



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΝΕΣΤΟΥ

Μάρτιος, 2013

Λ. Ν. Μαλατέστα

Επιβλέπων Καθηγητής: Χ. Μακρόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Στόχος	2
1.3	Βήματα Υλοποίησης	2
1.4	Καινοτομία	2
1.5	Δομή Εργασίας	3
2	Διαχείριση Υδατικών Πόρων και Ενέργεια	5
2.1	Η έννοια του Υδροσυστήματος και της Ανάλυσης Συστημάτων	5
2.2	Η έννοια της Διαχείριση των Υδατικών Πόρων	5
2.2.1	Ορισμός	5
2.2.2	Η Κατάσταση στην Ελλάδα	7
2.2.3	Οι Στόχοι της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων	7
2.3	Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/EC	9
2.4	Υδατικές Χρήσεις	11
2.5	Υδροηλεκτρική Ενέργεια	13
2.5.1	Γενικά για την Υδροηλεκτρική Ενέργεια	13
2.5.2	Τα Υδροηλεκτρικά Έργα	14
2.5.3	Πλεονεκτήματα Υδροηλεκτρικών Έργων	16
2.5.4	Μειονεκτήματα Υδροηλεκτρικών Έργων	17
2.5.5	Τα Υδροηλεκτρικά Έργα της Ελλάδας	17
2.5.6	Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Ενέργεια Υδροηλεκτρικών Έργων	19
2.5.7	Το Σύστημα Άντλησης Ταμίευσης των ΥΗΕ	20
3	Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων – Παρουσίαση του WEAP 21 και του Optimization Toolbox του MATLAB	22
3.1	Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων	22
3.1.1	Ορισμός	22
3.1.2	Στάδια Χρήσης Ενός ΣΥΑ	23
3.1.3	Εφαρμογές των ΣΥΑ στη Διαχείριση Συστημάτων Υδατικών Πόρων	24
3.2	Το Λογισμικό WEAP21	25
3.2.1	Εισαγωγή στο WEAP21	25
3.2.2	Βασικά Χαρακτηριστικά του WEAP21	26
3.2.3	Η Δομή του WEAP21	26
3.2.4	Μοντελοποίηση και Δημιουργία Σεναρίων στο WEAP21	28
3.2.5	WEAP21 και Διεργασίες Λεκάνης Απορροής	29
3.2.6	Η Αναπαράσταση των Φραγμάτων στο WEAP21	30
3.2.7	Δημιουργία Νέων Μεταβλητών στο WEAP21	31
3.3	MATLAB και Optimization Toolbox	32
3.3.1	Γενικά	32
3.3.2	MATLAB και Προσομοιωμένη Ανόπτηση	33
3.3.3	MATLAB και Γενετικοί Αλγόριθμοι	33
3.4	Το Υπολογιστικό Σύστημα «ΚΑΣΤΑΛΙΑ»	34
4	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	38
4.1	Εισαγωγή στην Έννοια της Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης	38
4.2	Γενετικοί Αλγόριθμοι	41
4.2.1	Ο Ορισμός του Γενετικού Αλγόριθμου	41
4.2.2	Ιστορική Αναδρομή	42
4.2.3	Κύρια Χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων	43
4.2.4	Η Ανατομία Ενός Προγράμματος Γενετικών Αλγορίθμων	44

4.2.5	Βασικά Στοιχεία Γενετικών Αλγορίθμων.....	44
4.2.6	Γενετικές Διαδικασίες.....	45
4.2.7	Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων.....	49
4.2.8	Μειονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων.....	50
4.3	Προσομοιωμένη Ανόπτηση.....	51
5	Το Υδροσύστημα του ποταμού Νέστου	54
5.1	Γεωγραφικά Στοιχεία της Περιοχής του Νέστου.....	54
5.2	Γεωλογικά Στοιχεία της Λεκάνης του Νέστου.....	55
5.3	Πληθυσμιακά Δεδομένα.....	56
5.4	Χρήσεις Γης	56
5.5	Οικονομικές Δραστηριότητες.....	57
5.6	Διακρατική Συμφωνία για την Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στην Περιοχή του Νέστου ...	58
5.6.1	Εισαγωγή.....	58
5.6.2	Η Περίπτωση του Νέστου.....	59
5.6.3	Ελλείψεις και Ασάφειες της Συμφωνίας.....	60
5.7	Τα Φράγματα στο Νέστο	61
5.7.1	ΥΗΕ Θησαυρού	63
5.7.2	ΥΗΕ Πλατανόβρυσης.....	64
5.7.3	ΥΗΕ Τεμένους	65
6	Περιγραφή της Μεθοδολογίας.....	67
6.1	Εισαγωγή.....	67
6.2	Δεδομένα	67
6.2.1	Δεδομένα Βροχόπτωσης	67
6.2.2	Διαθέσιμοι Σταθμοί Μέτρησης Απορροής	69
6.2.3	Δεδομένα Εξατμισοδιαπνοής	71
6.3	Εξαγωγή Πολυγώνων Thiessen	73
6.3.1	Γενικά για τη Μέθοδο των Πολυγώνων Thiessen	73
6.3.2	Εξαγωγή Πολυγώνων Thiessen στη Λεκάνη του Νέστου.....	73
6.4	Εισαγωγή των Δεδομένων και Δημιουργία του Υδροσυστήματος στο WEAP21.....	74
6.5	Βαθμονόμηση του Υδροσυστήματος του Νέστου	75
6.6	Αποτελέσματα της Βαθμονόμησης	77
6.6.1	Αποτελέσματα Βαθμονόμησης με Χρήση του Αλγόριθμου της Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing)	77
6.6.2	Αποτελέσματα Βαθμονόμησης με Χρήση των Γενετικών Αλγορίθμων.....	83
6.7	Σύγκριση των Δύο Μεθόδων και των Αποτελεσμάτων τους.....	88
6.8	Βελτιστοποίηση του Υδροσυστήματος του Νέστου	91
6.8.1	Εισαγωγή Τεχνικών Έργων και Κόμβων Ζήτησης στο WEAP	91
6.8.2	Περιγραφή των Σεναρίων που Εξετάστηκαν	97
7	Παρουσίαση και Ανάλυση των Αποτελεσμάτων	108
7.1	Αποτελέσματα Σεναρίου Α	108
7.1.1	Χρονοσειρές 1973-1977.....	108
7.1.2	Χρονοσειρές 1991-1995.....	109
7.2	Προσομοιώσεις με τις Βέλτιστες Λύσεις	114
7.2.1	Προσομοίωση 1	115
7.2.2	Προσομοίωση 2	117
7.3	Έλεγχος Απόκρισης του Υδροσυστήματος με Χρήση των Συνθετικών Χρονοσειρών	120
7.4	Αποτελέσματα Σεναρίου Β.....	122
7.5	Αποτελέσματα Σεναρίου Γ	126
8	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	130
8.1	Γενικά Συμπεράσματα	130
8.2	Συμπεράσματα από την Ανάλυση των Αποτελεσμάτων	131

