



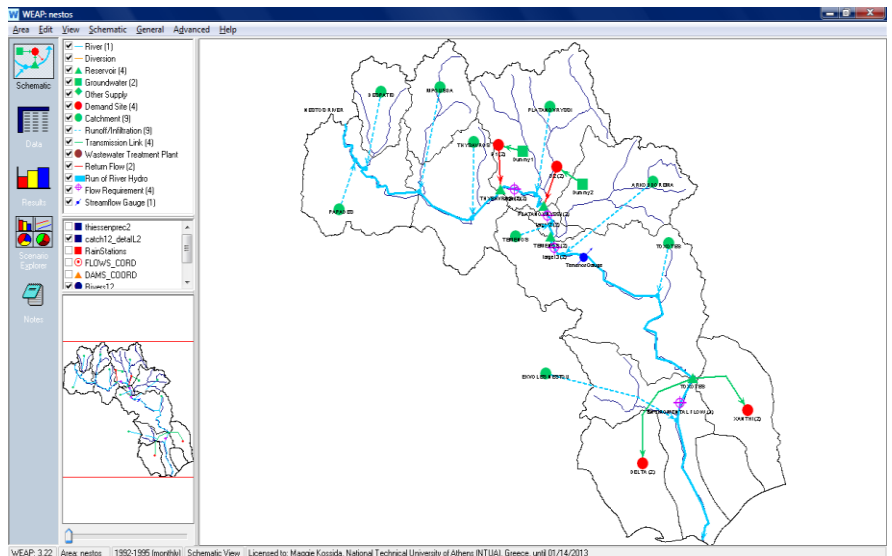
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

«Βελτιστοποίηση υδροσυστήματος με
την χρήση εξελικτικών αλγορίθμων:
Η περίπτωση του Νέστου»



Εκπόνηση εργασίας: Τσουκαλάς Ιωάννης

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Επιβλέπων: Μακρόπουλος Χρήστος,
Λέκτορας ΕΜΠ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

*Στους γονείς μου
Κυριάκο και Ερασμία*

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον Λέκτορα του Ε.Μ.Π της σχολής Πολιτικών Μηχανικών και επιβλέποντα της εργασίας κ. Χρήστο Μακρόπουλο, για την άριστη όσο και ευχάριστη συνεργασία μας, καθώς για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον και απαιτητικό θέμα.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον Λέκτορα Νικόλαο Μουτάφη για τις συμβουλές του και τα χρήσιμα στοιχεία που μου παρείχε όσον αφορά τους ταμιευτήρες της περιοχής.

Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Χαράλαμπο Σκουλικάρη για την πολύτιμη συνεισφορά του όσον αφορά την συλλογή των τόσο δυσεύρετων υδρολογικών δεδομένων που απαιτούνταν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Ανδρέα Ευστρατιάδη για την βοήθεια και τις συμβουλές του σε λειτουργικά θέματα που αφορούσαν το πρόγραμμα Κασταλία.

Τέλος, ευχαριστώ όλους του καθηγητές του ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» τους φίλους και συμφοιτητές μου.

Τσουκαλάς Ιωάννης

Μάρτιος, 2012

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	vii
Extended abstract.....	viii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Στόχος.....	1
1.3 Βήματα Υλοποίησης.....	2
1.4 Δομή εργασίας.....	2
2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	4
2.1 Νερό, ένα πολύτιμο αγαθό.....	4
2.2 Υδατική προέλευση και κατανομή.....	4
2.3 Η έννοια της διαχείρισης υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής.....	7
2.3.1 Οι στόχοι της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.....	9
2.3.2 Νομοθετικό πλαίσιο για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στην Ε.Ε. - Η Οδηγία 2000/60/EC.....	10
2.4 Η διαχείριση υδατικών πόρων στην Ελλάδα.....	11
2.5 Υδατικές χρήσεις.....	13
2.6 Ενέργεια και υδροσυστήματα.....	14
2.6.1 Σχέση νερού και ενέργειας.....	14
2.6.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	15
2.6.3 Αποθήκευση ενέργειας.....	19
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	21
3.1 Η έννοια της Πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.....	21
3.2 Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων.....	23
3.2.1 Ιστορικά.....	23
3.2.2 Η θεωρία Εξέλιξης των ειδών και η σχέση των Γ.Α. με αυτή.....	23
3.2.3 Η Ανατομία ενός προγράμματος Γενετικών Αλγορίθμων.....	25
3.2.4 Γενετική αναπαράσταση.....	25
3.2.5 Δημιουργία αρχικού πληθυσμού.....	26
3.2.6 Συνάρτηση στόχου.....	26
3.2.7 Γενετικές διαδικασίες.....	27
3.2.8 Παράγοντες έλεγχου.....	33
3.2.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων.....	34

3.3	Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτωσης.....	36
3.3.1	Φυσικό Ανάλογο	36
3.3.2	Μοντέλο διαδικασίας ανόπτωσης	37
3.4	Το σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης «Κασταλία».....	39
3.5	Βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογής Πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στους υδατικούς πόρους.....	42
4.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΙΡΗΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WEAP21	44
4.1	Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων	44
4.2	Χρήση των ΣΥΑ στην διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων	45
4.3	Εισαγωγή στο WEAP21	46
4.4	Βασικά χαρακτηριστικά του WEAP21	47
4.5	Διαδικασία μοντελοποίησης στο WEAP21	48
4.6	Προσομοίωση βροχής-απορροής στο WEAP21.....	49
4.7	Προσομοίωση φραγμάτων στο WEAP21.....	50
4.8	Διανομή νερού στο WEAP21	51
5.	ΤΟ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΝΕΣΤΟΥ/ΜΕΣΤΑ	52
5.1	Γεωμορφολογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Νέστου.....	52
5.2	Γεωλογικά και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά.....	54
5.3	Ανθρώπινες οικονομικές δραστηριότητες και παρεμβάσεις στην περιοχή	56
5.4	Χρήσης υδάτων της περιοχής	56
5.5	Διακρατική συμφωνία για τα δικαιώματα χρήσης των υδάτων.....	58
5.6	Η υδρολογία της περιοχής.....	60
5.7	Τα φράγματα στον ποταμό Νέστο	61
6.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	67
6.1	Γενικά για τη μεθοδολογία	67
6.2	Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν	67
6.2.1	Δεδομένα βροχόπτωσης.....	67
6.2.2	Καθορισμός των παραμέτρων της εξατμοδιαπνοής	69
6.2.3	Διαθέσιμοι σταθμοί μέτρησης απορροής	69
6.3	Παράγωγη των πολυγώνων Thiessen	72
6.4	Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων και σχήματοποίηση του υδροσυστήματος στο WEAP21.....	73

6.5	Βαθμονόμηση του υδροσυστήματος	74
6.5.1	Σύζευξη του WEAP21 και MATLAB μέσω COM-API για την βαθμονόμηση του υδροσυστήματος.....	74
6.5.2	Αποτελέσματα βαθμονόμησης	77
6.6	Βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος του Νέστου.....	81
6.6.1	Εισαγωγή τεχνικών έργων και κόμβων ζήτησης στο WEAP21	81
6.6.2	Περιορισμοί που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο WEAP21.....	87
6.6.3	Περιγραφή κανόνων λειτουργίας και σεναρίων που εξεταστήκαν.....	89
6.6.4	Ορισμός προτεραιοτήτων στο μοντέλο WEAP21	92
6.6.5	Σύζευξη του WEAP21 και MATLAB μέσω COM-API για την βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος.....	94
6.6.6	Δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών στο πρόγραμμα Κασταλία.....	96
7.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	98
7.1	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης	98
7.1.1	Χρήση των κανόνων λειτουργίας	102
7.1.2	Απόκριση συστήματος για τις βέλτιστες λύσεις	102
7.2	Έλεγχος απόκρισης των σεναρίων B1 και B2 υπό καθεστώς αβεβαιότητας	109
7.2.1	Έλεγχος απόκρισης του σεναρίου B1.....	110
7.2.2	Έλεγχος απόκρισης του σεναρίου B2.....	113
7.2.3	Σύγκριση των σεναρίων B1 και B2.....	115
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	116
8.1	Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων	116
8.2	Γενικά συμπεράσματα	117
8.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	118
9.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	119
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	124
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	133

Περίληψη

Η βέλτιστη διαχείριση ενός συστήματος ταμιευτήρων καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη όταν υπάρχει ανταγωνισμός στις χρήσεις νερού όπως η ύδρευση, η άρδευση, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Το λογισμικό WEAP21 είναι ένα εργαλείο διαχείρισης και προσομοίωσης υδροσυστημάτων ενώ ταυτόχρονα ενσωματώνει και το υδρολογικό μοντέλο. Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας προγραμματισμού που επιτυγχάνει την σύζευξη του λογισμικού WEAP21 με το λογισμικό MATLAB μέσω σύνδεσης COM-API. Ο στόχος της συνεργασίας αυτής είναι η χρήση των υπολογιστικών εργαλείων βελτιστοποίησης του MATLAB. Ο συνδυασμός των δυο προγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου αλλά και για την βελτιστοποίηση του συστήματος ταμιευτήρων. Σαν μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε το υδροσύστημα του ποταμού Νέστου, στην περιοχή υπάρχουν δυο ΥΗΕ, του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης ενώ υπάρχει μελέτη για κατασκευή ενός τρίτου ΥΗΕ μικρότερης ισχύος, το φράγμα του Τεμένους. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δυο κανόνες λειτουργίας, ένας με εποχικό συντελεστή και ένας χωρίς. Επίσης διερευνήθηκε η σημασία κατασκευής του φράγματος του Τεμένους και τα οφέλη που ενδεχομένως παρέχει ως προς την παραγόμενη ενέργεια και την διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος. Ως κριτήρια βελτιστοποίησης τέθηκαν η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Extended abstract

Introduction

Optimization of multiple reservoir system becomes increasingly complex when conflicting uses of water exists, water supply, irrigation, hydropower generation, etc. WEAP21 is software tool suitable for simulation and management of hydrosystems. WEAP21 integrates also a hydrologic model. For the needs of this thesis it was developed programming code which incorporates WEPA21 and MATLAB via COM-API. The objective of this integration is the use of optimization tools of MATLAB in combination with WEAP21. MATLAB optimization tools were used for the calibration of the hydrologic model and optimization of reservoir system. As a case study was chosen the Nestos river hydrosystem. The hydrosystem contains two hydroelectric plants, Thysavros and Platanovryssi, also there are plans for a third one, a smaller, the one of Temenos. In this thesis was studied two operating rules for the reservoir system, one with seasonal coefficient. Also it was investigated the contribution of Temenos dam and the potential benefits like increase in hydropower energy and increase in system's reliability. The objective criteria were hydropower generation and the system reliability.

Thesis outline

The thesis is organized in eight sections:

Chapter 1: Introduction.

Chapter 2: Brief description of hydrosystems, operation rules, competing water uses and presentation of reservoir pump-storage system.

Chapter 3: Presentation of optimization techniques like genetic algorithms and simulated annealing. Also in this chapter is presented the software Castalia which was used for the production of stochastic time series. Also a brief literature review in issues concerning the use of optimization techniques in water resources management.

Chapter 4: Brief description of the decision support tool used in this thesis which is WEAP21.

Chapter 5: Brief description of the Nestos hydrosytem.

Chapter 6: Analysis of methodology and description of optimization the techniques applied in this thesis.

Chapter 7: Analysis of the results for the optimized scenarios.

Chapter 8: Conclusions and suggestions for future research.

A short description of Nestos hydrosystem

Nestos basin is a transboundary basin which extends between Bulgaria and Greece. That fact makes the management of water resources of Nestos difficult and complicated. Nestos is the second larger river of the Thrace water district and one the major rivers in Greece. It flows from Mount Rila in Bulgaria (a region with the highest altitude of the Balkans, about 2.925 m) and has a total length of 234 km of which 130 are in Greek territory. The Nestos flows into Greece from the plateau of Nevrokopi of Drama. The bed of the river forms a natural boundary between Bulgaria and Greece for a few kilometers. The Nestos basin is 6.219 km² and about 60% belongs to Bulgaria. The Greek part of the basin occupies an area equal to 2525 km² (Paraskevopoulos, 1994). The river and its basin shared by administrative prefectures of Drama, Xanthi and Kavala and is a natural boundary between the departments of Macedonia and Thrace. The river flows into the Sea of Thrace opposite of Thasos, forming a large delta area about 50 km². It is worth noting that the Nestos estuary is an area protected by the Ramsar Convention and has joined the network NATURA 2000.

The first dam built in the region was the dam of Toxotes (1960-1966). This is an irrigation dam with length of 280 meters located in the neck of the estuary and diverts the quantities of water to the east (Xanthi) and western (Kavala) bank of the main stream of the river. The feasibility study of dam Toxotes held by an American construction company, Knappen-Tippetts-Abbett-McCarthy Engineering (YDE, 1954).

Later on behalf of (1971-1972) PPC was done by a foreign consultant engineers, the feasibility study for construction of three dams upstream. The project began ten years later, around mid-1980 based on an interim agreement with Bulgaria on minimum incoming water quantities in Greece (in 1995 signed an agreement to provide 29% of total river water). The original plan was to build three hydroelectric power stations (serialy) the first two would be reversible. These stations were the Thysavros (381 MW), the Platanovryssi (116 MW) and the Temenos station (19 MW).

These projects are multipurpose projects to provide water for irrigation, distribute water to small towns and industrial areas, and energy production. The hydroelectric plant of Thysavros reservoir is the head of the group project that provides scaling and setting of annual runoff of the river.

However the overall project has not completed due to lack of funds, so far the completed reservoirs are: the dam of Thysavros (1996-1997) and dam of Platanovryssi (1998-1999).

Description of methodology used for calibration

The main tools used are WEAP21 model to simulate the hydrosystem and Matlab for calibration and optimization. As part of the thesis was developed programming code that achieves interactive cooperation between the two programs, this coupling makes possible to use the computational tools of MATLAB.

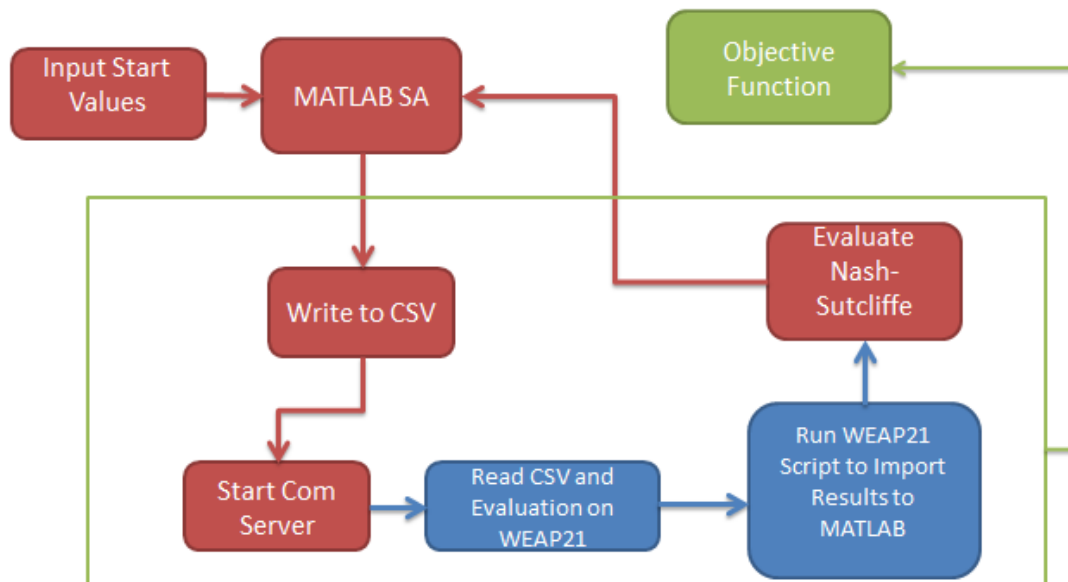


Figure1: Flow Chart which describes the methodology used for calibrating the hydrosystem

Briefly the main loop of the iterative process begins with the transformation of variables to an appropriate format readable by WEAP, then opening the connection to the WEAP through COM-API, then WEAP reads the variables and calculates the results, after that the results are exported to Matlab where the objective function is calculated.

The optimization technique which was used was simulated annealing of the Global Optimization Toolbox of Matlab and designated as maximum number of repetitions 8000 revealed the results presented below. Also performance measure was used the Nash-Sutcliffe function. The Best function value was 0.875136 which is considered satisfactory.

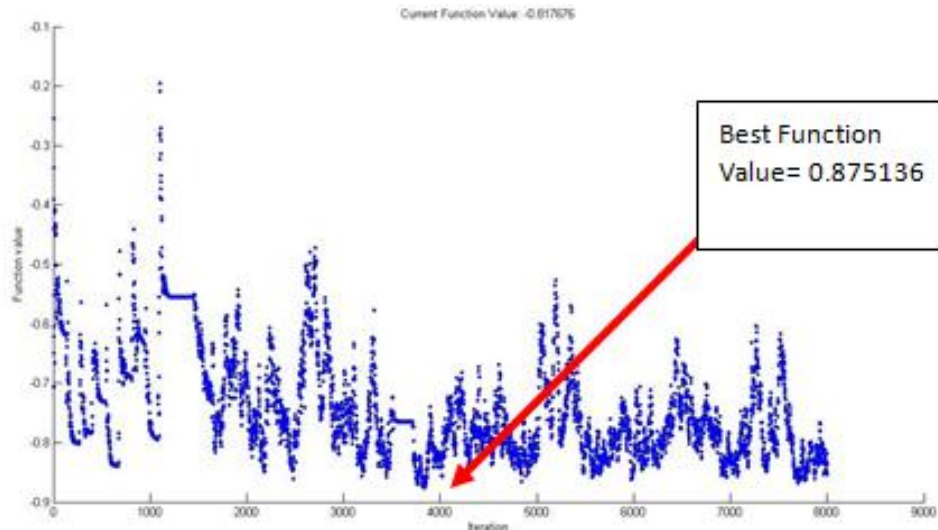


Figure 2: Variation of the objective function values

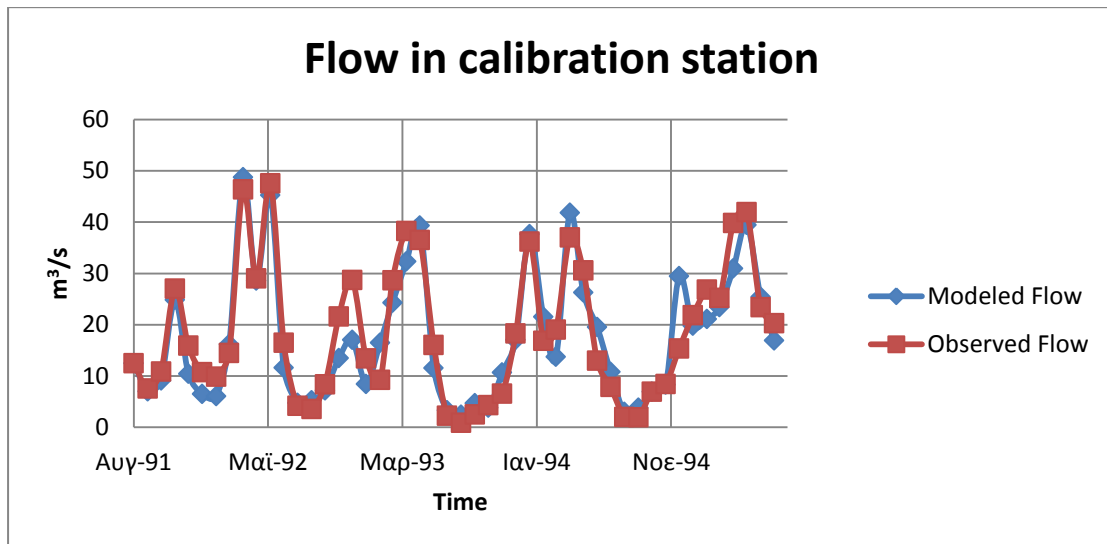


Figure 3: Comparison of calculated and measured runoff in position Temenos (Coefficient of Nash-Sutcliffe = 0.8751).

Description of methodology used for hydrosystem optimization

Because WEAP21 does not provide the ability to set the exact amount of water released from each reservoir it was decided to use the minimum flow requirement downstream of each dam and the amount returned to the upstream reservoirs through false demand nodes (reverse mode). Note that the minimum flow downstream of each dam has the role of "threshold" and not the exact quantity of water to be released from the upstream reservoir. In

particular these quantities are a percentage of the available total volume of the reservoir of Thysavros dam calculated from the previous time step. It was chosen to use only the volume of the Thysavros since it is the larger of the three (570 hm³, 12 hm³, 6 hm³) so it is the decisive quantity.

The scenarios examined in this thesis are presented briefly in the following table.

Table1: Summary of operating rules and scenarios.

A/A	Without differentiation during irrigation season	With differentiation during irrigation season
With Temenos dam	A1	B1
Without Temenos dam	A2	B2

Similar to the calibration process, programming code was developed to optimize the system. The main difference is that in this case it is a multicriteria problem because the goal of optimization is to maximize energy production and to meet water demands. In this case it was selected to use the genetic algorithms of the Global Optimization Toolbox of MATLAB.

The main loop of the iterative process begins by converting the variable to an appropriate format readable by WEAP, then the code is opening a connection to WEAP through COM-API, then the WEAP reads the model variables and calculates the results, then the code export the results to MATLAB where the objective functions are calculated. The reasoning process of programming code that was developed is summarized in the following flowchart

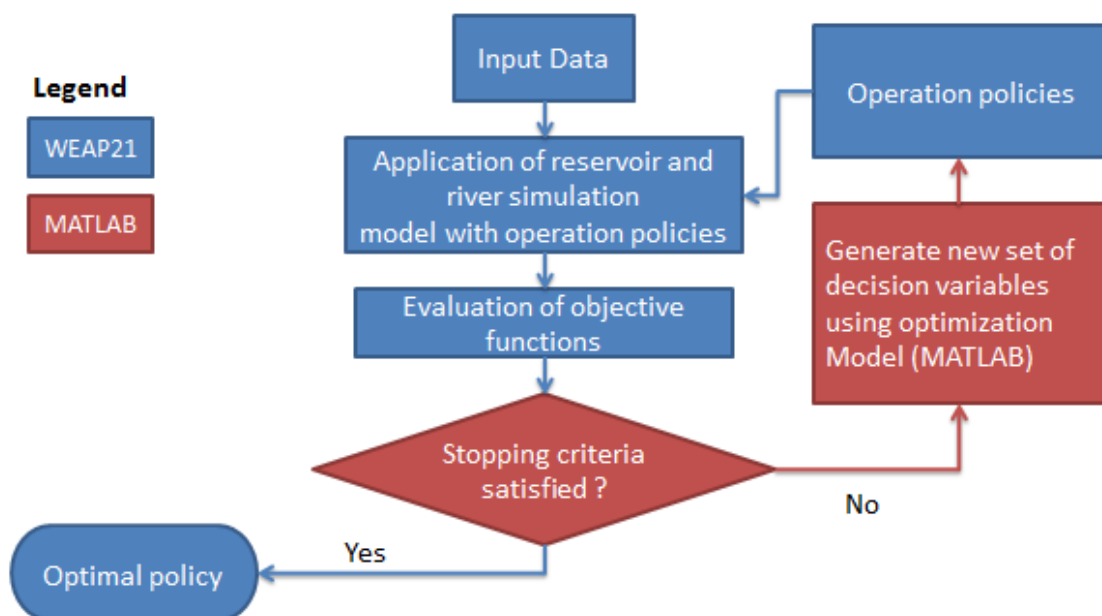


Figure 4: Flow chart for Multicriteria optimization of the hydrosystem.

Because the hydrosystem was optimized for the period 1991 to 1995 it was decided to create synthetic time series to investigate the response of the system. The time series were generated by the entire data set, (not only from the period 1991-1995). The creation of the series has been made by Castalia (Koutsoyiannis and Efstratiadis, 2002). The time series were created taking into account the phenomenon of persistence (high rate of Hurst) to test the system and operating rules under uncertainty. The time series which has been produced had length of a thousand years. The synthetic time series were used for scenarios B1 and B2.

Optimization results

Figure 5 shows the Pareto fronts obtained by optimization of scenarios A1 and B1. It is obvious that for scenario 1 (including the dam of Temenos) the use of operation rules B gives more favorable results. This is probably because use of an additional variable that contributes to segregation or non-irrigation periods. In this way the required quantities of water downstream of each reservoir are reduced during the winter (without irrigation) and resulted in an increase in the volume of the reservoir, this leads to higher drop height for hydroelectric power and increasing volume in the reservoirs which helps meet water needs during the summer months (irrigation season).

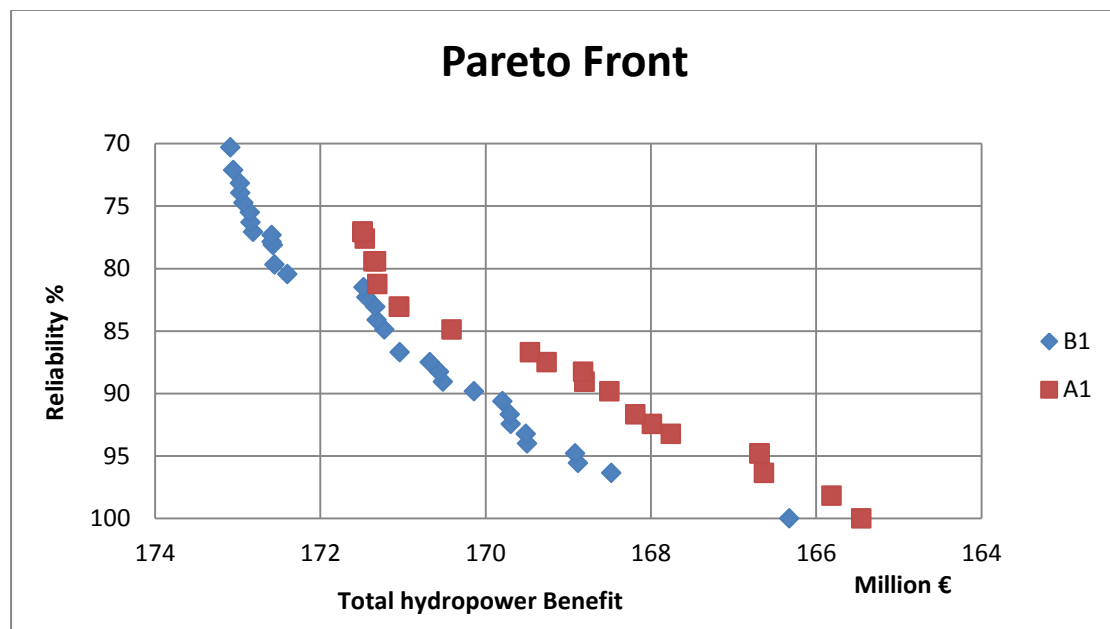


Figure 5: Pareto front of A1 and B1 scenarios.

Figure 6 shows the Pareto fronts obtained by the optimization of scenarios A2 and B2. Scenario 2 does not include the future dam Temenos. Unlike scenario 1, the operating rule B did not lead to significant displacement of the front Pareto, this is probably due to the absence of the dam of the Temenos. The absence of the Temenos dam has resulted in significant reduction of hydropower generation, also in this case is achieved high reliability.

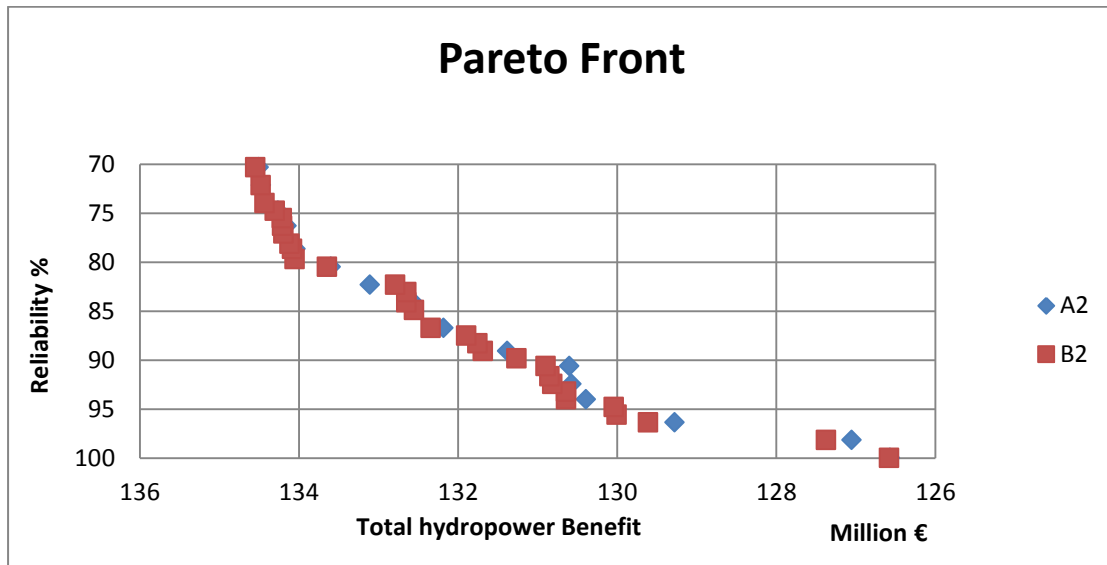


Figure 6: Pareto front of A2 and B2 scenarios.

Figure 7 compares the Pareto fronts of scenarios B1 and B2, as shown in the next figure is a significant improvement of the Pareto in the implementation of scenario 1 (with the future dam Temenos). Please note that the overall benefit of energy production in the period 1/8/1991 to 1/7/1995 increased by about 40 million euros and there is an average increase of 10 million euros per year.

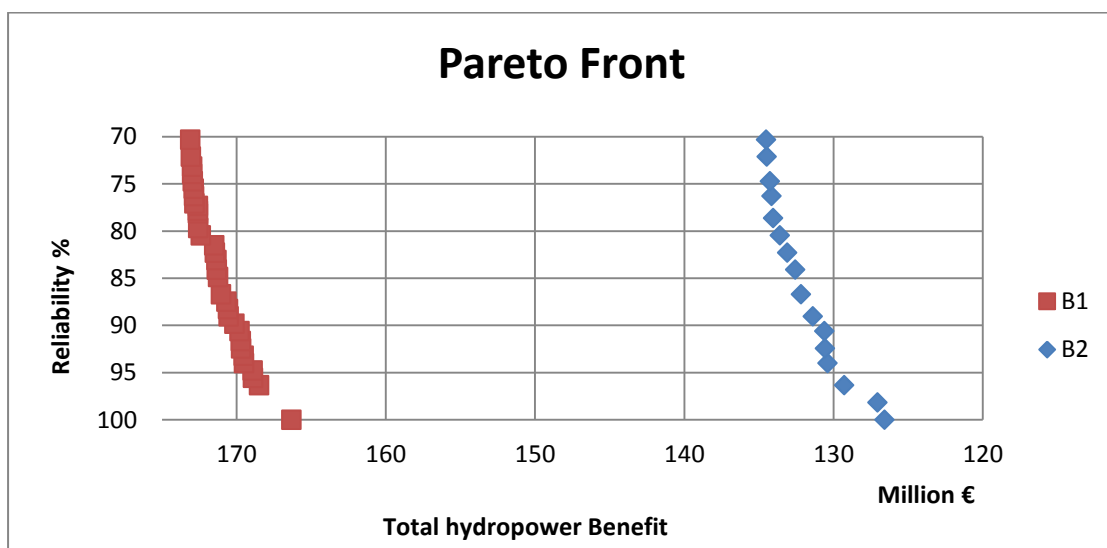


Figure 7: Pareto front of B1 and B2 scenarios.

Table 2: Comparative table of total energy production in GWh

Scenario\Month	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Total
B1	37.57	36.2	35.83	36.4	37.38	38.6	60.93	72.78	69.57	79.36	77.6	62.91	645.13
B2	29.94	25.81	24.66	26.55	26.77	39.18	37.27	50.04	54.36	63.8	61.69	48.89	488.96
Variation (%)	25%	40%	45%	37%	40%	-1%	63%	45%	28%	24%	26%	29%	32%

Generally in all scenarios studied, the algorithm found solutions with 100% reliability and that due to high water levels in reservoirs and because demand is relatively small, demand does not exceed a total of 100 hm³ at any time step.

Response of B1 and B2 scenarios under uncertainty

To investigate the reliability and responsiveness of the operating rule for scenarios B1 and B2 were used time series of 1000 years. And in this case the control variables which were used had 100% reliability. The reason that the optimization of the system was not based on synthetic time series is purely computational. This was a prohibitive factor in considering how to optimize lasted 400 generations with population size 80.

Generally system reliability in meeting the demand remains high in both cases B1 and B2 above the level of 99%. The coverage of environmental reliability of supply is on both scenarios is 100%. On the other hand there are significant changes in hydro energy production and this is because the absence of Temenos dam (scenario 2). At this point it should be recalled that the control variables examined in this case was those which had reliability 100%.

Table 3: Comparative table of total energy production in GWh

Scenario\Month	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Total
B1	64.64	54.02	37.43	43.08	54.14	65.78	85.92	99.12	99.12	99.56	83.38	67.79	853.98
B2	44.09	39.44	49.02	48.97	44.04	65.87	55.31	73.53	67.04	69.12	65.44	51.71	673.59
Variation (%)	47%	37%	-24%	-12%	23%	0%	55%	35%	48%	44%	27%	31%	27%

Based on the above table 3 there is an increase of 27% of the average output of the hydroelectric power in the Nestos hydroelectric complex in the scenario where the Temenos dam is taken into account, this means an average increase in annual revenue from energy production around 15 million euros. Also, the energy output of scenario B1 the summer months is increased by approximately 40% compared to scenario B2. According to the above table the case B1 shows a tendency for power generation during the summer while the winter months seem to produce less energy than the B2.

Conclusions and suggestions for further research

- The irrigation and environmental objectives of the water system met with virtually no failures if appropriate solutions are selected from the Pareto front and that because the system has enough water to cover the needs that simultaneously fluctuate at low levels.
- Based on the comparison of scenarios A1, A2, B1 and B2 it is shown that the construction of Temenos dam contribute significantly to the increase of hydro energy production while ensuring that the system will meet water demand.
- Significant improvement is shown in scenario 1 (including the dam of Temenos) when seasonal variable is used to distinguish between irrigated and non-irrigated period, because this way during the winter months more water is stored in reservoirs which leads to increased drop height (increased energy output), and increase in reserves to cover environmental and irrigation needs during the summer months.
- For scenario 2 the use of seasonal variable does not bring great improvement in the results obtained, probably due to the lack of Temenos dam.
- The comparison between the Pareto of B1 and B2 shown above indicates the contribution of Temenos dam in energy production, resulting in displacement of the Pareto leading to a surplus of revenue about 10 million euros per year
- At this point it is worth mentioning that the solutions obtained by optimizing the hydrosystem for the period 1991-1995 may be suboptimal since it is a dry period.

Some interesting proposals for further analysis of Nestos hydrosystem are presented below:

- Use of parallel computing, using the power of multiple computers would reduce simulation time and make possible the use of synthetic time series for the optimization.
- Comparison of the results obtained in this thesis with others produced by other tools or a combination of them, such as Hydroneas or HEC-Resim
- It will be useful to calibrate and optimize again the hydrosystem but using larger historical time series (if any) or the synthetic time series.
- Regulate the energy production during the year by using an energy demand curve.

WEAP21 software has potential for improvement and expansion. Some of these are:

- Addition of a parameter that would allow determining the exact desired flow from each reservoir.
- The separation of the produced energy in the primary and secondary would help determine optimal management policy.
- The inclusion in WEAP21 evolutionary optimization algorithm that could be used for both calibration problems and system optimization.
- Reducing simulation time.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Υδροσύστημα ορίζεται ένα σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα, που συνεργαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς, που αναφέρονται τόσο στην αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου, όσο και στην προστασία από την καταστροφική δράση του ως φυσικού κινδύνου (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1997). Για την εξυπηρέτηση αυτών των σκοπών είναι απαραίτητη η ανάλυση των υδροσυστημάτων έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη διαχειριστική πολιτική. Η ανάλυση συστημάτων βασίζεται σε μια διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις (decisions) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης. Εργαλεία ανάλυσης των υδροσυστημάτων αποτελούν τα μαθηματικά μοντέλα ενώ εργαλεία επιλογής απόφασης αποτελούν οι διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Στόχοι της διαδικασίας αυτής θα μπορούσαν μεταξύ άλλων να είναι η κάλυψη των διαφόρων καταναλωτικών αναγκών, η παραγωγή ενέργειας, η προστασία από πλημμύρες, η διατήρηση της καλής οικολογικής κατάστασης, κ.α. πάντα με διατήρηση υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας (περιορισμός της αβεβαιότητας). Από αυτή τη διαδικασία προκύπτουν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων. Οι κανόνες αυτοί εκφράζουν την βέλτιστη διαχειριστική πολιτική η οποία προέκυψε από την ανάλυση του Υδροσυστήματος. Ταμιευτήρες οι οποίοι εξυπηρετούν πλέον του ενός στόχου ονομάζονται πολλαπλού σκοπού, πράγμα που ισχύει και για Ελληνικά δεδομένα. Όπως είναι λογικό η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνει καθώς αυξάνουν τα αντικρουόμενα κριτήρια πράγμα που καθιστά την ανάλυση και βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος απαραίτητη. Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων πλέον της κάλυψης των καταναλωτικών αναγκών είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης (σχεδόν 90%), η κάλυψη των ενεργειακών αιχμών, ενώ πολύ σημαντική είναι η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας πράγμα που σημαίνει αξιόπιστη αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα οι μονάδες μετατροπής ενέργειας ενός ταμιευτήρα είναι αντιστρεπτές, δηλαδή λειτουργούν ως στρόβιλοι (φάση παράγωγης), είτε ως αντλίες (φάση αποθήκευσης), έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποθηκεύεται ενέργεια η οποία είναι άμεσα διαθέσιμη σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Στην Ελλάδα υπάρχουν σήμερα δύο αντιστρεπτοί σταθμοί, τα Ανώματα-Σφηκιά (Αλιάκμονας) και Πλατανόβρυση-Θησαυρός (Νέστος).

1.2 Στόχος

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την Πολυκριτηριακή εξελικτική βελτιστοποίηση σε συνδυασμό με άλλα υπολογιστικά εργαλεία για την εξαγωγή κανόνων λειτουργίας υδροηλεκτρικών έργων. Σαν μελέτη περιπτώσεως εξετάζεται το υδροσύστημα του ποταμού Νέστου.

1.3 Βήματα Υλοποίησης

Συνοπτικά τα βήματα υλοποίησης της παρούσας εργασίας είναι τα έξης:

- Κατανόηση λειτουργίας υδροσυστημάτων
- Κατανόηση Πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης
- Κατανόηση στοχαστικών χρονοσειρών
- Κατανόηση υδροσυστήματος Νέστου
- Δημιουργία μοντέλου του υδροσυστήματος σε περιβάλλον WEAP21
- Δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών με το πρόγραμμα Castalia
- Ανάπτυξη συνεργασίας MATLAB και WEAP21 με σκοπό την βαθμονόμηση του μοντέλου καθώς και την βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος
- Εφαρμογή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

1.4 Δομή εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια γενική αλλά περιεκτική περιγραφή του ζητήματος βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας καθώς και μια επιγραμματική παρουσίαση των περιεχόμενων των επόμενων κεφαλαίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής ανάλυση των υδροσυστημάτων, των κανόνων λειτουργίας, των αντικρουόμενων χρήσεων καθώς και παρουσίαση του συστήματος άντλησης-ταμίευσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και η προσομοιωμένη απόδοση. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της χρήσης στοχαστικών χρονοσειρών. Επίσης γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ζητήματα που αφορούν την χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης στην διαχείριση υδατικών πόρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του λογισμικού WEAP21 το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην συνέχεια της εργασίας για την προσομοίωση του υδροσυστήματος του Νέστου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το υδροσύστημα του Νέστου καθώς και οι όποιες ιδιαιτερότητες του.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση, την βαθμονόμηση και την βελτιστοποίηση του συστήματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο εμφανίζονται τα αποτελέσματα και συγκρίσεις που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία καθώς και σχολιασμός αυτών.

Στο Όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του ζητήματος.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται ο κώδικας προγραμματισμού που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον MATLAB για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται ο τρόπος χρήσης του κανόνα λειτουργίας με τη βοήθεια ψευδοκώδικα.

2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

2.1 Νερό, ένα πολύτιμο αγαθό

Η διαχείριση των υδατικών πόρων (ΔΥΠ) προβάλλεται σήμερα περισσότερο από ποτέ ως κεφαλαιώδες ζήτημα πρωταρχικής σημασίας. Η διατήρηση της ζωής και η ανάπτυξη οποιασδήποτε ανθρώπινης δραστηριότητας (οικονομικής, εμπορικής, κοινωνικής, κλπ) είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την χρήση νερού σε κατάλληλη ποιότητα και ποσότητα. Πριν από μερικά μόλις χρόνια το νερό στη συνείδηση όλων μας ήταν ένας φυσικός πόρος σε αφθονία που μπορούσε να χρησιμοποιείται σπάταλα, χωρίς καμία συνέπεια. Η λογική αυτή όμως έχει περάσει ανεπιστρεπτί, εξαιτίας της μεγάλης ανάπτυξης των τελευταίων ετών (γεωργία, βιομηχανία, αστικά κέντρα) και της αύξησης του πληθυσμού της γης, το νερό θεωρείται και είναι πλέον ένα αγαθό «σε κρίση» με αποτέλεσμα να προκύπτουν σοβαρά προβλήματα από την κακή διαχείριση και την ανεπαρκή προστασία του. Είναι χαρακτηριστικό πως σήμερα, σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, 1 δισ. άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό. Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η ανάγκη εξασφάλισης νερού ικανοποιητικής ποιότητας παντού και για πάντα είναι επιτακτική.

2.2 Υδατική προέλευση και κατανομή

Ο υδρολογικός κύκλος (Σχήμα 2.1) είναι μια κατάσταση διαρκούς κυκλοφορίας και δυναμικής ισορροπίας μεταξύ των τριών φάσεων του νερού (υγρής, στερεάς και αέριας). Το νερό που φτάνει στην επιφάνεια της γης εισέρχεται στο υπέδαφος μέσω υδροπερατών πετρωμάτων και δημιουργεί υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Ενώ οι ποσότητες του νερού που δεν εισέρχονται στο υπέδαφος δημιουργούν ποτάμια ή ρέματα (επιφανειακή νερά), ή λιμνάζει στην επιφάνεια της γης σχηματίζοντας λίμνες. Τα υπόγεια νερά και τα επιφανειακά νερά είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα επιφανειακά νερά κατά τη διαδρομή (υδροπερατά πετρώματα) τροφοδοτούν τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και αντίστροφα τα υπόγεια νερά έρχονται στην επιφάνεια μέσω των πηγών και δημιουργούν επιφανειακά ποτάμια ή ρέματα. Τα υπόγεια νερά σε σχέση με τους άλλους υπόγειους φυσικούς πόρους όπως είναι μεταλλεύματα, υδρογονάνθρακες κλπ. έχουν το πλεονέκτημα της ανανέωσης όμως έχουν και το μειονεκτήματα της μόλυνσης και της ρύπανσης.



Σχήμα 2.1: Ο κύκλος του νερού (Perlman et al., 2005)

Η επιφάνεια της γης καλύπτεται σε ποσοστό πάνω από το 70% από νερό. Οι μεγαλύτερες ποσότητες νερού βρίσκονται στη θάλασσα και καταλήγουν στην ξηρά, ως ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα με την εξάτμιση και τη μεταφορά των υδρατμών, ενώ τα επιφανειακά νερά των ποταμών και οι διαδρομές των υπογείων έχουν ως κατάληξη κάποιο φυσικό αποδέκτη, συνήθως τη θάλασσα. Στον πίνακα δεδομένων (Πίνακας 2.1) περιγράφεται λεπτομερώς η κατανομή του νερού της γης σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Παρατηρείται λοιπόν ότι από τα συνολικά 1.386 hm^3 του νερού στη γη το 97% περίπου είναι μη πόσιμο. Το 68% του γλυκού νερού είναι δεσμευμένο σε πάγο και παγετώνες και ένα 30% του γλυκού νερού βρίσκεται σε υπόγειους υδροφορείς. Το επιφανειακό γλυκό νερό που βρίσκεται σε ποτάμια και λίμνες ανέρχεται συνολικά σε 93.100 hm^3 και αποτελεί το 1/150 του 1% του συνολικού νερού στη γη. Πάρα ταύτα, τα ποτάμια και οι λίμνες είναι οι βασικές πηγές νερού για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών.

Πίνακας 2.1: Εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής νερού (Gleick, 1996)

ΜΟΡΦΗ ΝΕΡΟΥ	ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΚΥΒΙΚΑ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ
Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι	1.338.000.000	--	96,5
Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι	24.064.000	68,7	1,74
Υπόγειο Νερό	23.400.000	--	1,7
Γλυκό	10.530.000	30,1	0,76
Αλμυρό	12.870.000	--	0,94
Εδαφική Υγρασία	16.500	0,05	0,001
Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300.000	0,86	0,022
Λίμνες	176.400	--	0,013
Γλυκές	91.000	0,26	0,007
Αλμυρές	85.400	--	0,006
Ατμόσφαιρα	12.900	0,04	0,001
Έλη	11.470	0,03	0,0008
Ποταμοί	2.120	0,006	0,0002
Βιολογικό Νερό	1.120	0,003	0,0001
Σύνολο	1.386.000.000	--	100

Οι πόροι του νερού δεν είναι αποθεματικοί, αλλά ανανεώσιμοι. Επομένως αυτό που έχει σημασία δεν είναι η ποσότητα νερού που είναι αποθηκευμένη, αλλά αυτή που ανανεώνεται κάθε χρόνο. Έτσι, λοιπόν, τα επιφανειακά νερά διακινούνται και άρα ανανεώνονται με πολύ πιο γρήγορους ρυθμούς από τα υπόγεια. Με άλλα λόγια δεν έχει τόσο σημασία η στατική εικόνα της αποθήκευσης του νερού, αλλά η δυναμική εικόνα της κυκλοφορίας του νερού στην υδρόγειο, η οποία περιγράφεται από τις ποσότητες των διακινήσεων του νερού ανάμεσα στις διάφορες μορφές, δηλαδή από τις ποσότητες που μεταφέρονται μέσα στον υδρολογικό κύκλο (Perlman et al., 2005).

2.3 Η έννοια της διαχείρισης υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Ως υδροσύστημα (hydrosystem) ορίζεται ένα σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδατικά σώματα και τεχνικά έργα, που συνεργαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς, που αναφέρονται τόσο στην αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου, όσο και στην προστασία από την καταστροφική δράση του νερού ως φυσικού κινδύνου. Ο όρος σύστημα υδατικών πόρων (water resource system) έχει συνήθως στενότερη έννοια, καθώς δεν περιλαμβάνει τα έργα ελέγχου πλημμυρών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997).

Τα βασικά βήματα της προσέγγισης προς την τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά εφικτή εξασφάλιση του απαραίτητου για τις ανθρώπινες δραστηριότητες νερού είναι:

1. Προσδιορισμός της διαθεσιμότητάς του σε σχέση με το χώρο και το χρόνο.
2. Σχεδιασμός και εκτέλεση των έργων αξιοποίησής του.
3. Διαχείριση του όλου συστήματος των υδατικών πόρων.

Ως διαχείριση των υδατικών πόρων ορίζεται *"η επιστημονική και επιχειρησιακή πρακτική της διευθέτησης του ισοζυγίου προσφοράς και ζήτησης του νερού με στόχο την ισότιμη ικανοποίηση των αναγκών σε νερό και τη διατήρηση των περιβαλλοντικών συστημάτων"* (Κυριαζής, Μυλόπουλος et al 2002)

Στη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων συμπεριλαμβάνονται τόσο οι επιστημονικές και τεχνικές μέθοδοι, όσο και οι επιχειρησιακές επεμβάσεις και τα διοικητικά μέτρα που στόχο έχουν τη βέλτιστη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού, προκειμένου να ικανοποιηθεί μεγάλο μέρος των απαιτήσεων σε νερό, σύμφωνα με τα κριτήρια, τις προτεραιότητες και τους στόχους που έχουν προκαθοριστεί (N. Μυλόπουλος 2001).

Η διαχείριση των υδατικών πόρων έχει δύο διακριτές και ανεξάρτητες μεταξύ τους διαστάσεις: τη διάσταση της φυσικής προσφοράς και τη διάσταση της ζήτησης. Για να επιτευχθεί ο στόχος της επάρκειας των υδατικών αποθεμάτων δεν απαιτείται η μονόπλευρη όσο και αδιέξοδη περιβαλλοντικά εξασφάλιση ολοένα και περισσότερων υδατικών αποθεμάτων, αλλά η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης του νερού. Είναι σαφές ότι για τη φυσική προσφορά του νερού ευθύνεται κυρίως η φύση, που ωστόσο σταδιακά εξασθενεί λόγω των αυξημένων πιέσεων αφού η συμβολή

της τεχνολογίας στον τομέα αυτόν αν και σημαντική είναι μόνο συμπληρωματική (πχ φράγματα). Για τη διαμόρφωση του δεύτερου σκέλους του ισοζυγίου που αφορά στη ζήτηση του νερού, η αποκλειστική ευθύνη αποδίδεται στον ανθρώπινο παράγοντα και συνεπώς αποτελεί ευθύνη της οργανωμένης πολιτείας.

Το ζητούμενο λοιπόν είναι ο σχεδιασμός και η εφαρμογή μιας υδατικής πολιτικής με κεντρικό στόχο τη διευθέτηση των ισοζυγίων προσφοράς και ζήτησης του νερού στις υδρολογικές λεκάνες και τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας. Η πολιτική αυτή θα πρέπει να έχει τα χαρακτηριστικά της βιωσιμότητας, θα πρέπει δηλαδή να διασφαλίζει διαχρονικά τόσο την ανάπτυξη, με την ικανοποίηση των αναγκών σε νερό, όσο και την περιβαλλοντική προστασία, με τη διατήρηση της υγείας και της ακεραιότητας των υδατικών συστημάτων.

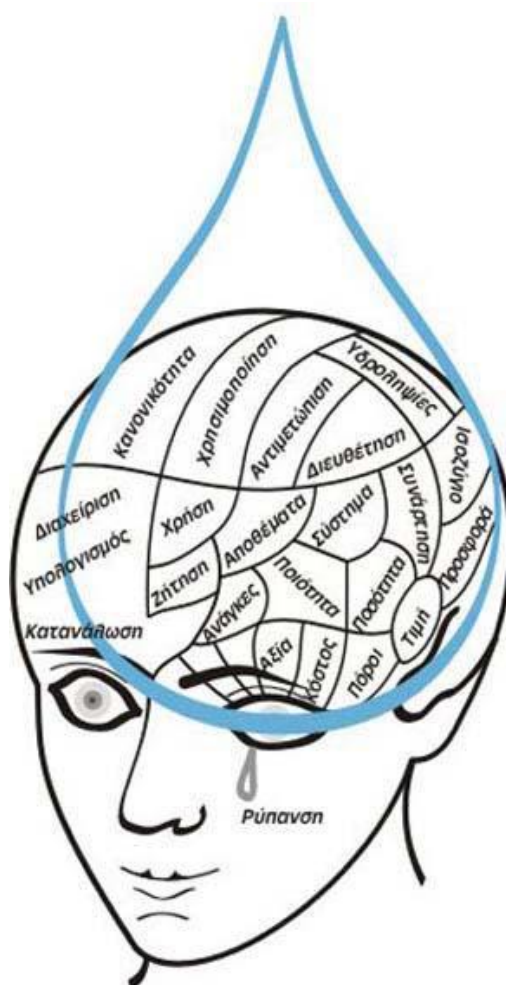
Επίσης, η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων, διακρίνεται σε δύο συνιστώσες, την υδρολογική και την επιχειρησιακή. Η υδρολογική συνιστώσα αφορά την έρευνα, την παρακολούθηση και τη μελέτη κατανομής και διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων στο χώρο και το χρόνο. Επίσης επεκτείνεται και σε ότι έχει να κάνει με τα θέματα της απόληψης του νερού από το περιβάλλον, καθώς και με εκείνα της επιστροφής του σ' αυτό. Η επιχειρησιακή συνιστώσα έχει κοινωνικοοικονομικό χαρακτήρα και αφορά τη διοικητική-οργανωτική και επιχειρησιακή διάρθρωση των παρεμβάσεων. Ειδικότερα, αναφέρεται στην αξιοποίηση των υδατικών πόρων στην κατεύθυνση της κάλυψης των υδατικών αναγκών. Με την έννοια αυτή σχετίζεται με τη ζήτηση του νερού και τους παράγοντες που τη διαμορφώνουν και την επηρεάζουν, καθώς και με τον ορθολογικό σχεδιασμό της αξιοποίησης των υδατικών πόρων και της κατανομής τους στις χρήσεις και τις δραστηριότητες, προκειμένου να επιτυγχάνεται το μέγιστο δυνατό όφελος. Ο όρος του οφέλους στην προκειμένη περίπτωση δεν εξαντλείται στην οικονομική θεώρηση του ζητήματος, αλλά επεκτείνεται κατά τρόπο που να επιτρέπει την ενσωμάτωση και κοινωνικών, περιβαλλοντικών ή συχνά και εθνικών στόχων και παραμέτρων, σύμφωνα με τα κριτήρια και τις προτεραιότητες που κάθε φορά τίθενται (Ν. Μυλόπουλος 2001) .

