Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L., 2014. Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, ISSN 0733-9496/04014094(8), ([http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000493](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493)).
- Xu, Q., Liu, R., Chen, Q., Li, R., 2014. Review on Water Leakage Control in Distribution Networks and the Associated Environmental Benefits, *Journal of Environmental Science*, (DOI: 10.1016/S1001-0742(13)60569-0).

Yu, G., Powell, R. S., Sterling, M. J. H., 1994. Optimized Pump Scheduling in Water Distribution Systems, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 83(3), 463 – 488.

Zessler, U., Shamir, U., Optimal Operation of Water Distribution Systems, 1989. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, No 6, ISSN 0733-9496/89/0006-0735.

<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/Water%20Energy%20Nexus%20Executive%20Summary%20July%202014.pdf> (Πρόσβαση 25/10/2014)

<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/Water%20Energy%20Nexus%20Full%20Report%20July%202014.pdf> (Πρόσβαση 25/10/2014)

<http://uimonline.com/index/webapp-stories-action/id.647/archive.yes/Issue.2012-02-01/title.water-management,-energy-efficiency> (Πρόσβαση 26/03/2015)