8.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	132
Βιβλιογραφία	133
Νομοθεσία.....	133
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	133
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	135
Ιστοσελίδες.....	136

Λίστα Σχημάτων

Σχ. 2-1: Ποσοστιαία κατανάλωση νερού ανά τομέα απασχόλησης (Πηγή: WWF, 22.03.2012).....	12
Σχ. 2-2: Σχηματική απεικόνιση υδροηλεκτρικής παραγωγής (www.google.com)	13
Σχ. 2-3: Τα 4 μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου(Μαμάσης και Στεφανάκος, 2010)	15
Σχ. 2-4: Χρονική εξέλιξη εισροών υδροηλεκτρικής παραγωγής και αποθεμάτων των μεγάλων υδροηλεκτρικών της Ελλάδας (Μαμάσης και Στεφανάκος, 2010)	19
Σχ. 2-5: Διάταξη αντιστρεπτού ΥΗΕ (Παπαντώνης, 2009).....	21
Σχ. 3-1: Περιβάλλον εργασίας στο WEAP (www.weap21.org).....	28
Σχ. 3-2: Διαχωρισμός ζωνών ταμιευτήρα στο WEAP (SEI, User Guide for WEAP21).....	31
Σχ. 3-3: Περιβάλλον εργασίας Optimization Toolbox του MATLAB (MATLAB, 2009 “Optimization Toolbox TM User’s Guide”)	32
Σχ. 3-4: Διάγραμμα ροής σχήματος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών για τη στοχαστική προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη (Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης και Σ. Κοζάνης, 2005).....	36
Σχ. 4-1: Απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας και του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων (Ευστρατιάδης, 2008).....	39
Σχ. 4-2: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής των ΓΑ (Κουμινιάκης, 2011).....	48
Σχ. 4-3: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτησης (Κατσιγιαννης, 2008)	53
Σχ. 5-1: Το ελληνικό τμήμα της λεκάνης απορροής του Νέστου (έγχρωμο) στο χάρτη της κεντρικής και δυτικής Μακεδονίας (ασπρόμαυρο) (Παπαδάς, 2010).....	54
Σχ. 5-2: Η πορεία του π. Νέστου στο ελληνικό έδαφος, όπως απεικονίζεται σε δορυφορική εικόνα, όπου φαίνονται οι κύριοι παραπόταμοι, οι τεχνητοί ταμιευτήρες, τα στενά κι η Δελταϊκή πεδιάδα του ποταμού (Αλμπανάκης, 2007).....	55
Σχ. 5-3: Πληθυσμιακή κατανομή στη λεκάνη του Νέστου (Σκουλικάρης, 2008)	56
Σχ. 5-4: Χρήσεις γης και κάλυψη εδαφικών εκτάσεων της λεκάνης του ποταμού Μέστα/Νέστου σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση CORINE Land Cover (Σκουλικάρης, 2008)	57
Σχ. 5-5: Η λεκάνη του ποταμού Μέστα/Νέστου	61
Σχ. 5-6: Δυτικό κανάλι εκτροπής φράγματος Τοξοτών (www.google.com).....	62
Σχ. 5-7: Απεικόνιση των τριών ΥΗΣ εν σειρά και των κύριων χαρακτηριστικών τους επί του ποταμού Νέστου (ΔΕΗ)	63
Σχ. 5-8: Το φράγμα του Θησαυρού (itia.ntua.gr)	64
Σχ. 5-9: Το φράγμα της Πλατανόβρυσης (www.airdynamics.gr)	65
Σχ. 6-1: Η θέση των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στη λεκάνη του Νέστου	68
Σχ. 6-2: Μετρημένη απορροή στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1968-1982	69
Σχ. 6-3: Μετρημένη απορροή στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1991-1995	70
Σχ. 6-4: Μετρημένη απορροή στη θέση Μονίμα Κύλα για την περίοδο 1968-1982	70
Σχ. 6-5: Μετρημένη απορροή στη θέση Μονίμα Κύλα για την περίοδο 1991-1995.	71
Σχ. 6-6: Θέση των σταθμών Τέμενος και Μονίμα Κύλα στην λεκάνη του Νέστου (Σκουλικάρης, 2008).....	71
Σχ. 6-7: Μηνιαίες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στη λεκάνη του Νέστου	72
Σχ. 6-8: Τα πολύγωνα Thiessen όπως προέκυψαν από το ArcGIS για τη λεκάνη απορροής του Νέστου	74
Σχ. 6-9: Η εικόνα του υδροσυστήματος του Νέστου στο WEAP21	75
Σχ. 6-10: Διάγραμμα ροής κώδικα προγραμματισμού για τη βαθμονόμηση (Τσουκαλάς, 2012)	77
Σχ. 6-11: Αποτελέσματα προσομοιωμένης ανόπτησης για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης.....	79
Σχ. 6-12: Διάγραμμα διακύμανσης της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των επαναλήψεων	80
Σχ. 6-13: Διάγραμμα διακύμανσης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των επαναλήψεων.....	81
Σχ. 6-14: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτησης απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1968-1982.....	82
Σχ. 6-15: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτησης απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1991-1995.....	83
Σχ. 6-16: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης	85