2.3.1 Οι στόχοι της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Οι στόχοι μιας πολιτικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, η οποία θα διέπεται από τις αρχές που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω:

- Η εξασφάλιση των απαραίτητων ποσοτήτων νερού και της κατάλληλης ποιότητας για την ικανοποίηση των αναγκών για την ύδρευση, την άρδευση, τη βιομηχανία κ.λπ. της ευρύτερης περιοχής.
- Η προστασία των υδατικών πόρων από τη ρύπανση.
- Η παροχή ικανοποιητικής προστασίας από ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι πλημμύρες και η ξηρασία.
- Η εξασφάλιση των απαραίτητων ποσοτήτων νερού για την κάλυψη των αναγκών της χλωρίδας και της πανίδας.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών είναι απαραίτητη η συλλογή πληροφοριών (Σχήμα 2.2) όσον αφορά στα υδρολογικά, υδραυλικά, τοπογραφικά και μετεωρολογικά δεδομένα για την ενιαία λεκάνη.



Σχήμα 2.2: Παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν στη διαχείριση υδατικών πόρων (Σούλιος, 2009)

2.3.2 Νομοθετικό πλαίσιο για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στην Ε.Ε. - Η Οδηγία 2000/60/EC

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, καθώς η Ευρώπη είναι ήπειρος με μεγάλο αριθμό διεθνών λεκανών απορροής (69), η κοινοτική Οδηγία Πλαίσιο 2000/60 για τα ύδατα θέτει τις βάσεις για την προστασία και τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων. Ο στόχος της Οδηγίας είναι η βιώσιμη διαχείριση και η προστασία των υδάτων. Θεσπίζει το πλαίσιο της κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, με σκοπό επίσης την ενσωμάτωση της πολιτικής αυτής και σε άλλους τομείς της κοινοτικής πολιτικής, όπως είναι η ενεργειακή πολιτική, η γεωργική πολιτική, η πολιτική των μεταφορών, η περιφερειακή πολιτική, κ.α. (Ε.Ε., 2000). Επίσης, μεριμνά για την επίτευξη καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης των υδάτων, επιφανειακών, υπόγειων ή παράκτιων, και φιλοδοξεί να συμβάλει στο μετριασμό των επιπτώσεων των πλημμύρων χωρίς ωστόσο να συμμετέχει ενεργά για το σκοπό αυτό.

Οι βασικοί στόχοι της Οδηγίας είναι (Μακρόπουλος 2010):

- Προστασία όλων των υδάτων: ποταμούς, λίμνες, παράκτια και υπόγεια.
- Θέτει φιλόδοξους στόχους για να εξασφαλιστεί ότι όλα τα ύδατα θα ανταποκρίνονται στην «καλή οικολογική κατάσταση» μέχρι το 2015.
- Δημιουργεί σύστημα διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.
- Απαιτεί διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών και όλων των εμπλεκόμενων μερών, (στην περίπτωση των διεθνών περιοχών λεκάνης απορροής ποταμού).
- Εξασφαλίζει ενεργό συμμετοχή όλων των φορέων, συμπεριλαμβανομένων των μη κυβερνητικών οργανισμών και των τοπικών αρχών, στις δραστηριότητες της διαχείρισης των υδάτων.
- Εξασφαλίζει μείωση και έλεγχο της ρύπανσης από όλες τις πηγές όπως η γεωργία, η βιομηχανική δραστηριότητα, οι αστικές περιοχές, κ.λπ.
- Απαιτεί πολιτικές τιμολόγησης του νερού και εξασφαλίζει ότι ο ρυπαίνων πληρώνει (ανάκτηση κόστους).

Η βασική μονάδα της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων είναι η Λεκάνη απορροής ποταμού. Αυτή ορίζεται σαν μια αυτόνομη εδαφική έκταση από την οποία συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής του νερού, και παροχετεύεται στη θάλασσα με ενιαίο στόμιο ποταμού (Οδηγία Πλαίσιο 60/2000 άρθρο 2, παρ. 13).

Τα κράτη – μέλη θα πρέπει να ορίσουν τα υδατικά διαμερίσματα στο πλαίσιο της επικράτειας τους, με βάση τις επιμέρους λεκάνες απορροής ποταμού και για κάθε λεκάνη απορροής θα πρέπει να καταρτισθεί ένα Σχέδιο Διαχείρισης. Με τα Σχέδια Διαχείρισης δίνεται η δυνατότητα για μια ολοκληρωμένη παρατήρηση, εξέταση και ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών, επιφανειακών και υπόγειων νερών. Επίσης, εξετάζεται η δυνατότητα ικανοποίησης των διαφόρων αναγκών σε νερό αλλά και η εξισορρόπηση μεταξύ ανταγωνιστικών αναγκών θέτοντας προτεραιότητες και καταστρώνοντας κατάλληλα διαχειριστικά σενάρια ζήτησης. Τέλος γίνεται συγχρονισμός των μέτρων προστασίας των υδάτων λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τις ιδιαιτερότητες του υδατικού δυναμικού της κάθε λεκάνης απορροής (ποσοτική και ποιοτική κατάσταση), τα προβλήματα που εμφανίζει αλλά και τις ιδιαιτερότητες των αναγκών σε νερό σε αυτή. Με τον τρόπο αυτό η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων γίνεται αποτελεσματικότερη, καθώς οι αντίστοιχες διοικητικές ενότητες υπαγορεύονται από το φυσικό περιβάλλον.

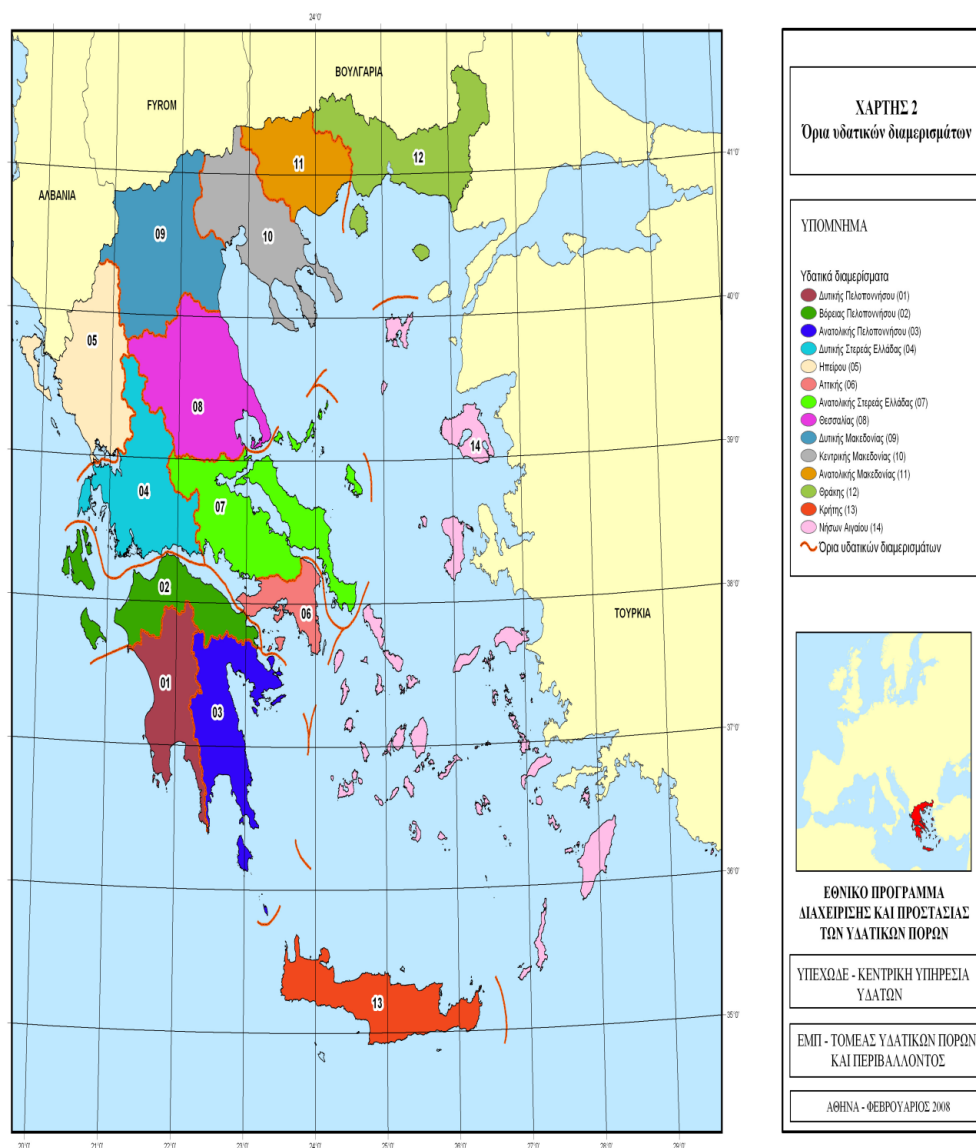
2.4 Η διαχείριση υδατικών πόρων στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, περιλαμβάνει πολλές μικρές λεκάνες απορροής λόγω του έντονου ανάγλυφου της και του μεγάλου αναπτύγματος ακτών, πράγμα που σημαίνει πως απαιτούν διαφορετική διαχειριστική πολιτική. Επίσης υπάρχει έντονη ανισοκατανομή χωρική και χρονική της φυσικής προσφοράς του νερού της βροχής αλλά και της ζήτησής. Έτσι, στην ηπειρωτική και ορεινή Ελλάδα και κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό των βροχοπτώσεων, ενώ αντίθετα η πεδινή και παράκτια χώρα, στην οποία συγκεντρώνεται και το μεγαλύτερο μέρος της ανθρώπινης δραστηριότητας (γεωργία και τουρισμός), χαρακτηρίζεται από χαμηλά ποσοστά βροχόπτωσης και μεγάλη ζήτηση νερού.

Ο περιορισμένος αριθμός και η γεωγραφική κατανομή των ποτάμιων συστημάτων, η οποία οφείλεται στο γεωμορφολογικό ανάγλυφο καθώς και η έλλειψη υδροτεχνικών έργων, οδήγησε σε μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων και στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού με αποτέλεσμα την έντονη υποβάθμιση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε ορισμένες περιοχές ή ακόμα και την υφαλμύρωση σε παράκτιες περιοχές (π.χ. Θεσσαλία).

Πρέπει να σημειωθεί πως η Ελλάδα «μοιράζεται» μεγάλα υδατικά συστήματα με γειτονικές χώρες. Τα κύρια ποτάμια συστήματα του βόρειου τμήματος της χώρας, (Έβρος, Νέστος, Στρυμόνας, Αξιός, Αλιάκμονας) καθώς και τρεις από τις μεγαλύτερες λίμνες ανήκουν και σε γειτονικές χώρες. Αυτό δυσκολεύει τόσο τον έλεγχο της ρύπανσης που εμφανίζεται στα συστήματα αυτά όσο και την αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού αυτών.

Ο νόμος – πλαίσιο (Ν. 1739/87) για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στην Ελλάδα ορίζει πως το νερό αποτελεί φυσικό αγαθό για την ικανοποίηση κοινωνικών αναγκών, ενώ με τον όρο υδατικοί πόροι νοείται το σύνολο των επιφανειακών και υπογείων νερών της χώρας, χωρίς διάκριση στην ποιότητα, την προέλευση ή την πιθανή χρήση που μπορούν να οδηγηθούν. Με βάση τον νόμο αυτό θεσμοθετήθηκε η διαίρεση της χώρας σε 14 υδατικά διαμερίσματα, για λόγους οργανωτικούς και διοικητικούς (Σχήμα 2.3). Επιπρόσθετα, με το νόμο αυτό εκσυγχρονίστηκε σε κάποιο βαθμό η ισχύουσα νομοθεσία, σε ότι αφορούσε την ορθολογική διαχείριση του νερού. Τέλος, διαμορφώθηκε ένα νέο θεσμικό πλαίσιο, καθώς και οι αναγκαίοι μηχανισμοί για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας.



Σχήμα 2.3: Τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, 2008)

2.5 Υδατικές χρήσεις

Η ζήτηση του νερού συνεχώς αυξάνεται λόγω του συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού του πλανήτη και της αύξησης των αναγκών σε νερό.

Οι χρήσεις του νερού διακρίνονται σε καταναλωτικές και μη. Οι καταναλωτικές χρήσεις απαιτούν την απόληψη/εκροή συγκεκριμένης ποσότητας νερού, η οποία εξέρχεται από το φυσικό υδατικό σύστημα και της οποίας μόνο ένα μέρος ή καθόλου επιστρέφει στο εν λόγω σύστημα (άμεσα ή έμμεσα), με διαφοροποιημένη την ποιοτική του κατάσταση.

Καταναλωτικές υδατικές χρήσεις είναι η άρδευση, η ύδρευση, η κτηνοτροφία, η βιομηχανία και η ψύξη (βιομηχανικών συγκροτημάτων και ΑΗΣ). Μη καταναλωτικές είναι οι χρήσεις, στις οποίες το νερό χρησιμοποιείται χωρίς να μεταβάλλονται (ουσιωδώς) τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του και χωρίς να απομακρύνεται από το φυσικό υδατικό σύστημα. Στις μη καταναλωτικές υδατικές χρήσεις συγκαταλέγονται η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η περιβαλλοντική διατήρηση, η αναψυχή, η ναυσιπλοΐα και η ιχθυοκαλλιέργεια (Κουτσογιάννης, 2007).

Αστική Χρήση: Η σημαντικότερη μορφή αστικής ζήτησης είναι η ύδρευση. Παρόλο που στην Ελλάδα ποσοτικά αντιστοιχεί μόνο στο 12% περίπου των συνολικών καταναλωτικών χρήσεων (ή 920 hm³ ετησίως), οι ποιοτικές απαιτήσεις για την ύδρευση είναι πολύ υψηλές. Πρόκειται εξάλλου για τη χρήση, η οποία είναι κοινωνικά καταξιωμένη και θεσμικά κατοχυρωμένη (Ν. 1739/87) ως η χρήση πρώτης προτεραιότητας (Κουτσογιάννης, 2007). Κατά τη διαχείριση των υδατικών πόρων, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη της ύδρευσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής δύο παράγοντες: πρώτον, η πολύ μικρή επιτρεπτή αστοχία στην παροχή και δεύτερον η εξασφάλιση καλής ποιότητας νερού. Το 5-20% του νερού, που καταναλώνεται καθημερινά, χρησιμοποιείται από τα νοικοκυριά, ενώ η εύκολη πρόσβαση και η αυξημένη χρήση του, κυρίως στον τομέα της προσωπικής υγιεινής, έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της κατανάλωσής του. Σήμερα, η μέση ημερήσια οικιακή κατανάλωση ανέρχεται σε περίπου 200 λίτρα νερό κατ' άτομο μαζί με τις απώλειες (Κουτσογιάννης κ.ά., 2007). Πέραν των αναγκών ύδρευσης των μόνιμων και εποχιακών κατοίκων (παραθεριστικές περιοχές), στην αστική χρήση συγκαταλέγονται επίσης η τουριστική χρήση του νερού (ξενοδοχειακές μονάδες, ενοικιαζόμενα δωμάτια), η οποία κατά μέσο όρο ανέρχεται σε 300 λίτρα την ημέρα κατ' άτομο, η βιοτεχνική χρήση, οι μικροαρδευτικές ανάγκες (μη οικιακή γεωργική χρήση), οι απώλειες των δικτύων κατά τη μεταφορά και τη διανομή του νερού και η δημόσια/δημοτική χρήση (σχολεία, δημόσια κτίρια, κοινοτικά καταστήματα, νοσοκομεία, πυροσβεστικοί κρουνοί) (Μιμίκου, 2004).

Αγροτική Χρήση: Θεωρείται παγκοσμίως ο μεγαλύτερος χρήστης. Παρότι η υψηλή κατανάλωση νερού για άρδευση επιφέρει εκτεταμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κανείς δε μπορεί να παραβλέψει το ζωτικό ρόλο της άρδευσης στην παραγωγή τροφής.

Βιομηχανία: Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στα αναπτυσσόμενα κράτη, λόγω της έντονης τεχνολογικής ανάπτυξης, γίνονται σημαντικές προσπάθειες για τον περιορισμό της κατανάλωσης του νερού για βιομηχανική χρήση και τη μείωση της παραγωγής βιομηχανικών αποβλήτων. Σύμμαχοι των προσπαθειών αυτών είναι καταρχήν οι αυστηροί κανονισμοί και περιορισμοί που επιβάλλονται από τη νομοθεσία και τις οδηγίες που εκδίδονται, αλλά και η κλιμακωτή τιμολόγηση της κατανάλωσης και η ανάπτυξη περιβαλλοντικής και κοινωνικής συνείδησης (Adventure Zone, 2003).

Ενέργεια: Οι παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις, κυρίως για ηλεκτρισμό, αναμένεται να αυξηθούν σε μεγάλο βαθμό στη διάρκεια του 21ου αιώνα, όχι μόνο εξαιτίας δημογραφικών πιέσεων αλλά και εξαιτίας των συνεχώς βελτιούμενων προδιαγραφών διαβίωσης, την αστική και βιομηχανική διόγκωση και τις αυξανόμενες προσδοκίες. Το 1996, το 18,4% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας προέρχονταν από υδροηλεκτρική ενέργεια (Μιμίκου, 2004).

2.6 Ενέργεια και υδροσυστήματα

2.6.1 Σχέση νερού και ενέργειας

Είναι γεγονός πως στις μέρες μας το θέμα της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την διαχείριση της ενέργειας. Και αυτό γιατί δεν είναι δυνατόν να μιλάμε για οικονομική διαχείριση νερού και μάλιστα αειφορική, ξέχωρα από ένα ολοκληρωμένο και πλήρως συνυφασμένο σχέδιο διαχείρισης ενέργειας. Λέγοντας αειφορική εννοούμε την κάλυψη των υδατικών αναγκών με βέλτιστο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιούμε την οικονομική και κοινωνική ευημερία, χωρίς να εξαντλούμε τα μέσα και τους πόρους οδηγώντας σε συμβιβασμούς τις επόμενες γενεές, ως προς την κάλυψη των αναγκών τους. Τόσο το σχέδιο διαχείρισης υδατικών πόρων, όσο και ενέργειας πρέπει να σχεδιάζονται συνδυαστικά με αειφορικά κριτήρια και σχετικά μεγάλο χρονικό ορίζοντα, συμπεριλαμβάνοντας αλλαγές που πρόκειται να συμβούν κυρίως στον ενεργειακό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να γίνει αντιληπτό και να υπεισέλθει στα σχέδια διαχείρισης ότι τα ορυκτά καύσιμα στα οποία στηρίχθηκε σχεδόν αποκλειστικά η ανάπτυξη του δυτικού κόσμου δεν είναι ανεξάντλητα, αλλά αναλώσιμα αφού δεν ανανεώνονται και η κατανάλωση τους καμία σχέση δεν έχει με την αειφορική ανάπτυξη που αναφέρθηκε (Κοντογιάννης, 2007).

2.6.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η διαχείριση των υδατικών πόρων συνδέεται άμεσα με τη παραγωγή ενέργειας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια, σε αντίθεση με άλλες μορφές ΑΠΕ χρησιμοποιούνταν ήδη από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα για ηλεκτροπαραγωγή όπου και κατασκευάστηκαν τα πρώτα υδροηλεκτρικά έργα μεγάλης κλίμακας

Η υδροηλεκτρική ενέργεια ουσιαστικά προκύπτει από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική, λόγω γης διαφοράς υψόμετρου η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται με κάποιες ειδικές διατάξεις (στρόβιλοι) σε μηχανική (περιστροφή άξονα) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι αποτελεί καθαρή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με μηδενικό κόστος και μηδενικές εκπομπές ρύπων, η δημιουργία νέων οικοσυστημάτων από τη δημιουργία των τεχνητών λιμνών, η ευελιξία των συστημάτων (κάλυψη αιχμής), η προστασία των κατάντη περιοχών από πλημμύρες και η δυνατότητα αξιοποίησης του νερού για άλλες χρήσης (πχ . άρδευση).

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κατασκευαστικό κόστος, καθώς και η αλλαγή του κατάντη περιβάλλοντος λόγω της διακοπής της συνέχειας του ποταμού του οικοσυστήματος και της τροφοδοσίας με φερτές ύλες. Στο πλείστο των περιπτώσεων τα θετικά της υδροηλεκτρικής ενέργειας υπερκαλύπτουν τα αρνητικά καθιστώντας την μια βιώσιμη μορφή ενέργειας. Πέραν των κλασικών υδροηλεκτρικών έργων κατασκευάστηκαν και μικρά υδροηλεκτρικά έργα που δεν απαιτούν κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα (η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τη φυσική παροχή του ποταμού).

Στο δυτικό κόσμο έχουν κατασκευαστεί ήδη πολλά φράγματα με κύριο σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή. Στις αναπτυσσόμενες χώρες άρχισαν πρόσφατα να κατασκευάζονται , εξασφαλίζοντας ενέργεια σε πολλές περιοχές συμβάλλοντας στη σημαντική αύξηση του βιοωτικού επίπεδου. Ενδεικτικά αναφέρονται τα 4 μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα σε όλο τον κόσμο (πίνακας 2.2) (Μαμάσης ,2011)

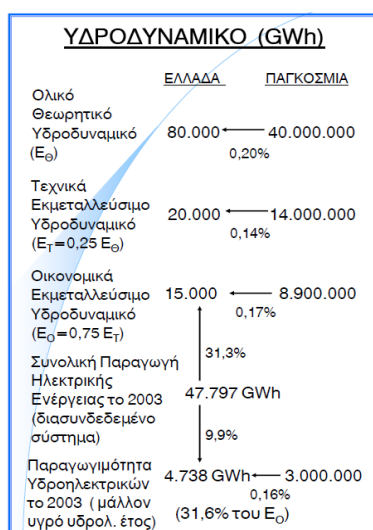
Πίνακας 2.2: Τα 4 μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά παγκοσμίως

Όνομα	Χώρα	Έτος κατασκευής	Ισχύς (MW)	Επιφάνεια ταμιευτήρα (km ²)
Three Gorges	Κίνα	2011	18.300-22.500	632
Itaipu	Βραζιλία – Παραγουάη	2003	14.000	1350
Guri (Simón Bolívar)	Βενεζουέλα	1986	10.200	4250
Tucuruí	Βραζιλία	1984	8.370	3014

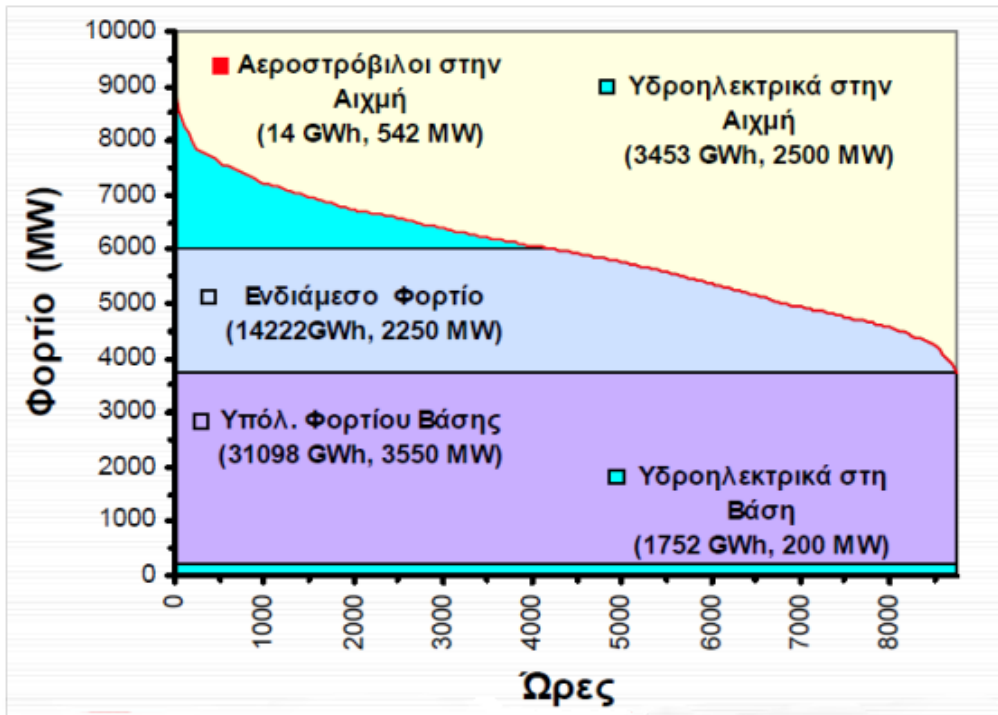
Στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο μέρος του υδροδυναμικού εντοπίζεται στο δυτικό και βόρειο τμήμα όπου βρίσκονται οι μεγαλύτεροι ποταμοί της χώρας (Αχελώος, Αραχθός, Αώος, Αλιάκμονας και Νέστος). Παρόλα αυτά το ποσοστά συμμετοχής των υδροηλεκτρικών στην παραγωγή ενέργειας είναι μικρό (το ένα τρίτο του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου δυναμικού), σε αντίθεση με τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες που έχουν εξαντλήσει σε μεγάλο ποσοστό το υδροδυναμικό τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η Νορβηγία εκμεταλλεύεται το 70% του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου δυναμικού της, καλύπτοντας το σύνολο των ενεργειακών αναγκών της (Κουτσογιάννης, 2007). Εκτιμάται ότι το μέσο ετήσιο εκμεταλλεύσιμο δυναμικό της χώρας είναι περίπου 15 TWh ή το 30% των σημερινών αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (σήμερα η υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει κάτω από το 10% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια) (Στεφανάκος, 2011). Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται δεδομένα για το Ελληνικό και παγκόσμιο ετήσιο υδροδυναμικό σε GWh (Σχήμα 2.3).

Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα εν λειτουργία ΥΗΕ στην Ελλάδα ενώ στον πίνακα 2.4 μεγάλα ΥΗΕ που αναμένονται να λειτουργήσουν σύντομα

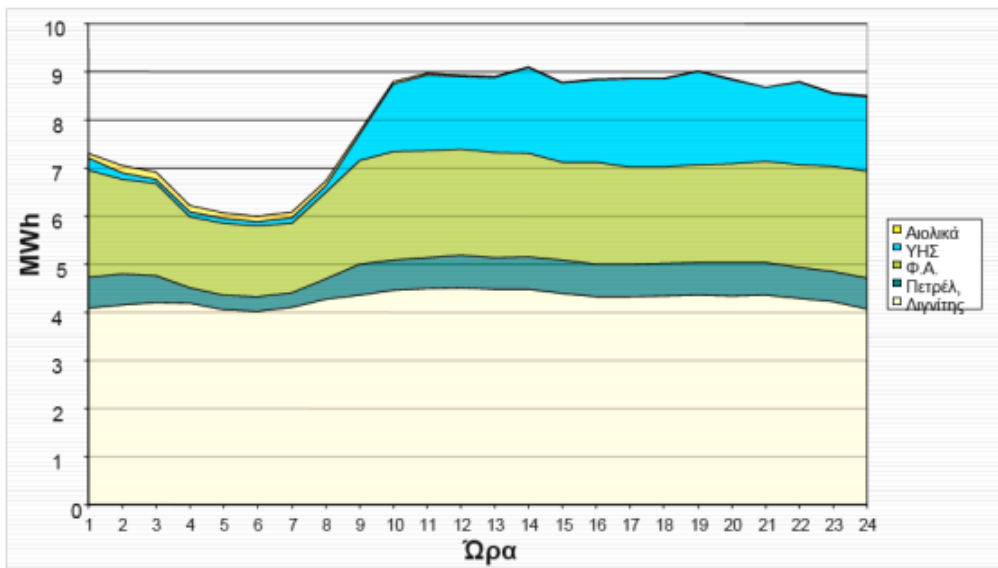
Όπως προαναφέρθηκε το κυριότερο πλεονέκτημα των ΥΗΕ είναι η ευελιξία τους που τους επιτρέπει τη χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αιχμών (Κουτσογιάννης, 2007). Αυτό γιατί μπορεί το υδροηλεκτρικό να συνδεθεί με το σύστημα σε 1 με 2 λεπτά. Στα σχήματα 2.4 και 2.5 φαίνεται η σημαντική συμβολή των ΥΗΕ στην κάλυψη των αιχμών στην Ελλάδα. Σημειώνεται πως η μεγάλες θερμοηλεκτρικές μονάδες απαιτούν μέρες έτσι ώστε να μεταβάλουν την παραγωγή της ενέργειας τους (Μαμάσης, 2011).



Σχήμα 2.3:Ετήσιο Ελληνικό και παγκόσμιο υδροδυναμικό (Στεφανάκος, 2011)



Σχήμα 2.4:Ετησιο Ελληνικό και παγκόσμιο υδροδυναμικό (Στεφανάκος, 2011)



Σχήμα 2.5:Ετησιο Ελληνικό και παγκόσμιο υδροδυναμικό (Στεφανάκος, 2011)

Πίνακας 2.3: Μεγάλα ΥΗΕ σε λειτουργία (Κουτσογιάννης, 2007)

A/A	ΥΗΕ	Ποταμός	Έτος ένταξης	Αριθμός εγκατ. μονάδων	Συνολική εγκατ. ισχύς (MW)	Ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα (hm ³)
1	Κρεμαστά	Μέσος Αχελώος	1965	4	437.2	2 820.0
2	Καστράκι		1970	4	320.0	74.0
3	Στράτος I+II		1988	2+2	156.2	14.0
Σύνολο συγκροτήματος					913.4	2 908.0
4	Πλαστήρας*	Ταυρωπός (Αχελώος)	1962	3	129.3	300.0
5	Πηγές Αώου**	Αώος και Άραχθος	1990	2	210.0	170.0
6	Πουρνάρι I		1981	3	300.0	323.0
7	Πουρνάρι II		1988	3	33.6	4.5
Σύνολο συγκροτήματος					543.6	497.5
8	Λάδωνας	Λάδωνας	1956		70.0	50.0
9	Άγρας	Βόδας	1956		50.0	
10	Εδεσσαίος	Εδεσσαίος	1969		19.0	
11	Πολύφυτο	Αλιάκμονας	1974	3	375.0	1 300.0
12	Σφηκιά***		1985	3	315.0	20.0
13	Ασώματα		1985	2	108.0	14.0
Σύνολο συγκροτήματος					808.8	1 334.0
14	Θησαυρός****	Νέστος	1997	3	384.0	680.0
15	Πλατανόβρυση		2000	2	116.0	72.0
Σύνολο συγκροτήματος					500.0	752.0
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ					3054.1	

*Εκτροπή Αχελώου προς Θεσσαλία

**Εκτροπή Αώου προς Άραχθο

***Αντιστρεπτός σταθμός (Αντληση από Ασώματα προς Σφηκιά)

****Αντιστρεπτός σταθμός (Αντληση από Πλατανόβρυση προς Θησαυρό)

Πίνακας 2.4: Μεγάλα ΥΗΕ που αναμένονται να λειτουργήσουν (Κουτσογιάννης, 2007)

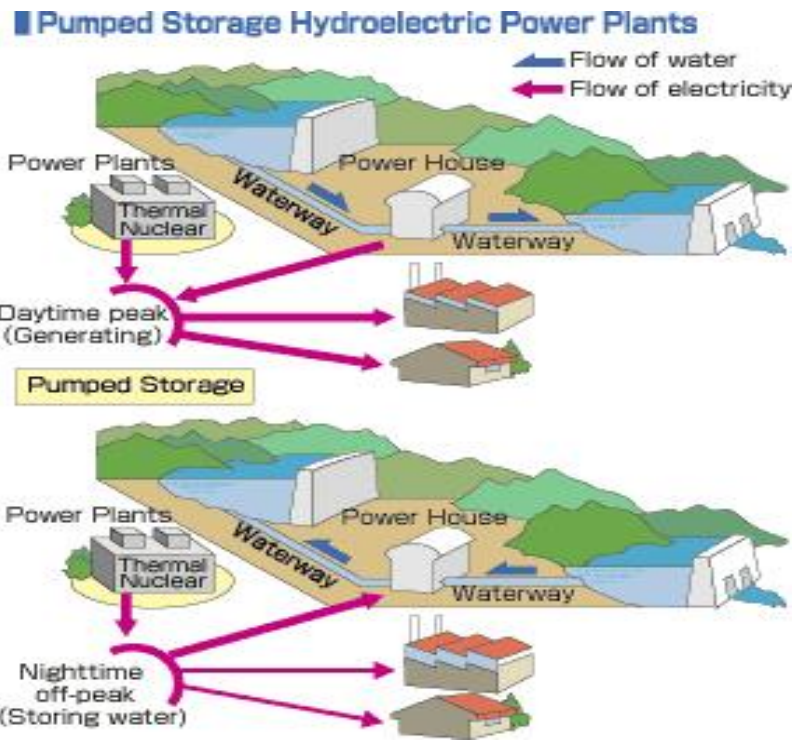
A/A	ΥΗΕ	Ποταμός	Συνολική εγκατ. Ισχύς (MW)
1	Μεσοχώρα	Άνω Αχελώος	161.6
2	Συκιά		126.5
3	Πευκόφυτο		160.0
4	Μετσόβιτικός	Άραχθος	25.0
5	Ιλαρίωνας	Αλιάκμονας	120.0
6	Τέμενος	Νέστος	19.0
	Σύνολο		612.1

2.6.3 Αποθήκευση ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε οι περισσότερες ΑΠΕ δεν προσαρμόζονται εύκολα στη ζήτηση. Από τη στιγμή που υπάρχει διαφορά μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης προκύπτει η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας. Η μόνη αξιόπιστη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας παρέχεται από τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα των οποίων οι μονάδες μετατροπής ενέργειας είναι αντιστρεπτές, δηλαδή μπορούν να λειτουργούν είτε ως στρόβιλοι (φάση παραγωγής), είτε ως αντλίες (φάση αποθήκευσης). Ο όλος κύκλος (άντλησης και παραγωγή) έχει βαθμό απόδοσης που μπορεί να φτάνει το 90%, (Κουτσογιάννης, 2007) τιμή ασύλληπτα υψηλή σε σύγκριση με τους άλλους τρόπους ενεργειακών μετατροπών. Για τη λειτουργία αντιστρεπτών ΥΗΕ απαιτείται κατά τη φάση άντλησης πρόσθετη πηγή ενέργειας, η οποία συνήθως προέρχεται από μεγάλες θερμοηλεκτρικές μονάδες σε ώρες χαμηλής ζήτησης (περίσσεια προσφοράς). Το αναστρέψιμο ΥΗΕ είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μόνο σε περιοχές που το επιτρέπει η φυσική και γεωλογική διαμόρφωση της περιοχής και όχι κοντά στις γραμμές μεταφοράς, οπότε σε αυτή την περίπτωση το κόστος της ενέργειας επιβαρύνεται.

Τα αναστρέψιμα ΥΗΕ έχουν λοιπόν διπλό όφελος. Απορροφούν την περίσσεια ενέργεια κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης μετατρέποντας την σε υδραυλική ενέργεια (και η οποία αποθηκεύεται στο πάνω ταμιευτήρα) για να την αποδώσουν στο δίκτυο τις ώρες αιχμής. Παρόλο που η διαδικασία αυτή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική (άντληση) και στη συνέχεια η εκ νέου μετατροπή της σε ηλεκτρική (λειτουργία υδροστροβίλων), συνοδεύεται με απώλειες, όμως η επένδυση είναι οικονομικά συμφέρουσα λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική διαφορά κόστους της μονάδας ενέργειας αιχμής και βάσεως (νυχτερινό τιμολόγιο).

Ένας άλλος σημαντικός ρόλος των αναστρέψιμων ΥΗΕ είναι η εφεδρεία που παρέχουν στο δίκτυο, σε περίπτωση που λόγω βλάβης, τεθεί εκτός λειτουργία μια μεγάλη θερμική μονάδα βάσης.



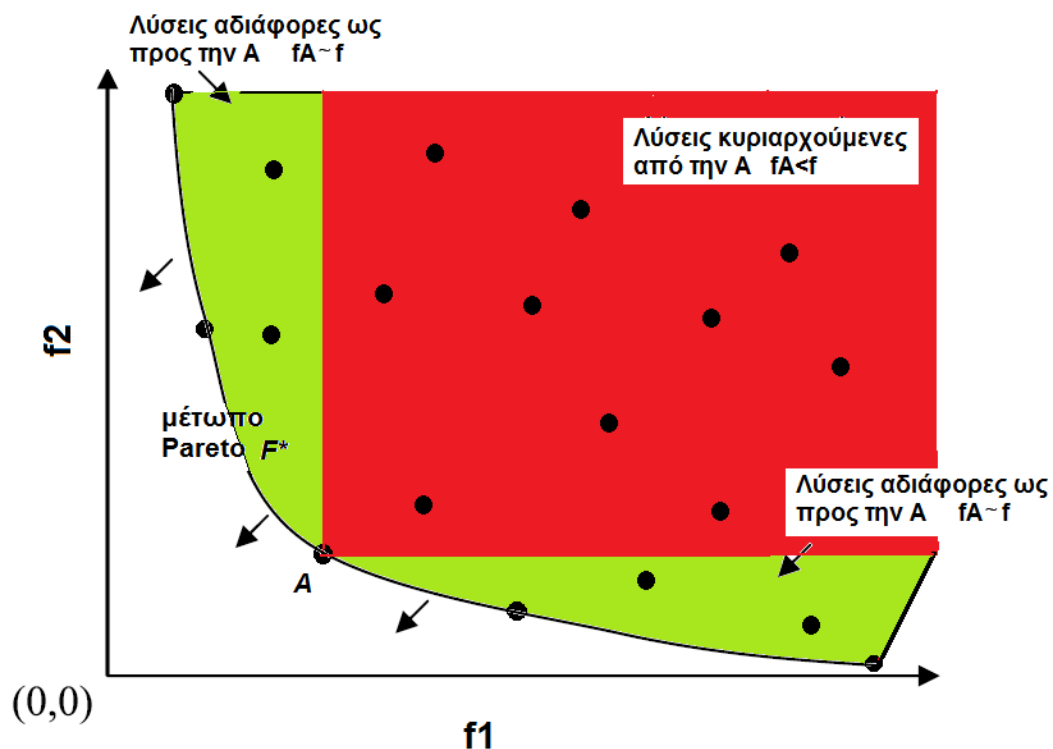
Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη αντιστρεπτού ΥΗΕ

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Η έννοια της Πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Ένα σύνθηρες πρόβλημα στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων είναι η ύπαρξη ανταγωνιστικών κριτηρίων τα οποία αποτιμώνται σε διαφορετική μονάδα μέτρησης συνεπώς πρόκειται για πολυκριτηριακό πρόβλημα. Επομένως η λήψη αποφάσεων αποτελεί πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η απάντηση του προβλήματος αυτού δίνεται από μία προσέγγιση που συνεπάγεται την ύπαρξη πολλαπλών βέλτιστων λύσεων που αποτυπώνονται στο πεδίο αποτίμησης με το λεγόμενο μέτωπο Pareto, όπου η μετακίνηση από ένα σημείο του μετώπου σε άλλο προκαλεί την μείωση της επίδοσης ενός κριτηρίου όταν ένα άλλο βελτιώνεται.

Αν υποθέσουμε ότι το πρόβλημα που μελετάμε αξιολογείται ως προς δύο αντικρουόμενα κριτήρια (π.χ. κάλυψη αναγκών ύδρευσης και παραγωγή ενέργειας), τότε οι εφικτές λύσεις μπορούν να παρασταθούν ως σημεία σε διάγραμμα δύο αξόνων, με κάθε ένα να αποτελεί μία λύση που διαμορφώνει με συγκεκριμένο τρόπο τα δύο μέτρα επίδοσης των κριτηρίων. Στο Σχήμα 3.1 τα τελευταία απεικονίζονται στους άξονες x και y ως οι συναρτήσεις f_1 και f_2 . Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση υπεισέρχεται η έννοια της κυριαρχίας μεταξύ των διαφόρων εφικτών λύσεων που αναλύεται με βάση το σχήμα αυτό (Παναγόπουλος, 2010).



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας και του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων (Ευστρατιάδης, 2008).

Με βάση το παραπάνω σχήμα η βέλτιστες (ελάχιστες) λύσεις βρίσκονται στην αρχή των αξόνων. Με βάση την λύση A περιγράφονται οι υποπεριοχές τη σχήματος 3.1.

Η υποπεριοχή πάνω δεξιά από το σημείο A (κόκκινη τετραγωνισμένη περιοχή), περιλαμβάνει περιοχές με μέτρα επίδοσης χειρότερα του A και για τα δύο κριτήρια, δηλαδή κυριαρχούνται από το A .

Οι περιοχές πάνω αριστερά και κάτω δεξιά από το A περιλαμβάνουν περιοχές που παρουσιάζουν λύσεις καλύτερες για το ένα κριτήριο αλλά χειρότερες για το άλλο, αυτές χαρακτηρίζονται αδιάφορες του A .

Βάση του παραπάνω σχήματος ορίζεται ακόμη μια κατηγορία λύσεων αυτές οι οποίες βρίσκονται πάνω στις γραμμές του κόκκινου τετραγώνου αλλά τέμνονται με το A . Πρόκειται για λύσεις όπου το ένα κριτήριο είναι ίσο με την τιμή που είχε στη λύση A αλλά το άλλο είναι χειρότερο. Έτσι λέγεται πως το A κυριαρχεί ασθενώς ως προς τη λύση αυτή.

Η έννοια της κυριαρχίας επιτρέπει τον χαρακτηρισμό ορισμένων λύσεων ως βέλτιστων, σύμφωνα με τον ακόλουθο ορισμό:

«Το σημείο x^ είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει εφικτό σημείο x το οποίο να μπορεί να βελτιώσει το ένα κριτήριο f_1 , χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει το άλλο κριτήριο f_2 » (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008).*

Τα σημεία εκείνα που ενώνονται με την μαύρη γραμμή επαληθεύουν τον ορισμό αυτό. Πρόκειται δηλαδή για σημεία, που ως προς το A , παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση για ένα κριτήριο και χειρότερη για ένα άλλο (αδιάφορα ως προς το A). Ο λόγος που τα σημεία αυτά δεν ανήκουν στις περιοχές αδιάφορων λύσεων είναι ότι κάτω από αυτά δεν υπάρχουν σημεία με ικανοποιητικότερη επίδοση με μικρότερα μέτρα απόδοσης. Το σύνολο των σημείων αυτών ονομάζεται σύνολο μη κυριαρχούμενων (non-dominated), και είναι γνωστό ως σύνολο Pareto βέλτιστων σημείων (Pareto set). Τα σημεία του συνόλου Pareto είναι αδιάφορα μεταξύ τους, ενώ κάθε ένα από αυτά είτε κυριαρχεί, είτε είναι αδιάφορο ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού χώρου αναζήτησης.

Σκοπός της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι ο εντοπισμός ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού μη κατώτερων λύσεων ώστε να επιτευχθεί η προσέγγιση του ολικού μετώπου Pareto. Για να γίνει αυτό ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να έχει τέτοια χαρακτηριστικά και να του δίνεται ο απαραίτητος χρόνος ώστε να μην αφήνει ανεξερεύνητες περιοχές του χώρου αναζήτησης και συνεπώς να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά μέτωπα Pareto.

3.2 Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων

3.2.1 Ιστορικά

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων (Γ.Α.) χρονολογείται στις αρχές του 1950 όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα (Γεωργόπουλος κ.α., 1999). Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι σήμερα γνωστοί, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland (Holland, 1975) και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan, σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστούν προβλήματα βασισμένα στις αρχές της αποτίμησης και της κληρονομικότητας.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ένα μαθηματικό εργαλείο με ευρύ πεδίο εφαρμογής και διέπονται από τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής (Goldberg, 1989). Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν γνώση ή πληροφορία για την κλίση του χώρου αναζήτησης και δεν επηρεάζονται από πιθανές ασυνέχειες στο χώρο αναζήτησης και είναι πολύ αποτελεσματικοί σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα βελτιστοποίησης, ιδίως όταν οι σχετικές συναρτήσεις παρουσιάζουν πολλά ακρότατα ή ασυνεχείς παραγώγους (Michalewicz, 1996). Η αξία της μεθόδου έγκειται στην απλότητα και την ικανότητα της να χρησιμοποιείται αποτελεσματικά σε διάφορες επιστημονικές έρευνες από οικονομολόγους, χημικούς, μαθηματικούς και μηχανικούς.

3.2.2 Η θεωρία Εξέλιξης των ειδών και η σχέση των Γ.Α. με αυτή

Η θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών (Evolution of Species), που αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο στα μέσα του περασμένου αιώνα, προκάλεσε μεγάλη αναστάτωση, αφού ερχόταν σε σύγκρουση με τις επικρατούσες θρησκευτικές αντιλήψεις περί προέλευσης της ζωής. Με την πάροδο ενός και πλέον αιώνων, ο θόρυβος αυτός δεν έχει κοπάσει πλήρως, όμως η θεωρία έχει γίνει αποδεκτή από το σύνολο των επιστημόνων γιατί κατόρθωσε να πείσει και να δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις σε θεμελιώδη ερωτήματα. Σκοπός της θεωρίας αυτής είναι να δώσει μια εξήγηση για το φαινόμενο της ζωής, την προέλευσή της και τις βασικές λειτουργίες της. Με δεδομένο το ότι η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γ.Α. είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης, τα κυριότερα σημεία της θεωρίας εξέλιξης των ειδών που σχετίζονται και ερμηνεύουν τον τρόπο λειτουργίας των Γ.Α. είναι τα εξής :

Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών σε ανώτερους και κατώτερους. Σε κάθε βιολογικό είδος, μερικά άτομα αφήνουν περισσότερους απογόνους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και

έτσι τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενιά. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να επιζήσουν και να πολλαπλασιαστούν. Έτσι, με την αλλαγή του περιβάλλοντος και των συνθηκών διαβίωσής τους, αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά τους, προσπαθώντας να προσαρμοστούν κάθε φορά, με στόχο την εξασφάλιση της επιβίωσής τους.

Αυτή η αλλαγή όμως, που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά των ατόμων, είναι αλλαγή στα χρωμοσώματά τους (chromosomes), που είναι πολύπλοκα οργανικά μόρια που κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως γονίδια (genes). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται γονότυπος (genotype). Η δημιουργία ενός νέου οργανισμού περιλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων. Το αποκωδικοποιημένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype). Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης είναι η διασταύρωση (crossover) και η μετάλλαξη (mutation).

Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. ακτινοβολία), έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, μερικά λάθη που έγιναν αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την προοδευτική εξέλιξη της ζωής.

Το προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από την μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει πάρει ένα γονίδιο από κάθε γονέα. Μερικές φορές, τα δύο αυτά γονίδια συμφωνούν μεταξύ τους, όσον αφορά την "τιμή" που θα δώσουν στο χαρακτηριστικό, π.χ. γαλάζιο χρώμα ματιών, ενώ άλλες φορές δεν συμφωνούν, π.χ. το ένα υποδεικνύει καστανό χρώμα ματιών και το άλλο γαλάζιο. Στη δεύτερη περίπτωση, κυριαρχεί η "τιμή" ενός γονιδίου (π.χ. του καστανού), και αγνοείται η "τιμή" του άλλου, μολονότι μπορεί να περάσει σε επόμενες γενιές. Το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται κυρίαρχο ή επικρατέστερο (dominant) και το άλλο υπολειπόμενο (recessive). Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα (δηλαδή που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται αλληλόμορφα (alleles).

Όλος αυτός ο μηχανισμός της φυσικής επιλογής φάνηκε ιδιαίτερα ελκυστικός για τον John Holland, πρωτοπόρο των Γ.Α., στις αρχές της δεκαετίας του '70. Ο Holland φαντάστηκε ότι κάποιες ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν

αποτελέσματα, αν ενσωματώνονταν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν νέες αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας του Holland ήταν οι Γ.Α., μια καινούρια εξελισσόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

3.2.3 Η Ανατομία ενός προγράμματος Γενετικών Αλγορίθμων

Ένας Γ.Α. για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε συστατικά (Michalewicz, 1996);(Λυκοθανάσης, 2001):

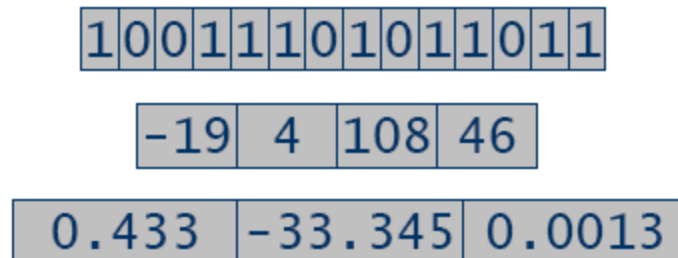
- i. Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
- ii. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
- iii. Μια συνάρτηση στοχου - αξιολόγησης (ή αποτίμησης), που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους.
- iv. Γενετικές λειτουργίες οι οποίες μεταβάλλουν τη σύνθεση των απογόνων.
- v. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ένας γενετικός αλγόριθμος όπως το μέγεθος του πληθυσμού και οι πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών λειτουργιών.

3.2.4 Γενετική αναπαράσταση

Οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση παριστάνονται συνήθως με μορφή συμβολοσειράς προκειμένου να προσαρμοστούν πιο εύκολα οι γενετικές διαδικασίες. Ο τρόπος αναπαράστασης παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και στον χρόνο υπολογισμού ενός γενετικού αλγορίθμου και ο συνήθης τρόπος αναπαράστασης είναι ο δυαδικός, δηλαδή συμβολοσειρές αποτελούμενες από δύο στοιχεία, το 0 και το 1. Ο αριθμός των συμβόλων της σειράς ονομάζεται μήκος της συμβολοσειράς. Η αναπαράσταση μπορεί να γίνει επίσης χρησιμοποιώντας διάνυσμα ακέραιων ή πραγματικών αριθμών, με κάθε ακέραιο ή πραγματικό αριθμό να αντιπροσωπεύει μια παράμετρο (Λυκοθανάσης, 2001).

Στο Σχήμα 3.2 παρατίθενται παραδείγματα κωδικοποίησης προβλημάτων προς επίλυση με ΓΑ. Η πρώτη περίπτωση είναι μία δυαδική συμβολοσειρά, ενώ οι δύο επόμενες είναι απεικονίσεις πραγματικών αριθμών

(ακεραίων και δεκαδικών), που προφανώς στα αντίστοιχα προβλήματα που αναφέρονται τα γονίδια ταυτίζονται με τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών που αναπαριστούν.



Σχήμα 3.2: Κωδικοποίηση μεταβλητών σε Γ.Α

3.2.5 Δημιουργία αρχικού πληθυσμού

Στην αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι απαιτούν ένα σύνολο αρχικών λύσεων, δηλαδή τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού. Αυτό μπορεί να γίνει με δυο τρόπους, είτε δημιουργώντας τυχαίες λύσεις με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (αυτό συμβαίνει όταν δεν είναι γνωστή από πριν η περιοχή όπου εμφανίζεται η βέλτιστη λύση ή όταν πρόκειται να ελεγχθεί η απόδοση ενός γενετικού αλγορίθμου), είτε γνωρίζοντας την περιοχή της βέλτιστης λύσης οπότε και οδηγούμαστε σε αυτήν σε λιγότερο χρόνο.

3.2.6 Συνάρτηση στόχου

Η συνάρτηση στόχου διαδραματίζει τον ρόλο του περιβάλλοντος αξιολογώντας τις λύσεις και τους περιορισμούς του προβλήματος με κριτήριο την προσαρμοστικότητά τους. Όταν οι περιορισμοί είναι κρίσιμοι και δεν επιτρέπεται να παραβιαστούν, μπορεί με κατάλληλο σχεδιασμό είτε να απορρίπτονται από την αρχή οι λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς είτε να παίρνουν μία ποινή στη βαθμολογία τους. Επομένως τα χρωμοσώματα θα αναπαράγονται ή θα απορρίπτονται με ένα επί πλέον κριτήριο βιωσιμότητας, αυτό της ικανοποίησης των περιορισμών.