Σχ. 6-17: Διάγραμμα διακύμανσης της καλύτερης και της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των γενεών.....	85
Σχ. 6-18: Διάγραμμα διακύμανσης της καλύτερης και της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των γενεών.....	86
Σχ. 6-19: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1968-1982	87
Σχ. 6-20: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1991-1995	87
Σχ. 6-21: Σχηματική λεπτομέρεια προσομοίωσης συστήματος ανάστροφης λειτουργίας	96
Σχ. 6-22: Το υδροσύστημα του Νέστου στο περιβάλλον εργασίας του WEAP21	97
Σχ. 6-23: Διάγραμμα ροής για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος (Τσουκαλάς, 2012)	101
Σχ. 6-24: Συνθετική χρονοσειρά βροχής του βροχομετρικού σταθμού Καρυόφυτο.....	102
Σχ. 6-25: Καμπύλη μηνιαίων οριακών τιμών συστήματος (Στεφανάκος, 2009)	104
Σχ. 7-1: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης ταμιευτήρων	109
Σχ. 7-2: Μέτωπο Pareto των λύσεων της βελτιστοποίησης.....	110
Σχ. 7-3: Μέτωπο Pareto των λύσεων της βελτιστοποίησης.....	113
Σχ. 7-4: Μέτωπα Pareto των λύσεων των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων	114
Σχ. 7-5: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.	115
Σχ. 7-6: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής ενέργειας από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς του υδροσυστήματος.....	116
Σχ. 7-7: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους.....	117
Σχ. 7-8: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.	118
Σχ. 7-9: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής ενέργειας από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς του υδροσυστήματος.....	119
Σχ. 7-10: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους.....	120
Σχ. 7-11: Καμπύλες διαρκείας της παραγόμενης ενέργειας από το υδροσύστημα για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται.....	121
Σχ. 7-12: Διακύμανση καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των επαναλήψεων.....	123
Σχ. 7-13: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.	125
Σχ. 7-14: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους.....	126
Σχ. 7-15: Διακύμανση καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των επαναλήψεων.....	127
Σχ. 7-16: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους.....	128
Σχ. 7-17: Καμπύλες διαρκείας της ενέργειας για τις περιπτώσεις της ενιαίας και της ανεξάρτητης ενεργειακής διαχείρισης του υδροσυστήματος.....	129

Λίστα Πινάκων

Πίν. 2-1: Η υδροηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως(http://greek-energy.blogspot.com/2008/09/blog-post_07.html)	14
Πίν. 2-2: Τα 4 μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου (Μαμάσης και Στεφανάκος, 2010)	15
Πίν. 2-3: Ετήσιο Ελληνικό και Παγκόσμιο υδροδυναμικό (Στεφανάκος, 2011).....	18
Πίν. 2-4: Τα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ σε λειτουργία	18
Πίν. 2-5: Μεγάλα ΥΗΕ που αναμένονται να λειτουργήσουν (Κουτσογιάννης, 2007)	18
Πίν. 4-1: Αναλογία μεταξύ ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και ενός φυσικού συστήματος (Κατσιγιάννης, 2008).....	52
Πίν. 6-1: Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν.....	68
Πίν. 6-2: Μηνιαίες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στη λεκάνη του Νέστου (Σκουλικάρης, 2008).	72
Πίν. 6-3: Ανώτατα και κατώτατα όρια τιμών μεταβλητών.	76
Πίν. 6-4: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης	78
Πίν. 6-5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης για τους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών	79
Πίν. 6-6: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών	84
Πίν. 6-7: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης	84
Πίν. 6-8: Απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των υφιστάμενων αρδευτικών αναγκών στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου (Νομαρχία Καβάλας, 2000)	92
Πίν. 6-9: Εκτιμώμενες απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των μελλοντικών αρδευτικών αναγκών στην περιοχή της πεδιάδας της Ξάνθης (Σκουλικάρης, 2008).....	92
Πίν. 6-10: Τεχνικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά παραγωγής ενέργειας ΥΗΕ (Τσουκαλάς, 2012)	93
Πίν. 6-11: Μέγιστες παροχετευόμενες ποσότητες από τους στροβίλους και τις αντλίες.....	95
Πίν. 7-1: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση	108
Πίν. 7-2: Ενδεικτικές τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης και αντικειμενικών συναρτήσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση.....	111
Πίν. 7-3: Ενδεικτικές τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης και αντικειμενικών συναρτήσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση.....	113
Πίν. 7-4: Τιμές ενεργειακών στόχων που χρησιμοποιήθηκαν	115
Πίν. 7-5: Τιμές ενεργειακών στόχων που χρησιμοποιήθηκαν	117
Πίν. 7-6: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης που προέκυψαν.	123
Πίν. 7-7: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης που προέκυψαν	127

Ευχαριστίες



Περίληψη

Η εύρεση της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής των υδροσυστημάτων είναι μία αρκετά δύσκολη και σύνθετη διαδικασία. Η κατάσταση γίνεται ακόμα δυσκολότερη όταν αφορά σε υδροσυστήματα με ανταγωνιστικές χρήσεις, ειδικά αν μια από αυτές είναι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των υδροσυστημάτων επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης του υδροσυστήματος, συχνά μέσω δύο βημάτων: της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται το υδροσύστημα του ποταμού Νέστου, με σκοπό την εξαγωγή κανόνων λειτουργίας για τη βέλτιστη διαχείρισή του. Το υδροσύστημα του Νέστου αποτελείται αυτή τη στιγμή από δύο υδροηλεκτρικούς σταθμούς, το Θησαυρό και την Πλατανόβρυση, ενώ έχει γίνει μελέτη για την κατασκευή και ενός τρίτου σταθμού, αυτόν του Τεμένους. Η ανάλυση του συστήματος επιτεύχθηκε με τη συνδυασμένη χρήση δύο υπολογιστικών εργαλείων: του WEAP21 και του MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του WEAP21 έγινε προσομοίωση του υδροσυστήματος, ενώ η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη συνδυασμένη χρήση του WEAP21 και του MATLAB μέσω σύνδεσης COM-API. Όσον αφορά στο MATLAB, έγινε χρήση του Optimization Toolbox και συγκεκριμένα των γενετικών αλγορίθμων και του αλγόριθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης. Εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο μελετήθηκε η εύρεση κανόνων λειτουργίας θέτοντας δύο κριτήρια βελτιστοποίησης: πρώτον τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος όσον αφορά στην ικανοποίηση των αρδευτικών και περιβαλλοντικών στόχων του και δεύτερον τη μεγιστοποίηση του κέρδους από την παραγωγή ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψιν την Ελληνο-Βουλγαρική συμφωνία που έχει υπογραφεί, αλλά δεν έχει τεθεί ακόμα σε εφαρμογή και η οποία ορίζει τα ποσοστά εκμετάλλευσης των υδάτων του ποταμού Νέστου μεταξύ των δύο χωρών, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις: α) στην πρώτη περίπτωση η απορροή θεωρήθηκε ίση με την καταγεγραμμένη από τους σταθμούς μέτρησης απορροής στα σύνορα με τις παρούσες συνθήκες μη εφαρμογής της συμφωνίας (70-80% της απορροής στην Ελλάδα) και β) στη δεύτερη περίπτωση, θεωρήθηκε ότι έχει τεθεί σε εφαρμογή η Ελληνο – Βουλγαρική συμφωνία και άρα η απορροή στα σύνορα καθορίζεται σύμφωνα με τους όρους της συμφωνίας. (29% της απορροής στην Ελλάδα). Στο δεύτερο και στο τρίτο σενάριο εξετάζεται η δυνατότητα μεγιστοποίησης της πρωτεύουσας ενέργειας του συστήματος, δηλαδή της εξασφαλισμένης ενέργειας που παράγεται ακόμα και κάτω από τις δυσμενέστερες συνθήκες. Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων έγκειται στη διαφορετική θεώρηση ως προς τον τρόπο διαχείρισης του υδροσυστήματος.

Abstract

Finding the optimal management policy for a hydro system is a difficult and complicated process due to the many problems that can arise and must be addressed. The situation becomes even more difficult when considering hydro systems where one of the main goals is to produce hydroelectric power. The hydro systems' optimization is achieved through analysis of the hydro system, by means of simulation and optimization. In the present study, the River Nestos hydro system is examined in order to derive operating rules for optimal management. River Nestos hydro system currently consists of two hydropower plants, Thesaurus and Platanovrissi. Also, a study has been made for the construction of a third plant, Temenos. The system analysis was carried out by the combined use of two software tools: WEAP21 and MATLAB. More specifically, a simulation of the hydro system was made using WEAP21, while the optimization was performed by the combined use of WEAP21 and MATLAB connected via COM-API. Regarding MATLAB, Optimization Toolbox was used and, more specifically, the genetic algorithm and simulated annealing algorithm. Three different scenarios were examined. In the first scenario the study aimed to find operating rules based on two optimization criteria: firstly, the maximization of system reliability in meeting the irrigation and environmental objectives and, secondly, the profit maximization from energy production. Taking into account the Greek-Bulgarian agreement which has been signed but has not yet been enforced and which defines the percentage of water that may be exploited by each country, two cases were examined: a) In the first case, the run-off was considered equal to that recorded by stations in the basin borders, under the present situation in which the agreement is not enforced (70-80% share to Greece) and b) in the second case it was considered that the agreement has been implemented and hence the run-off in the border area was determined to be in accordance with the terms of the agreement (29% share to Greece). The second and third scenarios consider the possibility of maximizing the primary energy of the system, i.e. the secured generation even under the most unfavorable conditions. The difference between these two scenarios lies in different approaches to the management of the hydro system.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η διαχείριση των υδατικών πόρων είναι μία αρκετά σύνθετη και επίπονη διαδικασία καθώς έχει να αντιμετωπίσει πληθώρα προβλημάτων όπως η μη γραμμική δυναμική των φυσικών διεργασιών, η ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών που επιβάλλονται από ομάδες με διαφορετικά συμφέροντα, η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των υδρολογικών εισροών, η ανάγκη συγκερασμού της οικονομικότητας και του ρίσκου κ.α. Η σύγχρονη αντίληψη περί διαχείρισης προϋποθέτει την υιοθέτηση μίας ολιστικής προσέγγισης και μίας υδατικής πολιτικής που θα χαρακτηρίζεται από ορθολογικότητα, αποδοτικότητα και βιωσιμότητα.

Στην εφαρμογή αυτής της υδατικής πολιτικής ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει η λειτουργία και η διαχείριση των **υδροσυστημάτων**. Υδροσύστημα καλείται το σύστημα που αποτελείται από φυσικά υδάτινα σώματα και συνεργαζόμενα τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997). Η διαχειριστική πολιτική των υδροσυστημάτων καθορίζεται ύστερα από λεπτομερή ανάλυση και αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών αποφάσεων, καθώς και των συνεπειών που καθεμία από αυτές αποφέρει. Τα παραπάνω επιβάλλουν μια συστημική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων (Grigg, 1996) που επιτυγχάνεται με τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Η βέλτιστη λύση, δηλαδή η ικανοποίηση όλων των στόχων κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο, η οποία είναι και το ζητούμενο, προκύπτει ύστερα από μία ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, αφού τις περισσότερες φορές οι αντιθέσεις που εμφανίζονται μεταξύ των διαφορετικών στόχων δυσχεραίνουν την λήψη των αποφάσεων. Ισχυρά εργαλεία σε αυτήν τη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί αλλά και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι οποίοι βοηθούν ουσιαστικά στην έκφραση των τελικών κανόνων λειτουργίας των υδροσυστημάτων.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης και της εύρεσης κανόνων λειτουργίας για την όσο το δυνατό αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων των υδροσυστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική και για την Ελλάδα, αφού η ανομοιόμορφη κατανομή τόσο των υδατικών πόρων όσο και της ζήτησης στο χώρο και στο χρόνο αλλά και η αναντιστοιχία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, καθώς κι οι πολλές και αντικρουόμενες μεταξύ τους χρήσεις νερού που υπάρχουν, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη ύπαρξης ενός συνολικού (διατομεακού) σχεδιασμού και προγραμματισμού κι ενός ολοκληρωμένου κι ορθολογικού μοντέλου διαχείρισης των υδάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το θέμα της διαχείρισης ενός εκ των μεγαλύτερων υδροσυστημάτων της Ελλάδας, το υδροσύστημα του ποταμού Νέστου. Για

την εκπόνησή της έγινε χρήση του λογισμικού WEAP21 καθώς και του μαθηματικού προγράμματος MATLAB, ο συνδυασμός των οποίων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων.