3.2.7 Γενετικές διαδικασίες

Οι κυριότερες γενετικές διαδικασίες είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Συχνά χρησιμοποιούνται και άλλες διαδικασίες με συνηθέστερη αυτή της αντιμετάθεσης. Σε ένα πρόγραμμα γενετικών αλγορίθμων δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλες οι διαδικασίες καθώς κάθε μία δρα ανεξάρτητα από τις άλλες. Η επιλογή και ο σχεδιασμός των διαδικασιών εξαρτάται από το πρόβλημα και τον τρόπο αναπαράστασης.

i. Επιλογή

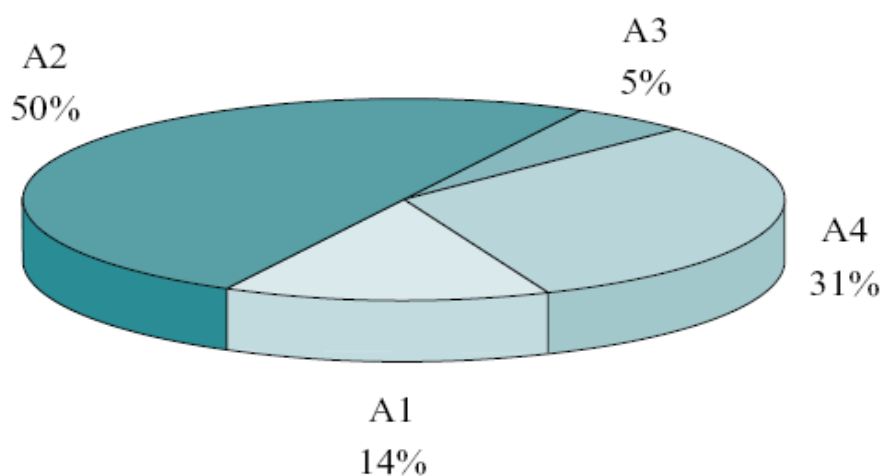
Ένα είδος καταλαμβάνει σε μια περιοχή μια συγκεκριμένη έκταση ανάλογα με τα άλλα ανταγωνιστικά είδη που είναι εγκατεστημένα στην ίδια περιοχή. Αποτελείται από έναν αριθμό ατόμων τα οποία, πολλαπλασιαζόμενα εκθετικά, δρουν μεταξύ τους επίσης ανταγωνιστικά προσπαθώντας να καταλάβουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο χώρο στην επικράτεια τους. Όταν οι απαιτούμενοι για την ύπαρξη τους πόροι δεν θα είναι πλέον επαρκείς ο ρυθμός ανάπτυξης τους θα μειωθεί, επιφέροντας κατά κάποιο τρόπο ισορροπία στον αριθμό του αναπαραγόμενου πληθυσμού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη έντονου ανταγωνισμού μεταξύ των ατόμων για την εξασφάλιση της ζωής. Η φυσική επιλογή θα ενεργήσει έτσι ώστε τα πιο εύρωστα άτομα να επιβιώσουν και να μεταβιβάσουν το πλεονέκτημα της ευρωστίας τους στους απογόνους τους. Αν θεωρηθεί ότι ο πληθυσμός θα παραμείνει ίδιος στην επόμενη γενιά, θα είναι ωστόσο στο σύνολο του "βελτιωμένος", αφού θα περιλαμβάνει περισσότερα άτομα εφοδιασμένα με το πλεονέκτημα της προσαρμογής. Ο στόχος της διαδικασίας της επιλογής είναι να αναπαράγει περισσότερα αντίγραφα των ατόμων των οποίων οι τιμές αξιολόγησης είναι υψηλότερες από εκείνες των οποίων οι τιμές είναι χαμηλές. Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη διαδικασία της επιλογής οδηγούμαστε σε μια πιο ευνοϊκή περιοχή για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων και αυτό συμβαίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εντούτοις, η ποικιλομορφία του πληθυσμού πρέπει να διατηρηθεί για να αποφευχθεί η πρόωρη τοπική σύγκλιση και για να φθάσει στη ολική βέλτιστη λύση. Στους γενετικούς αλγορίθμους εμφανίζονται κυρίως δύο διαδικασίες επιλογής: η επιλογή ανάλογα με την αξία αποτίμησης (τροχός της ρουλέτας με άνισα διαστήματα), (Σχήμα 3.3) και η επιλογή ανάλογα με την κατάταξη (διαγωνισμός-tournament). Η πρώτη μέθοδος επιλογής χρησιμοποιήθηκε από τον Holland και βασίζεται στην αναλογία της αξίας αποτίμησης. Η τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για να την παραστήσει είναι εκείνη της ρουλέτας με τα άνισα διαστήματα (Goldberg, 1989). Σύμφωνα με αυτή, οι αξίες αποτίμησης των ατόμων εκφράζονται από τα διαστήματα μιας νοητής ρουλέτας. Η επιλογή ενός ατόμου για την επόμενη γενιά γίνεται με τυχαία περιστροφή της ρουλέτας μέσω της οποίας επιλέγεται ένα διάστημα και κατά συνέπεια ένα συγκεκριμένο άτομο. Είναι προφανές ότι οι πιθανότητες

επιλογής είναι ανάλογες του εύρους του διαστήματος, και κατά συνέπεια της αξίας του ατόμου. Αφού κάθε άτομο έχει μια αξία, ο πληθυσμός παρουσιάζει μια συνολική αξία που προκύπτει αθροιστικά από τις αξίες των ατόμων του. Έτσι κάθε άτομο στατιστικά θα αναπαραχθεί τόσες φορές όσες αντιστοιχούν στον λόγο της αξίας του ως προς τη συνολική αξία του πληθυσμού. Όσο μεγαλύτερη αξία έχει ένα άτομο σε σχέση με τη συνολική αξία, τόσους περισσότερους απογόνους θα αφήσει.

Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο επιλογής, κάθε άτομο παράγει ένα συγκεκριμένο αριθμό απογόνων ανάλογα με την κατάταξη της αξίας αποτίμησης του και όχι με την τιμή. Επιλέγεται δηλαδή τυχαία ένας προκαθορισμένος αριθμός χρωμοσωμάτων και συγκρίνονται οι συναρτήσεις αξιολόγησής τους. Αυτό με την καλύτερη τιμή περνάει στον ενδιαμέσο πληθυσμό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για αριθμό ίσο προς το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού, σχηματίζοντας έτσι έναν ενδιαμέσο πληθυσμό ίσου μεγέθους προς τον αρχικό. Η μέθοδος αυτή βοηθάει στην αποτροπή φαινομένων γρήγορης σύγκλισης.

Τέλος, ας αναφερθεί ότι με τις διαδικασίες επιλογής που προαναφέρθηκαν δεν εξασφαλίζεται πλήρως ότι το καλύτερο χρωμόσωμα θα περάσει από την προηγούμενη γενεά στον ενδιαμέσο πληθυσμό. Γι' αυτό το λόγο, πολλοί κώδικες που ακολουθούν τη λεγόμενη επιλεκτική προσέγγιση (elitist approach), περιλαμβάνουν ειδική διαδικασία ενσωμάτωσης ενός τουλάχιστον αντιγράφου του καλύτερου χρωμοσώματος στον ενδιαμέσο πληθυσμό.

Αφού σχηματισθεί ο ενδιαμέσος πληθυσμός, επιλέγονται τυχαία κάποια από τα μέλη του για να υποστούν τις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, ενώ τα υπόλοιπα περνούν αυτούσια στην επόμενη γενιά.



Σχήμα 3.3: Ρουλέτα με άνισα διαστήματα για την επιλογή ατόμων προς αναπαραγωγή του πληθυσμού (Λυκοθανάσης, 2001).

ii. Διασταύρωση

Είναι μια απλή λειτουργία (γενετικός τελεστής) ανταλλαγής γενετικού υλικού, μεταξύ δύο ατόμων (γονέων) του πληθυσμού, που ζευγαρώνουν με τυχαίο τρόπο δημιουργώντας έτσι δύο νέα χρωμοσώματα. Στόχος της είναι η νέα γενιά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους.

Κατά τη διασταύρωση αποσπώνται κομμάτια από ένα άτομο (γονιό) και αλλάζουν θέση με τα αντίστοιχα κομμάτια του άλλου ατόμου. Η διασταύρωση των γονιδίων μεταξύ δυο χρωμοσωμάτων που αποτελούν ζεύγος περιγράφεται στους Γενετικούς Αλγόριθμους ως

εξής:

Έστω ότι τα δύο χρωμοσώματα- γονείς είναι οι συμβολοσειρές:

Γονέας A 1001010100

Γονέας B 0011101011

και η διασταύρωση συμβαίνει στη θέση 5, δηλαδή το τμήμα των πέντε πρώτων γονιδίων θα ανταλλαγεί:

10010 10100

00111 01011

Τα χρωμοσώματα –απόγονοι που θα προκύψουν είναι:

Απόγονος A 00111 10100

Απόγονος B 10010 01011

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται διασταύρωση ενός σημείου, συχνά ωστόσο εφαρμόζεται και η διασταύρωση πολλαπλών σημείων. Να σημειωθεί ότι είναι τυχαίο το ποιιά χρωμοσώματα θα σχηματίσουν ζεύγη για να διασταυρωθούν μεταξύ τους, όπως επίσης τυχαία είναι και η θέση της διασταύρωσης.

iii. Μετάλλαξη

Είναι η λειτουργία (γενετικός τελεστής) που ενεργεί σε ένα μόνο χρωμόσωμα κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από το γονέα στον απόγονο, επιλέγεται τυχαία με μικρή πιθανότητα - τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης - ένα ψηφίο και αντιστρέφεται (από 0 σε 1 και το αντίστροφο). Λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η επιλογή ή η διασταύρωση, ενδεχομένως, οδηγήσουν σε απώλεια κάποιων πολύτιμων γενετικών πληροφοριών. Στη φύση συμβαίνει τυχαία και μπορεί να είναι πλεονεκτική ή μη-πλεονεκτική για το άτομο στον αγώνα του για επιβίωση, σε αντίθεση με τη φυσική επιλογή η οποία στηρίζεται στο νόμο των πιθανοτήτων. Η συσσώρευση πολλών τέτοιων μεταλλάξεων προς την κατεύθυνση της βελτίωσης οδηγεί στην εξέλιξη.

Η μετάλλαξη μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε γονίδιο οποιουδήποτε χρωμοσώματος. Η πιθανότητα να συμβεί στην φύση είναι μικρότερη από 0,00001 και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ειδών γιατί υπήρχε τεράστιος διαθέσιμος χρόνος για να συμβεί. Στους γενετικούς αλγόριθμους βέβαια, που αποτελούν μια προσομοίωση της εξελικτικής διαδικασίας της φύσης, μια τόσο μικρή πιθανότητα δεν θα είχε νόημα γιατί η συμβολή της στην εξέλιξη ενός πληθυσμού θα ήταν σχεδόν μηδαμινή. Συνήθως θεωρούμε την πιθανότητα μετάλλαξης μεταξύ 0,01 και 0,001. Η διαδικασία της μετάλλαξης οδηγεί το χρωμόσωμα στην διερεύνηση νέων περιοχών βοηθώντας έτσι τον αλγόριθμο να αποφύγει πρόωρη σύγκλιση και να ανακαλύψει την ολική βέλτιστη λύση.

Στους δυαδικούς Γενετικούς Αλγόριθμους η μετάλλαξη ενός γονιδίου σημαίνει μετατροπή τού 0 σε 1 και αντιστρόφως. Αν για παράδειγμα το χρωμόσωμα έχει τη μορφή :

00101010001111

η τιμή του στο δυαδικό σύστημα θα είναι ίση με 2703. Μια μετάλλαξη που θα συνέβαινε στο δεύτερο γονίδιο του χρωμοσώματος θα έδινε τη μεταλλαγμένη μορφή:

01101010001111

με τιμή 6799. Αν η αξία επιβίωσης του συγκεκριμένου χρωμοσώματος εξαρτάται από τη μεγάλη του τιμή τότε η μετάλλαξη θα δράσει πλεονεκτικά και το μεταλλαγμένο χρωμόσωμα έχει αυξημένες πιθανότητες να επιλεγεί στην επόμενη γενιά. Αντίθετα, αν η αξία επιβίωσης είναι ανάλογη με τη χαμηλή τιμή όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην περίπτωση ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης, τότε αυτή η μετάλλαξη για το συγκεκριμένο χρωμόσωμα δεν αποφέρει πλεονέκτημα και οι πιθανότητες να επιβιώσει το νέο άτομο στην επόμενη γενιά μειώνονται.

iv. Αντιμετάθεση

Η αντιμετάθεση είναι μια διαδικασία για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης των γενετικών αλγορίθμων και εφαρμόζεται σε ζεύγη διαδοχικών θέσεων (γονίδια) ενός χρωμοσώματος. Μπορεί να επιλεγεί κάθε θέση εκτός της τελευταίας. Εάν μια τιμή επιλεγεί και ισούται με 1, τότε μετατρέπεται σε 0, ενώ το επόμενο γονίδιο τίθεται αυτομάτως ίσο με 1. Το αντίθετο συμβαίνει εάν η επιλεγείσα τιμή ισούται αρχικά με 0. Αναλυτικότερα τα ακόλουθα συμβαίνουν όσον αφορά τα διάφορα ζεύγη γονιδίων:

11 μετατρέπεται σε 01

00 μετατρέπεται σε 10

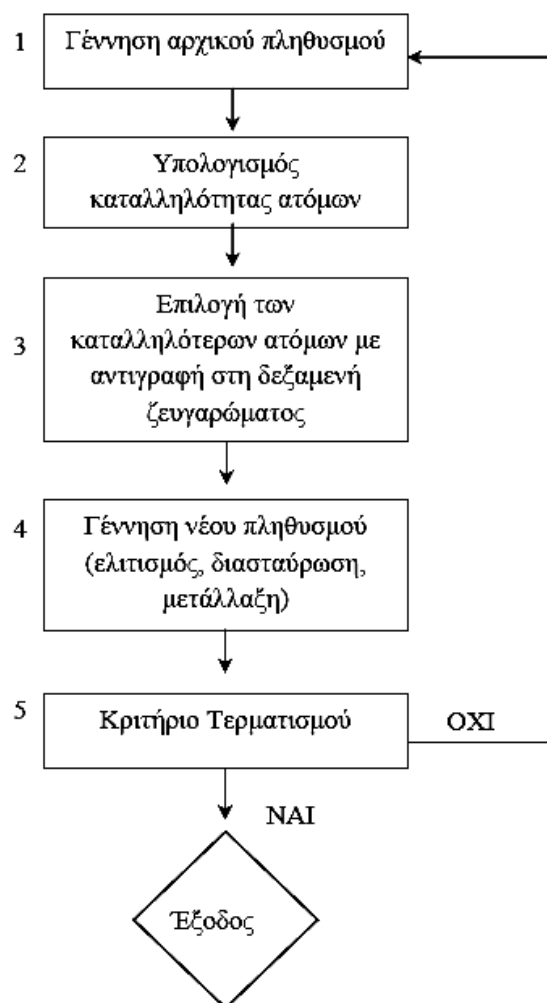
10 μετατρέπεται σε 01

01 μετατρέπεται σε 10

Για τις δύο πρώτες περιπτώσεις η διαδικασία είναι ισοδύναμη της μετάλλαξης μόνο στην επιλεγμένη θέση. Στις τελευταίες όμως αντιστοιχεί σε μετάλλαξη και των δυο γονιδίων.

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας εφαρμογής του ΓΑ σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει, εκτός από τον ορισμό των γενετικών τελεστών που περιγράφηκε, τον καθορισμό του μεγέθους του πληθυσμού και του κριτηρίου τερματισμού της αναζήτησης. Μεγάλος πληθυσμός συνεπάγεται μεγάλη ικανότητα ψαξίματος του εφικτού χώρου αλλά ταυτόχρονα μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Δεν υπάρχει κάποιος κανόνας που να συσχετίζει το μέγεθος του πληθυσμού με το κάθε πρόβλημα, γενικά θα μπορούσε να λεχθεί όμως ότι ο πληθυσμός πρέπει να έχει μέγεθος αυστηρά μεγαλύτερο του αριθμού των μεταβλητών με μία τάση ο λόγος μεταξύ των δύο να μειώνεται όσο οι μεταβλητές πληθαίνουν. Όσον αφορά το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αυτό μπορεί να είναι είτε ένας συγκεκριμένος και μεγάλος αριθμός γενιών, είτε ένα ανώτατο όριο που εκφράζει το ποσοστό βελτίωσης της συνάρτησης στόχου μετά από συγκεκριμένο αριθμό παραγωγής γενιών, είτε ακόμα ένα ανώτατο όριο χρόνου, όπου δεν παρατηρείται η ελάχιστη επιθυμητή βελτίωση της συνάρτησης στόχου. Επειδή σε μία διαδικασία αναζήτησης ο ΓΑ πολύ πιθανόν να κάνει κάποιο άλμα στη βελτίωση της συνάρτησης στόχου μετά από αρκετό χρόνο, δηλαδή μετά από πολλές συνεχόμενες επαναλήψεις όπου δεν παρουσίαζε σημαντική πρόοδο, θεωρείται ότι το πιο εγγυημένο κριτήριο τερματισμού για την προσέγγιση της ολικά βέλτιστης λύσης/λύσεων είναι η δημιουργία ενός αρκετά μεγάλου αριθμού γενιών (Παναγόπουλος, 2010).

Με βάση τα ανωτέρω μπορεί να γίνει μία σύνοψη και ανακεφαλαίωση της λειτουργίας των ΓΑ στο Σχήμα 3.4. Σύμφωνα με αυτό, για τη λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (μονό ή πολυκριτηριακό) γεννάνται ένας αρχικός πληθυσμός από πιθανές λύσεις, οι οποίες αξιολογούνται ταυτόχρονα ως προς την καταλληλότητά τους μέσω της στοχικής/ων συνάρτησης/ων. Στη συνέχεια επιλέγονται με κάποια μέθοδο τα καλύτερα άτομα του πληθυσμού από την δεξαμενή ζευγαρώματος, ως γονείς για ζευγάρι και αναπαραγωγή του πληθυσμού. Οι γενετικές διαδικασίες (διασταύρωση, μετάλλαξη) ορίζουν τον τρόπο αναπαραγωγής και τη γέννηση του νέου πληθυσμού προς αξιολόγηση, ενώ τα πιο ισχυρά άτομα μεταφέρονται αυτούσια στο νέο πληθυσμό (ελιτισμός). Ελέγχεται το κριτήριο τερματισμού του αλγόριθμου και η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου αυτό ικανοποιηθεί. Μετά τον τερματισμό το άτομο/άτομα με την καλύτερη επίδοση αποτελούν τη βέλτιστη/ες λύση/σεις του προβλήματος, ενώ μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα ο τελικός πληθυσμός μπορεί να περιλαμβάνει πολλά αντίγραφα του καταλληλότερου ατόμου και σίγουρα άτομα με μεγάλο βαθμό καταλληλότητας σχεδόν στο σύνολό του (Παναγόπουλος, 2010).



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου (Ευστρατιάδης, 2008)

3.2.8 Παράγοντες έλεγχου

Στους παράγοντες ελέγχου ενός γενετικού αλγορίθμου περιλαμβάνονται το μέγεθος του πληθυσμού και οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης. Έχουν γίνει αρκετές έρευνες προκειμένου να προσδιοριστεί η επιρροή των παραγόντων αυτών στην απόδοση των γενετικών αλγορίθμων. Τα κύρια συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

- i. Μεγάλο μέγεθος πληθυσμού οδηγεί σε ταυτόχρονη επεξεργασία πολλών λύσεων και αυξάνει το χρόνο υπολογισμού ανά επανάληψη. Με δεδομένη όμως την χρησιμοποίηση πολλών δειγμάτων, η πιθανότητα σύγκλισης στην βέλτιστη λύση είναι υψηλότερη από την χρησιμοποίηση μικρού μεγέθους πληθυσμού.
- ii. Το ποσοστό διασταύρωσης καθορίζει τη συχνότητα της διαδικασίας διασταύρωσης. Είναι χρήσιμο στην έναρξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης να ανακαλυφθεί μια ευνοϊκή περιοχή. Μικρή συχνότητα διασταυρώσεων μειώνει την ταχύτητα σύγκλισης σε μια τέτοια περιοχή. Αν η συχνότητα είναι πολύ μεγάλη, οδηγεί στον κορεσμό γύρω από μια λύση.
- iii. Όσον αφορά την πιθανότητα μετάλλαξης, μεγάλες τιμές εισάγουν μεγάλη ποικιλομορφία στον πληθυσμό κάτι που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Αφ' ετέρου, είναι συνήθως δύσκολο για έναν γενετικό αλγόριθμο να βρει ολική βέλτιστη λύση με πολύ μικρό ποσοστό μετάλλαξης.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά προτεινόμενες τιμές για τους παράγοντες ελέγχου από τους De Jong, Schaffer, Grefenstete.

Παράγοντες Ελέγχου	De Jong	Schaffer	Grefenstete
Μέγεθος πληθυσμού	50-100	20-30	30
Ποσοστό διασταύρωσης	0.6	0.75	0.95
Ποσοστό μετάλλαξης	0.001	0.005-0.01	0.01

3.2.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν πολλές εφαρμογές ιδιαίτερα σε προβλήματα που περιγράφουν πολύπλοκα συστήματα, είτε βιολογικά, είτε φυσικά, είτε τέλος τεχνητά. Η ευρωστία που τους χαρακτηρίζει οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Τα βασικότερα είναι τα εξής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999), (Ζορμπά, 2003) :

- i. Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α. είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από Γ.Α. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατών τους, για τους Γ.Α. δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- ii. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι Γ.Α. προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδιάσή τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.
- iii. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Όπως θα γίνει σαφές στα επόμενα κεφάλαια, οι Γ.Α. δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των Γ.Α. που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά αναγκαίες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- iv. Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των Γ.Α. είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος Γ.Α. με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των Γ.Α.
- v. Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, Γ.Α. μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών

εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών "δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.

- vi. Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη προϋποθέσεων, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι "θορυβώδεις" συναρτήσεις κ.τ.λ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους Γ.Α. πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- vii. Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη "επικοινωνία" του Γ.Α. με το περιβάλλον του είναι η συνάρτηση στόχου . Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από την σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους Γ.Α. Όπου όμως δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
- viii. Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με το hill-climbing γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι Γ.Α. επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.
- ix. Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι Γ.Α. μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.

Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια:

- i. Η αδυναμία παροχής εγγυήσεων εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Αυτό σημαίνει ότι τις περισσότερες φορές, δεν υπάρχει βεβαιότητα ότι ο Γ.Α. μας έδωσε την καλύτερη λύση.
- ii. Ο μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων καταλληλότητας όπως και η τυχόν πολυπλοκότητα της συνάρτησης αποτίμησης, ακριβώς επειδή αυτή υπολογίζεται για κάθε χρωμόσωμα κάθε γενιάς, συνεπάγεται σημαντικό υπολογιστικό χρόνο.

- iii. Η μη αξιοποίηση ειδικότερων πληροφοριών σ' ένα συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να περιορίσει αισθητά την απόδοση της έρευνας.
- iv. Προβλήματα εξοικείωσης με τη Γενετική. Εκείνο που συμβαίνει με τους Γ.Α. είναι ότι μιμούνται με αφαιρετικό τρόπο κάποιες διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση, χωρίς να ενδιαφέρει σε μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας η λειτουργία τους. Επιπλέον, το μέλλον και η εξέλιξη των Γ.Α. δεν εξαρτώνται σε καμία περίπτωση από τις αντίστοιχες θεωρίες της Βιολογίας. Το αρχικό μοντέλο είναι δανεισμένο από εκεί, όμως η εφαρμογή του στα Τεχνητά Συστήματα έγινε με πλήθος διαφοροποιήσεων, προσαρμογών και "παρεκτροπών" με στόχο πάντα τη βελτίωση της απόδοσης.

3.3 Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτωσης

3.3.1 Φυσικό Ανάλογο

Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτωσης βασίζεται στην αναλογία που υπάρχει ανάμεσα στην προσομοίωση της φυσικής διαδικασίας της ανόπτωσης των στερεών σωμάτων και της διαδικασίας επίλυσης δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η φυσική διαδικασία αναφέρεται στη σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου, ξεκινώντας από μια αρχική υψηλή θερμοκρασία, μέχρι το σημείο κατά το οποίο η ενέργεια του συστήματος έχει αποκτήσει την ελάχιστη τιμή της. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτωσης στηρίζεται στον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η κρυσταλλική δομή ενός μετάλλου κατά τη διαδικασία της ανόπτωσης. Σε υψηλές θερμοκρασίες το μέταλλο βρίσκεται σε υγρή φάση και συνεπώς τα άτομα του συστήματος είναι ακανόνιστα, ακολουθώντας μια τυχαία διάταξη στο χώρο. Με τη σταδιακή ψύξη του μετάλλου, το σύστημα αποκτά μια πιο κανονικοποιημένη δομή, μέχρι να φθάσει στην τελική στερεά κατάσταση όπου η ενέργεια του συστήματος έχει ελαχιστοποιηθεί (Metropolis et. al, 1953). Το πιο σημαντικό σημείο της μεθόδου εντοπίζεται στην επιλογή ενός αργού ρυθμού ψύξης του μετάλλου, ώστε να επιτυγχάνεται κατάσταση θερμικής ισορροπίας σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας. Σε πρώτη ανάλυση, δεν γίνεται φανερή η αναλογία που υπάρχει ανάμεσα στη παραπάνω φυσική διαδικασία και στο αντικείμενο της βελτιστοποίησης μαθηματικών προβλημάτων. - Ωστόσο, αρχικά οι Metropolis, Rosenbluth και Teller και στη συνέχεια οι Kirkpatrick, Gelatt Jr. και Vecchi (Kirkpatrick et. al, 1953) πρότειναν έναν πρωτότυπο τρόπο για τη μαθηματική διατύπωση της παραπάνω διαδικασίας και την εφαρμογή της σε δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης (Simopoulos, 2006).

3.3.2 Μοντέλο διαδικασίας ανόπτωσης

Το 1953 οι Metropolis, Rosenbluth και Teller πρότειναν μια απλή επαναληπτική μέθοδο για την προσομοίωση της φυσικής διαδικασίας της εξέλιξης της κρυσταλλικής δομής ενός μετάλλου σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, για μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, ένα τυχαίο άτομο μετατοπίζεται μέσω μιας τυχαίας διαταραχής της υπάρχουσας κατάστασής του και υπολογίζεται η επακόλουθη αλλαγή E στην ενέργεια του συστήματος. Αν $E \leq 0$, η προτεινόμενη διαταραχή οδηγεί το μέταλλο σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Συνεπώς, η αλλαγή γίνεται αποδεκτή και η νέα διάταξη των ατόμων του συστήματος αποτελεί το σημείο εκκίνησης για το επόμενο βήμα. Στην αντίθετη περίπτωση, η προτεινόμενη αλλαγή δεν απορρίπτεται άμεσα, αλλά μπορεί να γίνει δεκτή με πιθανότητα που δίνεται από την κατανομή του Boltzmann:

$$P(\Delta E) = \exp\left(\frac{-\Delta E}{K_b * \text{Temp}}\right) \quad (3.1)$$

όπου K_b είναι η σταθερά του Boltzmann και Temp είναι η τρέχουσα τιμή της θερμοκρασίας.

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει παρέχει εξ ορισμού μια μη μηδενική πιθανότητα μετάβασης σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας, δίνοντας στο σύστημα την ευκαιρία να «υπερπηδήσει» ένα «τοπικό» ενεργειακό ελάχιστο και να βρεθεί, μακροπρόθεσμα, σε μια ισορροπία χαμηλότερης ενέργειας. Η εν λόγω πιθανότητα εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας. Στην αρχή της διεργασίας, οπότε η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, αντίστοιχα υψηλή είναι η πιθανότητα εντοπισμού καταστάσεων μεγαλύτερης ενέργειας, με αποτέλεσμα τη μετάβαση του συστήματος σε πολλαπλές καταστάσεις θερμικής ισορροπίας. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, περιορίζεται η πιθανότητα αύξησης της ενέργειας του συστήματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πλέον δυνατότητα διαφυγής από τοπικά ακρότατα. Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία τέλειων κρυστάλλων είναι ο αργός ρυθμός ψύξης. Αν η ψύξη πραγματοποιηθεί γρήγορα, το σύστημα δεν φτάνει στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, αλλά καταλήγει σε μια πολυκρυσταλλική ή άμορφη δομή, που αντιστοιχεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη (Ευστρατιάδης, 2008).

Η εφαρμογή του αλγορίθμου, όπως περιγράφεται από τους Kuczera and Parent (1998) έχει ως εξής: Έστω ότι η κατάσταση ενός συστήματος περιγράφεται από τη μεταβλητή β , για την οποία είναι γνωστή η συνάρτηση κατανομής $p(\beta | D)$, όπου D το σύνολο των δεδομένων του συστήματος. Αν υπάρχει μια εκτίμηση $\beta_i - 1$, τότε παράγεται μια επόμενη εκτίμηση β_i , μέσω μιας πολυμεταβλητής πιθανοτικής συνάρτησης (π.χ. μια πολυμεταβλητή κανονική κατανομή), της μορφής:

$$\beta_i \leftarrow J(\beta|\beta_{i-1}) \quad (3.2)$$

Αφού υπολογιστεί η τιμή της συνάρτησης κατανομής για τη μεταβλητή β_i , διαμορφώνεται ο λόγος:

$$\Psi = \frac{p(\beta_i|D)}{p(\beta_{i-1}|D)} \quad (3.3)$$

Στη συνέχεια γεννάται ένας τυχαίος ομοιόμορφος αριθμός z στο διάστημα $[0, 1]$, και αν $z \leq \Psi$, τότε η νέα κατάσταση γίνεται αποδεκτή, διαφορετικά το σύστημα παραμένει στην προηγούμενή του κατάσταση. Τονίζεται ότι αν το σύστημα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθεί στην κατάσταση β_i σε σχέση με την β_{i-1} , δηλαδή $\Psi > 1$, τότε η νέα αυτή κατάσταση γίνεται εξ ορισμού αποδεκτή (αφού ισχύει $z \leq 1$), διαφορετικά γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα z .

Στη διαδικασία προσομοιωμένης ανόπτωσης, η στοχική συνάρτηση θεωρείται ως το μαθηματικό αντίστοιχο της ενέργειας του συστήματος, και εισάγονται:

- μια παράμετρος ελέγχου T , αντίστοιχη της θερμοκρασίας·
- ένα χρονοδιάγραμμα ανόπτωσης $g(T)$ που περιγράφει τη διαδικασία μείωσης της θερμοκρασίας·
- μια συνάρτηση πιθανότητας $p(T)$, αντίστοιχη της συνάρτησης Boltzman, που χρησιμοποιείται για την αποδοχή βημάτων αναρρίχησης (η συνάρτηση απαντά και ως κριτήριο Metropolis).

Στοιχεία εισόδου της μεθόδου είναι η αρχική θερμοκρασία T_0 , και το μήκος της διαδρομής θερμικής ισορροπίας L . Αρχικά, γεννάται ένα τυχαίο διάνυσμα $x[0]$, και τίθενται $T = T_0$ και $k = 1$, όπου k δείκτης που υποδηλώνει τη διαδρομή θερμικής ισορροπίας. Κάθε διαδρομή παράγεται από μια ακολουθία διαταραχών (στην τυπική περίπτωση μια Μαρκοβιανή αλυσίδα) μήκους L , υπό σταθερή θερμοκρασία T_k . Μια διαταραχή γίνεται πάντα αποδεκτή εφόσον βελτιώνει την τιμή της στοχικής συνάρτησης, διαφορετικά γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα $p(T_k)$. Όταν ολοκληρωθεί η διαδρομή, η θερμοκρασία μειώνεται με βάση το χρονοδιάγραμμα ανόπτωσης, δηλαδή $T_{k+1} = g(T_k)$, και ξεκινά ένας νέος κύκλος θερμικής ισορροπίας. Αποδεικνύεται ότι, αν τα σημεία της διαδρομής γεννώνται στους διακριτούς κόμβους ενός πλέγματος, η παραπάνω διαδικασία συγκλίνει στο ολικό ακρότατο. Η προσομοιωμένη ανόπτωση έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία κυρίως σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας, δηλαδή σε προβλήματα διακριτών τιμών με πολλές μεταβλητές ελέγχου (Van Laarhoven and Aarts, 1987) (Ευστρατιάδης, 2008).

3.4 Το σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης «Κασταλία»

Το σύστημά «Κασταλία» είναι ένα σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης υδρολογικών μεταβλητών. Το σύστημα εφαρμόζει ένα πρωτότυπο σχήμα στοχαστικής ανάλυσης πολλών μεταβλητών και δύο χρονικών επιπέδων, κατάλληλο με σκοπό τη διατήρηση των ουσιαστών στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών χρονοσειρών και για την αναπαραγωγή χαρακτηριστικών ιδιοτεροτήτων, όπως της εμμονής (υδρολογική εμμονή- ιδιότητα των υγρών και ξηρών ετών να εμφανίζονται κατά ομάδες, σχηματίζοντας μακρές περιόδους υψηλής και χαμηλής υδροφορίας, αντίστοιχα), της περιοδικότητας και της ασυμμετρίας.. Το μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει και ως εργαλείο στοχαστικής πρόγνωσης, υπό την προϋπόθεση ότι αυτό τροφοδοτείται με επίκαιρα υδρολογικά δεδομένα. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργεί σενάρια εισροών που χρησιμοποιούνται στην καταληκτική προσομοίωση υδροσυστημάτων (Ευστρατιάδης κ.ά.,2007).

Το μαθηματικό σύστημα της Κασταλίας επιτυγχάνει να αναπαράγει τα χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών διαφόρων μεταβλητών που αναφέρονται σε χωρικά κατανεμημένα στοιχεία των υδροσυστημάτων. Οι συνθετικές χρονοσειρές αναφέρονται στις υδρομετεωρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν μέρος σε ένα υδροσύστημα, όπως απορροές, βροχοπτώσεις και εξατμίσεις των ταμιευτήρων. Η κύρια λειτουργία του είναι η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών, των οποίων οι μελλοντικές τιμές θα πρέπει να είναι συνεπείς με τις επίκαιρες και τις ιστορικές τιμές.

Η χρήση του μοντέλου δημιουργίας συνθετικών χρονοσειρών μπορεί να έχει τις εξής εφαρμογές:

- Τη γέννηση χρονοσειρών όπου δεν εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης, και συνεπώς είναι χρονοσειρές μεγάλου μήκους, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τύπου μόνιμης κατάστασης.
- Τη γέννηση πολλαπλών σεναρίων μικρού μήκους, τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τύπου καταληκτικής προσομοίωσης.

Για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών υιοθετήθηκε ένα στοχαστικό σχήμα πολλών μεταβλητών, το οποίο υλοποιείται σε δύο χρονικά επίπεδα. Κάθε μεταβλητή αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία, που λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση. Το πρώτο επίπεδο (υψηλό επίπεδο) αναφέρεται σε χρονοσειρές αραιής χρονικής κλίμακας, η ισοδιάσταση της οποίας θα καλείται εφεξής περίοδος, ενώ το δεύτερο επίπεδο (χαμηλό επίπεδο) αναφέρεται σε πυκνότερη χρονική κλίμακα, που θα καλείται υποπερίοδος. Ως υψηλή χρονική κλίμακα επιλέγεται η ετήσια, για την οποία οι

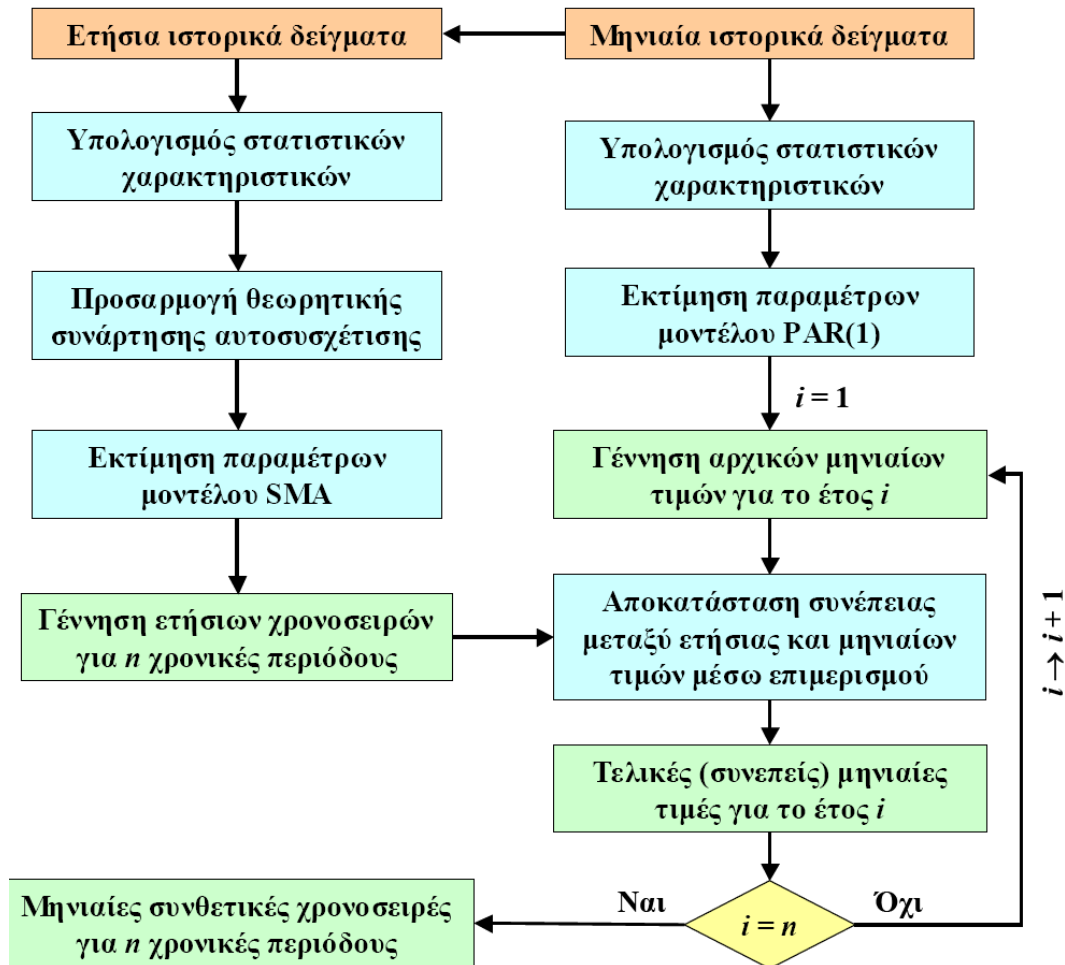
στοχαστικές ανεπίξεις θεωρούνται στάσιμες, ενώ ως χαμηλή χρονική κλίμακα επιλέγεται η μηνιαία, που είναι η συνήθης κλίμακα στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων.

«Η μακροπρόθεσμη εμμονή (persistence) των υδρολογικών χρονοσειρών ανακαλύφθηκε από τον Hurst (1951), στα πλαίσια μελέτης του φράγματος του Ασουάν. Ο Hurst, αναλύοντας τις χρονοσειρές του ποταμού Νείλου καθώς και άλλες υδρολογικές και γεωφυσικές χρονοσειρές που ήταν διαθέσιμες για αρκετές εκατοντάδες έτη, διαπίστωσε την ιδιότητα των υγρών και ξηρών ετών να εμφανίζονται κατά ομάδες, σχηματίζοντας μακρές περιόδους υψηλής και χαμηλής υδροφορίας, αντίστοιχα. Έκτοτε, η μακροπρόθεσμη εμμονή των φυσικών χρονοσειρών έλαβε την ονομασία φαινόμενο Hurst, ενώ αργότερα εισήχθη από τον γνωστό μαθηματικό Mandelbrot η έκφραση φαινόμενο Ιωσήφ. Το φαινόμενο εντοπίζεται σε πλήθος γεωφυσικών και κλιματολογικών μεταβλητών, όπως η ένταση ανέμων, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία και το πάχος δακτυλίων δέντρων (Koutsoyiannis, 2002). Η μακροπρόθεσμη εμμονή των χρονοσειρών που περιγράφουν φυσικές διεργασίες εμφανίζεται με τη μορφή υψηλών θετικών τιμών των συντελεστών αυτοσυσχέτισης, ακόμη και για μεγάλη χρονική υστέρηση, της τάξης των δεκάδων ή και εκατοντάδων ετών (Ευστρατιάδης κ.ά., 2005).»

Οι δύο κατηγορίες παραμέτρων όπου εντάσσονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά που διατηρούνται και αναπαράγονται στις συνθετικές χρονοσειρές είναι:

- Οι παράμετροι των περιθωρίων συναρτήσεων κατανομής, και συγκεκριμένα οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις και οι συντελεστές ασυμμετρίας.
- Οι παράμετροι των από κοινού συναρτήσεων κατανομής, και συγκεκριμένα οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης και οι συντελεστές ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης.

Οι παραπάνω συνιστούν το ελάχιστο σύνολο ουσιαστών στατιστικών παραμέτρων που, κατά κανόνα, απαιτούνται για την αναπαραγωγή της δίαιτας των υδρολογικών μεταβλητών στα πλαίσια της στοχαστικής προσομοίωσης ενός υδροσυστήματος. Για την εκτίμηση των δειγματικών τιμών των παραμέτρων εφαρμόζονται τυπικές στατιστικές επεξεργασίες πάνω στις ιστορικές χρονοσειρές. Η γέννηση των χρονοσειρών γίνεται από την υψηλότερη στη χαμηλότερη χρονική κλίμακα.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής σχήματος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών για τη στοχαστική προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη (Ευστρατιάδης κ.α., 2005)

Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας γέννησης συνθετικών χρονοσειρών απεικονίζεται παραπάνω (Σχήμα 3.5). Είσοδος του μοντέλου είναι τα μηνιαία ιστορικά δείγματα των μεταβλητών, βάσει των οποίων προκύπτουν τα αντίστοιχα ετήσια. Πρώτα υπολογίζονται τα δειγματικά στατιστικά χαρακτηριστικά, τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια βάση. Στη συνέχεια, για κάθε ετήσια μεταβλητή ορίζεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (πόσο καλά εκτιμάται η τιμή $x_t + 1$, αν θεωρηθεί γραμμική συνάρτηση της x_t), η οποία περιγράφει τη μακροπρόθεσμη εμμονή της αντίστοιχης υδρολογικής διεργασίας. Η δομή της αυτοσυσχέτισης αναπαράγεται μέσω ενός στάσιμου μοντέλου συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων (μοντέλο SMA), οι παράμετροι του οποίου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ετήσιων ιστορικών χρονοσειρών. Το μοντέλο SMA, που σημειωτέον είναι γενικευμένο ώστε να προσαρμόζεται σε πολυμεταβλητά σχήματα προσομοίωσης, χρησιμοποιείται για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών σε όλες τις θέσεις και για όλο το χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης.

Για τη στοχαστική προσομοίωση των μηνιαίων μεταβλητών χρησιμοποιείται ως βάση ένα περιοδικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης, το PAR(1), διατυπωμένο ως πολυμεταβλητό. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των μηνιαίων ιστορικών χρονοσειρών. Η γέννηση των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, η οποία προϋποθέτει να έχει ολοκληρωθεί η παραγωγή των ετήσιων συνθετικών τιμών, γίνεται σε στάδια Αρχικά, για κάθε ένα έτος ξεχωριστά, γεννώνται 12 μηνιαίες τιμές μέσω του μοντέλου PAR(1), οι οποίες προφανώς δεν είναι συνεπείς με τις αντίστοιχες ετήσιες. Για την αποκατάσταση της συνέπειας, εφαρμόζεται μια διαδικασία γραμμικής αναγωγής (μοντέλο επιμερισμού), μέσω της οποίας οι μηνιαίες συνθετικές τιμές διορθώνονται, ώστε συναθροισμένες να ισούνται με την αντίστοιχη ετήσια. Η διαδικασία γέννησης μηνιαίων τιμών επαναλαμβάνεται για όλα τα έτη, οπότε προκύπτει ένα τελικό συνθετικό δείγμα μηνιαίων τιμών που είναι συνεπές με το έτησιο, το οποίο έχει προκύψει με εφαρμογή του μοντέλου SMA, αναπαράγοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το ιδιαίτερα κρίσιμο φαινόμενο της εμμονής (Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης και Σ. Κοζάνης-2005).

3.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογής Πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στους υδατικούς πόρους

Στον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων, και στον ακαδημαϊκό χώρο τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα έχουν γίνει τρεις διδακτορικές διατριβές που προσπαθούν να λύσουν ένα σχετικό πρόβλημα, αποκλειστικά ή μη με ΓΑ.

Η Πεταλά (2004) χρησιμοποίησε ΓΑ για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης υπόγειων υδροφορέων. Με συνδυασμό της μεθόδου των οριακών στοιχείων και ΓΑ βελτιστοποιήθηκε η απόληψη νερού από γεωτρήσεις ώστε να μην παρατηρείται το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Ο Ευστρατιάδης (2008) ανέπτυξε εξελικτικά σχήματα για την αντιμετώπιση ενός πολύ επίκαιρου προβλήματος στην επιστήμη των υδατικών πόρων, της βαθμονόμησης των υδρολογικών μοντέλων με βάση πολλά κριτήρια αξιολόγησης της αποδοτικότητάς τους. Ακομή ο Παναγόπουλος (2010) προτείνει μία νέα μεθοδολογία, βασισμένη σε εξελικτικές μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με σκοπό τον περιορισμό της ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων λεκάνης απορροής από τις αγροτικής προέλευσης ενώσεις θρεπτικών του αζώτου νιτρικών (N-NO₃) και του φωσφόρου (P).

Πέραν του Ελλαδικού χώρου, οι Oliveira και Loucks (1997) προτείνουν μια προσέγγιση για τον προσδιορισμό των κανόνων λειτουργίας ταμειυτήρων κάνοντας χρήση Γ.Α και καταλήγουν στον συμπέρασμα πως η χρήση Γ.Α βοηθά στο να ξεπεραστούν προβλήματα που αντιμετωπίζονταν με την χρήση παραδοσιακών μαθηματικών μεθόδων. Ο Wang το 1997 χρησιμοποίησε με επιτυχία τους Γ.Α για την βαθμονόμηση ενός μοντέλου βροχής- απορροής με

εννέα παραμέτρους. Επίσης ο Chen το 2003 επιτυχώς έκανε χρήση Γ.Α σε συνδυασμό με ένα μοντέλο προσομοίωσης ταμιευτήρων για την βελτιστοποίηση των δεκαήμερων κανόνων λειτουργίας ενός συστήματος ταμιευτήρων στην Ταιβάν. Ακόμη οι Makropoulos C. και Butler D. το 2005 παρουσίασαν σε άρθρο τους μια υπολογιστική τεχνική για την επίλυση χωρικών πολυκριτιρακών προβλημάτων στον τομέα της αστικής διαχείρισης υδάτων. Οι Farmani R. et al. το 2006 έκαναν χρήση Γ.Α για τον σχεδιασμό και την επιχειρησιακή λειτουργία δικτύων διανομής νερού. Επίσης οι Preis και Ostfeld το 2007 χρησιμοποίησαν Γ.Α για να προβλέψουν την απορροή και ποιότητα των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Άλλες προσεγγίσεις πάνω σε αυτό το θέμα όπως των Kim T. et al. το 2008 όπου με τη χρήση Γ.Α ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για την εύρεση των βέλτιστων κανόνων λειτουργίας ενός ταμιευτήρα. Γενικά η χρήση της προσομοιωμένης ανόπτησης και των γενετικών αλγορίθμων συναντώνται πολύ συχνά σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολυκριτηριακής ή μη στον χώρο των υδατικών πόρων. Επίσης ο Chang (2008) έκανε χρήση των Γ.Α για να βελτιστοποιήσει ενός ταμιευτήρα στην Ταιβάν έναντι των πλημμύρων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η χρήση του Γ.Α μπορούσε να μειώσει τις ζημιές από τις πλημμύρες ενώ ταυτόχρονα βοήθησε στην αύξηση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα για μελλοντική χρήση. Ακόμη οι Pierro et al. το 2009 με τη βοήθεια των Γ.Α διεξήγαγαν πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τον βέλτιστο σχεδιασμό δικτύων διανομής νερού. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως η χρήση των Γ.Α θα μπορούσε να επεκταθεί στον σχεδιασμό μεγάλων υδρευτικών δικτύων.

4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΙΡΗΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WEAR21

4.1 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων

Λόγω της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος των σύγχρονων οργανισμών και επιχειρήσεων η λήψη αποφάσεων αποτελεί πλέον ένα αποτέλεσμα συνθετών διαδικασιών. Αυτές οι διαδικασίες αποσκοπούν στην ανάλυση, τη μελέτη και την τεκμηρίωση των επιπτώσεων ενδεχομένων αποφάσεων καθώς και τη σύγκλιση των αποφάσεων ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι ενδεχόμενοι στόχοι ή κριτήρια που έχουν τεθεί.

Τα ΣΥΑ (Decision System Support, DSS) απαρτίζουν εφαρμογές λογισμικού που έχουν ως στόχο την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης μιας απόφασης, βοηθώντας τους αρμοδίους χρήστες να κατανοήσουν τις επιπτώσεις των δράσεων τους (French, 2000). Τα ΣΥΑ διαθέτουν ευρύ πεδίο εφαρμογής, κυρίως στον έλεγχο και στη διαχείριση πολύπλοκων φυσικών ή τεχνητών συστημάτων (Eom et al., 1998 , Turban and Aronson, 1998).

Ορισμένα χαρακτηριστικά ενός ΣΥΑ φαίνονται παρακάτω (Ευστρατιάδης κ.α., 2007):

- Πρόκειται για ολοκληρωμένο σύστημα από υπολογιστικά εργαλεία, με διαδραστικό, κατά κανόνα, περιβάλλον λειτουργίας (προϋποθέτει δηλαδή επέμβαση του χρήστη, αλληλεπίδραση με αυτόν).
- Παρέχει δυνατότητες τυποποίησης, οργάνωσης, διαχείρισης και επεξεργασίας των πληροφοριών (π.χ. μέσω βάσεων δεδομένων) καθώς και οπτικοποίησης αυτών (π.χ. μέσω συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας).
- Ενσωματώνει μαθηματικά εργαλεία ανάλυσης συστημάτων, όπως μοντέλα προσομοίωσης, βελτιστοποίησης και ανάλυσης αποφάσεων.
- Σχεδιάζεται με στόχο την υποβοήθηση του χρήστη στη λήψη αποφάσεων σε σχετικά πολύπλοκα και ασθενώς δομημένα προβλήματα (δηλαδή προβλήματα που δεν επιδέχονται άμεση διατύπωση εξισώσεων), μέσω της διατύπωσης και λεπτομερούς διερεύνησης σειράς εναλλακτικών επιλογών.

Στις δραστηριότητες που σχετίζονται με τη λήψη αποφάσεων κατατάσσονται η συλλογή πρωτογενών δεδομένων και επεξεργασία τους (ήτοι, μετατροπή τους σε χρήσιμη πληροφορία για την εκτίμηση της κατάστασης), η διατύπωση και διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων, η

αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, η λήψη της απόφασης και η ανάληψη των σχετικών δράσεων (Sage, 1993).

Τα τελευταία χρόνια η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων γίνεται, όλο και περισσότερο μέσω συστημάτων αυτοματισμού των μετρήσεων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως συνιστώσες ενός ΣΥΑ. Η κύρια λειτουργία των ΣΥΑ επικεντρώνεται στην επεξεργασία των δεδομένων και στη διατύπωση και διερεύνηση μιας σειράς εναλλακτικών λύσεων. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω εφαρμογών διαχείρισης και επεξεργασίας των πληροφοριών, οι οποίες μπορεί να είναι από απλά εργαλεία λογιστικών φύλλων μέχρι πιο σύνθετα εργαλεία σχεσιακών βάσεων δεδομένων και συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας. Ένα σύστημα που έχει να κάνει με αποφάσεις στο χώρο μιας γεωγραφικής έκτασης ονομάζεται Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων στο Χώρο (Spatial Decision Support System - SDSS), (Makropoulos and Butler, 2005b); (Makropoulos et al., 2003). Από την άλλη πλευρά, η διατύπωση και διερεύνηση των εναλλακτικών λύσεων που αποτελεί την κεντρική συνιστώσα ενός ΣΥΑ, αναφέρεται στην εφαρμογή εξειδικευμένων μαθηματικών μοντέλων (από απλά εμπειρικά μοντέλα έως εξελιγμένα μοντέλα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης), τα οποία αναπαριστούν τη δυναμική εξέλιξη του υπό μελέτη συστήματος, διερευνώντας τις επιπτώσεις εναλλακτικών δράσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία και διαχείριση αυτού. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αξιολογήσει αλλά και να ερμηνεύσει ένα ευρύ φάσμα τέτοιων δράσεων, εστιάζοντας όχι μόνο στις άμεσες επιπτώσεις (που μπορεί να είναι και προφανείς) αλλά και στις μελλοντικές.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, η λήψη της τελικής απόφασης και, συνεπακόλουθα, η ανάληψη των σχετικών δράσεων τεκμηριώνεται αντικειμενικά, και σε συνδυασμό με την εμπειρία και κρίση του αναλυτή, οδηγεί στην επιλογή της απόφασης με ορθολογικά κριτήρια (Ευστρατιάδης κ.α., 2007). Είναι προφανές πως τα ΣΥΑ δεν είναι δυνατό να υποκαταστήσουν τον άνθρωπο στο σύνολο των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων.

4.2 Χρήση των ΣΥΑ στην διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων

Τα συστήματα υδατικών πόρων έχουν αποτελέσει ένα προνομιακό πεδίο εφαρμογής των ΣΥΑ λόγω της πολυπλοκότητας στη δομή και λειτουργία τους, της πληθώρας δεδομένων που απαιτεί η διαχείρισή τους, και των πολλαπλών, κατά κανόνα ανταγωνιστικών, στόχων που εξυπηρετούν.