1.2 Στόχος

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το υδροσύστημα του ποταμού Νέστου. Στόχος της είναι η εξαγωγή κι η διατύπωση κανόνων λειτουργίας για το υδροσύστημα, με σκοπό τη καλύτερη δυνατή διαχείριση του με την ικανοποίηση όλων των αναγκών και την εκπλήρωση όλων των στόχων. Οι κανόνες αυτοί θα προκύψουν ύστερα από διατύπωση διαφορετικών σεναρίων και απλή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, η οποία θα γίνει με τη βοήθεια καταλλήλων αλγορίθμων και υπολογιστικών προγραμμάτων.

1.3 Βήματα Υλοποίησης

Τα βήματα υλοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας είναι τα εξής:

1. Κατανόηση της έννοιας και του τρόπου λειτουργίας των υδροσυστημάτων.
2. Κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του υδροσυστήματος του Νέστου.
3. Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος του Νέστου στο περιβάλλον WEAP21.
4. Κατανόηση της έννοιας της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.
5. Συνεργασία MATLAB και WEAP21 για τη βαθμονόμηση και τη βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος του Νέστου.
6. Εξαγωγή, αξιολόγηση και σύγκριση αποτελεσμάτων.
7. Εξαγωγή συμπερασμάτων.

1.4 Καινοτομία

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του υδροσυστήματος του Νέστου. Η βαθμονόμηση αφορά στην εύρεση τιμών για τους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκάνων της λεκάνης του Νέστου, καθώς και για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης (ποσοστό βροχής που υπόκειται σε εξατμισοδιαπνοή) όλης της λεκάνης, ο οποίος θεωρείται ότι έχει εποχιακή κατανομή. Η βαθμονόμηση του συγκεκριμένου υδροσυστήματος έχει πραγματοποιηθεί και σε προηγούμενη μεταπτυχιακή εργασία (Τσουκαλάς, 2012), αυτή τη φορά όμως χρησιμοποιούνται διαφορετικές και μεγαλύτερου μήκους χρονοσειρές δεδομένων καθώς και άλλοι αλγόριθμοι, ενώ διαφορετικός είναι κι ο αριθμός των προς βαθμονόμηση μεταβλητών.

Εκτός από την διαδικασία της βαθμονόμησης, ερευνάται κι η δυνατότητα εξαγωγής κανόνων λειτουργίας για το υδροσύστημα μέσω του προσδιορισμού των ενεργειακών

στόχων για κάθε ταμιευτήρα, με σκοπό την όσο το δυνατό πληρέστερη ικανοποίηση των διαφόρων απαιτήσεων του υδροσυστήματος (κάλυψη αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων, αύξηση παραγόμενης ενέργειας κ.λ.π.).

1.5 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια, η συνοπτική περιγραφή των οποίων δίνεται παρακάτω.

Στο **πρώτο** κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση των χρήσεων του νερού και του ζωτικού ρόλου που αυτό παίζει στην ανθρώπινη ζωή και δραστηριότητα, ενώ παράλληλα τονίζεται η σημασία της βελτιστοποίησης στη διαχείριση των υδροσυστημάτων. Επίσης παρουσιάζεται ο στόχος της παρούσας εργασίας και γίνεται μία σύντομη περιγραφή των περιεχομένων των κεφαλαίων της εργασίας.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο περιγράφεται η έννοια της διαχείρισης των υδατικών πόρων, ενώ παράλληλα τονίζεται η σημασία της στη ορθή λειτουργία των υδροσυστημάτων. Παρουσιάζονται επίσης οι βασικές αρχές και στόχοι της Οδηγίας Πλαίσιο ΕΚ/2000/60 για τα νερά. Τέλος, γίνεται μία αναφορά στις πολλές και διαφορετικές χρήσεις νερού, στην έννοια της υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ πραγματοποιείται και μία σύντομη περιγραφή του συστήματος άντλησης – ταμίευσης των μεγάλων ΥΗΕ.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται τα προγράμματα και λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη αναφορά στα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ). Στη συνέχεια, γίνεται μία αναλυτική περιγραφή του λογισμικού WEAP21, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του υδροσυστήματος του Νέστου, και ενός τμήματος του μαθηματικού προγράμματος MATLAB (συγκεκριμένα του τμήματος των γενετικών αλγορίθμων του optimization toolbox), με τη βοήθεια του οποίου έγινε η βαθμονόμηση κι η βελτιστοποίηση του συστήματος για την εξαγωγή των τελικών κανόνων λειτουργίας.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην έννοια της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και στη σημασία που αυτή έχει για τη σωστή και ορθολογική διαχείριση των υδροσυστημάτων. Επίσης αναλύεται η λειτουργία κάποιων αλγορίθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται συχνά σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων και της προσομοιωμένης ανόπτησης.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική περιγραφή του υδροσυστήματος του Νέστου, δηλαδή παρουσιάζεται η κατάσταση που επικρατεί από γεωγραφική, γεωλογική και υδρολογική πλευρά, ενώ παράλληλα περιγράφονται τα υφιστάμενα τεχνικά έργα και αναλύονται οι τρέχουσες ανάγκες και οι διάφορες χρήσεις νερού των κατοίκων της περιοχής.

Στο **έκτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται λεπτομερώς η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία. Περιγράφονται οι διαδικασίες της προσομοίωσης του υδροσύστηματος και οι τρόποι με τους οποίους επιτεύχθηκε η βαθμονόμηση του. Επίσης παρουσιάζονται τα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν και εξηγείται η λειτουργία και ο ρόλος των μεταβλητών που τέθηκαν για βελτιστοποίηση, προκειμένου να προκύψουν οι τελικοί κανόνες λειτουργίας.