Κάποιες από τις τυπικές εφαρμογές των ΣΥΑ στην ευρύτερη περιοχή των υδατικών πόρων είναι (Watkins and McKinney, 1995):

- Διαχείριση λιμνών και ταμιευτήρων (για την εξυπηρέτηση στόχων
- υδροδότησης, παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ελέγχου ρύπανσης)·
- Έλεγχος πλημμυρών και διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου (σε λεκάνες)
- Διαχείριση υδροφορέων - συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων πόρων·
- Διαχείριση συστημάτων διανομής νερού (δίκτυα ανοιχτών και κλειστών αγωγών, αντλιοστάσια, κλπ.)·
- Έλεγχος βλαβών ή διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης·
- Διαχείριση μη σημειακών πηγών ρύπανσης σε γεωργικές περιοχές.

Μερικές ακόμη εφαρμογές των ΣΥΑ στην ευρύτερη περιοχή των υδατικών πόρων είναι η χρήση ΣΥΑ σε συνδυασμό με ασαφείς λογική (Makrooulos et al., 2008).

4.3 Εισαγωγή στο WEAP21

Το WEAP ("Water Evaluation And Planning" system) είναι ένα φιλικό προς το χρήστη εργαλείο λογισμικού που προσφέρει ολοκληρωμένη προσέγγιση στο σχεδιασμό των υδατικών πόρων. Οι προκλήσεις της διαχείρισης του γλυκού νερού αποτελούν ένα θέμα διαρκώς αυξανόμενου ενδιαφέροντος. Η κατανομή των πεπερασμένων σε διαθεσιμότητα υδατικών πόρων μεταξύ αγροτικών, αστικών και περιβαλλοντικών χρήσεων απαιτεί μια ολοκληρωμένη θεώρηση της προσφοράς, της ζήτησης, της ποιότητας του νερού και των οικολογικών ζητημάτων. Το WEAP, στοχεύει στην ενσωμάτωση αυτών των θεμάτων στα πλαίσια ενός πρακτικού και εύρωστου εργαλείου για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό/διαχείριση των υδατικών πόρων. Το WEAP αναπτύχθηκε από το SEI Stockholm Environment Institute's U.S. Center (www.sei-international.org).

4.4 Βασικά χαρακτηριστικά του WEAP21

Το WEAP είναι ένα εργαλείο ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων το οποίο ενσωματώνει ένα ημι-αδιαμέριστο (semi-lumped) μοντέλο λεκάνης απορροής με ένα μοντέλο διαχείρισης υδατικών πόρων καθοδηγούμενο από τις διαφορές ζητήσεις νερού και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Κατά την τελευταία δεκαετία, έγινε εντονότερη μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανάπτυξη των υδατικών πόρων, η οποία τοποθετεί τα έργα προσφοράς νερού στο πλαίσιο της διαχείρισης της ζήτησης, και της ποιότητας των υδάτων καθώς και της διαφύλαξης και προστασίας των οικοσυστημάτων. Το WEAP ενσωματώνει αυτές τις αρχές σε ένα πρακτικό εργαλείο για το σχεδιασμό/διαχείριση των υδατικών πόρων και την ανάλυση θεμάτων πολιτικής. Το WEAP θέτει τα σχετικά με τη ζήτηση θέματα, όπως είναι τα πρότυπα χρήσης νερού, η αποδοτικότητα του εξοπλισμού, οι στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης, το κόστος και τα συστήματα κατανομής του νερού σε ισότιμη βάση με θέματα διαχείρισης προσφοράς, όπως η παροχή υδατορρέυματος, οι πόροι υπόγειων υδάτων, οι ταμιευτήρες, και η μεταφορά ύδατος.

Το WEAP διακρίνεται επίσης για την ολοκληρωμένη προσέγγιση που προσφέρει σχετικά με την προσομοίωση τόσο των φυσικών (πχ απαιτήσεις εξατμοδιαπνοής, απορροή, κ.α.) όσο και των τεχνητών στοιχείων (πχ ταμιευτήρες, άντληση υπόγειων υδάτων) των υδατικών συστημάτων. Αυτές οι δυνατότητες παρέχουν στο σχεδιαστή πρόσβαση σε μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση του εύρους των παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη διαχείριση των υδατικών πόρων στο παρόν και στο μέλλον. Το αποτέλεσμα είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών ανάπτυξης και διαχείρισης των υδάτων.

Το WEAP είναι ένα εργαλείο λογισμικού για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό υδατικών πόρων που υποστηρίζει αλλά δεν υποκαθιστά τον εξειδικευμένο σχεδιαστή.

Σημαντικά χαρακτηριστικά:

- Σύστημα ολοκληρωμένου σχεδιασμού υδατικών πόρων
- Ενσωματωμένα μοντέλα για: Κατακρημνίσεις-απορροή και διήθηση, εξατμοδιαπνοή, απαιτήσεις καλλιέργειών και αποδόσεις, αλληλεπιδράσεις επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και ποιότητα ρευμάτων νερού
- Βασισμένο σε GIS, και γραφικό περιβάλλον διεπιφάνειας χρήστη "drag and drop"

- Ικανότητα δημιουργίας μοντέλων με έναν αριθμό ενσωματωμένων συναρτήσεων
- Οριζόμενες από το χρήστη μεταβλητές και εξισώσεις
- Δυναμική σύνδεση με υπολογιστικά φύλλα και άλλα μοντέλα
- Ενσωματωμένο γραμμικό πρόγραμμα επίλυσης εξισώσεων κατανομής πόρων (allocation equations)
- Ευέλικτες και επεκτεινόμενες δομές δεδομένων
- Δυνατό σύστημα παραγωγής αναφορών που περιλαμβάνει γραφήματα, πίνακες και χάρτες

Το WEAP ως εργαλείο προσομοίωσης υπολογίζει την ζήτηση και προσφορά νερού, απορροή, διήθηση, απαιτήσεις των καλλιεργειών, παροχές και αποθήκευση, πρόκληση ρύπανσης, ποιοτικά χαρακτηριστικά των εισερχόμενων και εξερχόμενων παροχών νερού κάτω από μεταβαλλόμενα υδρολογικά σενάρια και πολιτικές. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων και την αξιολόγησή τους.

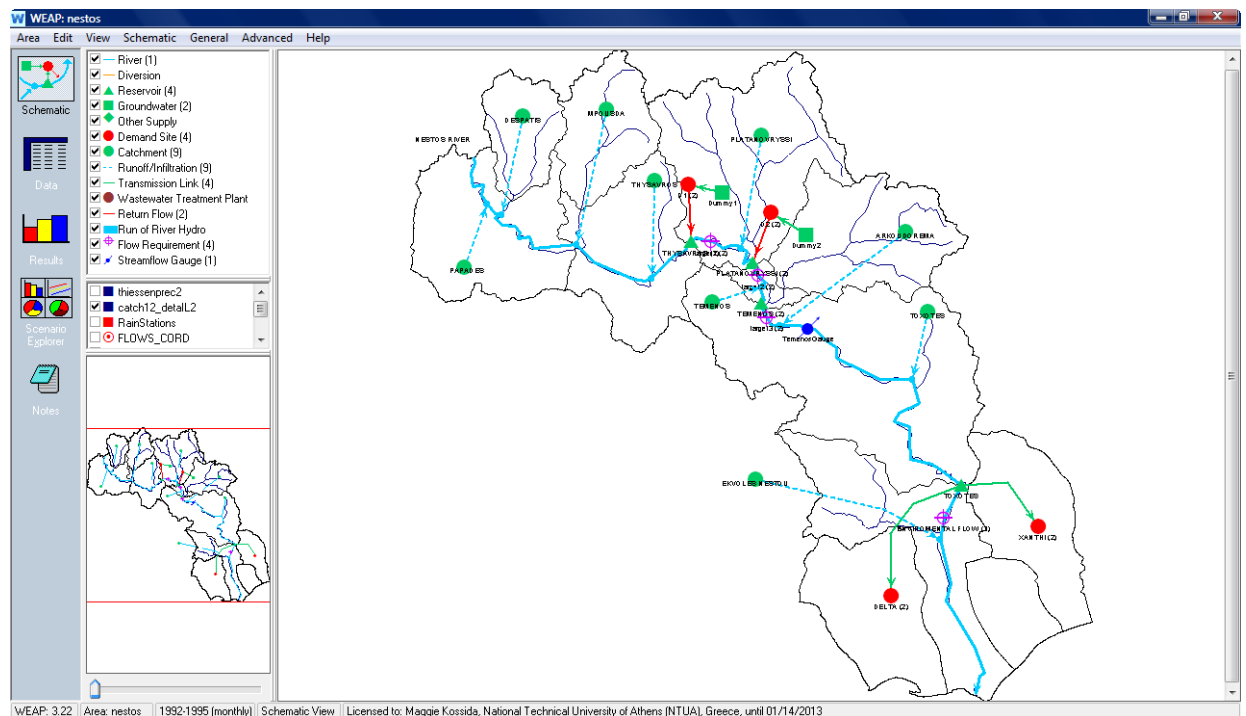
Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό το WEAP είναι η δυνατότητα δυναμικής αλληλεπίδρασης με άλλα μοντέλα και λογισμικά όπως QUAL2K, MODFLOW, MODPATH, PEST, Excel και MATLAB. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε σύνδεση με το λογισμικό MATLAB.

4.5 Διαδικασία μοντελοποίησης στο WEAP21

Το WEAP αποτελείται από πέντε κυρίως προβολές: γραφική απεικόνιση, δεδομένα, αποτελέσματα, περιηγητής σεναρίων και σημειώσεις.

Η εισαγωγή των διαφόρων φυσικών και τεχνικών γνωρισμάτων της περιοχής γίνεται από την προβολή «γραφική απεικόνιση» κάνοντας drag and drop από τις επιλογές που είναι διαθέσιμες στην αριστερή εργαλειοθήκη ενώ τα χαρακτηριστικά τους εισάγονται από την προβολή «δεδομένα».

Με την επιλογή Current Accounts αναπαρίσταται το σύστημα σε μια βασική κατάσταση, έτσι ώστε αυτό να αποτελεί την βάση για όλα τα μετέπειτα σενάρια που θα δημιουργηθούν και θα αξιολογηθούν. Κάθε σενάριο αποτελεί ξεχωριστή οντότητα και προβάλλει μια μελλοντική εικόνα του συστήματος. Το πρόγραμμα υπολογίζει την ποσότητα του νερού σε κάθε κόμβο και σύνδεσμο του συστήματος για κάθε χρονικό βήμα. Το νερό κατανέμεται έτσι ώστε να καλύπτονται οι οποίες ζητήσεις και στόχοι του συστήματος πάντα υπό τους υπάρχοντες φυσικούς περιορισμούς, προτεραιότητες ζήτησης, κ.α.



Σχήμα 4.1: Περιβάλλον εργασίας WEAP

Η διαδικασία μοντελοποίησης της περιοχής περιλαμβάνει τα έξης βήματα:

1. Ορισμός της περιοχής μελέτης και του χρονικού πλαισίου. Ο ορισμός του χρονικού πλαισίου περιλαμβάνει τον αρχικό και τελικό χρόνο των σεναρίων που θα αναλυθούν.
2. Δημιουργία του σεναρίου Current Accounts το οποίο είναι λίγο η πολύ η υπάρχουσα κατάσταση της περιοχής. Σε αυτό το σημείο ορίζονται οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι, τα διάφορα τεχνικά έργα και οι κομβί ζήτησης. Πρόκειται για ένα πολύ βασικό σημείο, μιας και αποτελεί την βάση όλης της διαδικασίας μοντελοποίησης.
3. Δημιουργία σεναρίων που θα αναλυθούν κατά την πορεία της μελέτης.
4. Εκτίμηση των σεναρίων βάση την διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων της περιοχής.

4.6 Προσομοίωση βροχής-απορροής στο WEAP21

Υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι για την προσομοίωση των λειτουργιών των λεκανών απορροής όπως η εξατμοδιαπνοή, η απορροή, η κατείσδυση και οι αρδευτικές ανάγκες.

- a) Irrigation Demands Only Method (FAO Crop Requirements Method), πρόκειται για την πιο απλή από τις τέσσερις διαθέσιμες μεθόδους. Χρησιμοποιεί συντελεστές καλλιέργειας για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμοδιαπνοή της λεκάνης, έπειτα καθορίζει της ανάγκες άρδευσης οι

οποίες δεν μπορούν να καλυφτούν. Δεν υπολογίζει απορροή καθώς και κατεισδύσεις.

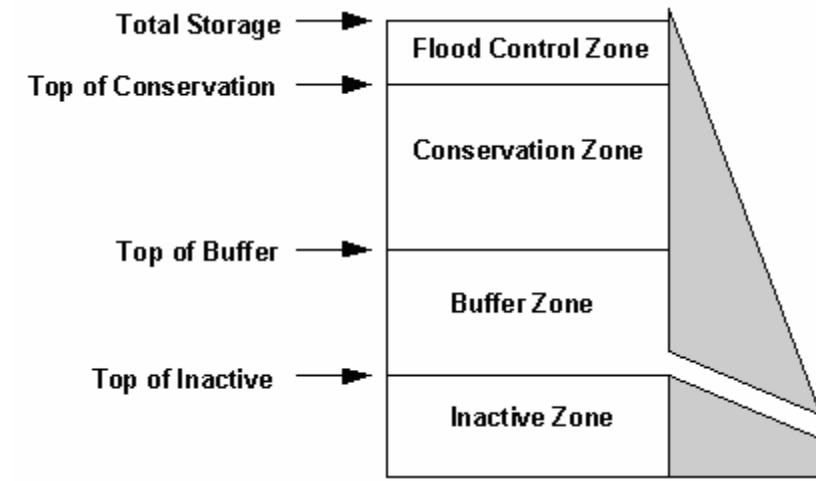
- b) Rainfall Runoff Method (FAO Crop Requirements Method), και αυτή η μέθοδος όπως και η προηγούμενη υπολογίζει τη δυνητική εξατμοδιαπνοή για τις αρδευόμενες περιοχές χρησιμοποιώντας συντελεστές καλλιέργειας. Η ανυπομονούσα βροχόπτωση που δε καταναλώθηκε από την εξατμοδιαπνοή προσομοιώνεται ως απορροή.
- c) Rainfall Runoff Method (Soil Moisture Method), πρόκειται για την πιο σύνθετη από τις τέσσερις μεθόδους, αναπαριστώντας τη λεκάνη με δυο εδαφικά στρώματα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί εκτεταμένη παραμετροποίηση όσον αφορά τα εδαφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά
- d) MABIA Method (FAO 56, Dual Kc, Daily), πρόκειται για μια μέθοδο ημερήσιας αποκλειστικά προσομοίωσης. Αναπτύχθηκε από το Institut National Agronomique de Tunisie από τους Dr. Ali Sahli and Mohamed Jabloun

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η Rainfall Runoff Method (FAO Crop Requirements Method), για την ρύθμιση της μεθόδου απαιτούνταν τα έξης δεδομένα: Εμβαδό λεκάνης απορροής, συντελεστές καλλιέργειας Kc, ενεργή βροχόπτωση, βροχόπτωση και εξατμοδιαπνοή.

4.7 Προσομοίωση φραγμάτων στο WEAP21

Το WEAP παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης ταμιευτήρων και μπορούν να δεχτεί ως δεδομένα χαρακτηριστικά φυσικά, λειτουργικά, υδροηλεκτρικά, ποιότητας νερού, κόστους και προτεραιότητας.

Όσον αφορά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά το πρόγραμμα χωρίζει τον ταμιευτήρα σε τέσσερις ζώνες 1) τον όγκο έλεγχου πλημμύρας, όπου προσωρινά συγκρατεί το νερό έως το τέλος του χρονικού βήματος όπου υποχρεωτικά το απελευθερώνει. 2) τον όγκο κανονικής λειτουργίας, όπου καθορίζει τον όγκο νερού που είναι διαθέσιμος για την κάλυψη των κατάντη αναγκών. 3) τον ρυθμιστικό όγκο ο οποίος χρησιμοποιείται για την κάλυψη αναγκών κατά τη διάρκεια ελλειμμάτων. 4) τον νεκρό όγκο, όπου είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθεί (Yates, 2005).



Σχήμα 4.2: Ζώνες για την προσομοίωση της λειτουργίας των ταμιευτήρων

4.8 Διανομή νερού στο WEAP21

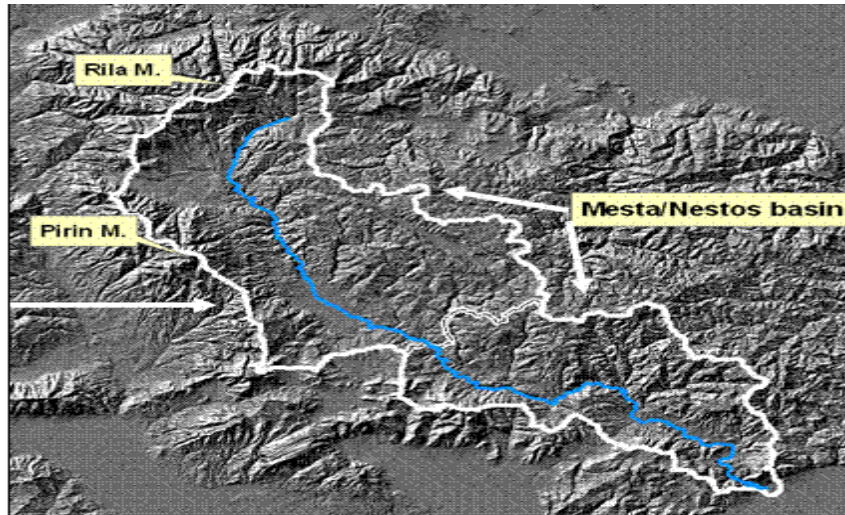
Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την τεχνική του γραμμικού προγραμματισμού για να λύσει το πρόβλημα της κατανομής του νερού στους διάφορους χρήστες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προτεραιότητες από το 1-99 για την κατηγοριοποίηση των ζητήσεων. Η κατηγορία 1 συμβολίζει την μεγαλύτερη προτεραιότητα ενώ η 99 την μικρότερη.

5. ΤΟ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΝΕΣΤΟΥ/ΜΕΣΤΑ

5.1 Γεωμορφολογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Νέστου

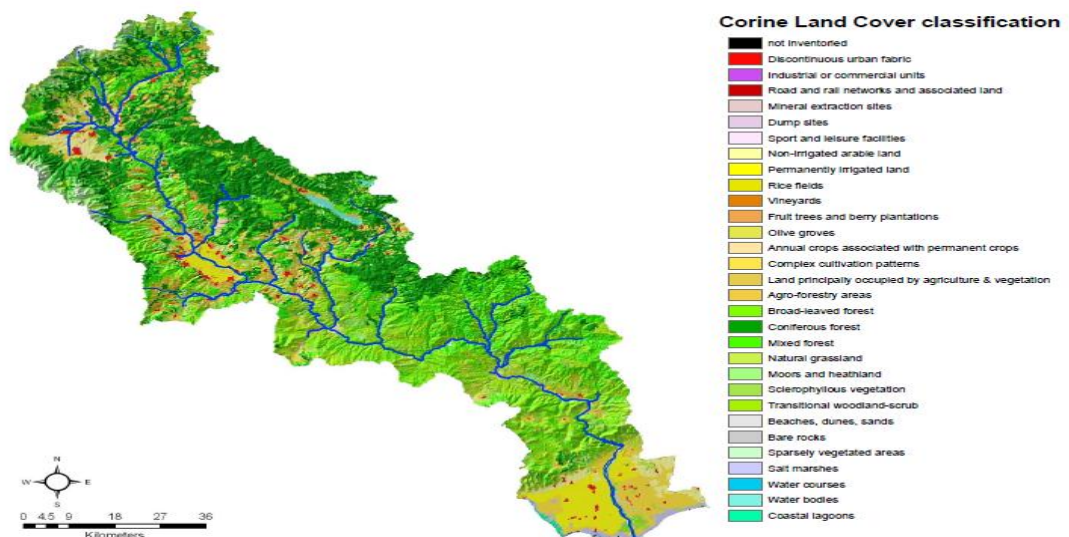
Η λεκάνη απορροής του Νέστου δεν βρίσκεται εξολοκλήρου σε μια χώρα, αλλά αποτελεί τμήμα Βουλγάρικων και Ελληνικών εδαφών. Το γεγονός αυτό καθιστά την διαχείριση των υδατικών πόρων του ποταμού αρκετά δύσκολη και περίπλοκη. Ο Νέστος είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος ποταμός του υδατικού διαμερίσματος της Θράκης και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ποταμούς της Ελλάδας. Πηγάζει από το όρος Ρίλα της Βουλγαρίας (μία περιοχή με το μεγαλύτερο υψόμετρο των Βαλκανίων, περίπου 2.925 m) και έχει συνολικό μήκος 234 km από τα οποία τα 130 βρίσκονται σε ελληνικό έδαφος. Ο Νέστος εισέρχεται στην Ελλάδα από το υψίπεδο του Νευροκοπίου του νομού Δράμας, περνώντας ανάμεσα από τις οροσειρές του Ορβήλου και της Ροδόπης. Η κοίτη του ποταμού αποτελεί φυσικό σύνορο ανάμεσα σε Βουλγαρία και Ελλάδα για μερικά χιλιόμετρα. Στο χωριό Ποταμοί, η ροή του Νέστου σταματά κι από εκεί ξεκινά η τεχνητή λίμνη που δημιουργήθηκε στις αρχές του 1997, μετά την ολοκλήρωση του υδροηλεκτρικού φράγματος του Θησαυρού. Από τους Ποταμούς μέχρι το φράγμα του Θησαυρού, η τεχνητή λίμνη ακολουθεί πορεία προς τα ανατολικά. Σε απόσταση 30 χιλιομέτρων από τα σύνορα, η λεκάνη του ποταμού σχηματίζει μια φυσική καμπή, με μήκος πάνω από 20 χιλιόμετρα. Μέσα σ' αυτή την καμπή έχει δημιουργηθεί το σύστημα των τριών φραγμάτων του Θησαυρού, της Πλατανόβρυσης και του Τεμένους (το οποίο είναι σε στάδιο δημοπράτησης).

Η λεκάνη απορροής του Νέστου ανέρχεται σε 6.219 km² και περίπου το 60% ανήκει στην Βουλγαρία. Στο ελληνικό τμήμα η λεκάνη απορροής καταλαμβάνει έκταση ίση με 2525 km² (Παρασκευόπουλος, 1994). Ο ποταμός και η λεκάνη απορροής του μοιράζονται διοικητικά από τα νομαρχιακά διαμερίσματα της Δράμας, της Ξάνθης και της Καβάλας και αποτελεί φυσικό όριο μεταξύ των διοικητικών διαμερισμάτων της Μακεδονίας και της Θράκης. Ο Νέστος αποχετεύει αρκετούς παραπόταμους και χείμαρρους όπως ο Δεσπάτης, ο Μουσδέλης, το Μεγάλο Ρέμα, το Διαβολόρεμα και το Αρκουδόρεμα. Εκβάλλει στο Θρακικό πέλαγος απέναντι από τη Θάσο σχηματίζοντας ένα μεγάλο και τελματώδες δέλτα εμβαδού περίπου 50 km³. Αξίζει να σημειωθεί πως το Δέλτα του Νέστου είναι περιοχή προστατευόμενη από τη συνθήκη Ramsar και έχει ενταχθεί στο Δίκτυο NATURA 2000.



Σχήμα 5.1: Ψηφιακό μοντέλο έδαφος της περιοχής (Skoulikaris,2008)

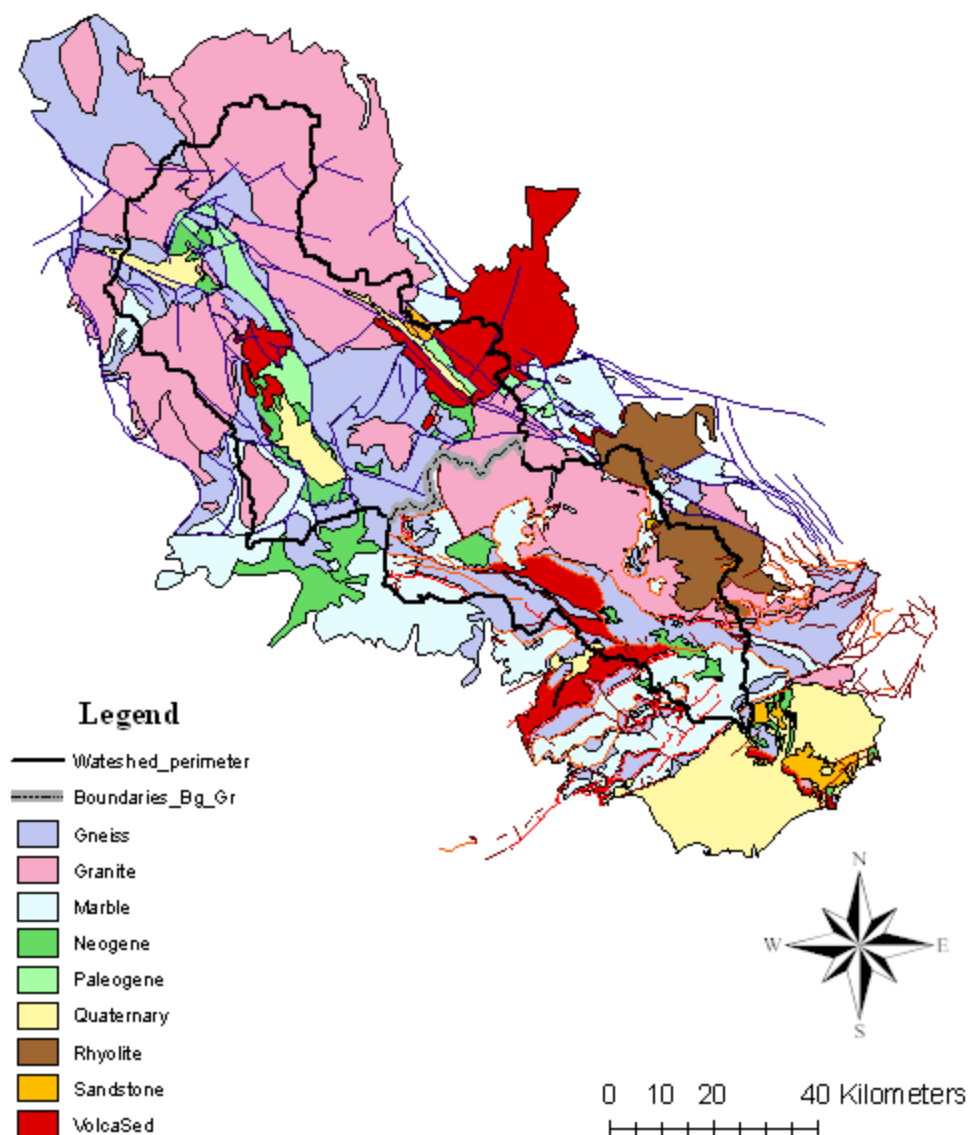
Η λεκάνη μπορεί να θεωρηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό ως φυσική λεκάνη αφού καλύπτεται κυρίως με δασικές ή φυσικές χορτολιβαδικές εκτάσεις (75,41%). Οι γεωργικές εκτάσεις καλύπτουν περίπου το σύνολο των υπολειπόμενων εκτάσεων (20,30%). Ειδικότερα, η γεωργία στο βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης αποτελείται από μη αρδευόμενες καλλιέργειες στις ορεινές περιοχές της λεκάνης και από μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις που βρίσκονται στις πεδιάδες του Razlog και Blagoevgrad. Από την άλλη μεριά, η γεωργία στο ελληνικό τμήμα της λεκάνης είναι συγκεντρωμένη στην περιοχή του δέλτα του Νέστου. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αστικές περιοχές καλύπτουν μόλις το 1% της λεκάνης.



Σχήμα 5.2: Χρήσεις γης και κάλυψη εδαφικών εκτάσεων της λεκάνης του ποταμού Μέστα/Νέστου σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση CORINE Land Cover

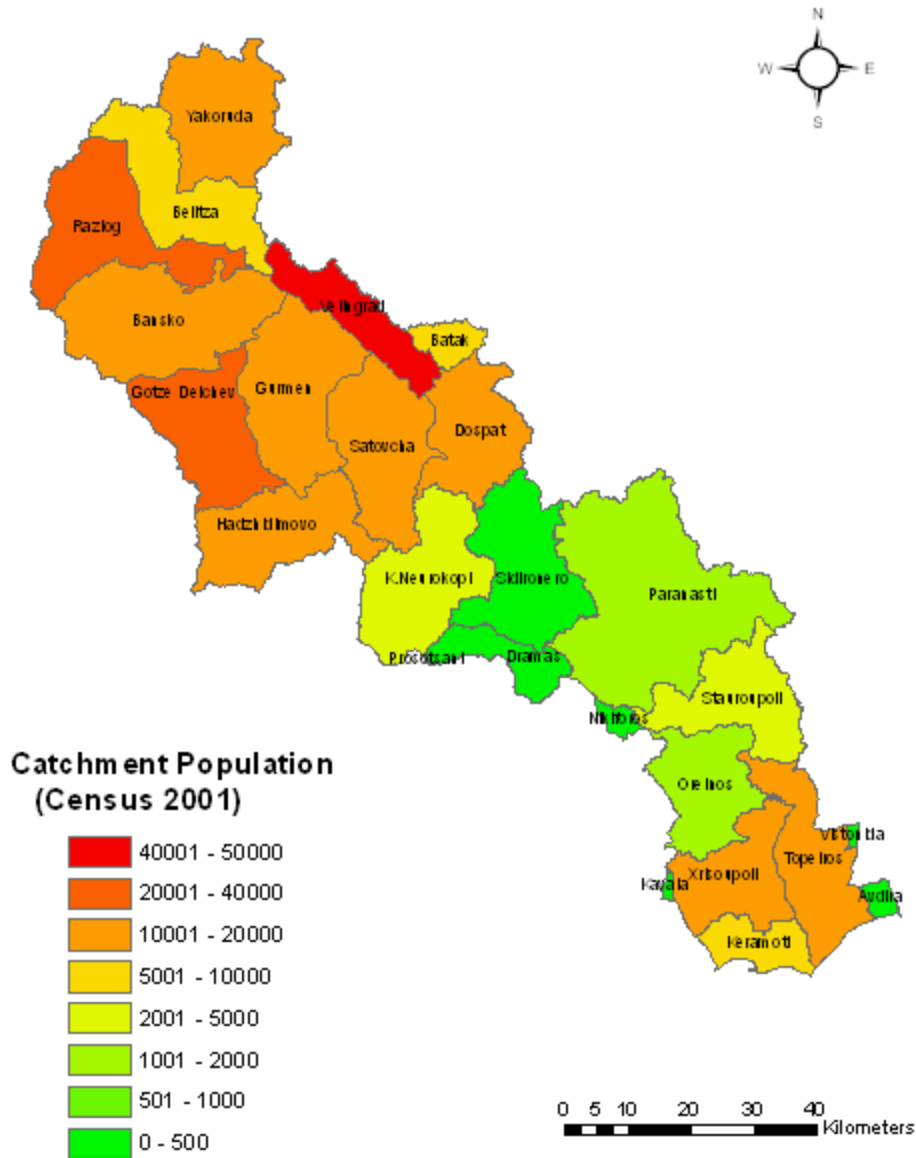
5.2 Γεωλογικά και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά

Η περιοχή αποτελείται κύριος από μεταμορφωσιγενή και μάρμαρα, ενώ η κοίτη του ποταμού από ιζηματογενή πετρώματα και αλλουβιακές αποθέσεις (προφήτες) (εικόνα 5.3). Γεωλογικά η περιοχή ανήκει στη μάζα της Ροδόπης. Ο γεωτεκτονικής χαρακτήρας της μάζας σύμφωνα με τα μοντέλα λιθοσφαιρικών πλακών για την εξέλιξη της Μεσόγειου είναι καθαρά ηπειρωτικός και θεωρείται ότι η προέλευση της προέρχεται από την πλάκα της Λαουρασίας. Το κρυσταλλοσχιτώδες της περιοχής του Νέστου διαιρείται σε τέσσερις σειρές που από τις βαθύτερες προς τις ανώτερες είναι οι έξης: η σειρά των γνευσίων της βάσης στη Δυτική Ροδόπη, η σειρά των μάρμαρων, η σειρά των μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων, η σειρά των σχιστόλιθων και μάρμαρων.



Σχήμα 5.3: Γεωλογικός χάρτης λεκάνης απορροής Νέστου (Skoulikaris, 2008)

Όσον αφορά τον πληθυσμό που ζει στην περιοχή πλησιάζει τις 230.000 κατοίκους. Στο Βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης ζουν περίπου 190.000 άνθρωποι που αντιπροσωπεύει το 2.5% του συνολικού πληθυσμού της Βουλγαρίας (Ruszczyk H. et al., 2001) ενώ στην Ελληνική πλευρά ζουν περίπου 42.000 κάτοικοι.



Σχήμα 5.4: Πληθυσμιακή κατανομή στη λεκάνη του Νέστου (Skoulikaris, 2008)

5.3 Ανθρώπινες οικονομικές δραστηριότητες και παρεμβάσεις στην περιοχή

Οι κυριότεροι βιομηχανικοί κλάδοι του τμήματος της Βουλγαρίας είναι η παράγωγή ποτών και τροφίμων, η επεξεργασία καπνού, η μεταλλουργία και η κλωστοϋφαντουργία. Παρόλα αυτά η γεωργία και η δασοκομία αποτελούν τον κύριο τομέα απασχόλησης στην περιοχή της λεκάνης του Μέστα (Βουλγαρία) με το 33,8% των εργαζόμενων να απασχολούνται στον συγκεκριμένο τομέα.

Όσον αφορά τις οικονομικές δραστηριότητες που αναπτύσσονται στο Ελληνικό κομμάτι εξέχουσα θέση κατέχει ο πρωτογενής τομέας και ιδιαίτερα η γεωργία, όπου μάλιστα απασχολεί κα το 50% του εργατικού δυναμικού της περιοχής. Στη βιομηχανία απασχολείται το 24% του εργατικού δυναμικού ενώ το υπόλοιπο 26% ασχολείται με τον τριτογενή τομέα. (Νομαρχία Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, 2000)

Το δέλτα του ποταμού Νέστου θεωρείται ως μια από τις πιο εύφορες και παραγωγικές γεωργικές περιοχές της Ελλάδας. Η κάλυψη των γεωργικών αναγκών σε νερό πραγματοποιείται από ένα εκτεταμένο αρδευτικό δίκτυο το οποίο καλύπτει μια έκταση της τάξης των 15.390 εκταρίων. Στη δυτική πλευρά του ποταμού που βρίσκεται στο Ν. Καβάλας υπάρχουν 8 αρδευτικά δίκτυα τα οποία καλύπτουν έκταση ίση με 12.290 εκτάρια, ενώ στην ανατολική πλευρά του ποταμού, στο Ν. Ξάνθης, ένα μικρότερο σε έκταση αρδευτικό δίκτυο καλύπτει έκταση ίση με 3.100 εκτάρια (Skoulikaris, 2008).

5.4 Χρήσης υδάτων της περιοχής

Βουλγαρία

Σύμφωνα με δεδομένα του 1998, η μέση κατανάλωση νερού για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης είναι 5,2 hm³ το χρόνο, εκ των οποίων το 56% προέρχεται από επιφανειακές πηγές υδάτων και το υπόλοιπο από υπόγειες πηγές.

Για τις αρδευτικές ανάγκες σε νερό, η άρδευση των 18.600 εκταρίων πραγματοποιείται με τον ελάχιστο όγκο νερού των 50 εκατ. κυβικών μέτρων το χρόνο. Στη λεκάνη του Μέστα υπάρχουν επίσης τρεις μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, Yakoquda, Razlog και Toplika, οι οποίοι παράγουν συνολικά 7,4 KWh. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι 378 hm³ το χρόνο εκτρέπονται από τη λεκάνη του Μέστα προς τη λεκάνη της Maritza μέσω ενός φράγματος, το φράγμα Dospat που έχει κατασκευαστεί στην δυτική πλευρά της λεκάνης του Μέστα (Skoulikaris, 2008)

Ελλάδα

Οι ανάγκες ύδρευσης των δήμων της περιοχής είναι περιορισμένες και καλύπτονται με τη χρήση υπόγειων καρστικών πηγών από το νότιο τμήμα του όρους Λεκάνης.

Στο Ελληνικό τμήμα ο μεγαλύτερη ποσότητα νερού καταναλώνεται για αρδεύσεις στην περιοχή του δέλτα (περίπου 345 hm^3 ετησίως), 255 hm^3 για τις ανάγκες της νομαρχίας Καβάλας και περίπου 90 hm^3 από την νομαρχία της Ξανθής. Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις στο δέλτα φτάνουν τα 37.000 ha (Skoulikaris, 2008). Καθώς η άρδευση αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή ανάπτυξης της περιοχής θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην υιοθέτηση πρακτικών που να εξασφαλίζουν την επάρκεια και την ποιότητα των νερών του Νέστου για άρδευση. Η βιομηχανική χρήση στην περιοχή είναι περιορισμένη και δεν φαίνεται να προκαλεί σημαντικά προβλήματα (Μυλοπουλος et al., 2003). Στην περιοχή υπάρχει και ένα σύστημα τριών υδροηλεκτρικών φραγμάτων και ενός αρδευτικού τα όποια παρουσιάζονται και αναλύονται λεπτομερώς στη συνέχεια.



Σχήμα 5.5: Το δέλτα του ποταμού Νέστου.

5.5 Διακρατική συμφωνία για τα δικαιώματα χρήσης των υδάτων

Για τα ύδατα του ποταμού Νέστου μία σειρά διαπραγματεύσεων ξεκίνησε το 1965 καταλήγοντας στη συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Βουλγαρίας, η οποία υπογράφηκε το 1995 (κυρώθηκε με το Ν. 2402/96, ΦΕΚ Α 98) και αποτελείται από 8 άρθρα. Σύμφωνα με αυτήν, η Βουλγαρία υποχρεούται να διοχετεύει το 29% της συνολικής παροχής στην Ελλάδα χωρίς όμως να καθορίζει την εποχιακή διακύμανση αυτής της παροχής. Τα κύρια σημεία της συμφωνίας είναι τα εξής:

- Η συμφωνία υποχρεώνει τη Βουλγαρία να αφήνει το 29% των υδάτων του Νέστου να εισέρχεται στο ελληνικό έδαφος. Καθορίζεται επίσης η μέση ετήσια απορροή βάση στοιχείων των ετών 1935-1970 σε 1.500.000.000 m³.
- Τα Συμβαλλόμενα Μέρη θα ανταλλάσσουν πληροφορίες και στοιχεία σχετικά με την κατάσταση των υδάτων.
- Σύσταση Μόνιμης Ελληνό-Βουλγαρικής Επιτροπής Υδροοικονομίας υπεύθυνη για την εφαρμογή της συμφωνίας και την επίλυση διαφορών.
- Οι Διεθνείς Συμβάσεις και οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα ληφθούν υπόψη για τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων.

Ενώ έχει υπογραφεί η σχετική συμφωνία του 1995, οι δύο χώρες συνεχίζουν να διαχειρίζονται το ποτάμι με διαφορετικές στρατηγικές και να παρατηρείται έντονη έλλειψη συνεργασίας. Η συμφωνία δεν εφαρμόζεται μέχρι σήμερα και συνεπώς δεν παρακολουθείται η τήρηση του συμφωνηθέντος 29% που οφείλει να παραχωρεί η Βουλγαρία στην Ελλάδα. Παρόλα αυτά εκτιμάται ότι η Ελλάδα λαμβάνει σήμερα περίπου το 70% της παροχής στα σύνορα, γεγονός που οφείλεται στην μικρή εκμετάλλευση των υδατικών πόρων από τη Βουλγαρία. Επίσης, δεν υπάρχει συνεργασία στην παρακολούθηση των ποιοτικών παραμέτρων και στη θέσπιση κοινών ορίων μόλυνσης. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γίνει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση όλων των περιβαλλοντικών, πολιτικών, κοινωνικών και τεχνικών πλευρών της διαχείρισης των υδατικών πόρων με στόχο τη διασφάλιση της ποιότητας του νερού και την προστασία του περιβάλλοντος.

Στο ενδεχόμενο επανέναρξης των διαπραγματεύσεων μεταξύ των δύο χωρών τότε θα πρέπει να αντιμετωπιστούν μία σειρά προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα:

- Αν η συμφωνία εφαρμοστεί και η παροχή μειωθεί στο 29% θα υπάρξει ανεπάρκεια της ποσότητας του νερού για την εύρυθμη λειτουργία των φραγμάτων, γεγονός που θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό και τις αρδεύσεις.
- Η ρύπανση που προέρχεται από τη Βουλγαρία θέτει σε κίνδυνο τις γεωργικές καλλιέργειες και τη διατήρηση των οικοσυστημάτων. Η έλλειψη ενός κοινού δικτύου ενημέρωσης και κοινοποίησης των περιστατικών ρύπανσης, ιδιαίτερα σε επείγουσες καταστάσεις, τοποθετεί την Ελλάδα σε δυσμενή θέση. Επίσης, ο μεγάλος πληθυσμός στο βουλγαρικό έδαφος σε σύγκριση με τον ελληνικό (140,000 και 41,000 αντίστοιχα) και η έλλειψη Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) αποτελεί βασικό παράγοντα ρύπανσης του ποταμού.

Η συμφωνία του 1995 περιέχει αρκετές ασάφειες και παραλείψεις ως προς την Οδηγία 2000/60. Θα ήταν ιδεατή μία αναθεώρηση της συμφωνίας και συμμόρφωση της με την Οδηγία που θα οδηγούσε στην ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης. Η σύναψη μίας νέας συμφωνίας για τη διαχείριση του Νέστου διακυβεύει αρκετές αβεβαιότητες ως προς το τελικό αποτέλεσμα. Αν η Ελλάδα ακολουθήσει αυτή την επιλογή ίσως να επιτύχει μία πιο βιώσιμη και εφαρμόσιμη συμφωνία, κυρίως για τον έλεγχο της ποιότητας, αλλά διακινδυνεύει να χάσει τη συμφωνημένη ποσοτική κατανομή των υδάτων. Αυτό θα μπορούσε να επιλυθεί με την προσφορά αποζημίωσης από την πλευρά της Ελλάδας για την παραχώρηση παροχής μεγαλύτερης από το συμφωνηθέν 29%. Η προοπτική ενός οικονομικού διακανονισμού θα ενδιέφερε και τις δύο χώρες καθώς η Βουλγαρία θα έβρισκε τους απαραίτητους πόρους για την κατασκευή σημαντικών έργων (όπως βιολογικοί καθαρισμοί) ενώ η Ελλάδα θα εξασφάλιζε τις απαραίτητες παροχές για την εύρυθμη λειτουργία των φραγμάτων (Ελευθεριάδου, 2005).

5.6 Η υδρολογία της περιοχής

Ο ποταμός Νέστος είναι διασυνοριακός ποταμός, που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η συνολική φυσική λεκάνη απορροής του ποταμού μέχρι τις εκβολές του είναι 6.219 km². Από την έκταση τα 2525 km² ανήκουν στην Ελλάδα. Η μέση παροχή είναι ίση με 39,6 m³/sec. Το υδρολογικό ισοζύγιο δίνεται στον πίνακα 5.1. Η φυσική απορροή του ποταμού Νέστου παρουσιάζει εποχιακές διακυμάνσεις. Οι μέγιστες παροχές παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα, (λόγω της τήξης του χιονιού, των αυξανόμενων βροχοπτώσεων) ενώ η ελάχιστη παροχή παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Οι παροχές κυμαίνεται από κάτω από 10 m³/s (κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και των χειμωνιάτικων μηνών των ξηρών ετών) στη μέγιστη παροχή των 1000 m³/s (κατά τη διάρκεια των πλημμυρών). Μετά την κατασκευή των φραγμάτων, το καθεστώς της απορροής του ποταμού κατάντη έχει αλλάξει και τώρα απλώς καθορίζεται από τη διαχείριση των ταμιευτήρων (Παρασκευόπουλος, 2001).

Πίνακας 5.1 Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο στη λεκάνη απορροής του Νέστου.

Περιοχή	Βροχόπτωση (hm ³)	Εξατμοδιαπνοή (hm ³)	Επιφανειακή απορροή (hm ³)	Κατείσδυση (hm ³)
Σύνορα Βουλγαρίας – Πτελέας Δαφνώνα	1299	610	615	78
Πτελέα Δαφνώνα, Τοξότες	360	187	100	72
Δέλτα	240	196	Αμελητέα	40

(*) συμπεριλαμβάνεται και η συνεισφορά 38 hm³ από τα υπόγεια νερά.

Στο ελληνικό τμήμα της λεκάνης, ο ποταμός Νέστος έχει δέκα επτά παραπόταμους, με τους επτά κυριότερους να παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Οι κύριοι παραπόταμοι του ποταμού Νέστου και η λεκάνες απορροής τους.

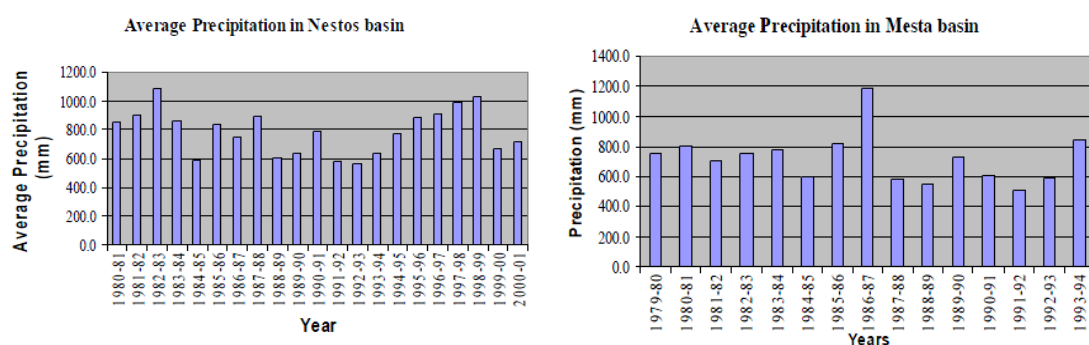
Ποτάμι	Λεκάνη απορροής (km ²)	Ποτάμι	Λεκάνη απορροής (km ²)
Διαβολόρεμα	356.4	Μηλόρεμα	93.1
Αρκουδόρεμα	283.3	Καστανιτούρεμα	60.9
Δεσπάτης	118.9	Ρέμα	45.7
Μαυρομάτιρεμα	46.8		

Αξίζει να σημειωθεί πως ο παραπόταμος Αρκουδόρεμα συμβάλει με τον Νέστο κατάντη του φράγματος του Τεμένους.

Σύμφωνα με στοιχεία της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) η μέση μηνιαία απορροή του ποταμού Νέστου για την περίοδο 1965-1990 ελάχιστες φορές ξεπέρασε τα 150 m³/s, ενώ αντιθέτως μετρήθηκε αρκετές φορές κάτω από 10 m³/s. Στις μέρες μας, η ποσότητα νερού που απορρέει στα κατάντη των φραγμάτων ρυθμίζεται ώστε να είναι μεγαλύτερη του ορίου των 6 m³/s τα οποία αποτελούν και την ελάχιστη περιβαλλοντική παροχή (Skoulikaris, 2008).

Στο βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι περίπου 810 mm/έτος. Ο Αύγουστος και ο Σεπτέμβρης αποτελούν τους δύο ξηρότερους μήνες κατά τους οποίους η βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 25 mm και 38 mm. Όσο αφορά τους παραπόταμους του ποταμού Μέστα που βρίσκονται στο βόρειο δυτικό τμήμα της λεκάνης, η μεγάλη συνεισφορά τους σε νερό οφείλεται στο γεγονός ότι επηρεάζονται από το κλίμα των ορεινών όγκων Rila και Pirin, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλης διάρκειας και έντασης βροχοπτώσεις καθώς και παρατεταμένες περιόδους χιονοκάλυψης.

Από την άλλη μεριά, στο ελληνικό τμήμα της λεκάνης η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι περίπου 790 mm/έτος. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των βροχερών ημερών ανά έτος υπολογίζεται στις 86,3 με τον Νοέμβρη, Δεκέμβρη και Ιανουάριο να είναι οι βροχερότεροι μήνες, ενώ η μέση ετήσια υγρασία κυμαίνεται από 70 ως 72 %. Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει τη μέση ετήσια βροχόπτωση και στα δύο μέρη της λεκάνης (Skoulikaris, 2008).



Σχήμα 5.6: Μέση ετήσια βροχόπτωση α) στο ελληνικό τμήμα της λεκάνης βάσει στοιχείων από το 1980 ως το 2001, β) στο βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης βάσει στοιχείων από το 1979 ως το 1994 (Skoulikaris, 2008).

5.7 Τα φράγματα στον ποταμό Νέστο

Το πρώτο φράγμα που κατασκευάστηκε στην περιοχή ήταν το φράγμα των Τοξοτών (1960-1966). Πρόκειται για ένα ρυθμιστικό αρδευτικό φράγμα μήκους 280 μέτρων (σχήμα 5.7) που βρίσκεται στο λαιμό του δέλτα και εκτρέπει τις ποσότητες των υδάτων προς την ανατολική (Ν. Ξάνθης) και δυτική (Ν. Καβάλας) όχθη του κύριου ρεύματος του ποταμού στα αντίστοιχα αρδευτικά δίκτυα. Η μελέτη σκοπιμότητας του φράγματος Τοξοτών πραγματοποιήθηκε από μια αμερικάνικη κατασκευαστική εταιρία, την Knappen-Tippetts-Abbott-McCarthy Engineering (ΥΔΕ, 1954).



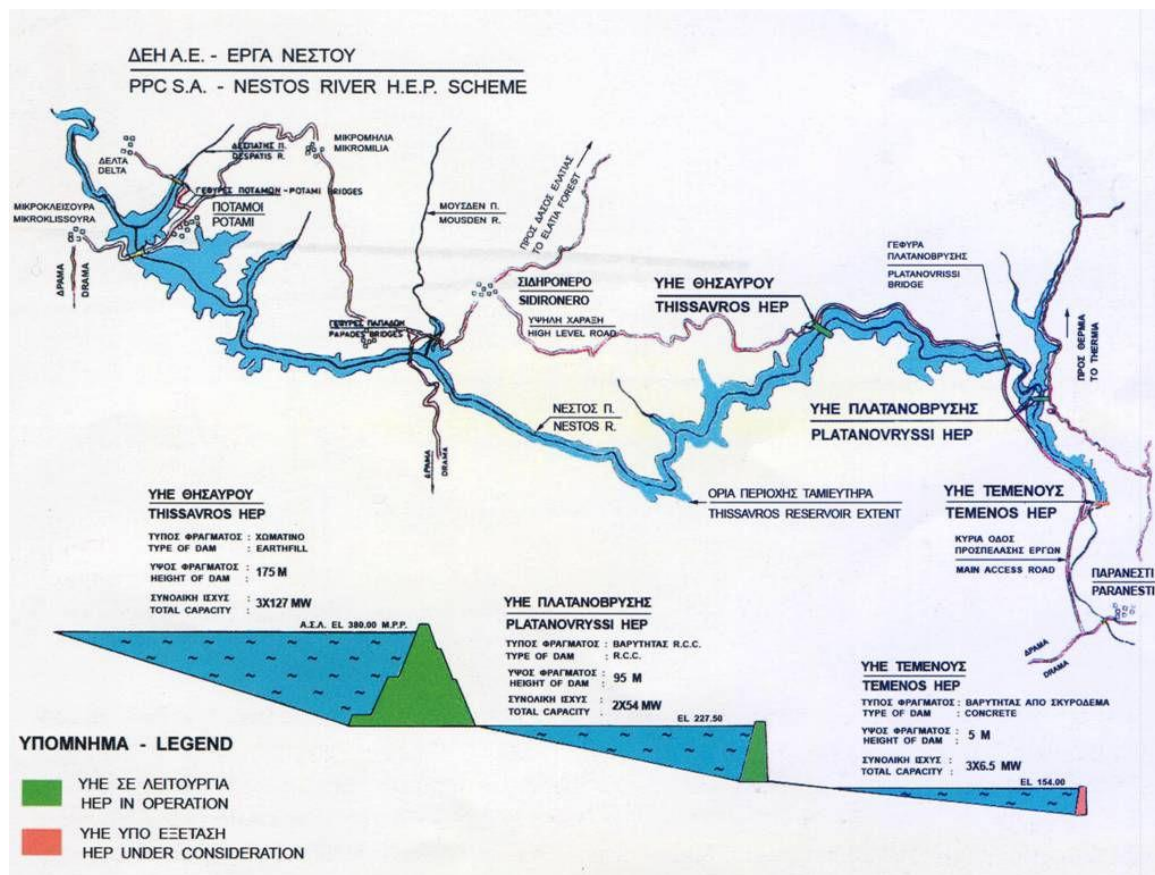
Σχήμα 5.7: Δυτικό κανάλι εκτροπής φράγματος Τοξοτών

Αργότερα για λογαριασμό της ΔΕΗ το 1971-1972 έγινε από μια ξένη εταιρία συμβούλων μηχανικών η μελέτη σκοπιμότητας για την κατασκευή τριών ανάντη φραγμάτων. Η κατασκευή του έργου ξεκίνησε δέκα χρόνια αργότερα, περίπου στα μέσα του 1980 βασιζόμενο σε ενδιάμεση συμφωνία με την Βουλγαρία για τις ελάχιστες εισερχόμενες ποσότητες υδάτων στην Ελλάδα (Το 1995 υπεγράφη συμφωνία για παροχή του 29% των συνολικών υδάτων του ποταμού). Το αρχικό σχέδιο προέβλεπε την κατασκευή τριών εν σειρά υδροηλεκτρικών σταθμών εκ των οποίων δυο πρώτοι θα ήταν αναστρέψιμοι. Οι σταθμοί αυτοί ήταν ο Θησαυρός (381 MW), η Πλατανόβρυση (116 MW) και ο σταθμός του Τεμένους (19 MW).