Στο **έβδομο** κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση κι η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, καθώς και η σύγκριση αυτών μεταξύ τους, με κύριο στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων.

Στο **όγδοο** κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, ενώ παράλληλα εκθέτονται και κάποιες προτάσεις που αφορούν σε περαιτέρω ενασχόληση και διερεύνηση των θεμάτων της παρούσας εργασίας.

2 Διαχείριση Υδατικών Πόρων και Ενέργεια

2.1 Η έννοια του Υδροσυστήματος και της Ανάλυσης Συστημάτων

Ως **σύστημα** νοείται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων, το οποίο χαρακτηρίζεται από:

- ένα σύνορο, το οποίο καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον
- αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι και έξοδοι)
- σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων και εξόδων. (Mays & Tung, 1992)

Ως **υδροσύστημα** ή σύστημα υδατικών πόρων ορίζεται ένα σύνολο φυσικών υδάτινων σωμάτων και τεχνικών έργων, που συνδυαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς (τηρώντας διάφορους περιορισμούς), που αναφέρονται τόσο στην αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου, όσο και στην προστασία από την καταστροφική δράση του νερού ως φυσικού κινδύνου. (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης, 2007). Η μελέτη ενός υδροσυστήματος περιλαμβάνει τους διαθέσιμους φυσικούς πόρους (ποτάμια, λίμνες, υδροφορείς), καθώς και τα σχετιζόμενα υδραυλικά έργα για την αποθήκευση, μεταφορά και διανομή τους με συγκεκριμένες ποσοτικές και ποιοτικές απαιτήσεις (ταμιευτήρες, υδραγωγεία, εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού κ.ο.κ).

Η **ανάλυση των συστημάτων υδατικών πόρων** είναι μία συστηματική διαδικασία αναζήτησης της «βέλτιστης» διαχειριστικής πολιτικής ενός υδροσυστήματος, που βασίζεται σε μια διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις και αξιολογήσεις των επιπτώσεων κάθε απόφασης. (Κουτσογιάννης, 2007).

Η αύξηση των πιέσεων στο υδάτινο περιβάλλον τα τελευταία χρόνια και η υπερεκμετάλλευση των υδάτινων σωμάτων έχει ως συνέπεια τη μείωση ως και την εξάντληση πολλών υδροφορέων καθώς και την ποιοτική τους υποβάθμιση. Όμως, τόσο η ανθρώπινη ζωή όσο και οποιαδήποτε ανθρώπινη δραστηριότητα προϋποθέτει τη χρήση νερού, κατάλληλης ποιότητας και ποσότητας. Επομένως, η ανάλυση συστημάτων υδατικών πόρων και η εύρεση και η εφαρμογή βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και ορθολογικής διαχείρισης των υδροσυστημάτων και γενικά των υδατικών πόρων προβάλλει σήμερα πιο επιτακτική από ποτέ.

2.2 Η έννοια της Διαχείριση των Υδατικών Πόρων

2.2.1 Ορισμός

Ως **διαχείριση υδατικών πόρων** νοείται η εφαρμογή μέτρων, κατασκευαστικών και μη, για τον έλεγχο φυσικών και τεχνητών συστημάτων υδατικών πόρων, με στόχο την ωφέλεια του

ανθρώπου και του περιβάλλοντος (Grigg, 1996). Η σύγχρονη αντίληψη περί της διαχείρισης προϋποθέτει μια ολιστική προσέγγιση με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη των υδατικών αναγκών, με κατάλληλη αξιοποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων νερού. Οι επιζητούμενοι τρόποι διαχείρισης πρέπει να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα, δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι, αποδοτικότητα, δηλαδή να αξιοποιούν τους υδατικούς πόρους στο μέγιστο δυνατό βαθμό, και βιωσιμότητα, δηλαδή να μην δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των σημερινών αναγκών.

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

Το ζητούμενο επομένως είναι ο σχεδιασμός κι η εφαρμογή μιας υδατικής πολιτικής με κεντρικό στόχο τη διευθέτηση των ισοζυγίων προσφοράς και ζήτησης του νερού στις υδρολογικές λεκάνες και στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας. Η πολιτική αυτή θα πρέπει να έχει τα χαρακτηριστικά της βιωσιμότητας, δηλαδή θα πρέπει να διασφαλίζει διαχρονικά τόσο την ανάπτυξη, με την ικανοποίηση των αναγκών σε νερό, όσο και την προστασία του περιβάλλοντος, 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 στο χρόνο. Επίσης επεκτείνεται και σε ό,τι 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 κι 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 στις 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 των κοινωνικών, περιβαλλοντικών ή συχνά και εθνικών στόχων και παραμέτρων, σύμφωνα με τα κριτήρια και τις προτεραιότητες που κάθε φορά τίθενται (Ν. Μυλόπουλος, 2001).

2.2.2 Η Κατάσταση στην Ελλάδα

Όσον αφορά στη χώρα μας, οι υδρολογικές και γεωμορφολογικές ανισότητες (άνιση χωροχρονική κατανομή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και κατά μείζονα λόγο των απορροών, έντονες γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις ανά υδατικό διαμέρισμα), σε συνδυασμό με τη χρονική αντιστροφή της κατανομής της ζήτησης και της υπερσυγκέντρωσης της σε περιορισμένους χώρους με ασήμαντους υδατικούς πόρους, δεν ευνοούν από οικονομοτεχνική άποψη την τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά εφικτή κάλυψη των αναγκών σε διάφορες χρήσεις νερού.

Επίσης, ο περιορισμένος αριθμός κι η γεωγραφική κατανομή των ποτάμιων συστημάτων 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 κι την υφαλμύρωση σε παράκτιες ζώνες.