Τα έργα αυτά είναι έργα πολλαπλού σκοπού για την εξασφάλιση νερού για τις αρδεύσεις, υδρεύσεις οικισμών και βιομηχανικών περιοχών, καθώς και για την παραγωγή ενέργειας. Το ΥΗΕ Θησαυρού αποτελεί τον ταμιευτήρα κεφαλής του συγκροτήματος των έργων που εξασφαλίζει υπερετήσια και ετήσια ρύθμιση των απορροών του ποταμού. Το ΥΗΕ Πλατανόβρυσης αποτελεί την κατάντη του ΥΗΕ Θησαυρού βαθμίδα ανάπτυξης του Ποταμού Νέστου. Ο ταμιευτήρας του εξασφαλίζει τη δυνατότητα λειτουργίας των μονάδων του ΥΗΕ Θησαυρού, ως αντλητικών αποδίδοντας έτσι ενέργεια αιχμής. Το ΥΗΕ Τεμένους αποτελεί το έργο ημερήσιας αναρρύθμισης των απορροών των ανάντη έργων που λειτουργούν ως έργα αιχμής, για την εξυπηρέτηση των αναγκών των αρδεύσεων που απαιτούν συνεχή παροχή 24ώρου ή 18ώρου βάσεως, ακόμη και σε εποχές ξηρασίας. Οι υδροληψίες

των αρδεύσεων προβλέπονται στο υφιστάμενο φράγμα στην περιοχή Τοξότες.

Παρόλα αυτά δεν μπόρεσε να επιτευχθεί η κατασκευή του συνολικού έργου λόγω έλλειψης κεφαλαίων, με αποτέλεσμα να έχουν ολοκληρωθεί μέχρι στιγμής: το φράγμα του Θησαυρού (1996-1997) και το φράγμα της Πλατανόβρυσης (1998-1999).



Σχήμα 5.8: Απεικόνιση των τριών ΥΗΣ εν σειρά και των κύριων χαρακτηριστικών τους επί του ποταμού Νέστου (ΔΕΗ).

ΥΗΕ ΘΥΣΑΥΡΟΥ

Η θέση του έργου βρίσκεται σε 20 km ευθεία απόσταση βορειανατολικά της πόλης Δράμας και 22 km κατάντη της γέφυρας Παπάδων. Το ΥΗΕ Θησαυρού αποτελεί την πρώτη βαθμίδα ανάπτυξης του συγκροτήματος των έργων του ποταμού Νέστου.

Το έργο περιλαμβάνει φράγμα από λιθορριπή με στέψη στο υψόμετρο 390 m και ύψους 175 m και μήκους στη στέψη 480 m. Ο συνολικός όγκος του φράγματος είναι περίπου 10 hm³. Η σήραγγα εκτροπής με διάμετρο 11 m και μήκος 1600 m βρίσκεται στο δεξιό αντέρρισμα. Η σήραγγα εκτροπής συνδυάζεται με εκκενωτή πυθμένα. Ο εκχειλιστής, που περιλαμβάνει τρία τοξωτά θυροφράγματα και ανοικτή διώρυγα, βρίσκεται στο αριστερό αντέρρισμα και καταλήγει σε κατασκευή αναπήδησης.

Το συγκρότημα παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει υδροληψία τύπου κατακόρυφου φρέατος ύψους 100 m, σήραγγα προσαγωγής μήκους περίπου 550 m, φρέαρ θυροφραγμάτων και υπόγειο σταθμό με τρεις μονάδες Francis, αναστρέψιμες, ισχύος 127 MW εκάστη.

Ο προϋπολογισμός του έργου σε τιμές 1991 ανέρχεται σε 86 δισεκατομμύρια δραχμές (Τσιγκνάκος, 1994).



Σχήμα 5.9: Το φράγμα του Θησαυρού στον ποταμό Νέστο (Panoramio Photos, από Google Earth).

ΥΗΕ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ

Το έργο κατασκευάζεται σε απόσταση 12 km κατάντη του ΥΗ Έργου Θησαυρού. Στην περιοχή Πλατανόβρυσης ο ποταμός σχηματίζει μαϊάνδρο σε σχήμα πετάλου, συναντά τον παραπόταμο Διαβολόρεμα και στρέφεται προς τον Νότο μέσα σε στενό φαράγγι με απότομα πρηνή, προσφέροντας μοναδική θέση για την κατασκευή φράγματος.

Το έργο περιλαμβάνει φράγμα βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα με στέψη στο υψόμετρο 230,0 m, ύψους 95 m και μήκους στη στέψη 300 m. Στην σύνθεση του σκυροδέματος αυτού του τύπου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα ιπτάμενη τέφρα του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας ως "τέταρτο υλικό" σε υψηλά ποσοστά. Ο τύπος του φράγματος από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete - RCC) έχει σε μεγάλο βαθμό υποκαταστήσει διεθνώς την τελευταία 20ετία, όλες τις άλλες τεχνικές κατασκευής φραγμάτων από σκυρόδεμα λόγω του οικονομικότερου τρόπου διάστρωσης και της μεγάλης ταχύτητας κατασκευής. Η σήραγγα εκτροπής με διάμετρο 11/12 m και μήκους 485 m διανοίχθηκε στο δεξιό αντέρεισμα. Η σήραγγα εκτροπής συνδυάζεται με κεκλιμένη σήραγγα εκχειλιστή.

Ο ΥΗ Σταθμός τοποθετείται στην κοίτη του ποταμού αμέσως κατάντη του φράγματος και στεγάζει δύο μονάδες Francis, ισχύος 58 MW εκάστη. Στη στέψη του φράγματος τοποθετείται ανοικτός εκχειλιστής πέντε ανοιγμάτων, η κατασκευή αναπήδησης του οποίου είναι και οροφή του ΥΗ Σταθμού. Ο προϋπολογισμός του έργου σε τιμές 1991 ανέρχεται σε 224 δισεκατομμύρια δραχμές (Τσιγκνάκος, 1994).



Σχήμα 5.10: Το φράγμα της Πλατανόβρυσης (www.greekscapes.gr)

ΥΗΕ ΤΕΜΕΝΟΥΣ

Το ΥΗΕ Τεμένους αποτελεί την κατάντη βαθμίδα του συγκροτήματος των έργων του ποταμού Νέστου και απέχει 6 περίπου χιλιόμετρα από το ΥΗΕ Πλατανόβρυσης. Το έργο περιλαμβάνει φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα, ύψους 45 m και μήκους στη στέψη 100 m, με ενσωματωμένο ανοικτό εκχειλιστή πέντε ανοιγμάτων με θυροφράγματα και βοηθητικό ανοικτό εκχειλιστή χωρίς θυροφράγματα. Ο ΥΗ Σταθμός είναι υπαίθριος με τρεις μονάδες τύπου TUBULAR, μέγιστης ισχύος 6,3 MW εκάστη. Ο προϋπολογισμός του έργου με τιμές 1991 ανέρχεται σε 12,5 δισεκατομμύρια δραχμές.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε πως ο Νέστος έγινε ένα διαχειριζόμενο από τη ΔΕΗ σύστημα, το οποίο εξασφαλίζει:

- Αντιπλημμυρική προστασία
- Παράγωγή ενέργειας
- Αρδευτικό νερό για τις καλλιέργειες της Δελταϊκής πεδιάδας

Είναι όμως ταυτόχρονα και ένα ποτάμιο σύστημα το οποίο λειτουργεί με «ανθρώπινη λογική», στην όποια είναι υποχρεωμένες να προσαρμοστούν οι φυσικές ποτάμιες διεργασίες

6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

6.1 Γενικά για τη μεθοδολογία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναπτύσσεται πλήρως η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι το μοντέλο WEAP21 για την προσομοίωση του υδροσυστήματος και το Matlab για τη βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση του. Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας προγραμματισμού που επιτυγχάνει την αμφίδρομη συνεργασία των δυο προγραμμάτων, πράγμα που κάνει εφικτή τη χρήση των υπολογιστικών εργαλείων βελτιστοποίησης του MATLAB. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της μεθοδολογίας.

Αρχικά συγκεντρώθηκαν και επεξεργαστήκαν τα απαραίτητα δεδομένα υδρολογικά και μη, δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα Thiessen για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης. Έπειτα έγινε εισαγωγή των στοιχείων αυτών στο μοντέλο WEAP21 και με τη βοήθεια του MATLAB και συνδέσμου αμφίδρομης επικοινωνίας που αναπτύχθηκε η βαθμονόμηση του συστήματος. Επόμενο βήμα αποτέλεσε η εισαγωγή των τεχνικών έργων και των χαρακτηριστικών τους καθώς και των κόμβων ζήτησης της περιοχή. Τέλος ακλούθησε Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του συστήματος με τη βοήθεια του MATLAB έχοντας ως βασικά κριτήρια την παράγωγη ενέργειας και την κάλυψη των αναγκών σε νερό.

6.2 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

6.2.1 Δεδομένα βροχόπτωσης

Στο ελληνικό τμήμα της λεκάνης, τα στοιχεία βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν βασίζονται σε δεδομένα που ελήφθησαν από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, και πιο συγκεκριμένα από την διδακτορική διατριβή του Δρ. Σκουλικάρη Χαράλαμπου. Τα στοιχεία αφορούσαν μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης οι οποίες είχαν συγκεντρωθεί από διάφορες πηγές όπως τη ΔΕΗ, την ΕΜΥ κτλ.. Ύστερα από τη μελέτη των δεδομένων αποφασίστηκε να ληφθούν υπόψη τα στοιχεία οκτώ βροχομετρικών σταθμών (σχήμα 6.1) που κάλυπταν την περίοδο από 1 Αυγούστου 1991 ως 31 Ιουλίου 1995. Ένας σημαντικός λόγος που επιλέχθηκε αυτό το χρονικό διάστημα ήταν τα περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα από τους σταθμούς μέτρησης απορροής, που παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Οι βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

Πίνακας 6.1: Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν.

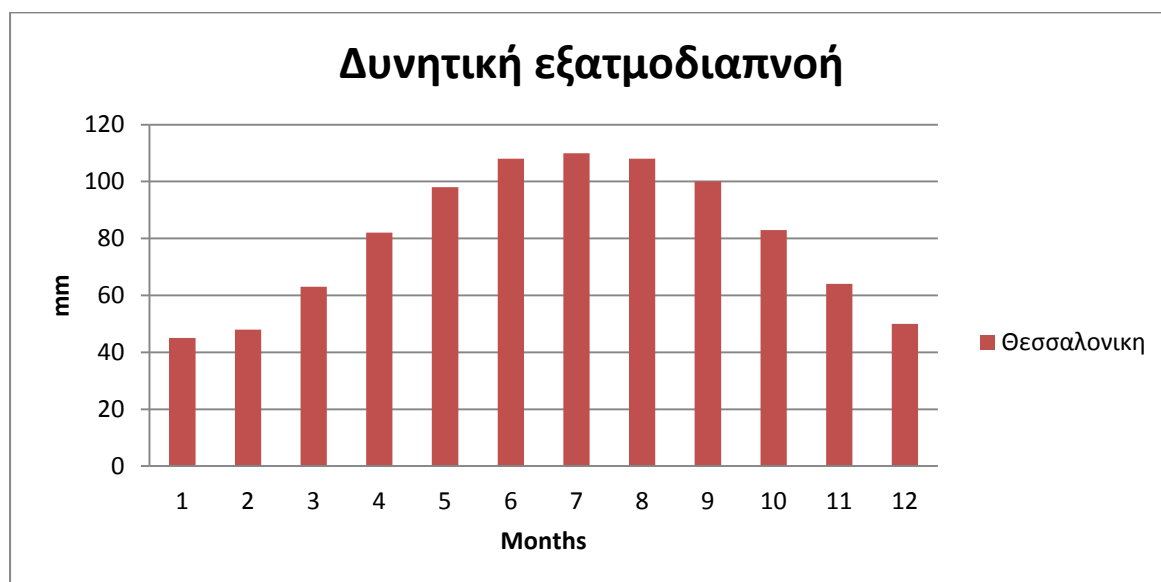
1- Αχλαδιά	5- Καρυόφυτο
2- Ποταμοί	6- Πτελέα
3- Σιδηρόνερο	7- Πρασινάδα
4- Μεσοχώρι	8-Κεχροκάμπος



Σχήμα 6.1: Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν.

6.2.2 Καθορισμός των παραμέτρων της εξατμοδιαπνοής

Ο καθορισμός της δυνητικής εξατμοδιαπνοή στη λεκάνη του Νέστου βασίστηκε στη χρήση μιας μοναδικής μέσης μηνιαίας τιμής που κάλυπτε το σύνολο της λεκάνης. Η εξατμοδιαπνοή του ελληνικού τμήματος της λεκάνης έγινε βάσει των στοιχείων της Θεσσαλονίκης (Skoulikaris, 2008). Τα δεδομένα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2.



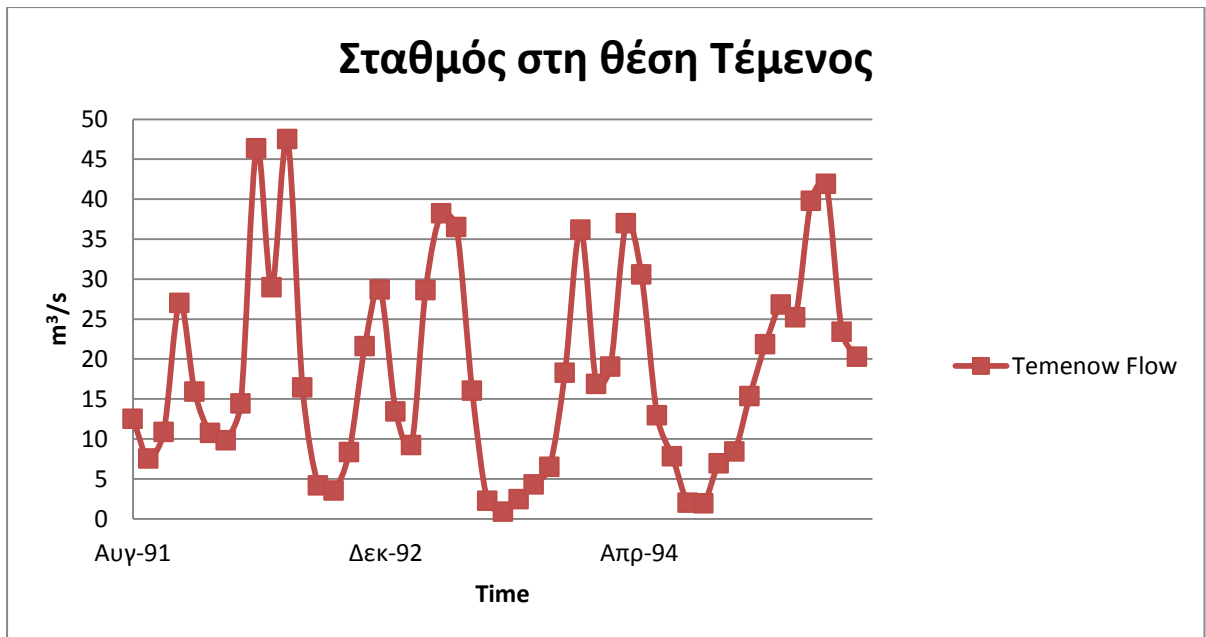
Σχήμα 6.2: Μέση μηνιαία εξατμοδιαπνοή Θεσσαλονίκης.

6.2.3 Διαθέσιμοι σταθμοί μέτρησης απορροής

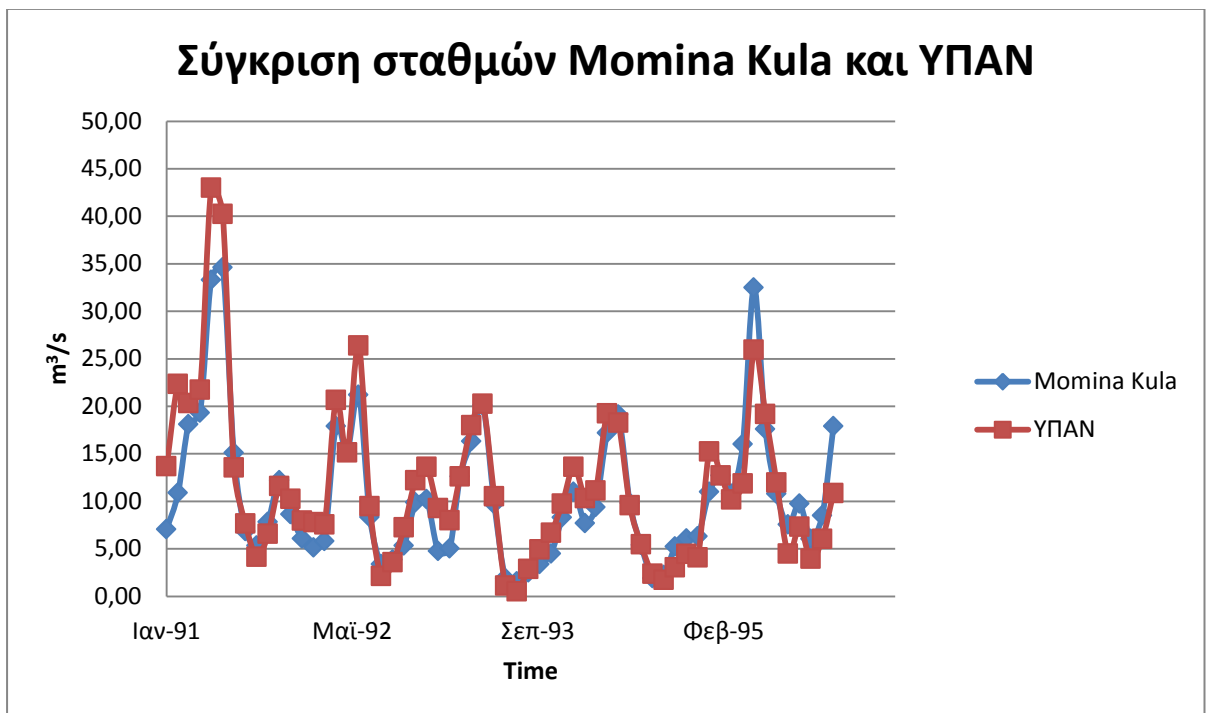
Για το Ελληνικό κομμάτι της περιοχής του Νέστου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία μόλις για έναν σταθμό μέτρησης απορροής, το σταθμό στην Θέση Τέμενος. Δεδομένα για το συγκεκριμένο σταθμό υπήρχαν διαθέσιμα για το διάστημα 1 Αυγούστου 1991 έως 31 Ιουλίου 1995. Αυτός ο παράγων καθόρισε και την επιλογή του διαστήματος μελέτης της περιοχής λόγω του ότι η βαθμονόμηση του συστήματος έγινε στη θέση Τέμενος. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η παρατηρημένη ροή στην θέση Τέμενος.

Επίσης έγινε χρήση του σταθμού Momina Kula της Βουλγαρίας για τον προσδιορισμό της απορροής που εισέρχεται στην Ελλάδα από τα σύνορα. Για την ασφαλή χρήση των δεδομένων του σταθμού αυτού έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα του ΥΠΑΝ για τη συνοριακή ροή. Στα σχήματα 6.4 γίνεται σύγκριση των δυο απορροών ενώ στο σχήμα 6.5 φαίνεται η υψηλή γραμμική συσχέτιση των δυο μεγεθών.

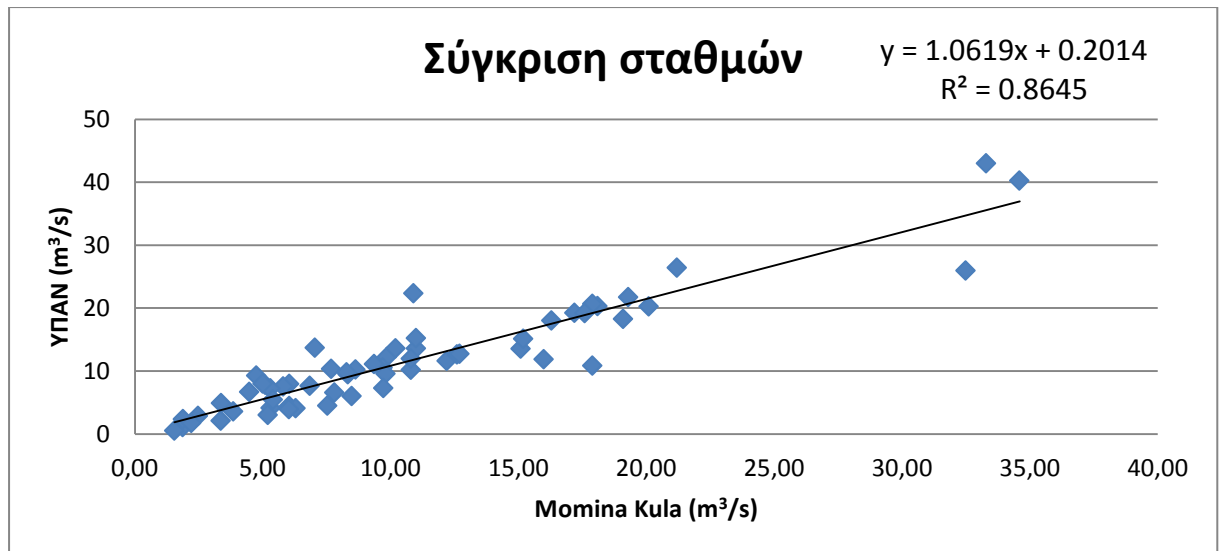
Οι Θέσεις των υδρομετρικών σταθμών Τέμενος και Momina Kula φαίνονται στο σχήμα 6.6.



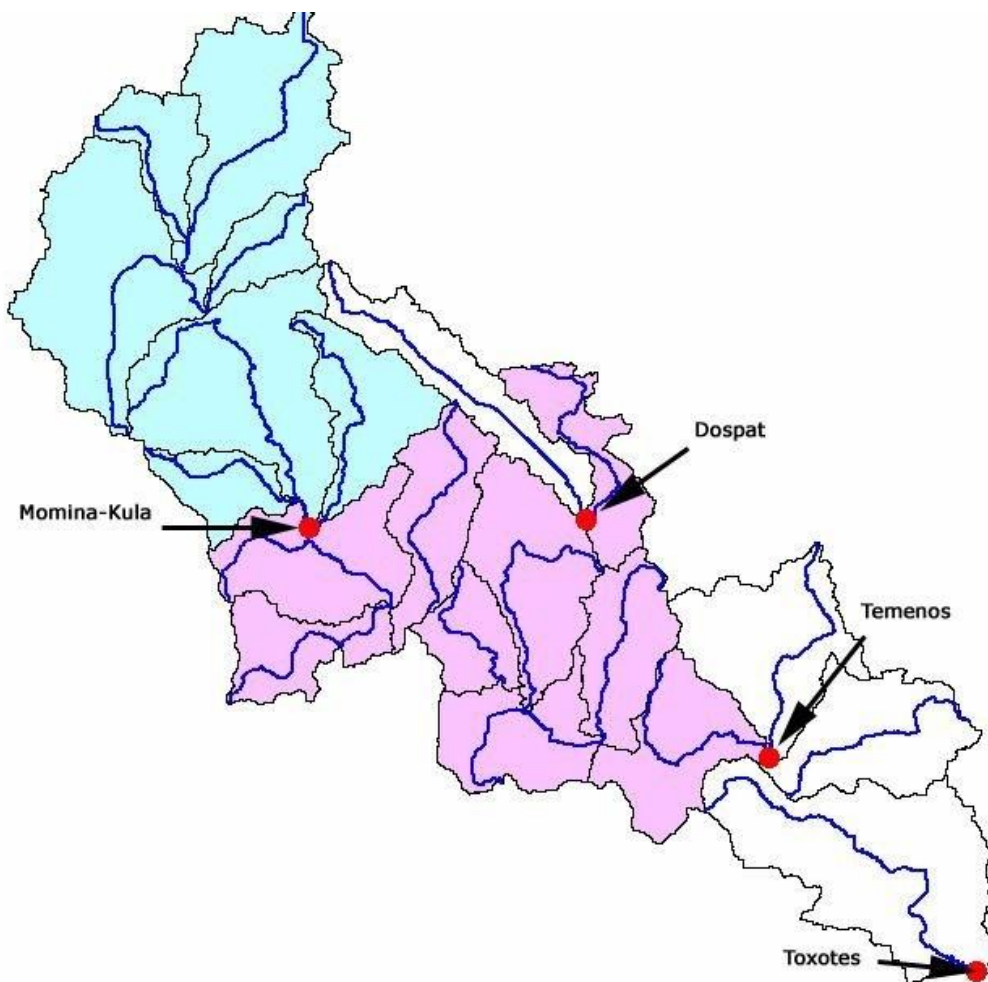
Σχήμα 6.3: Παρατηρημένη απορροή στην θέση Τέμενος.



Σχήμα 6.4: Συγκριτικό διάγραμμα των δυο απορροών.



Σχήμα 6.5: Οι δυο ροές παρουσιάζουν υψηλή γραμμική συσχέτιση με $R^2=0.85$.



Σχήμα 6.6: Θέσεις σταθμών μέτρησης απορροής (Skoulikaris, 2008).

6.3 Παράγωγή των πολυγώνων Thiessen

Για την χωρική κατανομή των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen και το πρόγραμμα ArcGis. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζονται τα πολύγωνα που δημιουργήθηκαν.

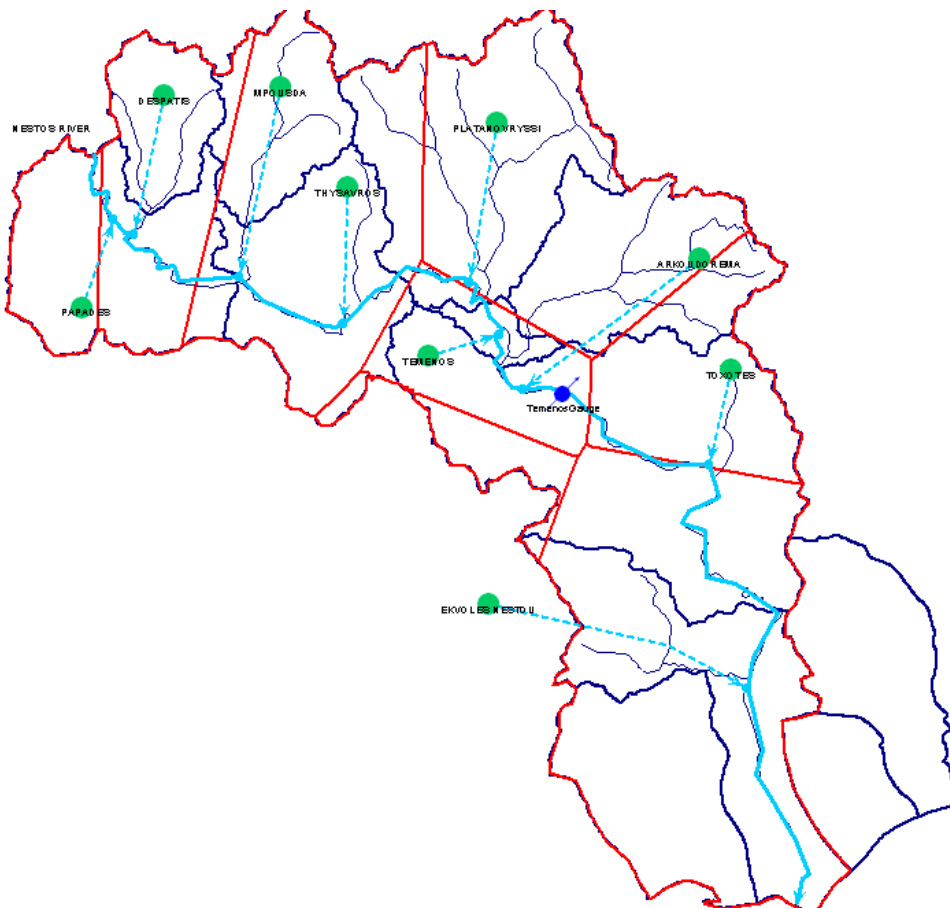


Σχήμα 6.7: Πολύγωνα Thiessen για την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης.

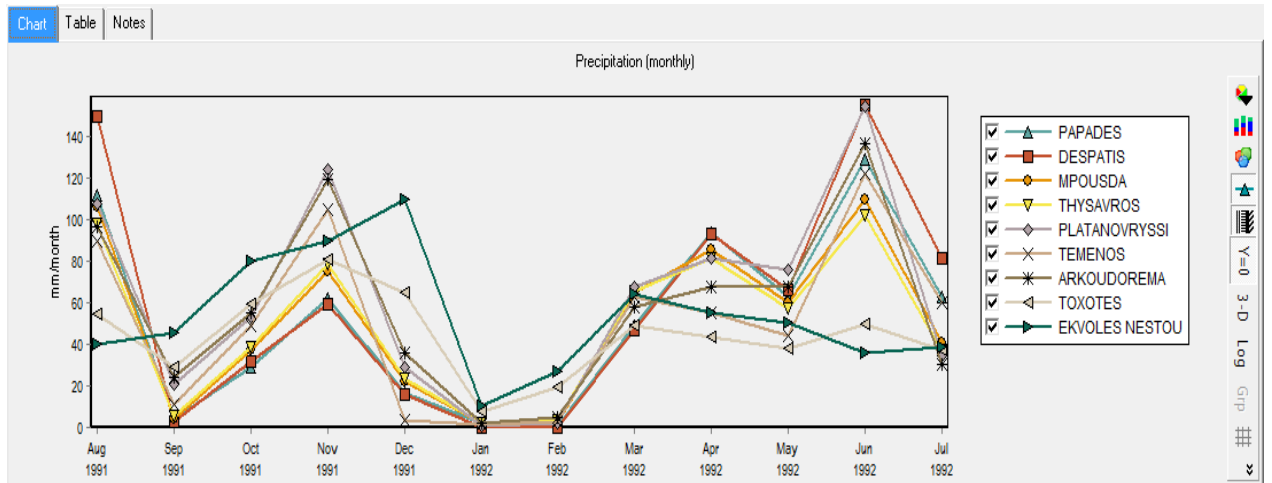
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χωρικής κατανομή των βροχοπτώσεων θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για την τροφοδοσία των λεκανών απορροής του μοντέλου WEAP21.

6.4 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων και σχήματοποίηση του υδροσυστήματος στο WEAP21

Σαν πρώτο βήμα έγινε εισαγωγή της λεκάνης του Νέστου η οποία είχε χωριστεί σε εννέα υπολεκάνες στις οποίες έγινε επιμερισμός των βροχοπτώσεων (σχήμα 6.9) που πρόεκυψαν από τα πολύγωνα Thiessen (σχήμα 6.8). Καθώς και τα διάφορα άλλα χαρακτηριστικά τους όπως η δυνητική εξατμοδιαπνοή όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα και τα εμβαδά των υπολεκανών. Σαν εισροή στα σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας ορίστηκε η απορροή από τον σταθμό Momina Kula. Επίσης τοποθετήθηκε η μετρημένη απορροή στην θέση Τέμενος, η οποία χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του συστήματος.



Σχήμα 6.8: Παρουσιάζονται τα όρια των υπολεκανών (μπλε γραμμή), ο συμβολισμός τους στο WEAP (πράσινος κύκλος), τα πολύγωνα Thiessen (κόκκινη γραμμή) καθώς και η μετρημένη απορροή στη θέση Τέμενος (μπλε κύκλος).



Σχήμα 6.9: Βροχοπτώσεις στις εννέα υπολεκάνες του υδροσυστήματος.

6.5 Βαθμονόμηση του υδροσυστήματος

6.5.1 Σύζευξη του WEAP21 και MATLAB μέσω COM-API για την βαθμονόμηση του υδροσυστήματος

Για της ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας προγραμματισμού σε περιβάλλον Matlab για την βαθμονόμηση του συστήματος. Ο κώδικας πετυχαίνει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των δυο προγραμμάτων. Οι βασικές αρχές του κώδικα περιγράφονται στη συνέχεια.

```

function [nash]=calibEP22(z)
1  byear=1991;
2  eyear=1995;
3  time=eyear-byear+1;
4  a1=zeros(time*12,3);
5  a2=zeros(time*12,3);
6  a3=zeros(time*12,3);
7  a4=zeros(time*12,3);
8  a5=zeros(time*12,3);
9  a6=zeros(time*12,3);
10

```

Command Window:

```

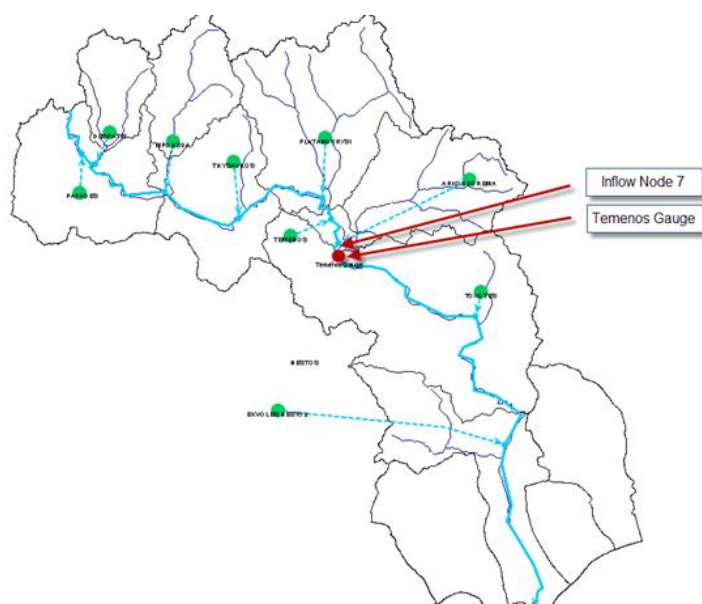
7960      8057      -0.875136      -0.827965      11.3157
7970      8067      -0.875136      -0.829812      11.3138
7980      8077      -0.875136      -0.811557      11.3119
7990      8087      -0.875136      -0.845278      11.3101
8000      8097      -0.875136      -0.817676      11.3082

```

Maximum number of iterations exceeded: increase options.MaxIter.

Σχήμα 6.10: Περιβάλλον προγραμματισμού Matlab

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η θέση όπου έγινε η βαθμονόμηση και η κλάδοι εκείνοι που συγκρίθηκαν.



Σχήμα 6.11: Θέση Βαθμονόμησης υδροσυστήματος.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση είναι οι συντελεστές καλλιέργειας (K_c) της κάθε υπολεκάνης (επτά σύνολο) που συμβάλει στην τροφοδότηση του υδρομετρικού σταθμού του Τεμένους και η ενεργή βροχόπτωση ($Effp$) εκφρασμένη επί τις εκατό για το σύνολο της λεκάνης άλλα με μηνιαία κατανομή, δηλαδή δώδεκα μεταβλητές. Πρέπει να σημειωθεί πως στο WEAP21 ως ποσοστό ενεργής βροχόπτωσης ορίζεται το ποσοστό της βροχής το οποίο υπόκειται σε εξατμοδιαπνοή (το υπόλοιπο είναι απευθείας απορροή) (Yates et al, 2005). Στον παρακάτω πίνακα 6.2 παρουσιάζονται συνοπτικά και οι δεκαεννέα μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν. Καθώς και οι περιορισμοί που τις διέπουν (πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.2: Μεταβλητές βαθμονόμησης.

Μεταβλητή	Λεκάνη εφαρμογής	Χρόνος
K_c1	Παπάδες	Τιμή σταθερή
K_c2	Δεσπάτης	Τιμή σταθερή
K_c3	Μπούσδα	Τιμή σταθερή
K_c4	Θησαυρός	Τιμή σταθερή
K_c5	Πλατανόβρυση	Τιμή σταθερή
K_c6	Τέμενος	Τιμή σταθερή
K_c7	Αρκουδορεμα	Τιμή σταθερή
$Effp$	Ολόκληρη η λεκάνη	Τιμή μεταβλητή ανά μήνα

Πίνακας 6.3: Περιορισμοί μεταβλητών.

Μεταβλητή	Κάτω όριο	Άνω όριο
Kc1 έως Kc7	0	1.3
Effp	0%	100%

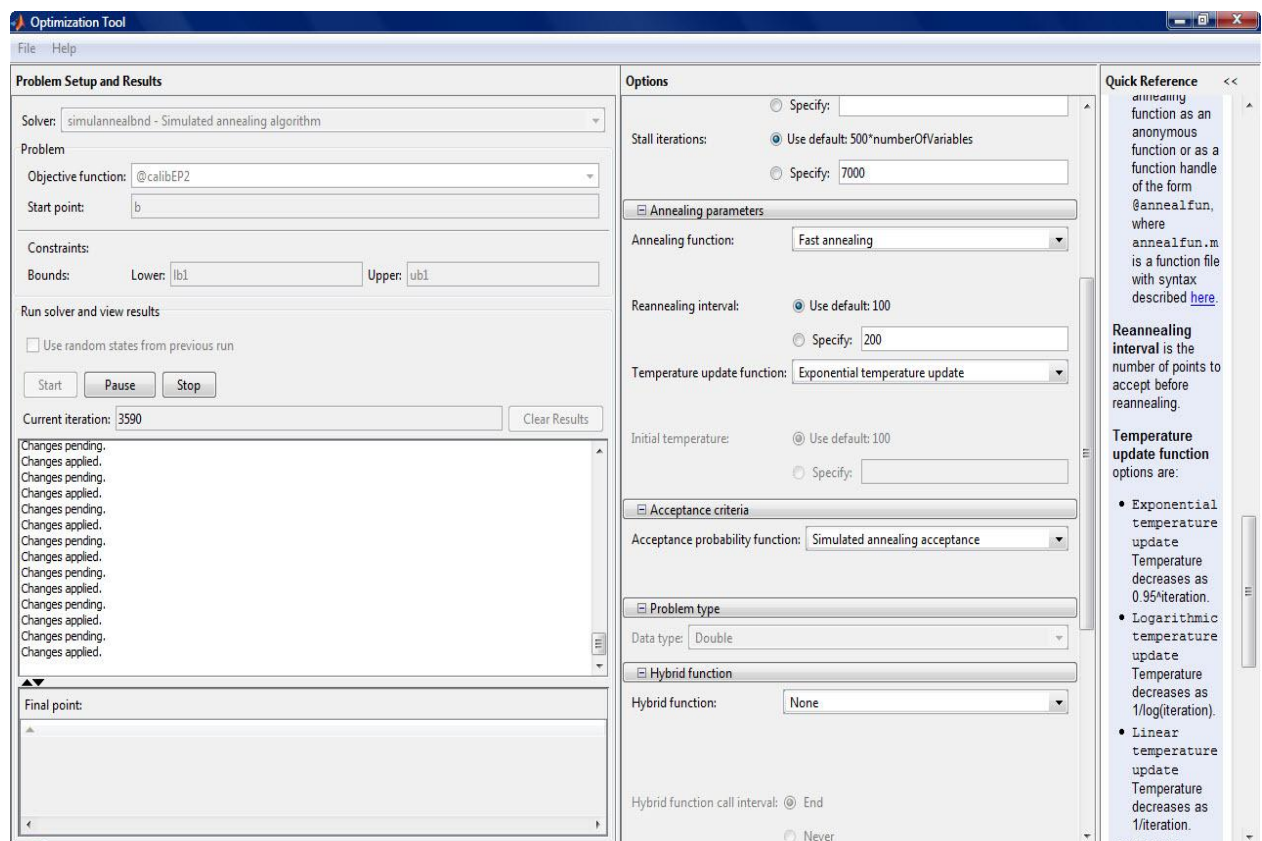
Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης απόκτησης του Global Optimization Toolbox του Matlab και η εξίσωση Nash-Sutcliffe (6.1) ως μέτρο επίδοσης (objective function).

$$E = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_o^{av})^2} \quad (6.1)$$

Όπου:

Q_o η παρατηρημένη απορροή στο σημείο

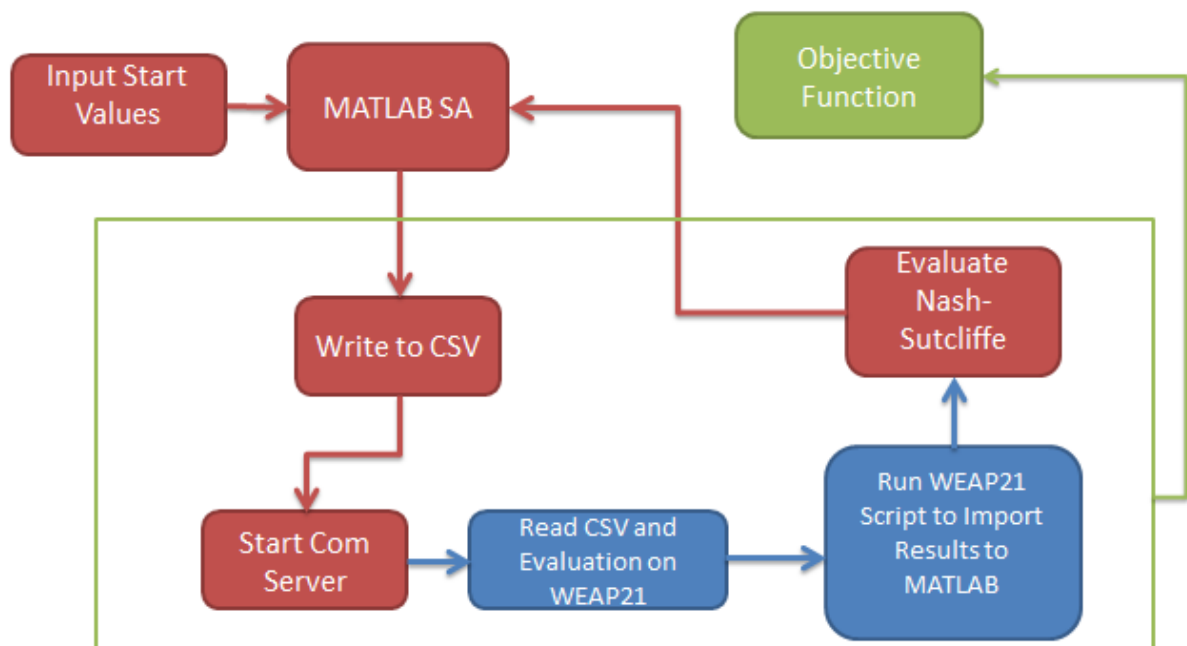
Q_m η απορροή που δημιουργήθηκε από το μοντέλο



Σχήμα 6.12: Περιβάλλον Global Optimization Toolbox του Matlab.

Με λίγα λόγια ο κύριος βρόχος της επαναληπτικής διαδικασίας ξεκινά με την μετατροπή των μεταβλητών σε αρχεία κατάλληλης μορφής αναγνώσιμης από το WEAP, γίνεται έναρξη της σύνδεσης με το WEAP μέσω COM-API, το μοντέλο διαβάζει τις μεταβλητές και υπολογίζει τα εξαγόμενα αποτελέσματα, στη συνέχεια εξάγονται τα αποτελέσματα στο Matlab όπου και υπολογίζεται η στοχική συνάρτηση.

Η συλλογιστική πορεία του κώδικα προγραμματισμού που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής (σχήμα 6.11).

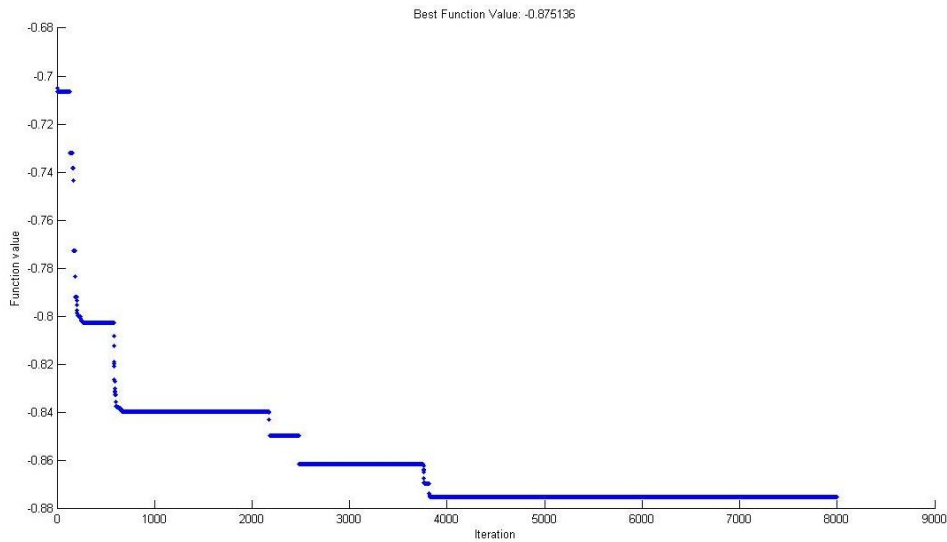


Σχήμα 6.13: Διάγραμμα ροής κώδικα προγραμματισμού για την βαθμονόμηση.

6.5.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

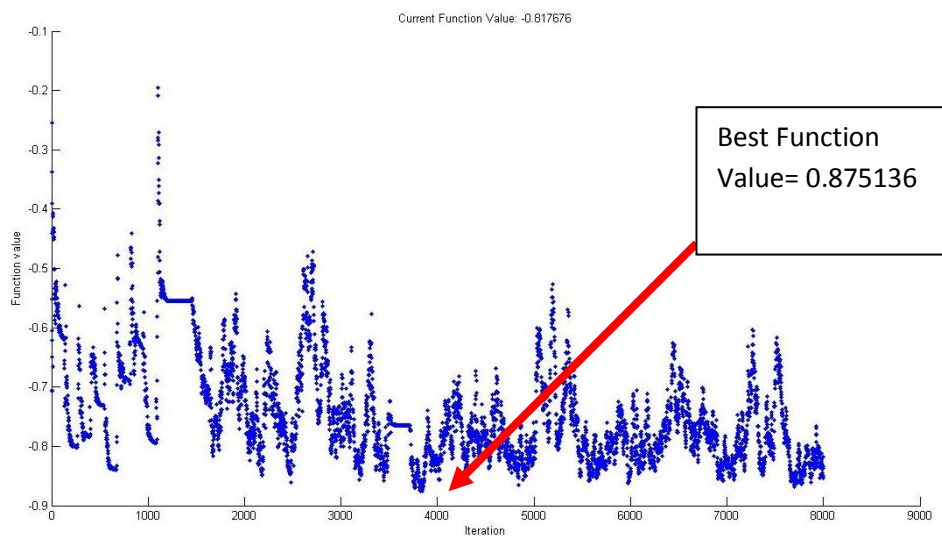
Αφού ορίστηκαν πλήρως όλες παράμετροι τις προσομοιωμένης ανόπτησης του Global Optimization Toolbox του Matlab και ορίστηκε ως μέγιστος αριθμός επαναλήψεων 8000 πρόεκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η διακύμανση της καλύτερης τιμής της συνάρτησης στόχου κατά την διάρκεια των επαναλήψεων. Παρατηρείται πως ο αλγόριθμος πετυχαίνει γρήγορα την ικανοποιητική τιμή για τον συντελεστή Nash-Sutcliffe 0.84 σχεδόν στην πεντακοσιοστή επανάληψη και στη συνέχεια βελτιώνεται αργά έως ότου καταλήξει στην τιμή 0.875136. Η οποία κρίνεται ικανοποιητική.



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα καλύτερης τιμής μέτρου επίδοσης συναρτήσε των επαναλήψεων, καλύτερη τιμη=0.875136.

Στο επόμενο σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η διακύμανση των αποτελεσμάτων για την συνάρτηση στόχου ενώ γίνονται εμφανείς οι «αυξήσεις θερμοκρασίας» που αποτελούν το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου της προσομοιωμένης απόπτωσης.



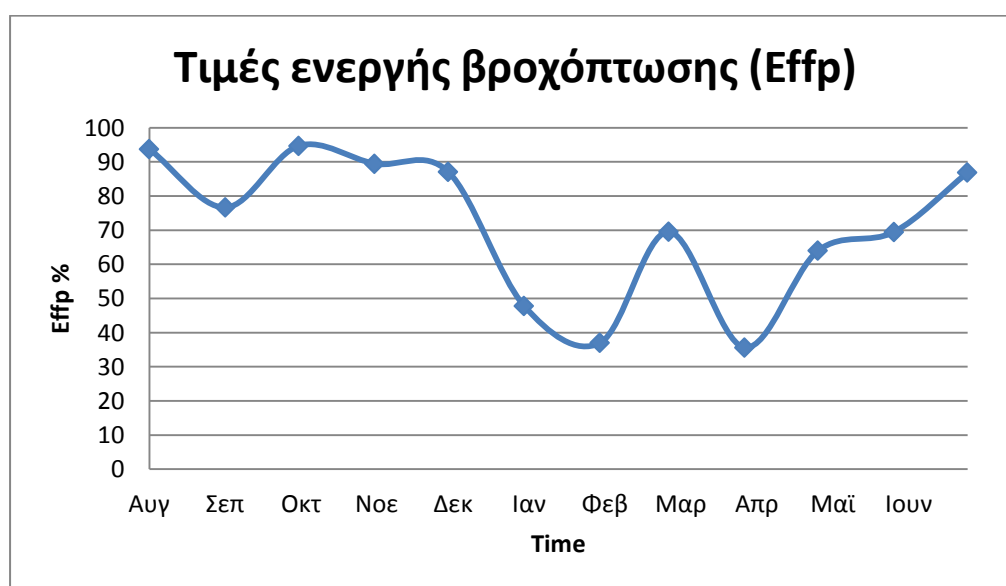
Σχήμα 6.15: Διακύμανση τιμών της συνάρτησης στόχου συναρτήσε των επαναλήψεων.

Τα αποτελέσματα των μεταβλητών βαθμονόμηση παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακα 6.4 ενώ στο σχήμα 6.16 γίνεται γραφική αναπαράσταση της μηνιαίας κατανομής της ενεργής βροχόπτωσης. Η μείωση του ποσοστού της ενεργής βροχόπτωσης (αύξηση απορροής) από τον Ιανουάριο έως τον Απρίλιο πιθανόν να οφείλεται στο λιώσιμο των χιονιών του Βουλγαρικού τμήματος και της τροφοδότησης της Ελληνικής λεκάνης απορροής.

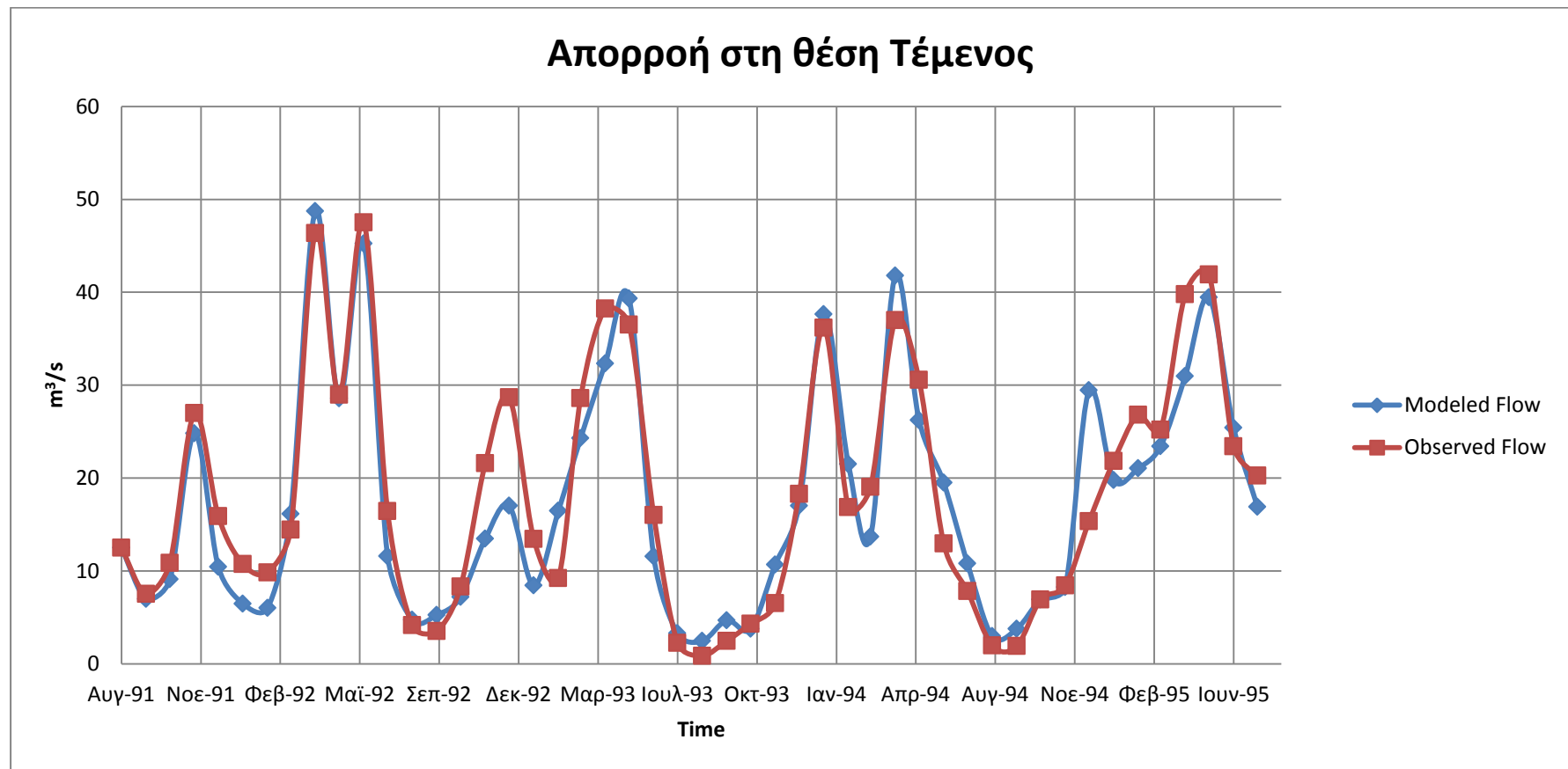
Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα μεταβλητών βαθμονόμησης

Μεταβλητή	Αποτέλεσμα
Kc1	1.28
Kc2	0.91
Kc3	1.27
Kc4	1.30
Kc5	1.27
Kc6	1.29
Kc7	1.26

Μεταβλητή Effp	Αποτέλεσμα (%)
Ιανουάριος	47.82
Φεβρουάριος	37.02
Μάρτιος	69.52
Απρίλιος	35.65
Μάιος	63.98
Ιούνιος	69.49
Ιούλιος	86.84
Αύγουστος	93.73
Σεπτέμβριος	76.63
Οκτώβριος	94.71
Νοέμβριος	89.46
Δεκέμβριος	87.07



Σχήμα 6.16: Διακύμανση τιμών ενεργής βροχόπτωσης.



Σχήμα 6.17: Σύγκριση υπολογισμένης και μετρημένης απορροής στη θέση Τέμενος(Συντελεστής Nash-Sutcliffe=0.8751).

6.6 Βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος του Νέστου

6.6.1 Εισαγωγή τεχνικών έργων και κόμβων ζήτησης στο WEAP21

Σε αυτή την φάση του μοντέλου WEAP21, μετά τον σχεδιασμό των τμημάτων του ποταμού, τη χάραξη των σημείων εισροής και τη Βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται η τοποθέτηση των φραγμάτων στο χώρο, ο σχεδιασμός των αρδευτικών καναλιών, των κόμβων ζήτησης, καθώς και ο καθορισμός των τεχνικών παραμέτρων των φραγμάτων. Οι τεχνικές παράμετροι είναι οι εξής: τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων, η παραγωγικότητα της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης και ο καθορισμός των διαφόρων περιορισμών στη διαχείριση του σταθμού.

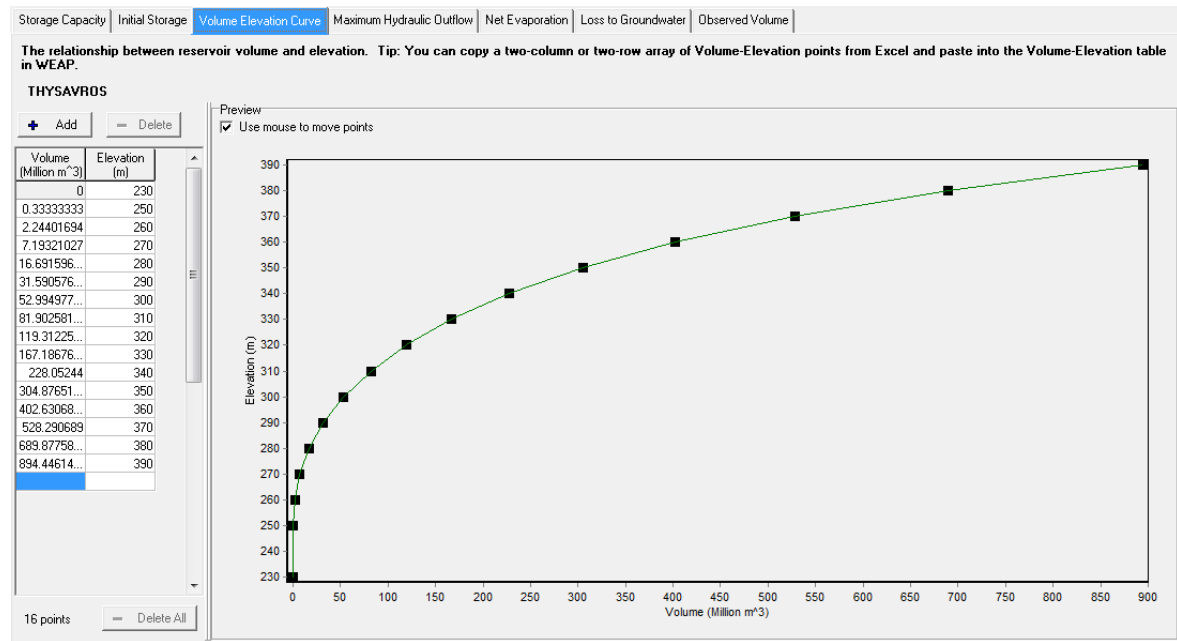
Οι φυσικές παράμετροι και οι παράμετροι λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση των ΥΗΣ βασίζονται σε δεδομένα τα οποία έχουν δημοσιευτεί από τη ΔΕΗ και από τη διδακτορική διατριβή του Χ. Σκουλικάρη, αφορούν τόσο τα υφιστάμενα φράγματα του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης όσο και το μελλοντικό φράγμα του Τεμένους (Πίνακας 6.5).

Πίνακας 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά παράγωγης ενέργειας ΥΗΕ.

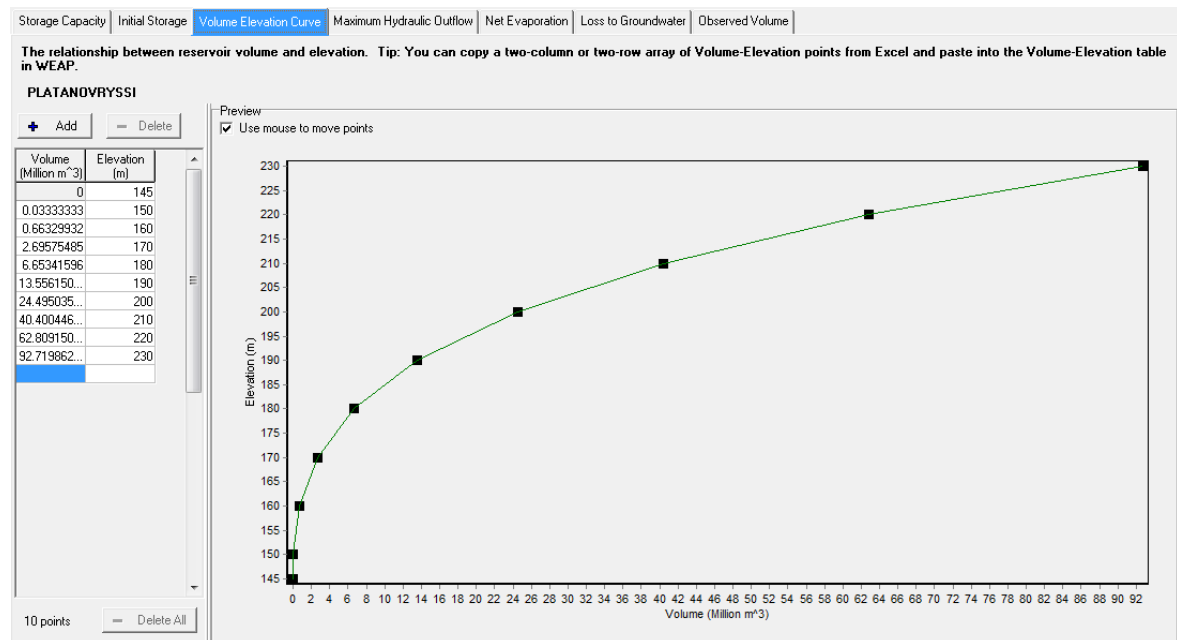
Παράμετρος	Θησαυρός	Πλατανόβρυση	Τέμενος
Λεκάνη απορροής πλημμυρών (km ²)	4263	4655	4666
Λεκάνη απορροής απορροών	3698	4090	4101
Μέση παροχή (1964-65/1982-83) (m ³ /sec)	38.84	43.14	45.22
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (ΑΣΛ) (m)	380	227.7	154
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	320	223.5	147
Όγκος στη ΑΣΛ hm ³	690.0	85.2	11.3
Ωφέλιμος όγκος 10 ⁶ hm ³	570	12	6
Στάθμη διώρυγας Φυγής (m)	226	151	127
Ύψος σημείου υδροληψίας (m)	309	190	138
Ύψος υπερχειλιστή (m)	385.82	229.95	159.5
Τύπος Φράγματος	Λιθόρριπτο με αδιαπέρατο πυρήνα	Βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC)	Βαρύτητας από σκυρόδεμα
Υψόμετρο στέψης φράγματος (m)	390	230	160
Ύψος φράγματος από τη θεμελίωση (m)	175	95	45

Αριθμός μονάδων	3	2	3
Συνολική ισχύς (MW)	381	116	19.5
Βαθμος αποδοσης	0.85	0.88	0.85

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά και των καμπύλων στάθμης-όγκου για τους σταθμούς Θησαυρού και Πλατανόβρυσης (σχ.6.18 και 6.19).



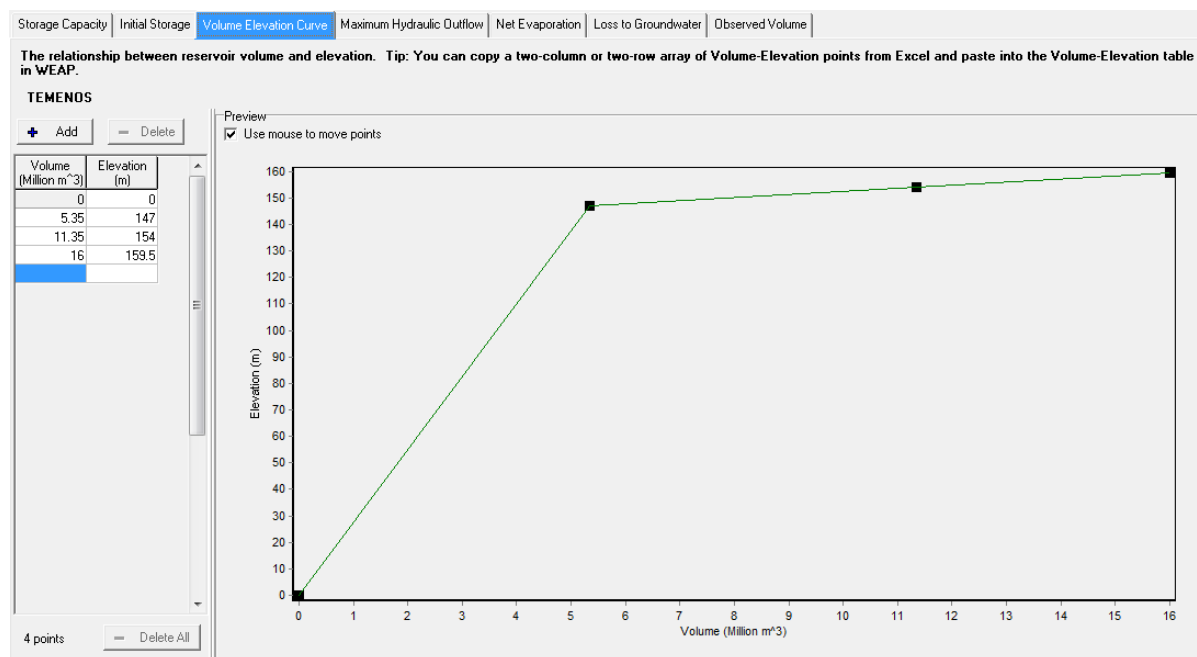
Σχήμα 6.18: Καμπύλη στάθμης-όγκου Θησαυρού (N. Μουτάφης).



Σχήμα 6.19: Καμπύλη στάθμης-όγκου Πλατανόβρυσης (N. Μουτάφης).

Όσον αφορά την καμπύλη στάθμης-όγκου του Τεμένου δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα, οπότε έπρεπε να κατασκευαστεί προσεγγιστικά με βάση

τα δεδομένα του πίνακα 6.5. Η καμπύλη στάθμης-όγκου του Τεμένους φαίνεται στο σχήμα 6.20

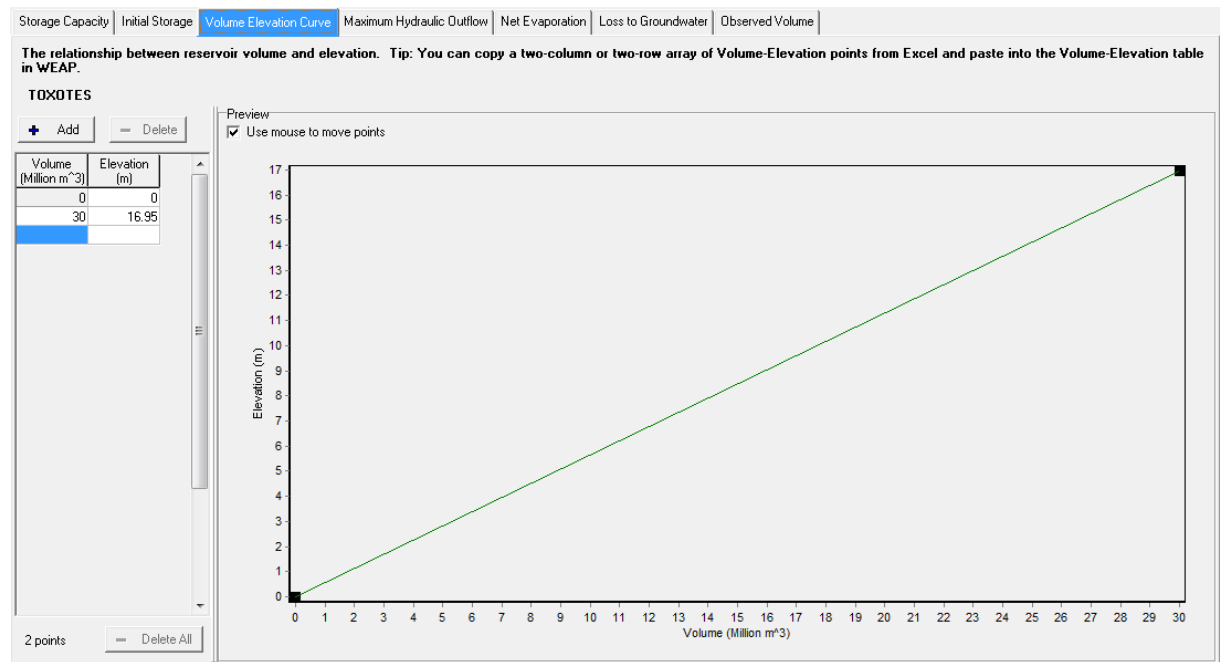


Σχήμα 6.20: Καμπύλη στάθμης-όγκου Τεμένους.

Το φράγμα των Τοξοτών το οποίο βρίσκεται στην αρχή του δέλτα του ποταμού Νέστου, αποτελείται από ένα ανάχωμα υπερχειλίσσης και δυο κανάλια εκτροπής των υδάτων. Σκοπός του φράγματος είναι η ρύθμιση των νερών που προορίζονται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, καθώς και για τη διατήρηση της απορροής στο κύριο ρεύμα του ποταμού. Τα χαρακτηριστικά του φράγματος συνοψίζονται τον παρακάτω πίνακα 6.6. Δυστυχώς ούτε σε αυτή την περίπτωση ήταν διαθέσιμη η καμπύλη στάθμης-όγκου και έτσι κατασκευάστηκε με παρόμοιο τρόπο όπως του Τεμένους (Σχήμα 6.21).

Πίνακας 6.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος Τοξοτών

Παράμετρος	Τοξότες
Χωρητικότητα (hm ³)	30
Μεγίστη στάθμη του ταμιευτήρα (m)	16.95
Μέγιστη παροχευτικότητα υπερχειλιστή m ³ /s	2200



Σχήμα 6.21: Καμπύλη στάθμης-όγκου Τοξοτών.

Για την διατήρηση της καλής κατάστασης του περιβάλλοντος, από την αρχική γέννηση της ιδέας κατασκευής των φραγμάτων του Νέστου είχε εκτιμηθεί πως μια ελάχιστη περιβαλλοντική παροχή της τάξης των $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ είναι αναγκαία να φτάνει στις εκβολές του ποταμού για την προστασία του οικοσυστήματος. Όσον αφορά τις απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, η Νομαρχία Καβάλας δημοσιεύει ανά τακτά χρονικά διαστήματα τις εκτιμώμενες αναγκαίες ποσότητες νερού για την κάλυψη των υφισταμένων αρδευτικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εκτάσεων του δέλτα του Νέστου που υπάγονται στο Νομό Καβάλας, καθώς επίσης και τα αρδευτικά δίκτυα που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του δέλτα στο Νομός Ξάνθης. Για τη ρύθμιση του μοντέλου WEAP21 χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που δημοσιεύτηκαν για το έτος 2000 (Πίνακας 6.7). Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία στα δεδομένα αυτά, είναι ότι οι μέγιστες απαιτήσεις σε νερό παρουσιάζονται τον Αύγουστο, μήνας κατά τον οποίο η απορροή του ποταμού Νέστου είναι η ελάχιστη δυνατή (Skoulikaris, 2008).

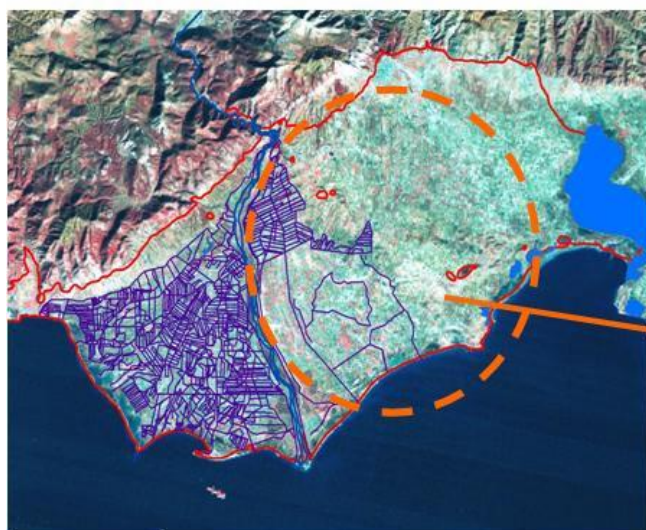
Πίνακας 6.7: Απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των υφισταμένων αρδευτικών αναγκών στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου (Νομαρχία Καβάλας, 2000).

Μήνας	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος
Απαιτούμενες ποσότητες νερού (m^3/s)	11.5	15.7	18.5	20.9	20.0	13.0

Από την άλλη μεριά, οι μελλοντικές απαιτήσεις σε νερό θα είναι αυξημένες αφού θα πρέπει να καλύπτουν τις αρδευτικές ανάγκες των υφισταμένων δικτύων καθώς και της πεδιάδας της Ξάνθης. Επομένως, οι μελλοντικές απαιτήσεις σε νερό υπολογίστηκαν βάσει ενός συντελεστή που είναι ίσος με το ποσοστό μεταξύ των υφισταμένων αρδευτικών εκτάσεων και των μελλοντικών (Πίνακας 6.8). Περισσότερες πληροφορίες για τον υπολογισμό αυτό παραθέτονται στη διδακτορική διατριβή του Χ. Σκουλικάρη.

Πίνακας 6.8: Εκτιμώμενες απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των μελλοντικών αρδευτικών αναγκών της πεδιάδας της Ξάνθης. (Skoulikaris, 2008).

Μήνας	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος
Μελλοντικές ποσότητες νερού (m ³ /s)	5.7	7.8	9.2	10.4	10.0	6.5



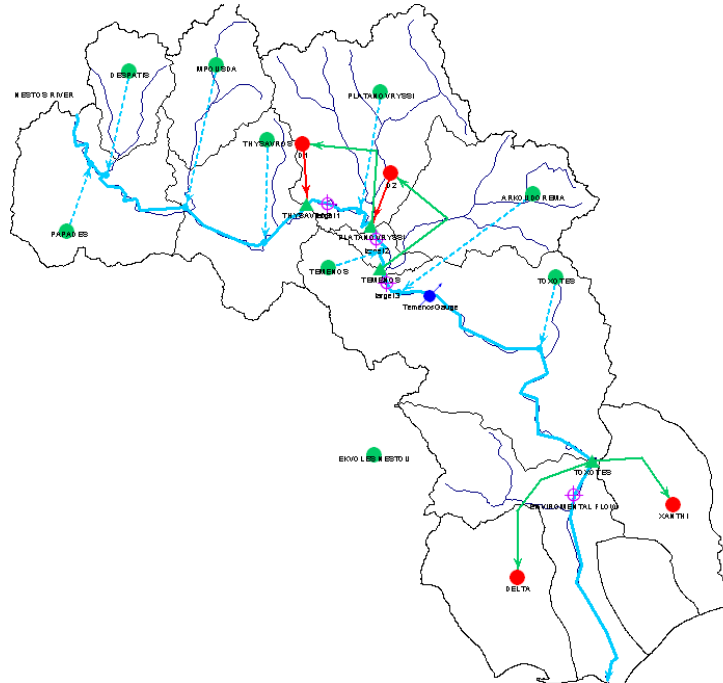
α) Το υπάρχον αρδευτικό δίκτυο του Δέλτα του Νέστου.



β) Μελλοντική εκτροπή νερού για την άρδευση της πεδιάδας της Ξάνθης.

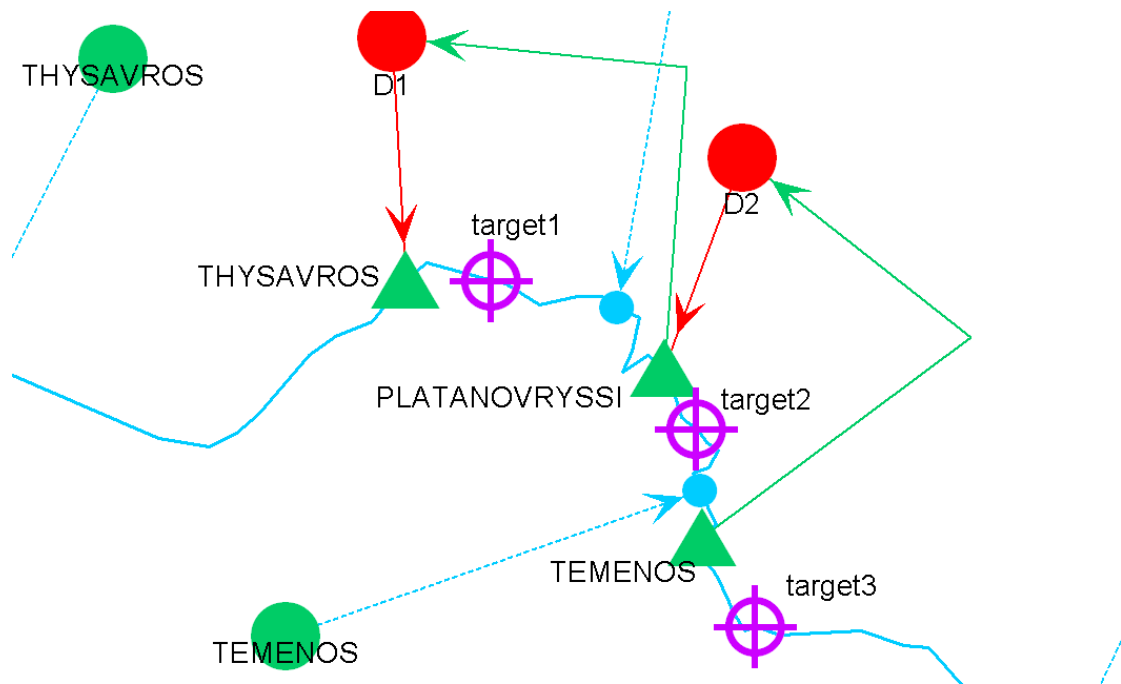
Σχήμα 6.22: Γεωργική ανάπτυξη στο δέλτα του Νέστου και στην πεδιάδα της Ξάνθης.

Στο επόμενο σχήμα 6.23 απεικονίζεται στο περιβάλλον του μοντέλου WEAP21 το ολοκληρωμένο σύστημα του ποταμού Νέστου βάση αυτών που περιγράφησαν παραπάνω.



Σχήμα 6.23: Το υδrosύστημα του Νέστου στο WEAP21.

Για την ανάγκη της προσομοίωσης της ανάστροφης λειτουργίας των ΥΗΕ Θησαυρού και Πλατανόβρυσης αναπτύχθηκε η εξής μεθοδολογία: Τα φράγματα Πλατανόβρυση και Τέμενος έχουν συνδεθεί τεχνητά 2 ψευδείς κόμβους ζήτησης D1 και D2 (Σχήμα 6.24). Στόχος ήταν το νερό να μην περνά από τον στρόβιλο και ο μόνος τρόπος για να προσομοιωθεί κάτι τέτοιο στο WEAP ήταν με τη χρήση αγωγών μεταφοράς νερού απευθείας μέσα από το φράγμα. Στο σχήμα 6.24 απεικονίζονται και οι στόχοι target1 έως target3 οι οποίοι αποτελούν μεταβλητές βελτιστοποίησης και θα επεξηγηθούν στην συνέχεια.



Σχήμα 6.24: Σχηματική λεπτομέρεια προσομοίωσης συστήματος αναστροφής λειτουργίας.

6.6.2 Περιορισμοί που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο WEAP21

Για τον υπολογισμό των μέγιστων ποσοτήτων που μπορούν να παροχετευτούν ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία όπου για λόγους ταχύτητας παρουσιάζεται μόνον η περίπτωση του φράγματος του Θησαυρού. Θεωρήθηκε πως τα ΥΗΕ λειτουργούν 18 ώρες την ημέρα ως υδροστρόβιλοι (παραγωγή ενέργειας) και 6 ώρες ως αντλίες (κατανάλωση). Οι τιμές που πρόεκυψαν από τους παρακάτω υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ως μέγιστες παροχετευτικές ποσότητες και έχουν τον ρόλο φυσικού περιορισμού. Στο σχήμα 6.25 παρουσιάζονται συνοπτικά οι περιορισμοί.

Γενικά ισχύει:

Λειτουργία υδροστρόβιλου

$$P = \rho * g * Q * h * n \quad (6.2)$$

Λειτουργία αντλίας

$$P = \rho * g * Q * h/n \quad (6.3)$$

Όπου:

P: Ισχύς σε Watt

g: Επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2

n: Βαθμός απόδοσης της αντλίας ή του υδροστρόβιλου

Q: Παροχή σε m^3/s

ρ : Πυκνότητα του νερού σε Kg/m^3

h: Ύψος σε m

Χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα του Θησαυρού: $P_{max}=380MW$,
 $H_{max}=154m$, $\eta_{υδρ}=85\%$, $\eta_{αντ}=70\%$

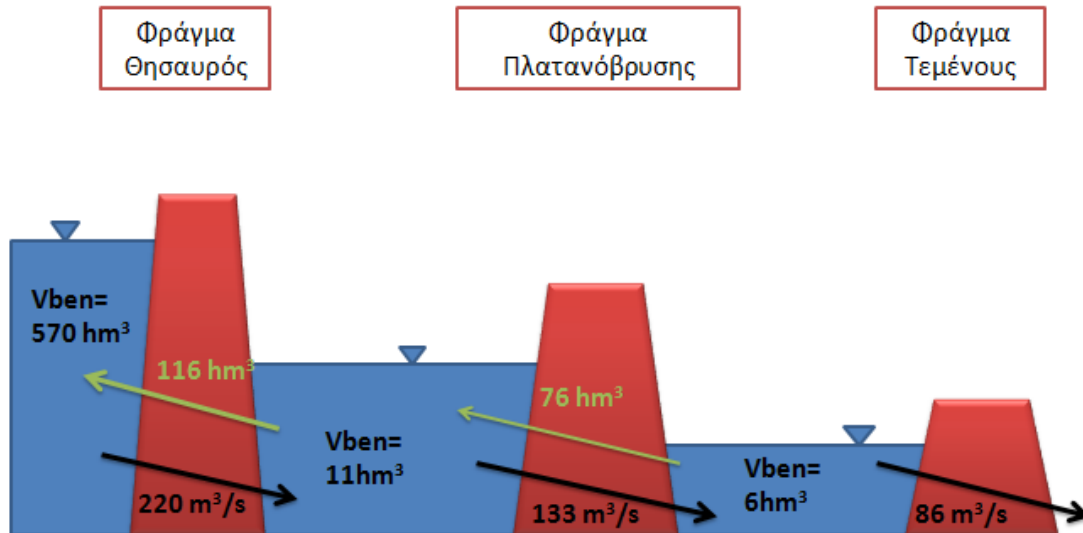
Λειτουργία υδροστρόβιλου:

Λύνοντας την 6.2 ως προς Q υπολογίζεται για δεδομένο P_{max} και H_{max} προκύπτει $Q=292 m^3/s$ άλλα επειδή το εργοστάσιο λειτουργεί 18 ώρες την ημέρα το Q πολλαπλασιάζεται με 18/24 και προκύπτει μέγιστη ποσότητα παροχетеυμένη από τον στρόβιλο σε ένα μήνα $Q=220 m^3/s$

Λειτουργία αντλίας:

Λύνοντας την 6.3 ως προς Q υπολογίζεται για δεδομένο P_{max} και H_{max} προκύπτει $V=458 hm^3$ άλλα επειδή το εργοστάσιο λειτουργεί 6 ώρες την ημέρα το V πολλαπλασιάζεται με 6/24 και προκύπτει μέγιστη ποσότητα παροχетеυόμενη από την αντλία $V=116 hm^3$. Έτσι ο αγωγός που μεταφέρει νερό από το φράγμα της Πλατανόβρυσης στο φράγμα του Θησαυρού έχει μέγιστη παροχетеυτική ικανότητα ίση με $116 hm^3$ το μήνα.

Στο σχήμα 6.25 παρουσιάζονται σχηματικά οι μέγιστες ποσοτήτων που μπορούν να παροχетеυτούν και για τα τρία ΥΗΕ.



Σχήμα 6.25: Σχηματική απεικόνιση των περιορισμών μεταβλητών βελτιστοποίησης υδροσυστήματος.

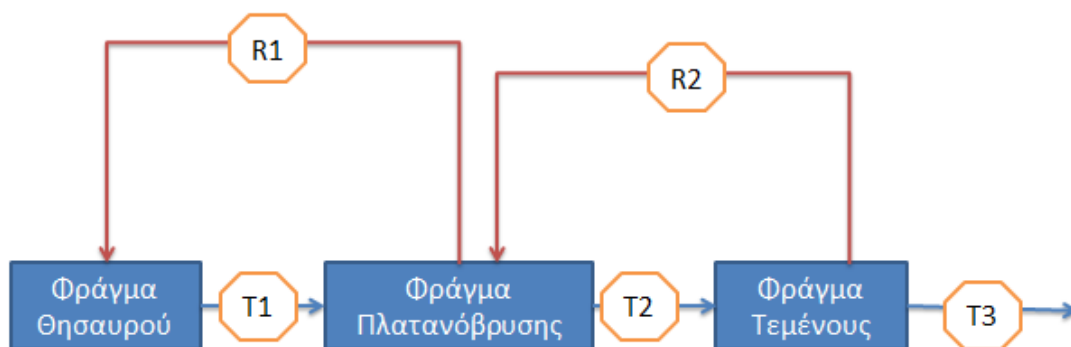
6.6.3 Περιγραφή κανόνων λειτουργίας και σεναρίων που εξεταστήκαν

6.6.3.1 Κανόνες λειτουργίας και σενάρια βελτιστοποίησης

Λόγω του ότι το WEAP21 δεν παρέχει την δυνατότητα ορισμού της ποσότητας που απελευθερώνεται από κάθε ταμιευτήρα αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ελαχίστη παροχή κατάντη κάθε φράγματος καθώς και η ποσότητα που επιστρέφει στους ανάντη ταμιευτήρες μέσω των ψευδών κόμβων ζήτησης (ανάστροφη λειτουργία). Να σημειωθεί πως η ελαχίστη παροχή κατάντη κάθε φράγματος έχει το ρόλο του «κατωφλιού» και όχι της ακριβούς ποσότητας νερού που πρέπει να απελευθερωθεί από τον ανάντη ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα οι ποσότητες αυτές αποτελούν ένα ποσοστό του διαθέσιμου ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα του Θησαυρού που έχει υπολογιστεί από το προηγούμενο βήμα. Επιλέχτηκε η χρήση μόνο του όγκου του Θησαυρού μιας και πρόκειται για τον μεγαλύτερο εκ των τριών (570 hm^3 , 12 hm^3 , 6 hm^3 με τη σειρά) μιας και αποτελεί την καθοριστικότερη ποσότητα. Με αυτόν το τρόπο γνωρίζοντας τον διαθέσιμο ωφέλιμο όγκο του προηγούμενου βήματος μπορεί να διαμορφωθεί η επιχειρησιακή λειτουργία των ΥΗΕ στο τρέχον βήμα. Επίσης λόγω του ότι η ελαχίστη ποσότητα κατάντη των ταμιευτήρων δεν αποτελεί την ακριβή ποσότητα νερού που απελευθερώνεται από το φράγμα, για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρειάζεται μια περαιτέρω επεξεργασία που περιγράφεται στη συνέχεια σε μορφή ψευδοκώδικα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κανόνες λειτουργίας και τα σενάρια στα οποία εφαρμόστηκαν.

Κανόνας λειτουργίας A για το σενάριο 1 (A1)

Το σενάριο 1 συμπεριλαμβάνει το μελλοντικό φράγμα του Τεμένους και για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιούνται πέντε (5) μεταβλητές ελέγχου (σχήμα 6.26). Για λόγους συντομίας θα καλείται στη συνέχεια A1. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση και ορίζονται ως εξής:



Σχήμα 6.26: Σχηματική απεικόνιση μεταβλητών βελτιστοποίησης υδροσυστήματος.

Όπου:

T_n : Ελαχίστη ποσότητα στόχος του όγκου του ταμιευτήρα του Θησαυρού κατάντη του ταμιευτήρα

R_n : Ποσότητα στόχος του όγκου του ταμιευτήρα του Θησαυρού προς επιστροφή στον ανάντη ταμιευτήρα μέσω των ψευδών κόμβων ζήτησης.

Οι ποσότητες T_n και R_n που αποτελούν συνάρτηση του διαθέσιμου ωφέλιμου όγκου του Θησαυρού ορίζονται ως εξής:

$$T_n(t) = V(t - 1) * a_n \quad (6.4)$$

$$R_n(t) = V(t - 1) * a_n \quad (6.5)$$

Όπου:

a_n : ένα ποσοστό από 0 έως 100%

$V(t - 1)$: Ο διαθέσιμος ωφέλιμος όγκος του Θησαυρού στο προηγούμενο βήμα.

Κανόνας λειτουργίας B για το σενάριο 1 (B1)

Ο κανόνας λειτουργίας B διαφέρει με τον A στο ότι οι ελάχιστες ποσότητες κατάντη των φραγμάτων διαφοροποιούνται όταν υπάρχουν ανάγκες άρδευσης. Για να επιτευχτεί κάτι τέτοιο επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί μια ακόμα μεταβλητή ελέγχου (σύνολο 6) η όποια για υπολογιστικούς λόγους θεωρήθηκε κοινή για κάθε τιμή στόχο κατάντη κάθε ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα η τιμή Tn για την περίοδο κατά την όποια δεν υπάρχουν ανάγκες άρδευσης προσδιορίζεται από την εξίσωση 6.5 ενώ όταν υπάρχουν ανάγκες άρδευσης από την εξίσωση 6.6. Οι ποσότητες που αφορούν την επιστροφή υδάτων στους ανάντη ταμιευτήρες προσδιορίζονται από την εξίσωση 6.5.

$$Tn(t) = V(t - 1) * a_n/b \quad (6.6)$$

Όπου:

b: τιμή με την όποια διαιρείται η ελαχίστη ποσότητα στόχος κατάντη κάθε φράγματος

Για λόγους συντομίας η περίπτωση αυτή θα καλείται στη συνέχεια B1.

Κανόνας λειτουργίας A για το σενάριο 2 (A2)

Το σενάριο 2 αφορά το υδροσύστημα της περιοχής χωρίς το μελλοντικό φράγμα του Τεμένους και για κανόνα λειτουργίας χωρίς διαφοροποίηση για τις περιόδους άρδευσης (κανόνας λειτουργίας A). Στην περίπτωση αυτή οι μεταβλητές ελέγχου είναι τρεις αφού δεν λαμβάνεται υπ όψιν η τιμή Tn κατάντη του φράγματος του Τεμένους και η τιμή Rn που αφορά την ποσότητα επιστροφής από το φράγμα του Τεμένους στο φράγμα της Πλατανόβρυσης.

Κανόνας λειτουργίας B για το σενάριο 2 (B2)

Η περίπτωση αυτή αφορά το σενάριο 2 που περιγράφηκε παραπάνω αλλά γίνεται διαφοροποίηση για τις περιόδους άρδευσης, πράγμα που σημαίνει την χρήση μιας επιπλέον μεταβλητής (σύνολο 4) για τον προσδιορισμό των ποσοτήτων Tn κατά τις περιόδους οποίες δεν υπάρχουν ανάγκες άρδευσης. Οι εξισώσεις που ισχύουν είναι ίδιες με την περίπτωση B1.

Πίνακας 6.9: Συνοπτική παρουσίαση των κανόνων λειτουργίας και των σεναρίων.

A/A	Χωρίς διαφοροποίηση κατά την αρδευτική περίοδο	Με διαφοροποίηση κατά την αρδευτική περίοδο
Με το φράγμα του Τεμένους	A1	B1
Χωρίς το φράγμα του Τεμένους	A2	B2

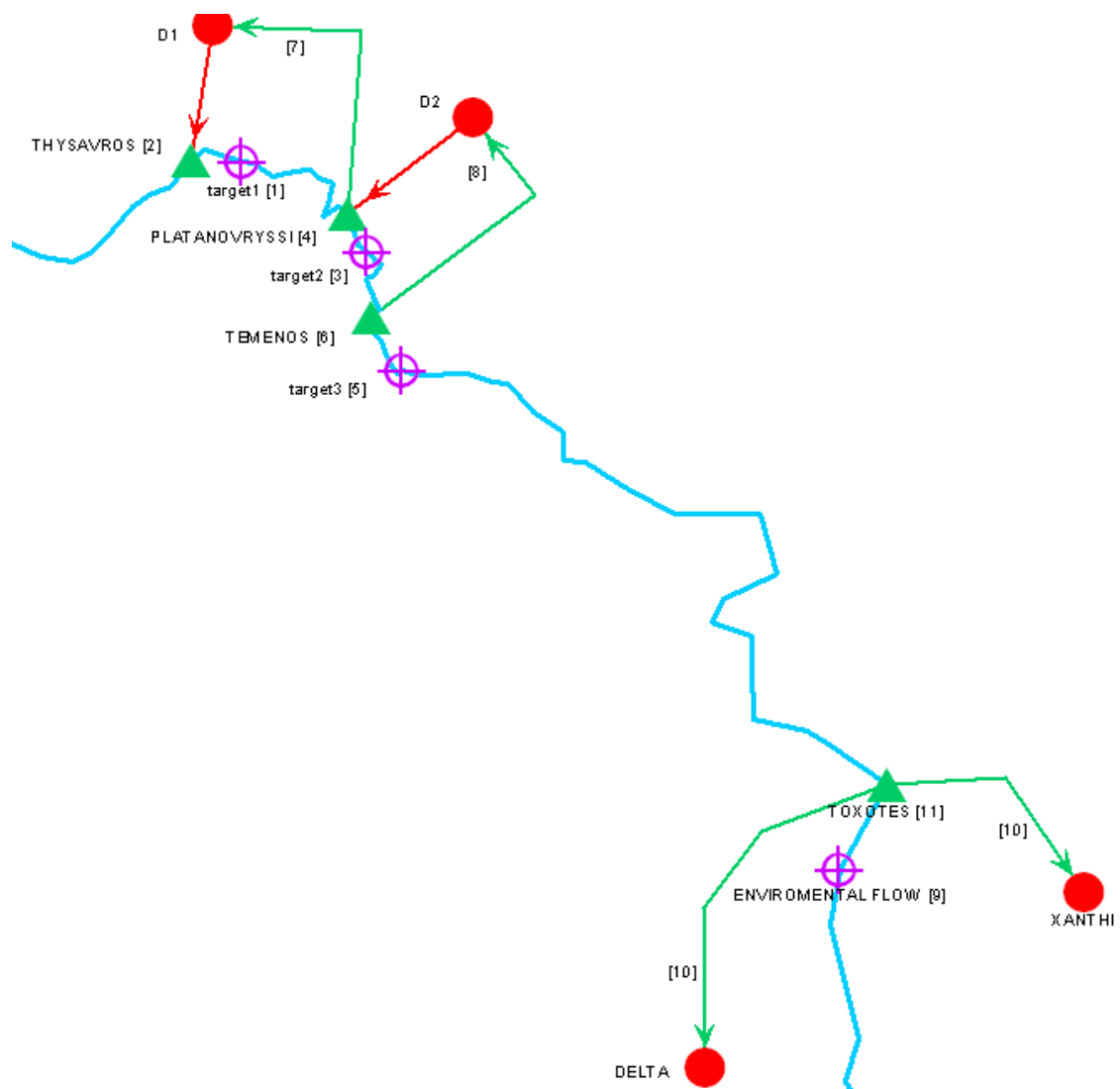
6.6.4 Ορισμός προτεραιοτήτων στο μοντέλο WEAP21

Το μοντέλο WEAP21 χρησιμοποιεί μια τεχνική γραμμικού προγραμματισμού για να κατανείμει το νερό έτσι ώστε να μεγιστοποιεί την κάλυψη των διαφόρων αναγκών. Με βάση αυτή τη διαδικασία το μοντέλο καλύπτει πρώτα τις ανάγκες των στόχων ή των κόμβων ζήτησης με υψηλότερη προτεραιότητα παίρνοντας νερό από τα αποθέματα (ταμιευτήρες σε αυτή την περίπτωση) με χαμηλότερη προτεραιότητα. Κάτι τέτοιο αποτέλεσε πρόβλημα για την βελτιστοποίηση διότι ακόμη και όταν οι τιμές των στόχων κατάντη των φραγμάτων ήταν μηδενικές οι κόμβοι ζήτησης ικανοποιούνταν καθώς το μοντέλο θα ικανοποιούσε αυτές πρώτα. Ένα άλλο σημείο που πρέπει να σημειωθεί είναι οι προτεραιότητες των φραγμάτων, στο WEAP21 δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού της προτεραιότητας γεμίσματος του κάθε φράγματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως όσο πιο χαμηλή η προτεραιότητα του φράγματος αυτό θα αδειάσει γρηγορότερα από ένα άλλο με υψηλότερη (Yates et al., 2005).

Για παράδειγμα εάν οι προτεραιότητες της περιβαλλοντικής παροχής και των κόμβων ζήτησης τεθούν 1 και 2 αντίστοιχα, το μοντέλο αρχικά θα υπολογίσει το συνολικό διαθέσιμο νερό στο σύστημα και εάν επαρκεί θα φροντίσει να καλύψει τους στόχους, στη συνέχεια εφόσον περισσέψει νερό θα το κατανείμει στους ταμιευτήρες με βάση τις προτεραιότητες (γεμίσματος) που έχουν τεθεί. Η παραπάνω διαδικασία αναιρεί το νόημα των στόχων που έχουν τεθεί κατάντη κάθε φράγματος, αφού αυτοί πρέπει να καθορίζουν το αν θα φτάσει νερό στους κόμβους ζήτησης.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό έπρεπε το μοντέλο να επιλύει τους διάφορους κόμβους σειριακά, δηλαδή από πάνω προς τα κάτω, έτσι ώστε η ρουτίνα γραμμικού προγραμματισμού του WEAP21 να μην έχει αντίκτυπο στην λύση. Με βάση το παραπάνω σκεπτικό οι προτεραιότητες ορίστηκαν (σχήμα 6.27) ώστε να αντιπροσωπεύουν την σειρά επίλυσης του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα έπρεπε οι στόχοι ελάχιστης παροχής του ποταμού κατάντη κάθε φράγματος να έχουν υψηλότερη προτεραιότητα από το ανάντη φράγμα, επίσης έπρεπε οι προτεραιότητες γεμίματος των φραγμάτων να φθίνουν καθώς πλησιάζουμε προς την εκβολή του ποταμού. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο για να καλύψει για παράδειγμα την ελαχίστη παροχή του ποταμού μεταξύ Πλατανόβρυσης και Τεμένους, (target 2 στο σχήμα 6.27) έχει πρόσβαση μόνο στον όγκο του ανάντη φράγματος (Πλατανόβρυσης) καθώς και σε οποία ποσότητα νερού εισέρχεται σε αυτό. Με αυτό το τρόπο δε δίνεται η δυνατότητα στο μοντέλο να αποσπάσει επιπλέον νερό από το φράγμα του Θησαυρού για να ικανοποιήσει τον στόχο Target 2, κ.ο.κ.



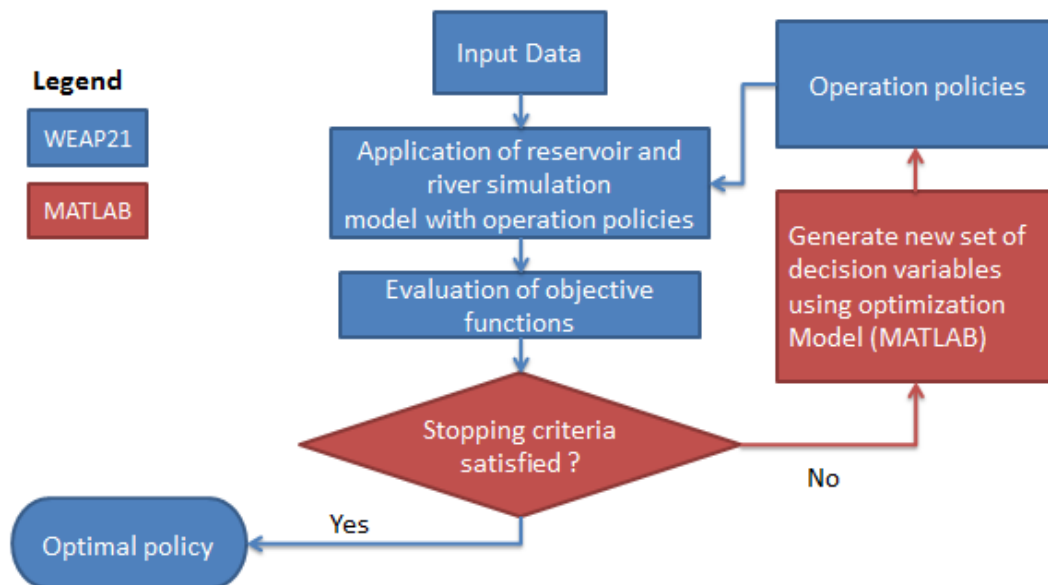
Σχήμα 6.27: Ορισμός προτεραιοτήτων έτσι ώστε να επιλύεται σειριακά τα σύστημα.

6.6.5 Σύζευξη του WEAP21 και MATLAB μέσω COM-API για την βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος

Ομοίως με τη διαδικασία της βαθμονόμησης αναπτύχθηκε κώδικας προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση του συστήματος. Κύρια διαφορά είναι πως σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα μιας και ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και η κάλυψη των αναγκών σε νερό. Επίσης επιλέχθηκε η χρήση των γενετικών αλγορίθμων του Global Optimization Toolbox του Matlab. Σε κάθε βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε πληθυσμός 80 ατόμων και 400 γενιές.

Ο κύριος βρόχος της επαναληπτικής διαδικασίας ξεκινάει με την μετατροπή των μεταβλητών σε αρχεία κατάλληλης μορφής αναγνώσιμης από το WEAP, γίνεται έναρξη της σύνδεσης με το WEAP μέσω COM-API, το μοντέλο διαβάζει τις μεταβλητές και υπολογίζει τα εξαγόμενα αποτελέσματα, στη συνέχεια εξάγονται τα αποτελέσματα στο Matlab όπου και υπολογίζεται η συνάρτηση στόχου.

Η συλλογιστική πορεία του κώδικα προγραμματισμού που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής (σχήμα 6.28).



Σχήμα 6.28: Διάγραμμα ροής για την Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος.

Ως αντικειμενικές συναρτήσεις για την Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ορίσθηκαν οι εξής:

$$f(1) = \left(\sum \text{Hydropower} \right) * \text{Benefit} - \left(\sum \text{Hydroconsumption} \right) * \text{cost} \quad (6.7)$$

$$f(2) = \text{Mean}(\text{ReliabilityXanthi}) * a + \text{Mean}(\text{ReliabilityDelta}) * a + \text{Mean}(\text{ReliabilityEnv}) * b \quad (6.8)$$

όπου:

Hydropower: Η συνολική παραγωγή ενέργειας από τα 3 ΥΗΕ σε GWh

Hydroconsumption: Η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε GWh

ReliabilityDelta: Η αξιοπιστία όσον αφορά την κάλυψη κόμβου ζήτησης για την άρδευση της κοιλάδας του Δέλτα.

ReliabilityXanthi: Η αξιοπιστία όσον αφορά την κάλυψη του κόμβου ζήτησης για την άρδευση της κοιλάδας της Ξάνθης.

ReliabilityEnv: Η αξιοπιστία όσον αφορά την κάλυψη της περιβαλλοντικής παροχής.

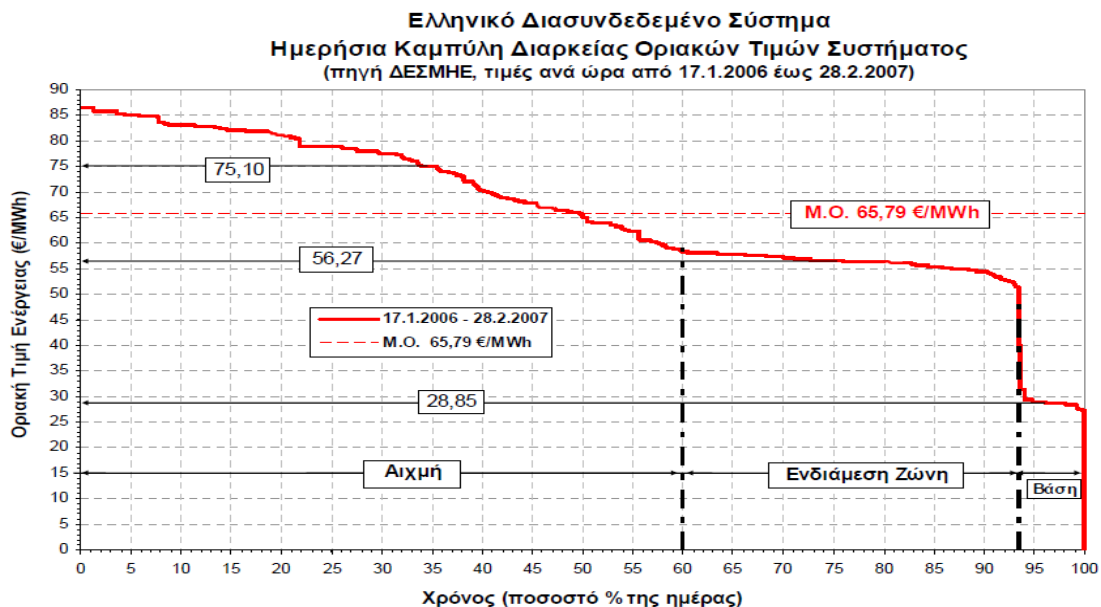
Benefit: Το όφελος από την παραγωγή ενέργειας σε €/GWh

Cost: Το κόστος από την κατανάλωση ενέργειας σε €/GWh

a,b: Συντελεστές βάρη, που προσδιορίζουν την σημασία κάλυψης της συγκεκριμένης ανάγκης.

Τα βάρη a και b ορίσθηκαν 0.25 και 0.5 αντίστοιχα, ενώ οι τιμές των Benefit και Cost ορίσθηκαν 75100 €/GWh και 30000 €/GWh αντίστοιχα βάση του σχήματος 6.29.

Να σημειωθεί πως σαν αξιοπιστία το WEAP21 ορίζει το ποσοστό των χρονικών βημάτων όπου η ζήτηση καλύφθηκε πλήρως (Yates, 2005).



Σχήμα 6.29: Ημερήσια καμπύλη διάρκειας οριακών τιμών συστήματος (Stefanakos, 2009).