Ο νόμος πλαίσιο (Ν. 1739/87), που αφορά στη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στην Ελλάδα, καθόρισε τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας (έγινε διαίρεση της χώρας σε 14 υδατικά διαμερίσματα), καθώς και τις βασικές αρχές προγραμματισμού, διαχείρισης, αξιοποίησης, χρήσης και προστασίας των υδατικών πόρων. Επίσης εκσυγχρονίστηκε σε κάποιο βαθμό η ισχύουσα νομοθεσία, σε ότι αφορούσε την ορθολογική διαχείριση του νερού.

2.2.3 Οι Στόχοι της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Οι στόχοι μια πολιτικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, η οποία θα διέπεται από τις αρχές που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι οι εξής (Κυρ. Χατζηευαγγέλου 2005):

- **Η εξασφάλιση ποσότητας νερού, ποιοτικά κατάλληλου, για την ικανοποίηση της ζήτησης.** Η γνώση των φυσικών μηχανισμών της ανανέωσης των υδατικών αποθεμάτων στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου, η προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων υδατικών πόρων και η πρόγνωση της συμπεριφοράς τους για διάφορα πιθανά σενάρια μετεωρολογικών και υδρολογικών συνθηκών, οδηγεί στον προσδιορισμό του υπάρχοντος υδατικού δυναμικού και βοηθά στην αντικειμενική εκτίμηση των δυνατοτήτων του. Αποτέλεσμα αυτής της σύνθετης διαδικασίας είναι η καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού αλλά και η δυνατότητα αναζήτησης κι εντοπισμού νέων πηγών νερού, προκειμένου να καλυφθούν με το καλύτερο δυνατό τρόπο οι σημερινές και, όσο το δυνατόν, οι μελλοντικές ανάγκες σε νερό. Ο σχεδιασμός κι η εκτέλεση έργων συλλογής και

αποθήκευσης, αναρρύθμισης και διευθέτησης καθώς και μεταφοράς, διανομής και εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, αποτελεί το τελευταίο στάδιο αυτής της διαδικασίας αξιοποίησης και διευθέτησης της φυσικής προσφοράς του νερού σε σχέση με τη ζήτηση.

- **Η διευθέτηση της ζήτησης του νερού σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.** Ο καθορισμός δηλαδή των αναγκών και δραστηριοτήτων που καταναλώνουν νερό, σύμφωνα με τις φυσικές δυνατότητες των υδατικών πόρων. Η καταγραφή των υπαρχουσών χρήσεων του νερού κι η γνώση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού μπορεί να συμβάλλει τα μέγιστα στη χάραξη μιας ορθολογικής πολιτικής διαχείρισης υδατικών πόρων, προσαρμόζοντας τις σχετικές επενδύσεις στις φυσικές δυνατότητες των υπό μελέτη περιοχών.
- **Η προστασία και διατήρηση της ποιότητας του νερού.** Εκτός της προστασίας του περιβάλλοντος και της διατήρησης της οικολογικής ισορροπίας, η διατήρηση της ποιότητας του νερού αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την κάλυψη της ζήτησης και την ικανοποίηση των αναγκών. Στη σύγχρονη νομοθεσία η ρύπανση του νερού λογίζεται ως μία ακόμα ανταγωνιστική χρήση, καθώς πρακτικά έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει τους υδατικούς πόρους και να εμποδίζει την περαιτέρω αξιοποίηση τους. Ο σχεδιασμός λοιπόν των έργων προστασίας ή και αποκατάστασης των υδατικών πόρων καθώς και η εκτίμηση των επιπτώσεων στα υδατικά συστήματα από την εκτέλεση και λειτουργία των υδραυλικών έργων ή και άλλου είδους τεχνικών έργων αποτελεί μείζονος σημασίας πεδίο της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων.
- **Η αντιμετώπιση των ανοιγμάτων σε προσφορά και ζήτηση.** Για τον έγκαιρο εντοπισμό τους και την αποτελεσματική αντιμετώπιση τους απαιτείται η εκπόνηση υδατικών ισοζυγίων και ισοζυγίων προσφοράς και ζήτησης νερού σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης ή και υδατικού διαμερίσματος.
- **Η εξομάλυνση των συγκρούσεων ανάμεσα στις ανταγωνιστικές χρήσεις.** Οι δραστηριότητες που καταναλώνουν νερό είναι άμεσα ανταγωνιστικές μεταξύ τους, με την έννοια ότι η ικανοποίηση των αναγκών κάποιας από αυτές συνήθως αποκλείει τη δυνατότητα ικανοποίησης των αναγκών κάποιας άλλης, καθώς οι υδατικοί πόροι είναι πεπερασμένοι ποσοτικά. Συνεπώς, η διαχείριση υδατικών πόρων ισοδυναμεί με μία διαδικασία αξιολόγησης αναγκών, ιεράρχησης προτεραιοτήτων και επίλυσης διαφορών, προκειμένου να ικανοποιούνται οι ανάγκες κατά τρόπο δίκαιο, ωφέλιμο κι ορθολογικό. Πρέπει να σημειωθεί πως από όλες τις ανταγωνιστικές δραστηριότητες που καταναλώνουν νερό, αυτή που ικανοποιείται κατά προτεραιότητα είναι η ύδρευση. Η ικανοποίηση της ύδρευσης είναι νομικά κατοχυρωμένη έναντι των υπόλοιπων χρήσεων νερού.

- **Η πρόληψη των απωλειών του νερού κι η αξιοποίηση των πλεονασμάτων.** Οι απώλειες των τεχνικών έργων και των υδραυλικών δικτύων αποτελούν συχνά περιοριστικό παράγοντα στην πλήρη εκμετάλλευση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, καθώς ανέρχονται σε υψηλά ποσοστά. Από την άλλη πλευρά, συμβαίνει εξαιτίας λανθασμένων υπολογισμών (π.χ συντηρητική εκτίμηση αναγκών σε νερό) ή μεταβολών σε βασικούς παράγοντες σχεδιασμού, να υπάρχουν πλεονάσματα νερού τα οποία να μην αξιοποιούνται.
- **Ο συντονισμός των παραπάνω δραστηριοτήτων** στην κατεύθυνση της ενιαίας και συνολικής αντιμετώπισης του ζητήματος της ορθολογικής ικανοποίησης των υδατικών αναγκών.