6.6.6 Δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών στο πρόγραμμα Κασταλία

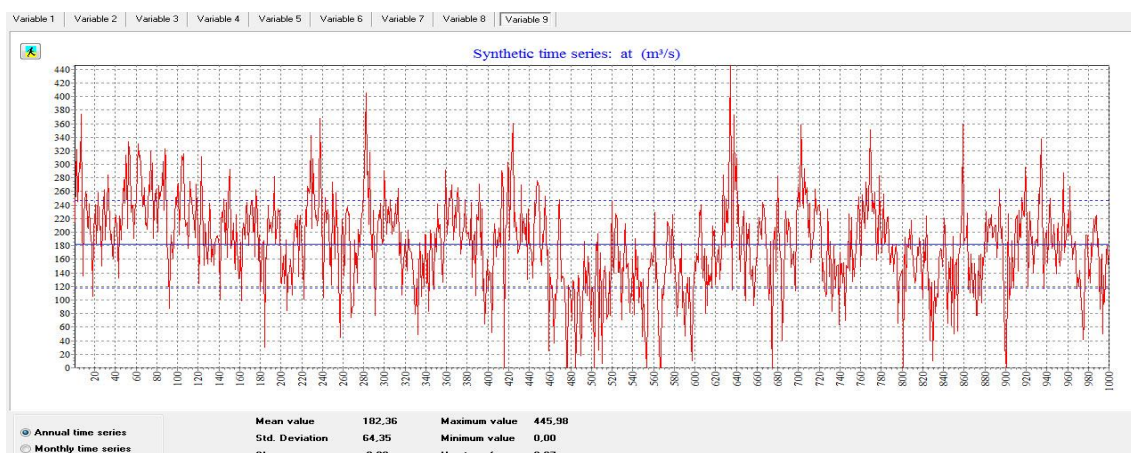
Λόγω του ότι η βελτιστοποίηση του συστήματος έγινε για το διάστημα 1991 ως 1995 αποφασίστηκε να δημιουργηθούν συνθετικές χρονοσειρές για την διερεύνηση της απόκρισης του συστήματος. Οι συνθετικές χρονοσειρές δημιουργήθηκαν από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων (πίνακας 6.10) και όχι μόνο από την περίοδο 1991-1995. Η δημιουργία των χρονοσειρών έγινε με το πρόγραμμα Κασταλία (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2002). Οι χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν λαμβάνουν υπόψη τους το φαινόμενο της εμμονής (υψηλό συντελεστή Hurst) έτσι ώστε να δοκιμαστούν το σύστημα και οι κανόνες λειτουργίας υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Παρήχθησαν χρονοσειρές μήκους χιλίων ετών, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τα σενάρια B1 και B2. Στον παρακάτω πίνακα 6.11 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συντελεστές Hurst των υδρολογικών συνθετικών χρονοσειρών. Οι χρονοσειρές 1 ως 8 αφορούν χρονοσειρές βροχής οι οποίες χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των λεκανών απορροής της περιοχής ενώ η χρονοσειρά 9 (σχήμα 6.30) αφορά την εισροή από στα σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας.

Πίνακας 6.10: Διαθέσιμες ιστορικές χρονοσειρές.

Χρονοσειρά		Διαθέσιμα έτη
1	Αχλαδιά (mm)	1964-1998
2	Καρυόφυτο (mm)	1964-1998
3	Κεχρόκαμπος (mm)	1991-1995
4	Μεσοχώρι (mm)	1991-1995
5	Ποταμοί (mm)	1964-1998
6	Πρασινάδα (mm)	1991-2995
7	Πτελέα (mm)	1964-1996
8	Σιδηρόνερο (mm)	1964-1998
9	Momina Kula (m ³ /s)	1968-1997

Πίνακας 6.11: Συντελεστές Hurst παραγομένων συνθετικών χρονοσειρών.

Χρονοσειρά		Συντελεστής Hurst
1	Αχλαδιά (mm)	0.69
2	Καρυόφυτο (mm)	0.81
3	Κεχρόκαμπος (mm)	0.70
4	Μεσοχώρι (mm)	0.73
5	Ποταμοί (mm)	0.61
6	Πρασινάδα (mm)	0.52
7	Πτελέα (mm)	0.80
8	Σιδηρόνερο (mm)	0.67
9	Momina Kula (m ³ /s)	0.87



Σχήμα 6.30: Συνθετική χρονοσειρά παροχής του σταθμού Momina Kula (Hurst=0.87)

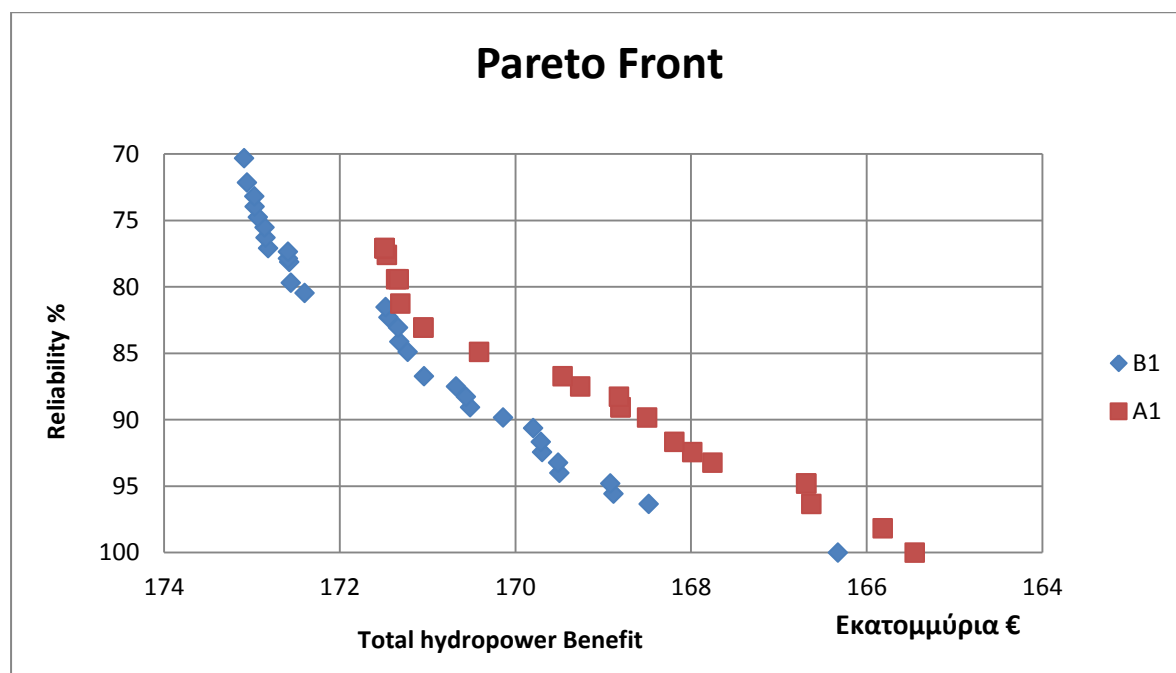
7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

7.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο διερευνήθηκαν 2 κανόνες λειτουργίας (A και B) και 2 σενάρια για το υδροσυστημα του Νέστου, με και χωρίς το μελλοντικό φράγμα του Τεμένους. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για τις τέσσερις αυτές διατάξεις και συγκρίνονται μεταξύ τους. Επίσης διερευνάται η αξιοπιστία των διατάξεων κάνοντας χρήση συνθετικών χρονοσειρών μήκους 1000 ετών.

Αποτελέσματα σεναρίων A1 και B1

Στο σχήμα 7.1 απεικονίζονται τα μέτωπα Pareto που πρόεκυψαν από την βελτιστοποίηση των σεναριων A1 και B1. Είναι εμφανές πως στην περίπτωση του σεναρίου 1 (συμπεριλαμβάνεται το φράγμα του Τεμένους) η χρήση των κανόνων λειτουργίας B αποδίδει ευνοϊκότερα αποτελέσματα. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο ότι χρήση μιας επιπλέον μεταβλητής η οποία συνεισφέρει στο διαχωρισμό περιόδων άρδευσης ή μη. Με αυτόν τον τρόπο οι απαιτούμενες ποσότητες νερού κατάντη κάθε ταμιευτήρα μειώνονται κατά την χειμερινή περίοδο (χωρίς αρδεύσεις) και σαν αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του ταμιευτήρα, αυτό με την σειρά του οδηγεί σε μεγαλύτερο ύψος πτώσης για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας αλλά και αυξάνει τα αποθέματα των ταμιευτήρων πράγμα που βοηθάει στην κάλυψη των αναγκών σε νερό τους θερινούς μήνες (αρδευόμενη περίοδος).



Σχήμα 7.1: Μέτωπο Pareto των σεναρίων A1 και B1

Στους πίνακες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα που πρόέκυψαν από την βελτιστοποίηση των σεναρίων B1 και A1 αντίστοιχα, όσον αφορά τον πίνακα 7.1 αξίζει να σημειωθεί πως η μεταβλητή ελέγχου b που αφορά την χειμερινή περίοδο παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας υποδηλώνοντας πως στις συγκεκριμένες βέλτιστες λύσεις οι απαιτούμενες ποσότητες κατάντη των ταμιευτήρων πρέπει να μειωθούν τους χειμερινούς μήνες. Επίσης παρατηρείται πως και στις δυο περιπτώσεις οι μεταβλητές ελέγχου a4 και a5 που αφορούν την ποσότητα επιστροφής στους ανάντη ταμιευτήρες μέσω του συστήματος άντλησης ταμίευσης λαμβάνουν υψηλές τιμές το οποίο πρακτικά σημαίνει πως κατά τη διάρκεια ενός μήνα αντλείται από τους κατάντη ταμιευτήρες όσο το δυνατόν περισσότερο νερό (πάντα μέσα στα όρια της παροχρητευτικής τους ικανότητας). Παρατηρώντας τα παρακάτω αποτελέσματα φαίνεται πως κρισιμότερη μεταβλητή ελέγχου αποτελεί η μεταβλητή a1 η οποία και αφορά την ελαχίστη παροχή κατάντη του Θησαυρού. Κάτι τέτοιο κρίνεται λογικό καθώς αποτελεί τον μεγαλύτερο εκ των τριών ταμιευτήρων αλλά και αυτόν με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ. Όσον αφορά τις λύσεις εκείνες που παρουσιάζουν χαμηλή αξιοπιστία συμπεραίνεται πως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης κατέληξε σε ένα «σχήμα» μεταβλητών ελέγχου όπου οι ελάχιστες ποσότητες κατάντη των ταμιευτήρων είναι πολύ μικρές, κάτι τέτοιο σημαίνει πως οι ταμιευτήρες διατηρούνται πάντα σε υψηλό επίπεδο (μεγάλο ύψος πτώσης) και πως στους στροβίλους διοχετεύεται ποσότητα ίση με τις εισροές για την αποφυγή υπερχειλίσεων.

Πίνακας 7.1: Ενδεικτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο B1

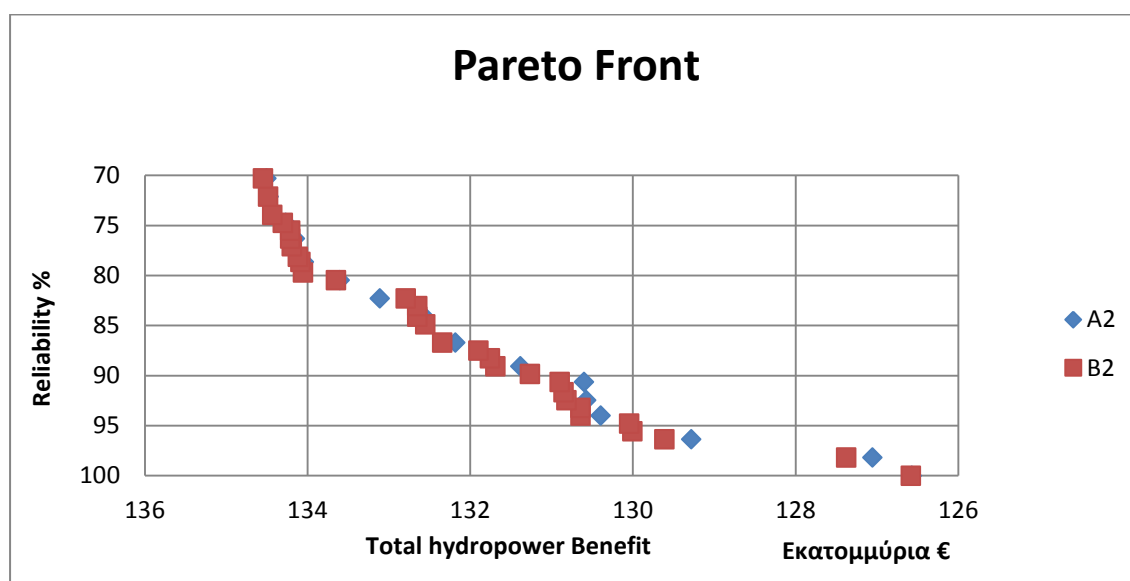
Μεταβλητές βελτιστοποίησης							Συνάρτηση στόχου	
#	a1	a2	a3	a4	a5	b	f1 (x10 ⁸)	f2(%)
1	0.3871	0.3690	0.0611	0.9448	0.6452	13.0017	166.33	100.00
2	0.1804	0.0331	0.0031	0.9689	0.7039	2.8959	168.88	95.57
3	0.1564	0.0998	0.0040	0.6130	0.8473	3.7949	169.79	90.63
4	0.0408	0.0192	0.0015	0.5967	0.5949	1.6042	172.40	80.47
5	0.0136	0.0036	0.0040	0.9668	0.7758	4.7414	173.09	70.31

Πίνακας 7.2: Ενδεικτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο A1

Μεταβλητές βελτιστοποίησης						Συνάρτηση στόχου	
#	a1	a2	a3	a4	a5	f1 (x10 ⁸)	f2(%)
1	0.3842	0.2799	0.0260	0.9510	0.8135	165.45	100.00
2	0.1889	0.9735	0.0243	0.6114	0.5544	166.68	94.79
3	0.1298	0.7611	0.0246	0.9297	0.6438	168.57	89.84
4	0.0314	0.7392	0.0255	0.6535	0.4922	171.30	81.25
5	0.0230	0.6969	0.0248	0.6559	0.5723	171.48	77.08

Αποτελέσματα σεναρίων A2 και B2

Στο σχήμα 7.2 απεικονίζονται τα μέτωπα Pareto που πρόεκυψαν από την βελτιστοποίηση των συνδυασμών των σεναριων A2 και B2. Το σενάριο 2 δεν συμπεριλαμβάνει το μελλοντικό φράγμα του Τεμένους. Σε αντίθεση με το σενάριο 1 ο κανόνας λειτουργίας B δεν επιφέρει σημαντική μετατόπιση του μετώπου Pareto, κάτι τέτοιο πιθανόν να οφείλεται στην απουσία του φράγματος του Τεμένους. Η απουσία του φράγματος του Τεμένους έχει σαν αποτέλεσμα η υδροηλεκτρική παραγωγή να μειώνεται σημαντικά, παρόλα αυτά και σε αυτήν την περίπτωση επιτυγχάνεται υψηλή αξιοπιστία.



Σχήμα 7.2: Μέτωπο Pareto των σεναριων A2 και B2

Στους πίνακες 7.3 και 7.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν από την βελτιστοποίηση των σεναριων A2 και B2 αντίστοιχα. Παρατηρείται πως και στις δυο περιπτώσεις η μεταβλητή a_3 που αφορά την επιστροφή νερού στο ανάντη φράγμα παίρνει υψηλές τιμές, κάτι τέτοιο συνέβαινε και στα σενάρια A1 και B1. Αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος για να επιτύχει αξιοπιστία 100% κατέληξε στην ίδια περίπτωση λύση με αποτέλεσμα η τιμή της μεταβλητής b του σεναρίου B2 να είναι ίση με την μονάδα. Όσον αφορά τις λύσεις εκείνες που πετυχαίνουν υψηλή παραγωγή ενέργειας και χαμηλή αξιοπιστία ισχύει ότι και στα σενάρια A1 και B1, δηλαδή χαμηλές τιμές για τις μεταβλητές ελέγχου, οι οποίες πρακτικά ερμηνεύεται ως μεγάλο ύψος πτώσης και παραγωγή ενέργειας από τις εισροές έτσι ώστε να αποφεύγεται η υπερχειλίση.

Πίνακας 7.3: Ενδεικτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο A2.

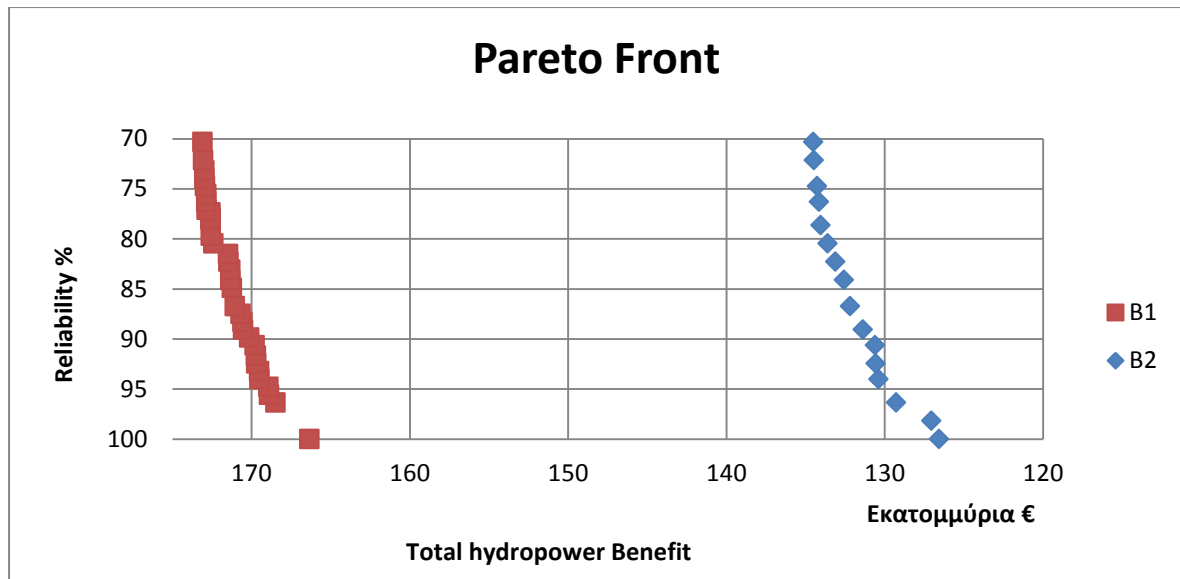
Μεταβλητές βελτιστοποίησης				Συνάρτηση στόχου	
#	a1	a2	a3	f1 (x10 ⁸)	f2(%)
1	0.3664	0.0037	0.8727	126.57	100.00
2	0.1621	0.0044	0.7590	130.39	94.01
3	0.0795	0.0020	0.9079	132.56	84.11
4	0.0176	0.0049	0.9182	134.26	74.74
5	0.0035	0.0042	0.9298	134.51	68.49

Πίνακας 7.4: Ενδεικτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο B2.

Μεταβλητές βελτιστοποίησης					Συνάρτηση στόχου	
#	a1	a2	a3	b	f1 (x10 ⁸)	f2(%)
1	0.3652	0.0017	0.8731	1.0000	126.58	100.00
2	0.1815	0.0002	0.7561	3.1067	130.00	95.57
3	0.1243	0.0016	0.6541	2.5548	131.75	88.28
4	0.0418	0.0007	0.7935	1.0171	133.64	80.46
5	0.0068	0.0003	0.8069	4.6206	134.54	70.31

Στο σχήμα 7.3 συγκρίνονται τα μέτωπα Pareto των σεναριων B1 και B2, όπως φαίνεται και στο σχήμα υπάρχει σημαντική βελτίωση του μετώπου κατά την εφαρμογή του σεναρίου 1 (με το μελλοντικό φράγμα του Τεμένους). Σημειώνεται πως για αξιοπιστία 100% το συνολικό όφελος από παραγωγή ενέργειας στο διάστημα 1/8/1991 ως 1/7/1995 αυξάνεται κατά 40 περίπου εκατομμύρια ευρώ δηλαδή υπάρχει μια μέση αύξηση κατά 10 εκατομμύρια ευρώ ανά έτος.

Γενικότερα σε όλα τα σενάρια που εξεταστήκαν ο αλγόριθμος βρήκε λύσεις με αξιοπιστία 100% και αυτό λόγω των υψηλών αποθεμάτων νερού στους ταμιευτήρες και λόγω του ότι η ζήτηση είναι σχετικά μικρή, αφού δεν ξεπερνά τα 100 hm³ συνολικά σε κανένα χρονικό βήμα.



Σχήμα 7.3: Μέτωπο Pareto των σεναριων B1 και B2

7.1.1 Χρήση των κανόνων λειτουργίας

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των κανόνων λειτουργίας χωρίς την χρήση του λογισμικού WEAP21 γίνεται χρήση ψευδοκώδικα, ο οποίος παρουσιάζεται στο παράρτημα Β. Απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών είναι ο ωφέλιμος όγκος των φραγμάτων του προηγούμενου μήνα.

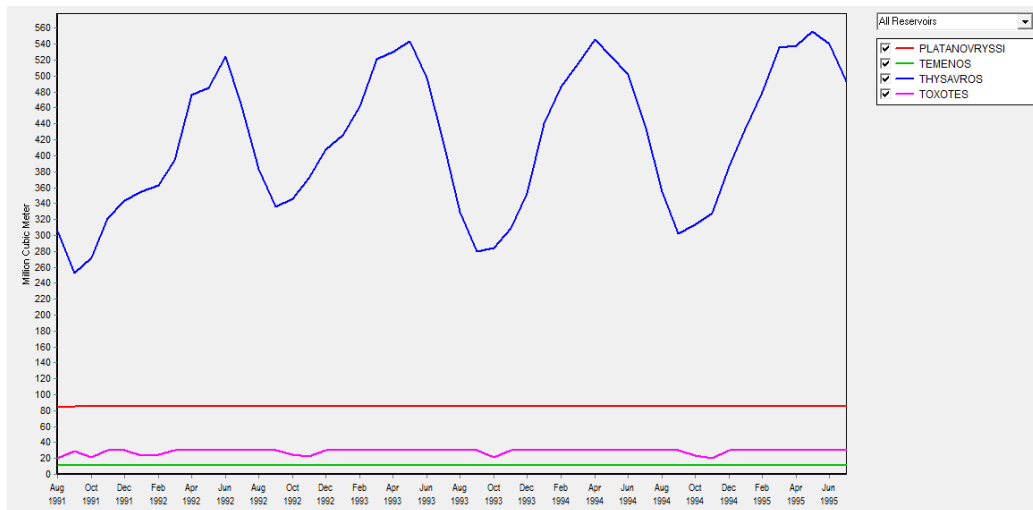
7.1.2 Απόκριση συστήματος για τις βέλτιστες λύσεις

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέχτηκαν τα σενάρια B1 και B2 για περεταίρω διερεύνηση. Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεταβλητών ελέγχου για αξιοπιστία 100% (πίνακας 7.1 και 7.4).

Σενάριο B1

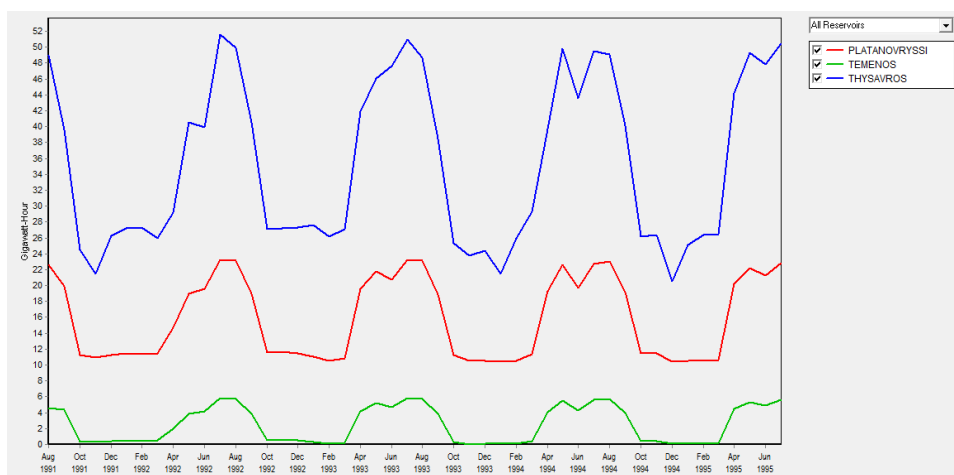
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εφαρμόστηκαν στο μοντέλο οι μεταβλητές ελέγχου (πίνακας 7.1) που πρόεκυψαν για αξιοπιστία 100%. Στο σχήμα 7.4 φαίνεται η διακύμανση του όγκου των ταμιευτήρων στο διάστημα 1991-1995. Παρατηρείται πως ο ταμιευτήρας του Θησαυρού παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αυξομειώσεις, με τον όγκο να αυξάνεται κατά την χειμερινή περίοδο και να μειώνεται κατά την χειμερινή. Οι ταμιευτήρες της Πλατανόβρυσης και του Τεμένους παραμένουν σταθερά πλήρως γεμάτη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χωρίς αυξομειώσεις. Τέλος το αρδευτικό

φράγμα των Τοξοτών παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις κυρίως κατά το τέλος της περιόδου άρδευσης.

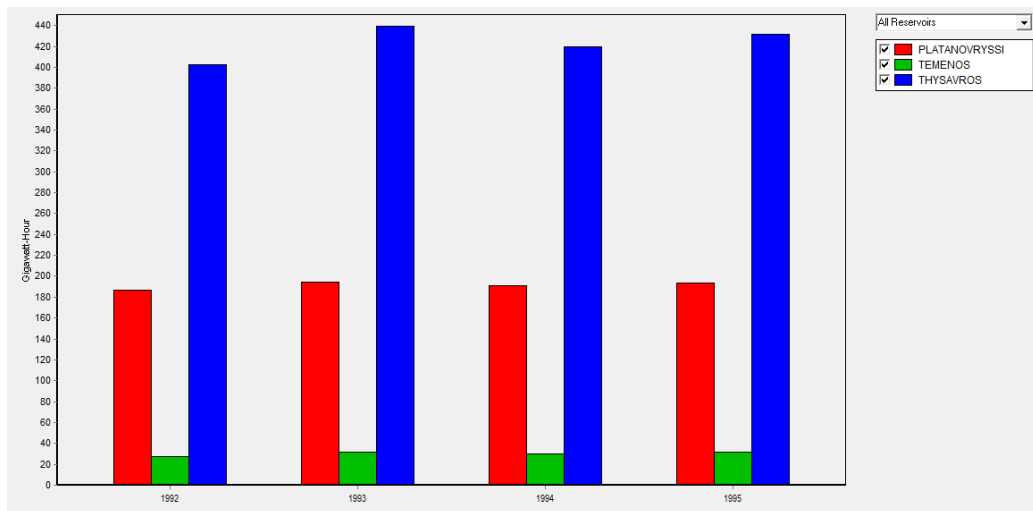


Σχήμα 7.4: Διακύμανση του όγκου των ταμιευτήρων στο διάστημα 1991-1995

Στο σχήμα 7.5 και 7.6 παρουσιάζεται η μηνιαία και η ετησία παραγωγή ενέργειας από τα τρία ΥΗΕ. Όπως ήταν αναμενόμενο η αιχμή της παράγωγης είναι του καλοκαιρινούς μήνες όπου φτάνει μέχρι τις 50.6 GWh για το φράγμα του Θησαυρού, ενώ η χαμηλότερη τιμή αγγίζει τις 24.2 GWh τον Δεκέμβριο. Η υψηλότερη μέση τιμή συνολικής παράγωγης ενέργειας και από τα 3 ΥΗΕ παρατηρείτε τον μήνα Ιουλίου και φτάνει τις 79.36 GWh. Η μέση ετησία παραγωγή ενέργειας από τους ταμιευτήρες του Θησαυρού είναι 423.4 GWh, της Πλατανόβρυσης 191.5 GWh και του Τεμένους 30.1 GWh. Ενώ το μέσω ετήσιο όφελος από την παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε 41.5 εκατ. ευρώ. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου συνδυασμού παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 7.5. Στο σχήμα 7.7 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές παράγωγης ενέργειας για τα 3 ΥΗΕ.



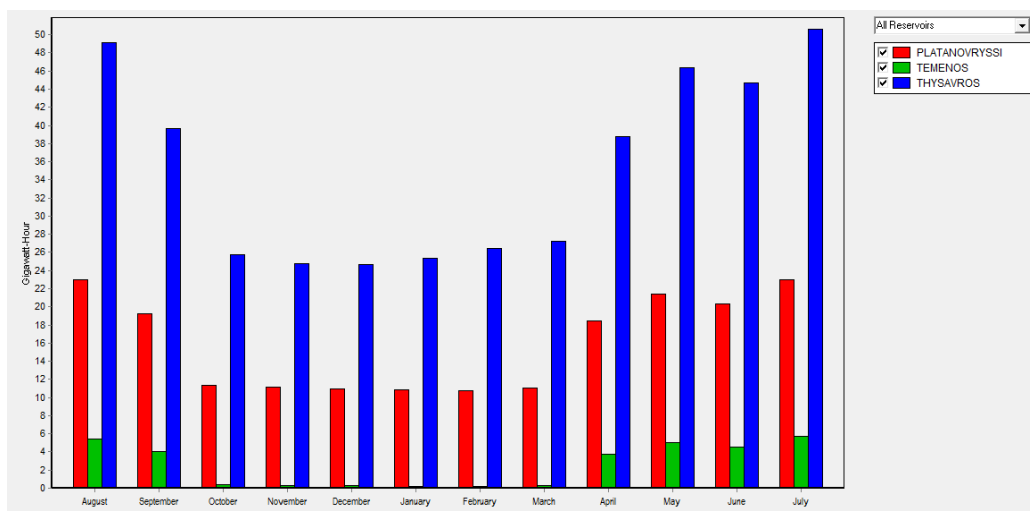
Σχήμα 7.5: Μηνιαία παραγωγή ενεργείας από τα τρία ΥΗΕ σε GWh



Σχήμα 7.6: Ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα τρία ΥΗΕ σε GWh.

Πίνακας: 7.5: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τα ΥΗΕ του Νέστου σε GWh

ΥΗΕ/Ετος	1992	1993	1994	1995	Σύνολο	Μ.Ο
Πλατανόβρυση	186.70	194.40	191.00	193.8	766.09	191.50
Τέμενος	27.30	31.66	30.16	31.40	120.52	30.13
Θησαυρός	402.60	439.40	419.90	431.8	1693.90	423.40

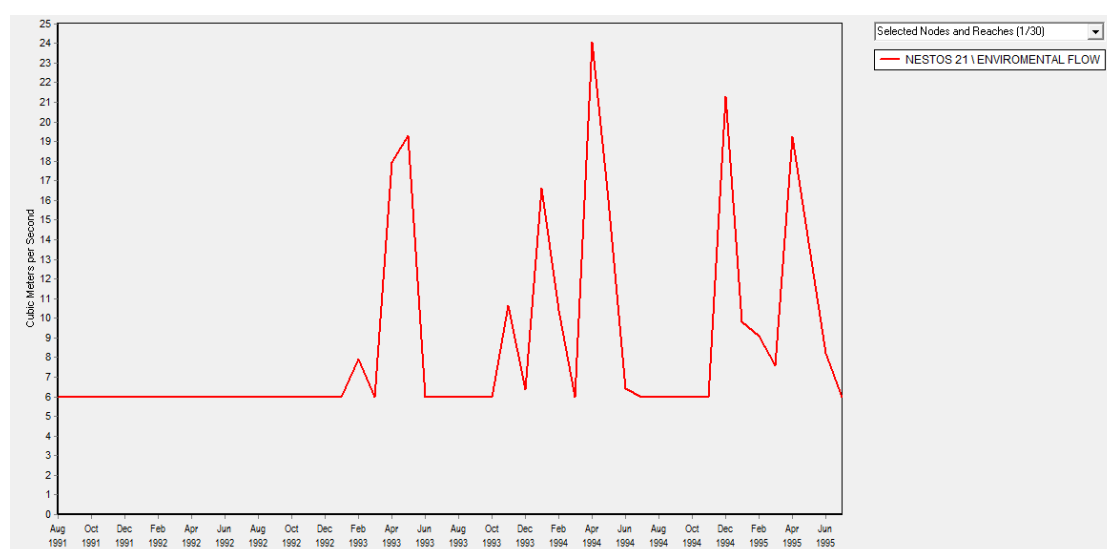


Σχήμα 7.7: Μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα τρία ΥΗΕ σε GWh

Πίνακας: 7.6: Μέση μηνιαία παραγόμενη ενέργεια από τα ΥΗΕ του Νέστου σε GWh

ΥΗΕ/Μήνας	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ
Πλατανόβρυση	22.98	19.23	11.37	11.14	10.95	10.85	10.76	11.08	18.46	21.36	20.32	23.01
Τέμενος	5.47	4.01	0.43	0.34	0.25	0.22	0.17	0.31	3.71	5.00	4.53	5.72
Θησαυρός	49.15	39.67	25.77	24.72	24.63	25.34	26.45	27.22	38.76	46.41	44.73	50.63
Σύνολο	77.60	62.91	37.57	36.20	35.83	36.40	37.38	38.60	60.93	72.78	69.57	79.36

Στο σχήμα 7.8 φαίνεται η παροχή του ποταμού Νέστου κατάντη του φράγματος των Τοξοτών, η οποία είχε τεθεί σαν στόχος η κάλυψη της περιβαλλοντικής παροχής (6 m³/s). Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα η απαίτηση της περιβαλλοντικής παροχής τηρείται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, αρκετούς μήνες την ξεπερνά πράγμα που οφείλεται στην απαίτηση για παραγωγή ενέργειας από τα ανάντη φράγματα.

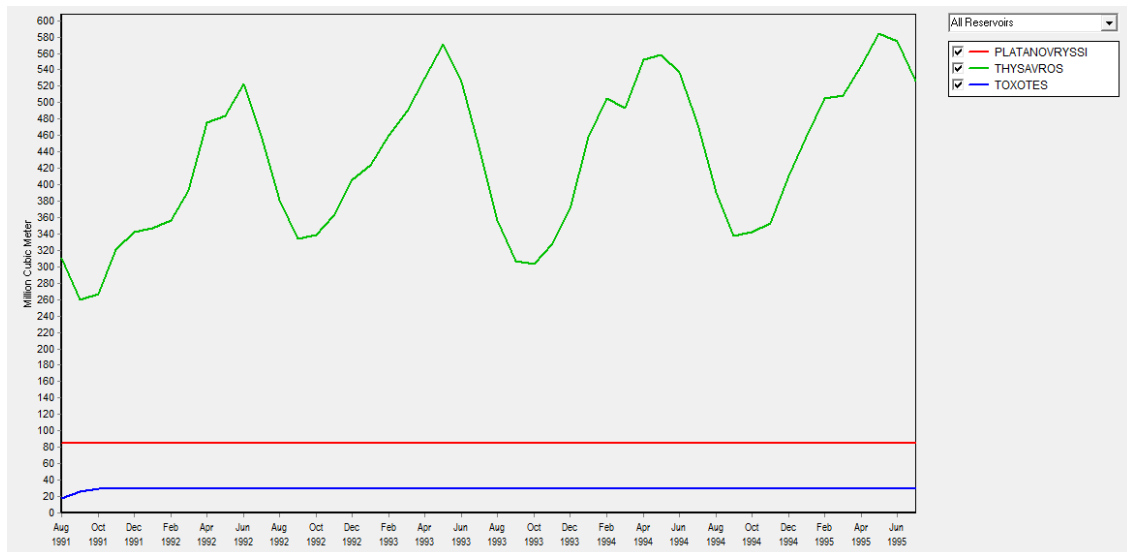


Σχήμα 7.8: Παροχή σε m³/s στη θέση κατάντη του φράγματος των Τοξοτών

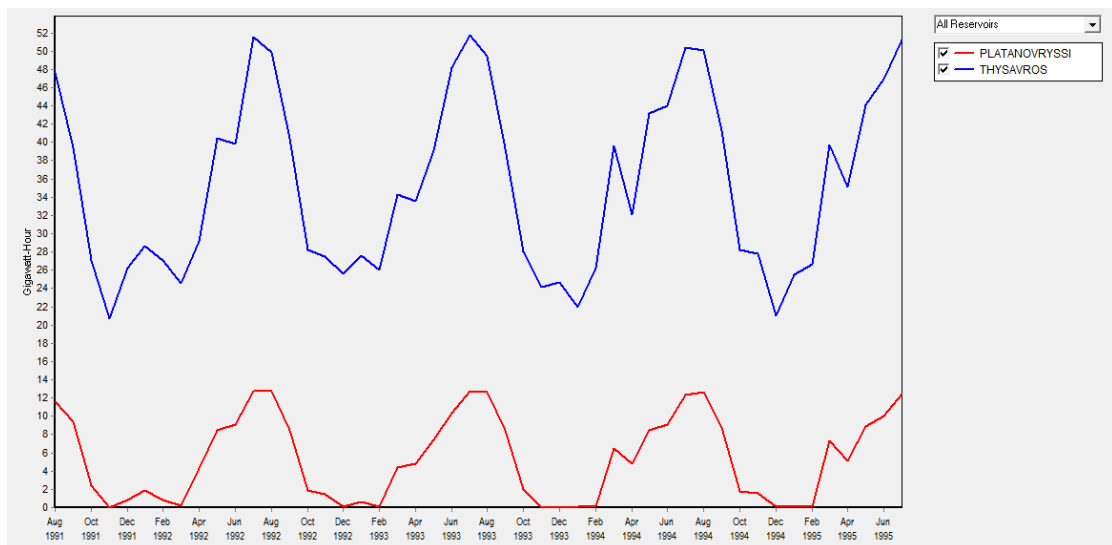
Σενάριο B2

Και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μεταβλητές ελέγχου που παρέχουν αξιοπιστία 100% (πίνακας 7.4). Η περίπτωση αυτή αφορά την υπάρχουσα κατάσταση στον ποταμό Νέστο δηλαδή χωρίς το φράγμα του Τεμένους. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9 ο όγκος των ταμιευτήρων ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτόν που παρουσιάστηκε για την περίπτωση B1, και σε αυτή την περίπτωση τον καθοριστικότερο ρόλο παίζει ο ταμιευτήρας του Θησαυρού από τον οποίο φαίνεται να γίνονται και οι απολήψεις. Ο αλγόριθμος κατέληξε στη λύση αυτή διότι το όφελος από την παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερο από την περίπτωση όπου οι απολήψεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών

γίνονται από το φράγμα της Πλατανόβρυσης και των Τοξοτών. Στο σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα δυο φράγματα. Η παραγωγή ενέργειας από το φράγμα του Θησαυρού κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση B1 όμως παρατηρείται μείωση της παραγόμενης ενέργειας από το φράγμα τις Πλατανόβρυσης, σχεδόν υποδιπλάσια του B1, πράγμα που οφείλεται στην απουσία του ταμιευτήρα του Τεμένους και της δυνατότητας ανάστροφης λειτουργίας που παρέχει.

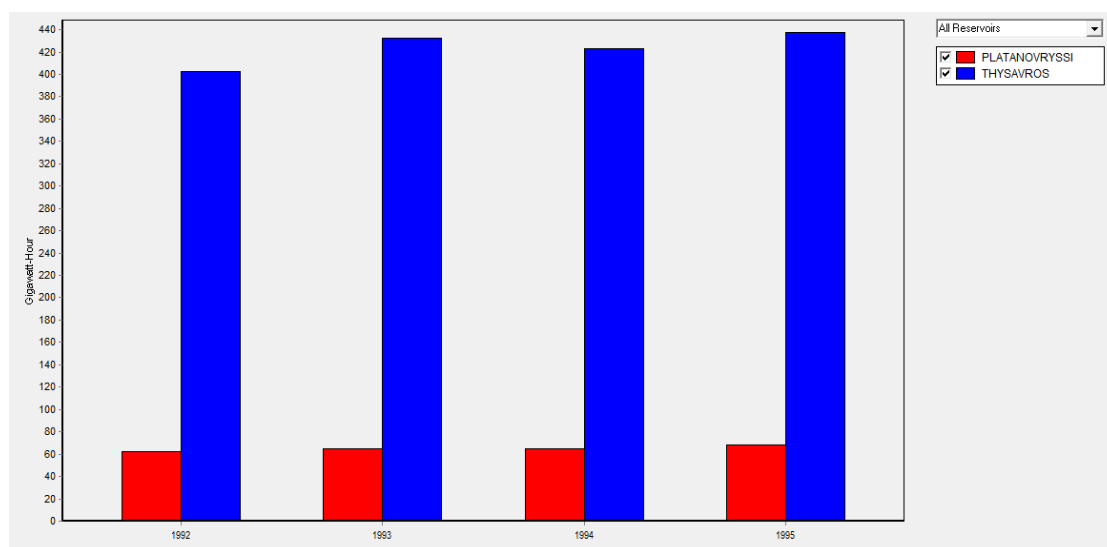


Σχήμα 7.9: Διακύμανση του όγκου των ταμιευτήρων στο διάστημα 1991-1995 για το σενάριο B2



Σχήμα 7.10: Μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα δυο ΥΗΕ σε GWh

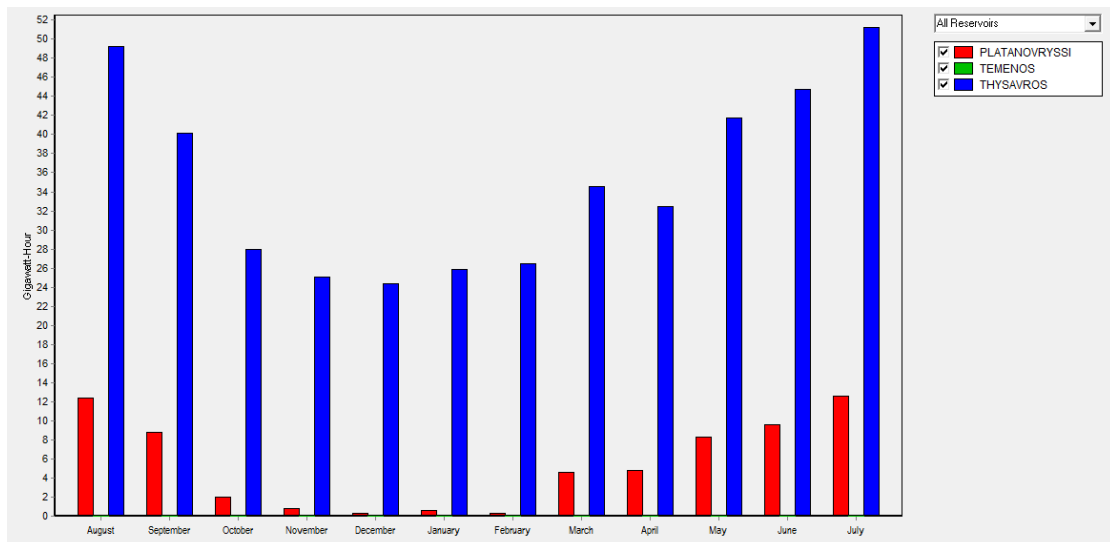
Τα ετησία επίπεδα παράγωγης ενέργειας φαίνονται στο σχήμα 7.11, όπου είναι ξεκάθαρη η μείωση της μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας (65.1 GWh) από το ΥΗΕ της Πλατανόβρυσης. Από την άλλη η παραγωγή του Θησαυρού (423.9 GWh) δεν αλλάζει σημαντικά καθώς και σε αυτή την περίπτωση αποτελεί την κύρια πηγή παραγωγή ενέργειας αλλά και παροχής νερού για την κάλυψη των κατόντη αναγκών. Το μέσω ετήσιο όφελος από την παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε 31.6 εκατ. ευρώ. Στον πίνακα 7.7 φαίνεται η ετησία παραγόμενη ενέργεια. Στον πίνακα 7.8 παρουσιάζεται μέση μηνιαία παραγόμενη ενεργεία σε GWh με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται τους μήνες Ιουλίου και Αύγουστο.



Σχήμα 7.11: Ετησία παραγωγή ενεργείας από τα δυο ΥΗΕ σε GWh

Πίνακας: 7.7: Ετησία παραγόμενη ενέργεια από τα ΥΗΕ του Νέστου σε GWh

ΥΗΕ/Ετος	1992	1993	1994	1995	Σύνολο	Μ.Ο
Πλατανόβρυση	62.00	65.09	64.61	68.62	260.32	65.08
Θησαυρός	402.63	432.19	423.08	437.66	1695.56	423.89



Σχήμα 7.12: Μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα δυο ΥΗΕ σε GWh

Πίνακας: 7.8: Μέση μηνιαία παραγόμενη ενέργεια σε GWh

ΥΗΕ/Μήνας	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ
Πλατανόβρυση	12.41	8.78	2.03	0.76	0.26	0.64	0.27	4.64	4.77	8.31	9.63	12.56
Θησαυρός	49.28	40.11	27.91	25.05	24.40	25.91	26.50	34.54	32.50	41.73	44.73	51.24
Σύνολο	61.69	48.89	29.94	25.81	24.66	26.55	26.77	39.18	37.27	50.04	54.36	63.8

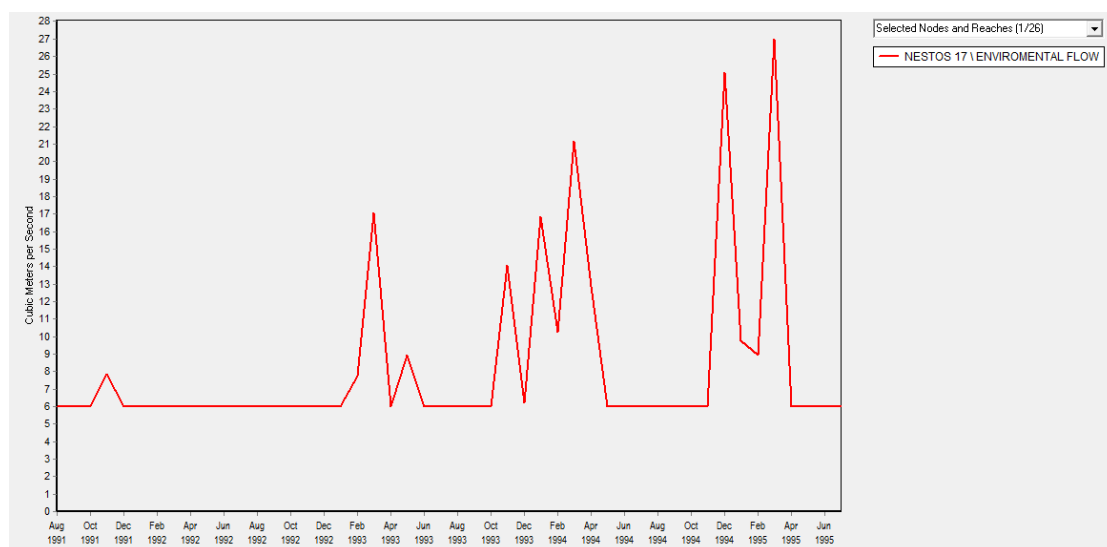
Στον πίνακα 7.9 παρουσιάζεται συνοπτικά η μεταβολή της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ανά μήνα αλλά και συνολικά. Παρατηρείται ότι καθόλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους το σενάριο B1 αποφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ενέργεια, η μεταβολή αυτή φτάνει το 28% τους θερινούς μήνες και σημειώνει μεγίστη μεταβολή τον μήνα Απρίλιο (63%).

Πίνακας: 7.9: Συγκριτικός πίνακας συνολικής παραγόμενης ενέργειας σε GWh

Σενάριο\Μήνας	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Σύνολο
B1	37.57	36.2	35.83	36.4	37.38	38.6	60.93	72.78	69.57	79.36	77.6	62.91	645.13
B2	29.94	25.81	24.66	26.55	26.77	39.18	37.27	50.04	54.36	63.8	61.69	48.89	488.96
Μεταβολή (%)	25%	40%	45%	37%	40%	-1%	63%	45%	28%	24%	26%	29%	32%

Όπως παρουσιάστηκε και στην περίπτωση του B1 οι απορροή κατάντη του φράγματος των Τοξοτών (σχήμα 7.13) αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα αξιολόγησης καθώς εκεί έχει τεθεί ο στόχος της περιβαλλοντικής παροχής. Μια άλλη ενδιαφέρουσα πληροφορία που μας δίνεται από το παρακάτω «σχήμα» είναι πόσο νερό «χάνεται» από το σύστημα το δεδομένο χρονικό βήμα. Η παροχή στην θέση αυτή για την περίπτωση B2 είναι ελαφρώς μεγαλύτερη και με περισσότερες αυξομειώσεις από εκείνη του

σεναρίου B1 πιθανόν λόγω του ότι απουσιάζει ο αναρυθμιστικός ταμιευτήρας του Τεμένους.



Σχήμα 7.13: Παροχή σε m³/s στη θέση κατάντη του φράγματος των Τοξοτών

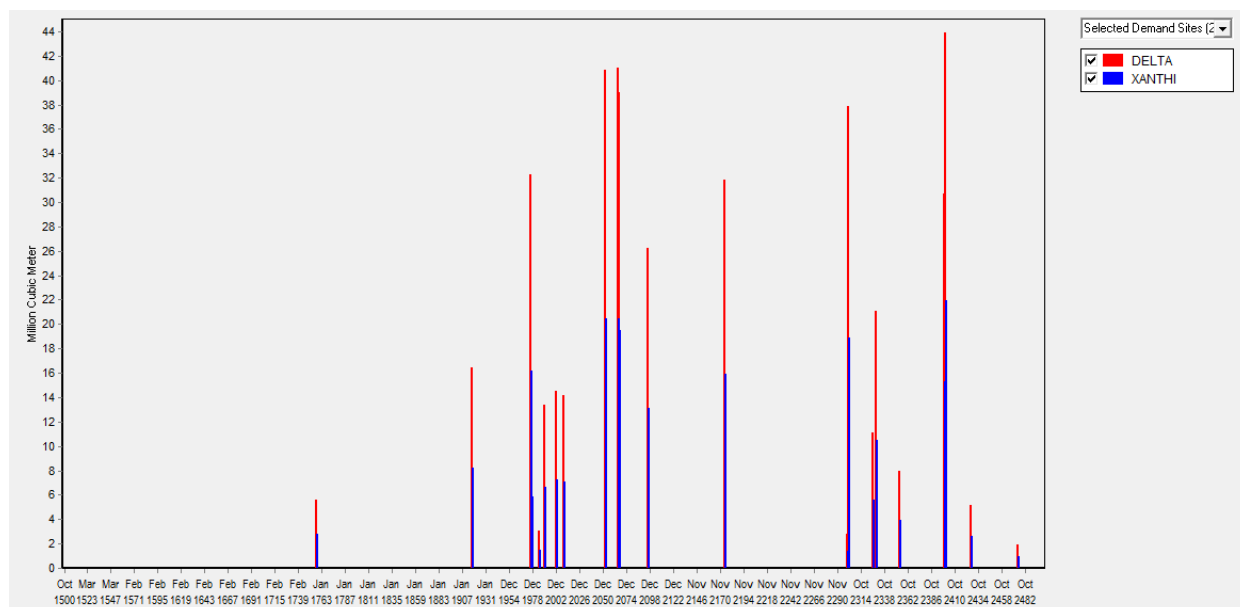
7.2 Έλεγχος απόκρισης των σεναρίων B1 και B2 υπό καθεστώς αβεβαιότητας

Για την διερεύνηση της αξιοπιστίας και της δυνατότητας απόκρισης του κανόνα λειτουργίας για τα σενάρια 1 και 2 χρησιμοποιήθηκαν συνθετικές χρονοσειρές 1000 ετών. Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μεταβλητές ελέγχου οι οποίες παρουσίαζαν αξιοπιστία 100% (πίνακας 7.1 και 7.4). Ο λόγος που δεν έγινε βελτιστοποίηση του συστήματος με βάση τις συνθετικές χρονοσειρές είναι καθαρά υπολογιστικός αφού το μοντέλο χρειαζόταν περίπου 20 λεπτά για μια πλήρη προσομοίωση. Αυτό αποτέλεσε απαγορευτικό παράγοντα λαμβάνοντας υπ' όψιν πως η βελτιστοποίηση διήρκεσε 400 γενιές με μέγεθος πληθυσμού 80 άτομα.

Οι υδρολογικές χρονοσειρές δημιουργήθηκαν από το σύνολο των ετών που ήταν διαθέσιμα και όχι μόνο από την περίοδο 1991-1995 για την οποία έγινε βελτιστοποίηση.

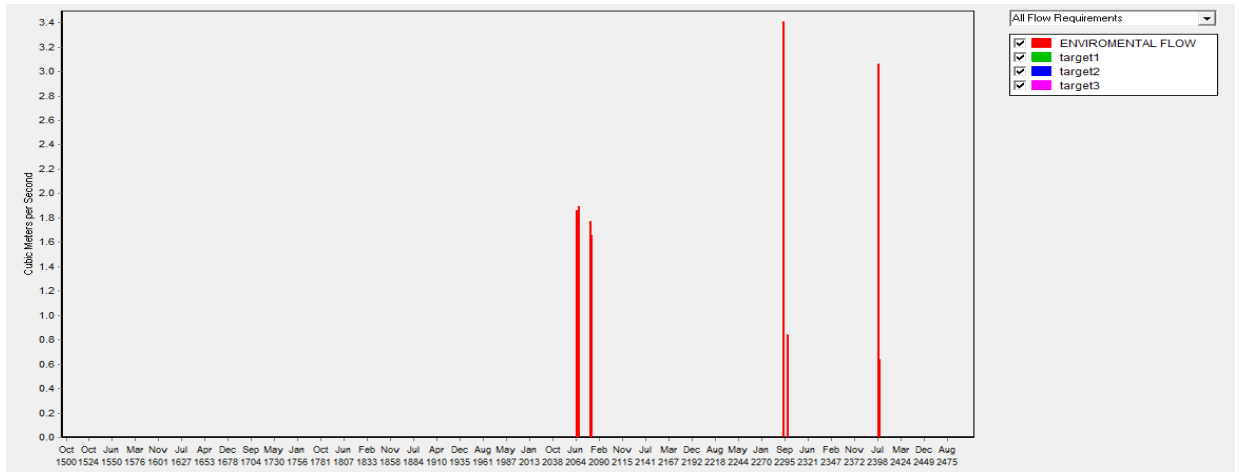
7.2.1 Έλεγχος απόκρισης του σεναρίου B1

Με την χρήση των στοχαστικών εισροών η αξιοπιστία του συστήματος για τις ανάγκες άρδευσης υπολογίζεται στο 98.6, στο σχήμα 7.14 παρουσιάζεται ποσοτικά το μηνιαίο έλλειμμα κάλυψης της ζήτησης για τις δυο αρδευόμενες εκτάσεις για την περίοδο 1000 ετών. Παρατηρείται πως οι περίοδοι που εμφανίζεται έλλειμμα ομαδοποιούνται.



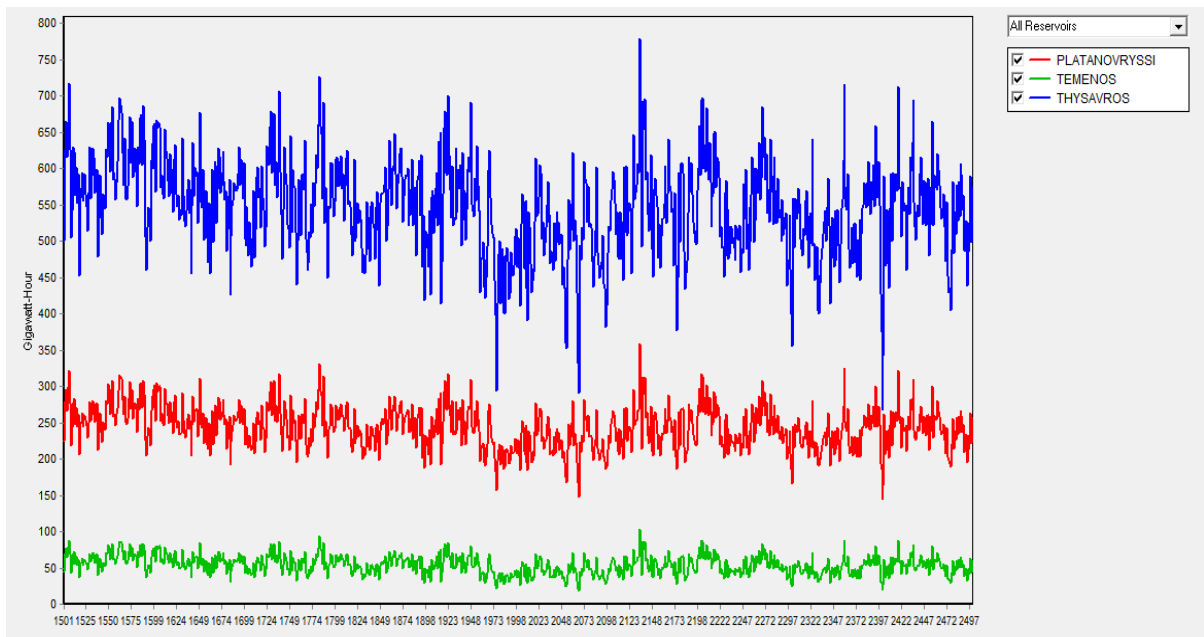
Σχήμα 7.14:Μηνιαίο έλλειμμα κάλυψης των κόμβων ζήτησης σε hm³

Στο σχήμα 7.15 παρουσιάζεται η αξιοπιστία κάλυψης της περιβαλλοντικής παροχής για την εξεταζόμενη περίοδο η όποια φτάνει το 99.4%. Οι περίοδοι κατά τις οποίες δεν καλύπτεται η περιβαλλοντική παροχή ταυτίζονται με τις περιόδους του σχήματος 7.14. Παρόλα αυτά η περιβαλλοντική παροχή καλύπτεται τους περισσότερους μήνες κατά την προσομοίωση. Το έλλειμμα δεν ξεπερνά τα 3.4 m³/s από τα 6 m³/s που είχε οριστεί η περιβαλλοντική παροχή.



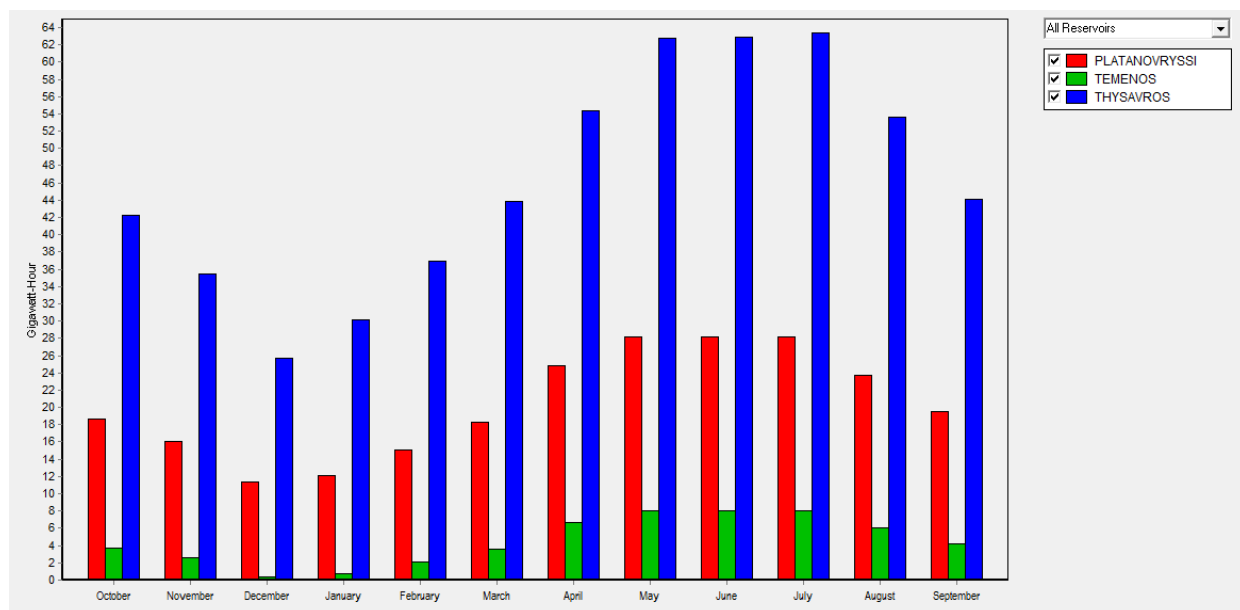
Σχήμα 7.15: Μηνιαίο έλλειμμα κάλυψης της περιβαλλοντικής παροχής σε hm³

Στο επόμενο σχήμα 7.16 φαίνεται η ετησία παραγόμενη ενέργεια από τα 3 ΥΗΕ σε GWh. Παρατηρούνται έντονες πτωτικές και ανοδικές τάσεις στο διάστημα των 1000 ετών πράγμα που πιθανόν οφείλεται στην δυναμική Hurst που ενσωματώνουν οι συνθετικές χρονοσειρές. Η μέση ετησία παραγωγή ενέργεια για το φράγμα του Θησαυρού είναι 555.7 GWh, για το φράγμα της Πλατανόβρυσης 244.1 GWh και για το φράγμα του Τεμένους 54.2 GWh. Το μέσω ετήσιο όφελος από την παραγόμενη ενέργεια ανέρχεται σε 58.25 εκατ. ευρώ. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας οφείλεται στο ότι οι συνθετικές χρονοσειρές δημιουργήθηκαν από όλα τα διαθέσιμα έτη, τα οποία παρουσίαζαν μεγαλύτερο μέσο όρο βροχοπτώσεων κάτι τέτοιο είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου όρου των απορροών.



Σχήμα 7.16: Ετησία παραγωγή ενέργειας από τα τρία ΥΗΕ

Στο σχήμα 7.17 απεικονίζεται η μέση μηνιαία παραγωγή ενέργεια από το συγκρότημα ΥΗΕ του ποταμού Νέστου. Η παραγόμενη αιχμή εντοπίζεται τους θερινούς μήνες. Η συνολική μέση παραγόμενη ενέργεια από τα 3 ΥΗΕ φτάνει τις 100 GWh τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιουλίου. Το γεγονός ότι η παράγωγή ενέργειας αυξάνει τους θερινούς μήνες είναι πολύ χρήσιμο διότι βοηθά στην κάλυψη των ενεργειακών αιχμών της χώρας. Στον πίνακα 7.9 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέσες μηνιαίες τιμές παράγωγης ενέργειας σε GWh.



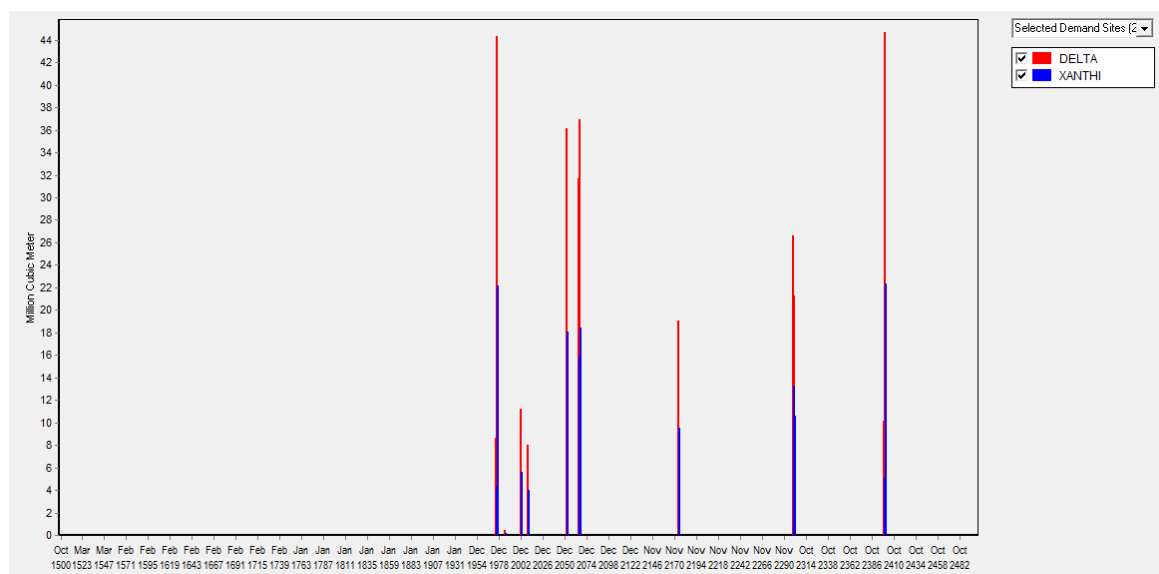
Σχήμα 7.17: Μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα τρία ΥΗΕ

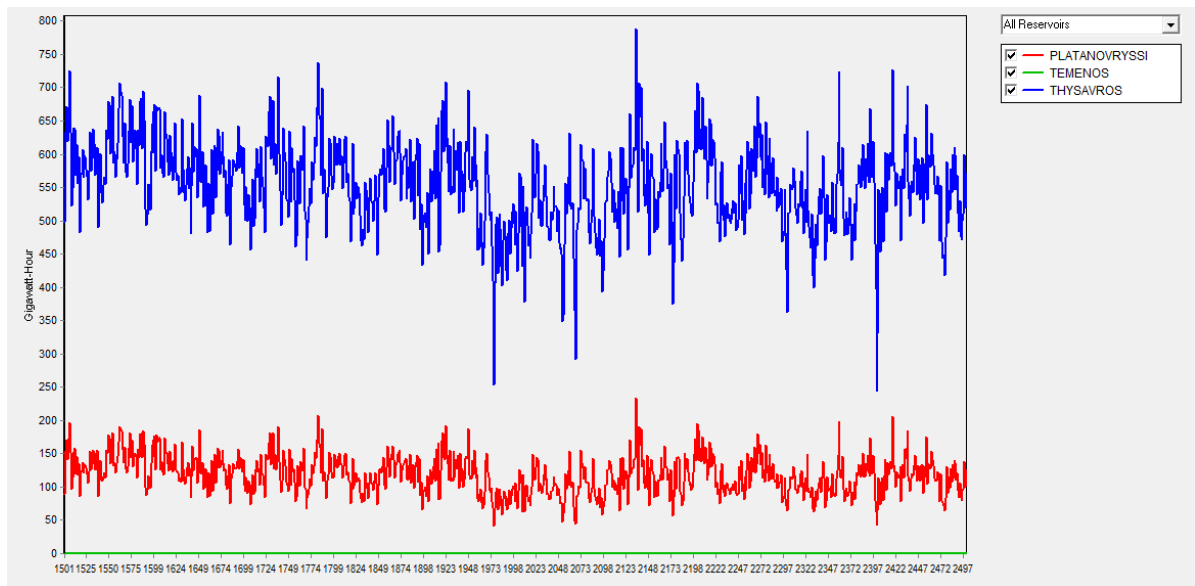
Πίνακας: 7.9: Μέση μηνιαία παραγόμενη ενέργεια σε GWh

ΥΗΕ/Μήνας	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Σύνολο
Πλατανόβρυση	18.65	16.03	11.31	12.13	15.04	18.32	24.89	28.22	28.14	28.12	23.70	19.53	244.08
Τέμενος	3.74	2.57	0.42	0.79	2.10	3.59	6.63	8.09	8.08	8.04	6.03	4.14	54.22
Θησαυρός	42.24	35.41	25.71	30.15	36.99	43.88	54.40	62.81	62.91	63.40	53.64	44.12	555.67
Σύνολο	64.64	54.02	37.43	43.08	54.14	65.78	85.92	99.12	99.12	99.56	83.38	67.79	853.98
Μ.Ο	21.55	18.01	12.48	14.36	18.05	21.93	28.64	33.04	33.04	33.19	27.79	22.60	#####

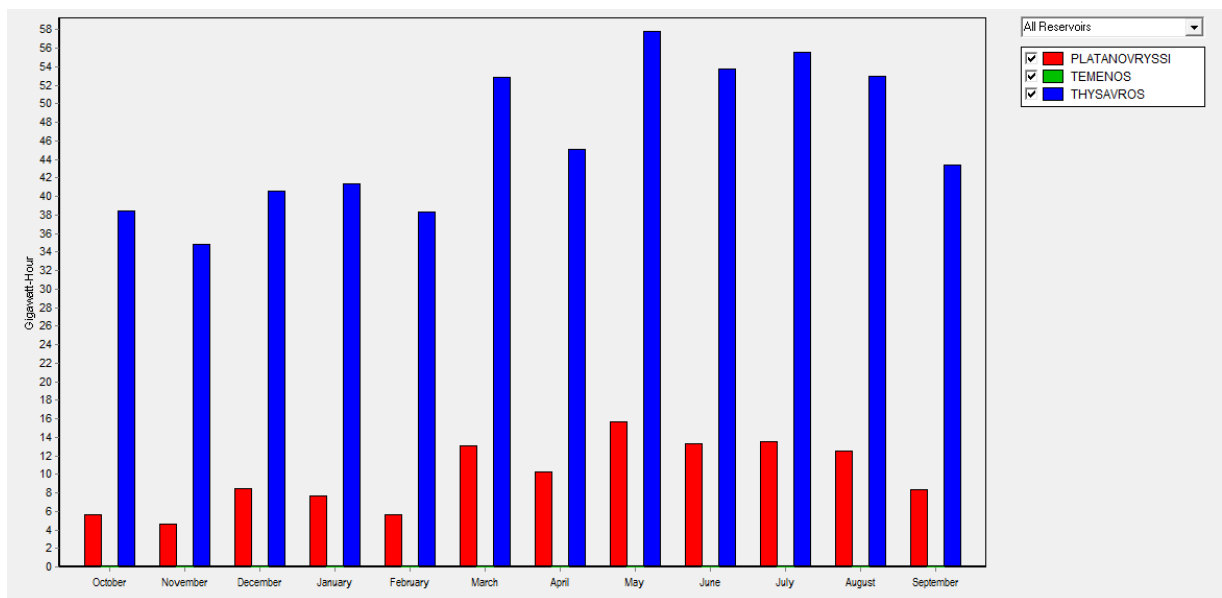
7.2.2 Έλεγχος απόκρισης του σεναρίου B2

Όσον αφορά το σενάριο 2 στο οποίο το ΥΗΕ του Τεμένους δεν συμπεριλαμβάνεται το σύστημα εξακολουθεί να διατηρεί υψηλή αξιοπιστία της τάξης του 99.6%. Στο παρακάτω σχήμα 7.18 παρουσιάζεται ποσοτικά η αστοχία του συστήματος να καλύψει τις ανάγκες άρδευσης. Και σε αυτή την περίπτωση οι αστοχίες ομαδοποιούνται και εντοπίζονται κύριος τον μήνα Αύγουστο, δηλαδή προς το τέλος της περιόδου άρδευσης. Από την άλλη μεριά η αξιοπιστία για την κάλυψη της περιβαλλοντικής παροχής φτάνει το 100% κατά την διάρκεια των χιλίων ετών.





Σχήμα 7.19: Ετήσια παραγωγή ενέργειας από το σύστημα των δυο ΥΗΕ



Σχήμα 7.20: Μέση μηνιαία παραγόμενη ενέργεια από τα δυο ΥΗΕ

Πίνακας: 7.10: Μέση μηνιαία παραγόμενη ενέργεια σε GWh

ΥΗΕ/Μήνας	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Σύνολο
Πλατανόβρυση	5.62	4.63	8.45	7.63	5.66	13.03	10.30	15.70	13.28	13.57	12.53	8.32	118.71
Θησαυρός	38.48	34.81	40.57	41.34	38.38	52.84	45.01	57.83	53.76	55.55	52.91	43.40	554.88
Σύνολο	44.09	39.44	49.02	48.97	44.04	65.87	55.31	73.53	67.04	69.12	65.44	51.71	673.59
Μ.Ο	22.05	19.72	24.51	24.49	22.02	32.94	27.66	36.76	33.52	34.56	32.72	25.86	#####

7.2.3 Σύγκριση των σεναριων B1 και B2

Γενικά η αξιοπιστία του συστήματος όσον αφορά την κάλυψη της ζήτησης διατηρείται σε υψηλό επίπεδα και στις δυο περιπτώσεις B1 και B2 πάνω από το επίπεδο του 99%. Η αξιοπιστία κάλυψης της περιβαλλοντικής παροχής είναι και στις δυο διατάξεις 100%. Από την άλλη παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στην παραγόμενη ενέργεια από τα ΥΗΕ και αυτό λόγω της απουσία του φράγματος του Τεμένους στο σενάριο 2 (πίνακας 7.11). Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται πως οι κανόνες λειτουργίας που εφαρμόστηκαν για τον έλεγχο της απόκρισης του συστήματος πρόεκυψαν από την βελτιστοποίηση του συστήματος για τα έτη 1991-1995 και αφορούσαν λύσεις με αξιοπιστία 100%.

Πίνακας: 7.11: Συγκριτικός πίνακας συνολικής παραγόμενης ενέργειας σε GWh

Σενάριο\Μήνας	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Σύνολο
B1	64.64	54.02	37.43	43.08	54.14	65.78	85.92	99.12	99.12	99.56	83.38	67.79	853.98
B2	44.09	39.44	49.02	48.97	44.04	65.87	55.31	73.53	67.04	69.12	65.44	51.71	673.59
Μεταβολή (%)	47%	37%	-24%	-12%	23%	0%	55%	35%	48%	44%	27%	31%	27%

Με βάση τον παραπάνω πίνακα 7.11 παρατηρείται μια αύξηση 27% της μέσης παραγόμενης για το υδροηλεκτρικό συγκρότημα του πόταμου Νέστου κατά το σενάριο όπου το ΥΗΕ του Τεμένους λαμβάνεται υπόψη, κάτι τέτοιο σημαίνει μια μέση αύξηση στα ετησία έσοδα από την παράγωγη ενέργειας της τάξης των 15 εκατ. ευρώ. Επίσης η παραγόμενη ενέργεια του σεναρίου B1 τους θερινούς μήνες είναι αυξημένη περίπου κατά 40% έναντι του σεναρίου B2. Συμφώνα με τον παραπάνω πίνακα η περίπτωση B1 παρουσιάζει μια τάση για παράγωγη ενέργειας τους θερινούς ενώ τους χειμερινούς μήνες φαίνεται να παράγει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με το B2.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης παρουσιάζονται συνοπτικά στα σχήματα 7.1, 7.2 και 7.3 όπου απεικονίζονται τα μέτωπα Pareto που πρόεκυψαν από την βελτιστοποίηση του συστήματος για το διάστημα 1991-1995. Στον πίνακα 7.8 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα σενάρια B1 και B2 που πρόεκυψαν από την εφαρμογή των μεταβλητών έλεγχου βελτιστοποίησης παρουσιάζαν αξιοπιστία 100%. Στον πίνακα 7.11 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος με την χρήση συνθετικών χρονοσειρών 1000 ετών που δημιουργήθηκαν με το λογισμικό Κασταλία. Με βάση τα στοιχεία αυτά καθώς και την ανάλυση που προηγήθηκε μπορούν να εξαρθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι αρδευτικοί και περιβαλλοντικοί στόχοι του υδατικού συστήματος ικανοποιούνται με πρακτικά μηδενικές αστοχίες στην περίπτωση που επιλεχθούν οι κατάλληλες λύσεις από το μέτωπο Pareto και αυτό διότι το σύστημα διαθέτει επαρκή ποσότητα νερού για την κάλυψη των αναγκών η οποίες ταυτόχρονα κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα.
- Με βάση την σύγκριση των σεναρίων A1 και A2 αλλά και των B1 και B2 προκύπτει πως η κατασκευή του φράγματος του Τεμένους συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της παραγόμενης ενεργείας από τα ΥΗΕ ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει την αναρρύθμιση του συστήματος για την κάλυψη των αναγκών σε νερό.
- Στην σύγκριση μεταξύ των Pareto B1 και B2 που παρουσιάζονται στο σχήμα 7.3 είναι εμφανής η συνεισφορά του φράγματος του Τεμένους στην παράγωγη ενεργείας, επιφέροντας μετατόπιση του Pareto που οδηγεί σε πλεόνασμα εσόδων κατά μέσο όρο 10 εκατ. ευρώ ανά έτος.
- Σημαντική είναι η βελτίωση που παρουσιάζεται στο σενάριο 1 (συμπεριλαμβάνει το φράγμα του Τεμένους) όταν χρησιμοποιείται εποχικός συντελεστής για τον διαχωρισμό μεταξύ αρδευομένης περιόδου και μη, διότι με αυτόν τον τρόπο κατά τους χειμερινούς μήνες αποθηκεύεται περισσότερο νερό στους ταμιευτήρες το οποίο οδηγεί στην αύξηση του ύψους πτώσης (αύξηση παραγόμενης ενεργείας) και ταυτόχρονα στην αύξηση των αποθεμάτων για την κάλυψη των αρδευτικών και περιβαλλοντικών αναγκών κατά τους θερινούς μήνες.
- Όσον αφορά το σενάριο 2 η χρήση εποχικού συντελεστή δεν αποφέρει ιδιαίτερη βελτίωση στο εξαγόμενα αποτελέσματα, πιθανόν λόγω της έλλειψης του αναρρυθμιστικού φράγματος του Τεμένους.
- Επίσης οι μεταβλητές έλεγχου που αφορούν την επιστροφή νερού μέσω του συστήματος άντλησης ταμίευσης φαίνεται να μην επηρεάζουν την σταθερότητα του συστήματος και την διατήρηση της αξιοπιστίας αφού σε κάθε περίπτωση η βελτιστοποίηση κατέληξε σε

υψηλές τιμές, κάτι τέτοιο πιθανόν οφείλεται στο ότι μέσω του συστήματος άντλησης ταμίευσης το νερό δεν χάνεται από το σύστημα άλλα «ανακυκλώνεται».

- Τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος με συνθετικές χρονοσειρές 1000 ετών καταδεικνύουν και αυτά τη σημασία του φράγματος του Τεμένους στην παράγωγή ενέργειας. Το σχήμα B1 παρουσιάζει μέση ετησία αύξηση της παραγόμενης ενέργειας της τάξης του 27% έναντι 32% που πρόεκυψε από την προσομοίωση του συστήματος για το διάστημα 1991-1995.
- Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως οι λύσεις που πρόεκυψαν από τη βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος για την περίοδο 1991-1995 ενδέχεται να είναι υποβέλτιστες αφού πρόκειται για μια περίοδο με υδρολογικά χαρακτηριστικά δυσμενεστέρα από τα συνήθη της περιοχής.

8.2 Γενικά συμπεράσματα

Επιχειρώντας μια γενική αξιολόγηση του μαθηματικού μοντέλου αλλά και των υπολογιστικών εργαλείων που αναπτύχτηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μπορούν να εξαρθούν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα.

- Η βελτιστοποίηση προβλημάτων διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων φαίνεται να είναι εφικτή με την χρήση λίγων παραμέτρων.
- Το WEAP21 αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση υδροσυστημάτων και την δημιουργία υποθετικών σεναρίων.
- Το περιβάλλον εργασίας του WEAP21 διακρίνεται για την φιλικότητα προς τον χρήστη και των δυνατοτήτων παραμετροποίησης.
- Η σύζευξη του WEAP21 με το λογισμικό MATLAB διευρύνει τις δυνατότητες του προγράμματος αλλά και του χρήστη, προσφέροντας ισχυρά υπολογιστικά εργαλεία ανάλυσης και όχι μονό, όπως το Global Optimization Toolbox.
- Με την χρήση των δυο προγραμμάτων επιτευχθήκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης, πράγμα που ήταν αδύνατο με την ενσωματωμένη λειτουργία του WEAP.
- Ο σχεδιασμός του λογισμικού WEAP21 προσφέρει εύκολη προσαρμογή του μοντέλου σε μελλοντικές αναθεωρήσεις και απαιτήσεις.
- Το κύριο μειονέκτημα του WEAP21 σχετίζεται με την ταχύτητα προσομοίωσης. Για την προσομοίωση της περιόδου 1991-1994 απαιτούνταν περίπου 6 δευτερόλεπτα, ενώ για την προσομοίωση 1000 ετών συνθετικών χρονοσειρών περίπου 20 λεπτά. Αυτός ήταν και ο λόγος που δεν χρησιμοποιήθηκαν συνθετικές χρονοσειρές για την βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος.

8.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Μερικές ενδιαφέρουσες προτάσεις που αφορούν την περαιτέρω ανάλυση του υδροσυστήματος του Νέστου ή την εξέλιξη και βελτίωση της παρούσας εργασίας είναι οι έξης:

- Σημαντική βελτίωση σε όλα τα παραπάνω θα αποτελούσε η παραλληλοποίηση του συστήματος, η χρήση της ισχύς πολλαπλών υπολογιστών θα οδηγούσε σε μείωση του χρόνου προσομοίωσης και θα έκανε εφικτή την χρήση συνθετικών χρονοσειρών για την βελτιστοποίηση του.
- Σύγκριση της προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του συστήματος των ταμιευτήρων με κάποιο άλλο λογισμικό ή συνδυασμό τους όπως πχ τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ ή το HEC-Resim
- Χρήσιμο θα ήταν να ξαναγίνει βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση με την χρήση μεγαλύτερων ιστορικών χρονοσειρών (εάν υπάρχουν) ή με την χρήση συνθετικών μεγάλου μήκους.
- Χρήση καμπύλης ζήτησης ενεργείας στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης η οποία θα διαφοροποιούσε την παράγωγη ενεργείας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κάλυψη των αιχμών κατά την διάρκεια του έτους.
- Διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος με την χρήση πολυωνυμικού κανόνα λειτουργίας.

Ειδικότερα το λογισμικό WEAP21 διαθέτει προοπτικές βελτίωσης και επέκτασης. Μερικές από αυτές είναι:

- Μια προσθήκη που θα ήταν ενδεχόμενος χρήσιμη και θα διευκόλυνε την βελτιστοποίηση συστημάτων ταμιευτήρων στο WEAP21 είναι η εισαγωγή παραμέτρου που θα επέτρεπε την επιλογή της επιθυμητής εκροής από τον κάθε ταμιευτήρα ξεχωριστά.
- Ο διαχωρισμός της παραγόμενης ενεργείας σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα θα διευκόλυνε τον καθορισμό βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής.
- Η ενσωμάτωση στο WEAP21 εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τόσο σε ζητήματα βαθμονόμησης αλλά και βελτιστοποίησης του συστήματος.
- Μείωση του χρόνου προσομοίωσης.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

1. **Π.Δ. 51/2007** "Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2000/60/ΕΚ «για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000" (ΦΕΚ 54Α/08-03-2007).
2. **Ν. 3199/2003** "Προστασία και διαχείριση των υδάτων-Εναρμόνιση με την Οδηγία
3. **2000/60/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000" (ΦΕΚ 280Α/09-12-2003).
4. **Ν. 1739/87** "Διαχείριση των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις" (ΦΕΚ 201Α/20-11-87).

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γεωργοπουλος Ε., Λυκοθανασης Σ. Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Εργαστήριο Αναγνώρισης Προτύπων, Πάτρα 1999.
2. Ευστρατιάδης, Α., Καραβοκυρός, Γ., Κουτσογιάννης, Δ. Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», 2007.
3. Ελευθεριάδου Ελένη και Μυλόπουλος Α. Γιάννης, Εξομάλυνση αντιθέσεων και συγκρούσεων στη διαχείριση διεθνών υδάτων: Εφαρμογή στη λεκάνη του Νέστου, HELECO, 1995.
4. Ευστρατιάδης, Α. Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ. Αθήνα, 2008.
5. Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης Δ. και Κοζάνης Σ., Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών «Κασταλία», 2005.
6. Ευστρατιάδης, Α., Μαμάσης, Ν., Κουτσογιάννης, Δ. Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Δ.Π.Μ.Σ. "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.

7. Ζορμπά, Α. Διαχείριση Υδατικών Πόρων – Εισαγωγικά στοιχεία από τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων, Α.Π.Θ., τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Θεσ/νικη 2003.
8. Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 2, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
9. Κουτσογιάννης, Δ., Σημειώσεις για το μάθημα Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εθνική Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
10. Κουτσογιάννης, Δ. Νερό και αστική ανάπτυξη, σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Δ.Π.Μ.Σ. "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", Εθνική Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
11. Κουτσογιάννης, Δ. Έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων, Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Δ.Π.Μ.Σ. "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", Εθνική Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
12. Κουτσογιάννης, Δ. Νερό και ενέργεια, Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Δ.Π.Μ.Σ. "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", ΕΜΠ, Αθήνα, 2007.
13. Κυριαζής, Δ., Μυλόπουλος, Ν. κ.α. , Γνωμοδότηση της Κοινωνικής και Οικονομικής Επιτροπής της Ελλάδας πάνω στο θέμα: Η διαχείριση των Υδατικών Πόρων, 2002.
14. Λυκοθανάσης, Σ. Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, (Τόμος Γ'). Θεματική Ενότητα: Τεχνητή Νοημοσύνη και Εφαρμογές, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πάτρα, 2001.
15. Μακρόπουλος, Χ., Σημειώσεις για το μάθημα Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων, Εθνική Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
16. Μαρμασης Ν., Κατσιρη Α., Στεφανακος Ι., Τσουκαλα Β., Σημειώσεις για το μάθημα Εισαγωγή στην ενεργειακη τεχνολογια, Εθνική Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
17. Μιμίκου, Μ.Α. και Μπαλτάς, Ε. Τεχνική Υδρολογία, 5^η έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.
18. Μυλόπουλος, Ν., Σημειώσεις για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2001.
19. Ξανθόπουλος, Θ. και Κουτσογιάννης, Δ. Υδατικοί Πόροι, Τεχνολογία & Πληροφορική, Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια: Εκδοτική Αθηνών, 1997.
20. Παναγοπουλος, Ι. Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδατικού περιβάλλοντος από μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ. Αθήνα, 2010.
21. Παρασκευόπουλος – ΠΑΝΓΑΙΑ, Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την ευρύτερη περιοχή της ελληνικής λεκάνης του ποταμού Νέστου, 1994.

22. Πεταλά, Ζ. Βελτιστοποίηση της Διαχείρισης Υπόγειων Υδοφορέων με τη Χρήση Γενετικών Αλγόριθμων. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη 2004.
23. Μυλόπουλος Α.Γ., Κολοκυθά Ε., Παπαχρήστου Ε., Νταρακάς Ε. Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πορών στη διακρατική λεκάνη του ποταμού Νέστου, HELECO, πρακτικά συνεδρίου, 2003.
24. Σιμόπουλος Δ. Βελτιστός βραχυπροθεσμός προγραμματισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο της προσομοιωμένης ανοπτησης. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολογικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2006.
25. Σουλίου Γ. Εκμετάλλευση και διαχείριση υπογείου νερού, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, 2009.
26. Στεφανάκος Ι., «Το υδροδυναμικό της Ελλάδας», Σημειώσεις για το μάθημα Υδροηλεκτρικά έργα, Εθνική Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
27. Τσιγκάκος Π., Ενεργειακή αξιοποίηση υδροηλεκτρικών έργων ποταμού Νέστου, Προσκομίστηκε από τη Διεύθυνση Γεωλογίας – Υδρολογίας, Τμήμα Υδρολογίας, Νομαρχιακό Διαμέρισμα Δράμας, 1994.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adventure Zone, Διεθνές Έτος Νερών, Adventure Zone, 13 Μαΐου, 2003.
2. Chang L., Guiding rational reservoir flood operation using penalty-type genetic algorithm, Journal of Hydrology, Vol. 354, pp. 65-74, 2008.
3. Chen, L., Real time genetic algorithm optimization of long term reservoir operation. Journal of the American Water Resources Association 39(5): 1157-1165, 2003
4. Eom, S. B., Lee, S. M., Kim E. B., and Somarajan, C. A survey of decision support system applications (1994-1998), Journal of Operational Research, 1998.
5. Farmani, R., Savic, D.A. and Walters, G.A. Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. Eng Optim, 37(2), 167-83, 2005.
6. French, S. Decision Analysis and Decision Support Systems, 3rd draft edition, 2000.
7. Goldeberg D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison, Wesley publishing company : Reading, Massachusetts, 1989.
8. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. 1975.
9. Kirkpatrick, S., Gelatt C. Jr., Vecchi, M., Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol. 220, pp. 671-680, 1983.

10. Kim, T. J. -H. Heo, D. -H Bae and J. -H. Kim, Single Reservoir Operating Rules for a Year Using Multiobjective Genetic Algorithm, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 10, No. 2, 2008, pp.163-179, 2008.
11. Koutsoyiannis, D., and A. Efstratiadis, Castalia: A system for stochastic simulation of hydrologic variables, 6 pages, Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering – National Technical University of Athens, Athens, February 2002.
12. Kuczera, G., and E. Parent, Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm, *Journal of Hydrology*, 211, 69-85, 1998.
13. Makropoulos, C.K. and Butler, D. A neurofuzzy spatial decision support system for pipe replacement prioritisation. *Urban Water Journal* 2(3), 141-150, 2005.
14. Makropoulos C., Butler, D. and Maksimovic, C. Fuzzy Logic Spatial Decision Support System for Urban Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(1), 69-78, 2003.
15. Makropoulos C., Butler, D. and Maksimovic, C. Building Decision Support Systems based on Fuzzy Inference. *Practical Hydroinformatics, Water Science and Technology Library*, Vol. 68, pp. 215-228, 2008.
16. Makropoulos, C., and D. Butler. A multi-objective evolutionary programming approach to the “object location” spatial analysis and optimisation problem within the urban water management domain. *Civil and Environmental Systems*, 22(2), pp. 85-107, 2005.
17. Metropolis, N. A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, E. Teller, Equations of State Calculations by Fast Computing Machines, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
18. Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, (3rd ed.), Springer- Verlag, 1996.
19. Oliveira, R. and Loucks, D. P., Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research* 33(4): 839-852, 1997
20. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290, 1970.
21. Perlman, H., Makropoulos, C., and Koutsoyiannis, D. *The water cycle*, United States Geological Survey, 2005.
22. Preis A., Ostfeld A., A coupled model tree–genetic algorithm scheme for flow and water quality predictions in watersheds, *Journal of Hydrology*, Vol.349, pp. 363-375, 2007.
23. Pierro F., Khu S., Savic D., Berardi L., Efficient multi-objective optimal design of water distribution networks on a budget of simulations using hybrid algorithms, *Journal of Environmental Modeling and Software*, Vol. 24, pp. 203-213, 2009.
24. Ruzczyk. H., Schubert. I., A. Stoyanovska, Local Response to Globalization: MESTA Region, Bulgaria. InFocus Programme on Boosting

- Employment through Small Enterprise Development, Job Creation and Enterprise Department – International Labor Office, Geneva, 2001.
25. Sage, A. P. Associates systems for decision support, Information and Decision Technologies, 1993.
 26. SEI, WEAP (Water Evaluation and Planning): User Guide for WEAP21. Stockholm Environmental Institute, 2010.
 27. Turban, E., and Aronson, J. Decision Support Systems and Intelligent Systems, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
 28. Van Laarhoven, P. J. M., and E. H. L. Aarts, Simulated Annealing: Theory and Applications, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1987.
 29. Watkins, D. W., and McKinney, D. C. Recent developments associated with decision support systems in water resources, U.S. National Report to International Union of geodesy and Geophysics 1991-1994, Reviews of Geophysics, Vol. 33 Supplement, 1995.
 30. Wang Q., Using genetic algorithms to optimise model parameters, Journal of Environmental Modeling and Software, Vol.12, pp.27-34, 1997.
 31. Winston, W. L. Operations Research, Applications and Algorithms, 3rd edition, Duxbury, Belmont, 1994.
 32. Yates, D., J. Sieber, J., D. Purkey, and A. Huber-Lee. WEAP21: A Demand, priority, and preference driver water planning model. Part 1: Model Characteristics. Water International 30, 2005.
 33. YDE, Nestos diversion dam, Macedonia, Greece. Basis of design on the Nestos diversion dam. Knappen-Tippetts-Abbott-McCarthy Engineers, New York, Library of Technical Chamber of Greece, Τάξ. αρ.: 627.8 Β - (045366), 1954.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

1. Κώδικας προγραμματισμού σε περιβάλλον MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την Βαθμονόμηση του μοντέλου

```
function [nash]=calibEP (z)

% Σε αυτό το σημείο μετατρέπονται οι μεταβλητές σε μορφή αναγνώσιμη από
% το WEAP21, δηλαδή στην πρώτη στήλη τοποθετείται το έτος, στη δεύτερη
% ο μηνάς και στην τρίτη η τιμή της μεταβλητής.
% Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 19, οι z(1)...z(19)

byear=1991;
eyear=1995;
time=eyear-byear+1;
a1=zeros(time*12,3);
a2=zeros(time*12,3);
a3=zeros(time*12,3);
a4=zeros(time*12,3);
a5=zeros(time*12,3);
a6=zeros(time*12,3);
a7=zeros(time*12,3);
a8=zeros(time*12,3);

k=0;
y=byear;
for i=1:time

    for j=1:12
a1(j+k,2)=j;
a1(j+k,3)=z(1);
a1(j+k,1)=y;
a2(j+k,2)=j;
a2(j+k,3)=z(2);
a2(j+k,1)=y;
a3(j+k,2)=j;
a3(j+k,3)=z(3);
a3(j+k,1)=y;
a4(j+k,2)=j;
a4(j+k,3)=z(4);
a4(j+k,1)=y;
a5(j+k,2)=j;
a5(j+k,3)=z(5);
a5(j+k,1)=y;
a6(j+k,2)=j;
a6(j+k,3)=z(6);
a6(j+k,1)=y;
a7(j+k,2)=j;
a7(j+k,3)=z(7);
```

```

a7(j+k,1)=y;

a8(j+k,1)=y;
a8(j+k,2)=j;

if (j==1)
    a8(j+k,3)=z(8);
end
if (j==2)
    a8(j+k,3)=z(9);
end
if (j==3)
    a8(j+k,3)=z(10);
end
if (j==4)
    a8(j+k,3)=z(11);
end
if (j==5)
    a8(j+k,3)=z(12);
end
if (j==6)
    a8(j+k,3)=z(13);
end
if (j==7)
    a8(j+k,3)=z(14);
end
if (j==8)
    a8(j+k,3)=z(15);
end
if (j==9)
    a8(j+k,3)=z(16);
end
if (j==10)
    a8(j+k,3)=z(17);
end
if (j==11)
    a8(j+k,3)=z(18);
end
if (j==12)
    a8(j+k,3)=z(19);
end
end
    y=y+1;
    k=i*12;
end

```

```

% Οι μεταβλητές εγγράφονται σε αρχεία τύπου .csv

csvwrite('c:\weap\kc1.csv',a1);
csvwrite('c:\weap\kc2.csv',a2);
csvwrite('c:\weap\kc3.csv',a3);
csvwrite('c:\weap\kc4.csv',a4);
csvwrite('c:\weap\kc5.csv',a5);
csvwrite('c:\weap\kc6.csv',a6);
csvwrite('c:\weap\kc7.csv',a7);
csvwrite('c:\weap\efp.csv',a8);

% Σύνδεση COM-API με το WEAP21
% Ενεργοποίηση της περιοχής μελέτης και υπολογισμός

W=actxserver('WEAP.WEAPApplication');
W.autocalc=true;
W.ActiveArea = 'nestos';
W.ActiveScenario = 'Reference';
W.Calculate

% Εκτέλεση script για την εξαγωγή αποτελεσμάτων

!C:\WEAP\calib.vbs

% Εισαγωγή των αποτελεσμάτων στο MATLAB

flowm=importdata('c:\WEAP\flowTModel.csv');
flowg=importdata('C:\WEAP\temenosOBSERVED.csv');

% Εκτέλεση απαραίτητων πράξεων για των υπολογισμό της
% συνάρτησης στόχου

flogav=sum(flowg)/length(flowg);
S1=zeros(length(flowg),1);
S2=zeros(length(flowg),1);

for i=1:length(flowg)
    S1(i)=((flowg(i)-flowm(i))^2);
end;

for i=1:length(flowg)
    S2(i)=((flowg(i)-flogav)^2);
end;
nash=(1-sum(S1)/sum(S2))*(-1);
end

```

Περιγραφή του script Calib.VBS

```
% Εκτέλεση του προγράμματος WEAP21 ως COM server

Set WEAP = CreateObject("WEAP.WEAPApplication")

% This is for plotting errors! You need it for checking the code!

WEAP.Verbose = 1 ' 0 = no dialogs, 1 = errors only, 2 = questions and errors,
3 = warnings, questions and errors, 4 = all dialogs
WEAP.Logfile ="C:\WEAP\WeapErrors.txt" ' log all errors and warnings to this
text file

% Ενεργοποίηση του επιθυμητού σεναρίου

WEAP.ActiveArea = "nestos"
WEAP.ActiveScenario = "Current Accounts"

Set objFSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

% Σε αυτό το σημείο διαγράφονται όλα τα προηγούμενα αρχεία που
δημιουργήθηκαν με σκοπό την εγγραφή νέων με το ίδιο όνομα

objFSO.deletefile("C:\WEAP\flowTModel.csv")

% Εξαγωγή και εγγραφή των αποτελεσμάτων σε αρχείο τύπου .csv

Dim Timesteps
Dim Years

for Years = 1992 to 1995

For Timesteps = 1 to 12
CALL WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\flowTModel.csv",WEAP.Branch("Supply
and Resources\River\NESTOS\Reaches\Below Catchment Inflow Node
7").Variables("Streamflow").Value(years,timesteps)/3600/24/30)

NEXT
NEXT
```


2. Κώδικας προγραμματισμού σε περιβάλλον MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του συστήματος

```
function [x]=mobj(z)

% Σε αυτό το σημείο μετατρέπονται οι μεταβλητές σε μορφή αναγνώσιμη από
% το WEAP21, δηλαδή στην πρώτη στήλη τοποθετείται το έτος, στη
% δεύτερη ο μήνας και στην τρίτη η τιμή της μεταβλητής
% Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 6, οι z(1)...z(6)

byear=1991;
eyear=1995;
time=eyear-byear+1;
a=zeros(time,3);
b=zeros(time,3);
c=zeros(time,3);
d=zeros(time,3);
e=zeros(time,3);

f=zeros(time,3);

k=0;
y=byear;
for i=1:time
    for j=1:12
        a(j+k,2)=j;
        a(j+k,3)=z(1);
        a(j+k,1)=y;
        b(j+k,2)=j;
        b(j+k,3)=z(2);
        b(j+k,1)=y;
        c(j+k,2)=j;
        c(j+k,3)=z(3);
        c(j+k,1)=y;
        d(j+k,2)=j;
        d(j+k,3)=z(4);
        d(j+k,1)=y;
        e(j+k,2)=j;
        e(j+k,3)=z(5);
        e(j+k,1)=y;

        f(j+k,2)=j;
        f(j+k,3)=z(6);
        f(j+k,1)=y;
    end
    y=y+1;
    k=i*12;
end
```

```

% Οι μεταβλητές εγγράφονται σε αρχεία τύπου .csv

csvwrite('c:\weap\optimization\t1.csv',a);
csvwrite('c:\weap\optimization\t2.csv',b);
csvwrite('c:\weap\optimization\t3.csv',c);
csvwrite('c:\weap\optimization\rp.csv',d);
csvwrite('c:\weap\optimization\rt.csv',e);

csvwrite('c:\weap\optimization\minus.csv',f);

% Σύνδεση COM-API με το WEAP21
% Ενεργοποίηση της περιοχής μελέτης και υπολογισμός

W=actxserver('WEAP.WEAPApplication');
%W.autocalc=true;
% W.Visible =false;
W.ActiveArea = 'nestos1';
W.ActiveScenario = 'Current accounts';

W.Calculate ;

% Εκτέλεση κάποιον script για την εξαγωγή αποτελεσμάτων

!C:\WEAP\optimization\Optim.vbs;

% Εισαγωγή των αποτελεσμάτων στο MATLAB

hydropower1=importdata('c:\WEAP\hydropower1.csv');
hydropower2=importdata('c:\WEAP\hydropower2.csv');
hydropower3=importdata('c:\WEAP\hydropower3.csv');

PumpedPlatano=importdata('C:\WEAP\optimization\PumpedPlatano.csv');
PumpedTemenos=importdata('C:\WEAP\optimization\PumpedTemenos.csv');

reliab1=importdata('c:\WEAP\reliabilityDelta.csv');
reliab2=importdata('c:\WEAP\reliabilityXanthi.csv');
reliab3=importdata('c:\WEAP\reliabilityEnv.csv');

% Εκτέλεση απαραίτητων πράξεων για τον υπολογισμό της
% συνάρτησης στόχου

reliability=-(mean(reliab1)*0.25+mean(reliab2)*0.25+mean(reliab3)*0.5);

hydroplus= sum(hydropower1+hydropower2+hydropower3);
hydrominus= sum(PumpedPlatano+PumpedTemenos);
hydro=-((75100*hydroplus)-(30000*hydrominus));

x(1)=hydro;
x(2)=reliability;
end

```

Περιγραφή του script optim.VBS

```
% Εκτέλεση του προγράμματος WEAP21 ως COM server

Set WEAP = CreateObject("WEAP.WEAPApplication")

% This is for plotting errors! You need it for checking the code!

WEAP.Verbose = 1 ' 0 = no dialogs, 1 = errors only, 2 = questions and errors,
3 = warnings, questions and errors, 4 = all dialogs

WEAP.Logfile ="C:\WEAP\WeapErrors.txt" ' log all errors and warnings to this
text file

% Ενεργοποίηση του επιθυμητού σεναρίου στο WEAP21

WEAP.ActiveArea = "nestos"

WEAP.ActiveScenario = "Current Accounts"

% Σε αυτό το σημείο διαγράφονται όλα τα προηγούμενα αρχεία που
δημιουργήθηκαν με σκοπό την εγγραφή νέων με το ίδιο όνομα

Set objFSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\optimization\PumpedTemenos.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\optimization\PumpedPlatano.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\hydropower1.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\hydropower2.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\hydropower3.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\reliabilityDelta.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\reliabilityXanthi.csv")

objFSO.deletefile("C:\WEAP\reliabilityEnv.csv")

% Σε αυτό το σημείο εγγράφονται τα επιθυμητά αποτελέσματα σε αρχεία .csv

Dim Timesteps

Dim Years

for Years = 1992 to 1995
```

```

CALL
WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\reliabilityDelta.csv",WEAP.Branch("Demand
Sites\DELTA").Variables("Reliability").Value(years,1))

CALL
WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\reliabilityXanthi.csv",WEAP.Branch("Demand
Sites\XANTHI").Variables("Reliability").Value(years,1))

CALL WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\reliabilityEnv.csv",WEAP.Branch("Supply
and Resources\River\NESTOS\Flow Requirements\ENVIROMENTAL
FLOW").Variables("Flow Requirement Reliability").Value(years,1))

For Timesteps = 1 to 12

CALL
WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\optimization\PumpedTemenos.csv",((0.25*1000
*9.81/(0.75*1000*3600))*(WEAP.Branch("Supply and
Resources\River\NESTOS\Reservoirs\PLATANOVRYSSI").Variables("Storag
e Elevation").Value(years,timesteps)-WEAP.Branch("Supply and
Resources\River\NESTOS\Reservoirs\TEMENOS").Variables("Storage
Elevation").Value(years, timesteps)))*WEAP.Branch("Supply and
Resources\Transmission Links\to D2\from
TEMENOS").Variables("Flow").Value(Years, Timesteps)/1000000 )

CALL
WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\optimization\PumpedPlatano.csv",((0.25*1000*9
.81/(0.75*1000*3600))*(WEAP.Branch("Supply and
Resources\River\NESTOS\Reservoirs\THYSAVROS").Variables("Storage
Elevation").Value(years,timesteps)-WEAP.Branch("Supply and
Resources\River\NESTOS\Reservoirs\PLATANOVRYSSI").Variables("Storag
e Elevation").Value(years, timesteps)))*WEAP.Branch("Supply and
Resources\Transmission Links\to D1\from
PLATANOVRYSSI").Variables("Flow").Value(Years, Timesteps)/1000000 )

CALL WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\hydropower1.csv",WEAP.Branch("Supply
and
Resources\River\NESTOS\Reservoirs\THYSAVROS").Variables("Hydropower
Generation").Value(years, timesteps)*0.00027777)

CALL WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\hydropower2.csv",WEAP.Branch("Supply
and
Resources\River\NESTOS\Reservoirs\PLATANOVRYSSI").Variables("Hydrop
ower Generation").Value(years, timesteps)*0.00027777)

CALL WEAP.PrintToFile("C:\WEAP\hydropower3.csv",WEAP.Branch("Supply
and

```

Resources\River\NESTOS\Reservoirs\TEMENOS").Variables("Hydropower
Generation").Value(years, timesteps)*0.00027777)

NEXT

NEXT

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των κανόνων λειτουργίας χωρίς την χρήση του λογισμικού WEAP21 δίνεται ο παρακάτω ψευδοκώδικα. Απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών είναι ο ωφέλιμος όγκος των φραγμάτων του προηγούμενου μήνα. Όπου Q_i είναι η βέλτιστη ποσότητα νερού που απαιτείται να ρέει κατάντη του κάθε ταμιευτήρα το τρέχον χρονικό βήμα. Το $V_i^{Benefit}$ αφορά τον ωφέλιμο όγκο του ταμιευτήρα. Τα V_{down} , V_{inc} , V' και $Temp$ είναι προσωρινές μεταβλητές. Ενώ οι In και $Evap$ αφορούν τις εισροές από ανάντη και την εξάτμιση από τους ταμιευτήρες αντίστοιχα. Το S αφορά την ποσότητα του νερού που αντί να υπερχειλίσει οδηγείται στον στρόβιλο.

Read V_{Thys}^{t-1} , V_{plat}^{t-1} , V_{Tem}^{t-1} , a_n , b

Evaluate $T1$, $T2$, $T3$, $R1$, $R2$ με βάση τις εξισώσεις 6.2 ή 6.4 και 6.3

$$V_{Thys}^{t-1} + In - Evap = V'$$

IF $V' - T1 > V_{Thys}^{Benefit}$

$$S = V_{Thys}^{Benefit} - V' + T$$

Else

$$S = 0$$

End

$$Q1 = T1 + R1 + S$$

$$Q2 = T1 + R2$$

IF $Q2 < T2$

$$Temp = T2 - Q2$$

IF $Temp > V_{plat}^{t-1}$

$$V_{down} = V_{plat}^{t-1}$$

Else

$$V_{down} = V_{plat}^{t-1} - Temp$$

End

$$Q2 = Q2 + V_{down}$$

Else

$$Temp = Q2 - V_{plat}^{t-1}$$

```

IF  $Temp > V_{plat}^{Benefit}$ 
     $Vinc = V_{plat}^{Benefit} - V_{plat}^{t-1}$ 
Else
     $Vinc = Temp$ 
End
 $Q2 = Q2 - Vinc$ 
End
Evaluate  $Q3 = Q2 - R2$ 
IF  $Q3 < T3$ 
     $Temp = T3 - Q3$ 
    IF  $Temp > V_{Tem}^{t-1}$ 
         $Vdown = V_{Tem}^{t-1}$ 
    Else
         $Vdown = V_{Tem}^{t-1} - Temp$ 
    End
     $Q3 = Q3 + Vdown$ 
Else
     $Temp = Q3 - V_{Tem}^{t-1}$ 
    IF  $Temp > V_{Tem}^{Benefit}$ 
         $Vinc = V_{Tem}^{Benefit} - V_{Tem}^{t-1}$ 
    Else
         $Vinc = Temp$ 
    End
     $Q3 = Q3 - Vinc$ 
End
Print  $Q1, Q2, Q3$ 

```