2.3 Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/EC

Η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και των υγρασιμικών οικοσυστημάτων στην Ευρώπη οδήγησε το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της 23^{ης} Οκτωβρίου 2003 στην έκδοση της «Οδηγίας 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων». Η Οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα συγχωνεύει και αντικαθιστά ένα πλήθος υφιστάμενων οδηγιών, οι οποίες δημιουργήθηκαν παλαιότερα για την πρόληψη της υποβάθμισης του υδάτινου περιβάλλοντος λόγω φυσικών και ανθρωπογενών πιέσεων.

Η Οδηγία προβλέπει τη θέσπιση πλαισίου για την προστασία και την ορθή διαχείριση των εσωτερικών επιφανειακών (ποταμοί και λίμνες), των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων. Το πνεύμα της Οδηγίας είναι καθαρά περιβαλλοντικό κι έχει ως στόχο την κατά το δυνατόν ομογενοποίηση των κριτηρίων και της αντίληψης της διαχείρισης των υδατικών πόρων και βασική αρχή τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων, μέχρι τον τελικό χρήστη-καταναλωτή, στη διαδικασία της διαχείρισης.

Ο απώτερος σκοπός της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα είναι η επίτευξη **καλής οικολογικής κατάστασης** όλων των υδατινών σωμάτων, το αργότερο έως το έτος 2015. Ο ορισμός της οικολογικής κατάστασης εξετάζει την αφθονία της υδατινής χλωρίδας και ιχθυακής πανίδας, την ύπαρξη θρεπτικών συστατικών, και πτυχές όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία και η ρύπανση από χημικούς ρύπους. Λαμβάνονται επίσης υπόψη μορφολογικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η ποιότητα, η ροή του νερού, τα βάθη και η σύσταση του πυθμένα του ποταμού.

Το σχήμα κατάταξης της ΟΠΥ για την οικολογική κατάσταση των **επιφανειακών** υδάτων περιλαμβάνει πέντε κατηγορίες: υψηλή, καλή, μέτρια, ελλιπής και κακή. Ως «υψηλή κατάσταση» νοείται η κατάσταση εκείνη όπου η ανθρώπινη πίεση είναι μηδενική ή πολύ χαμηλή. Ως «καλή κατάσταση» νοείται μια ελαφρά απόκλιση από την κατάσταση αυτή, ως μέτρια νοείται μια μέτρια απόκλιση κ.ο.κ.

Η ΕΕ έχει τώρα περισσότερα από 100.000 συστήματα επιφανειακών υδάτων από τα οποία το 80% είναι ποταμοί, το 15% λίμνες, ενώ το υπόλοιπο 5% είναι παράκτια και μεταβατικά ύδατα.

Οι κανόνες για τα **υπόγεια** ύδατα είναι ελαφρά διαφορετικοί και στόχος είναι η καλή χημική και ποσοτική κατάσταση. Τα κράτη μέλη καλούνται να χρησιμοποιήσουν γεωλογικά δεδομένα για τον προσδιορισμό ανεξάρτητων ποσοτήτων νερού στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, ενώ η ευρωπαϊκή νομοθεσία περιορίζει την άντληση σε ποσοστό της ετήσιας ροής (ανανέωσης). Τα υπόγεια ύδατα δεν πρέπει να είναι καθόλου μολυσμένα-κάθε ρύπανση πρέπει να εντοπίζεται και να εξαλείφεται.

Βασικό καινοτόμο στοιχείο που διέπει την Οδηγία είναι η διασυνοριακή διάσταση της διαχείρισης των υδάτων. Η Οδηγία αναγνωρίζει ότι απαιτούνται κοινές αρχές για το συντονισμό των προσπαθειών των κρατών μελών για τη βελτίωση της προστασίας των υδάτων. Μεμονωμένα μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού δεν μπορούν να είναι επιτυχή χωρίς να συνεκτιμηθούν τα όσα συμβαίνουν ανάντη και κατόντη. Η ολοκληρωμένη διαχείριση λεκάνης απορροής ποταμού υιοθετεί μια ολιστική προσέγγιση για τη προστασία του συνόλου του υδατικού συστήματος, της πηγής του, των παραποτάμων, μέσω μιας συντονισμένης στρατηγικής η οποία εμπλέκει όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Για την ορθή εφαρμογή των διατάξεων της Οδηγίας, τη λήψη μέτρων και τη σύνταξη των διαχειριστικών σχεδίων λεκάνης απορροής ποταμού απαιτείται η υλοποίηση από κάθε κράτος μέλος μίας σειράς δράσεων, όπως ο καθορισμός των τυποχαρακτηριστικών συνθηκών αναφοράς, η άσκηση διαβαθμονόμησης, η παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων κι η ταξινόμηση της οικολογικής τους κατάστασης.

Τα κύρια στοιχεία-στόχοι της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ είναι (Μακρόπουλος, 2010):

1. Προστασία όλων των υδάτων: ποταμοί, λίμνες, παράκτια και υπόγεια.
2. Θέτει φιλόδοξους στόχους για να εξασφαλίσει ότι όλα τα ύδατα θα ανταποκρίνονται στην «καλή οικολογική κατάσταση» έως το 2015.
3. Δημιουργεί σύστημα διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.
4. Απαιτεί διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών και όλων των εμπλεκόμενων μερών, (στην περίπτωση των διεθνών περιοχών λεκάνης απορροής ποταμού).
5. Εξασφαλίζει ενεργό συμμετοχή όλων των φορέων, συμπεριλαμβανομένων των μη κυβερνητικών μηχανισμών και των τοπικών αρχών, στις δραστηριότητες της διαχείρισης των υδάτων.
6. Εξασφαλίζει μείωση κι έλεγχο της ρύπανσης από όλες τις πηγές όπως η γεωργία, η βιομηχανική δραστηριότητα, οι αστικές περιοχές κ.λ.π.

7. Απαιτεί πολιτικές τιμολόγησης του νερού κι εξασφαλίζει ότι ο ρυπαίνων πληρώνει.
8. Δίνεται έμφαση στην αντιμετώπιση των πλημμυρών και ξηρασιών.

2.4 Υδατικές Χρήσεις

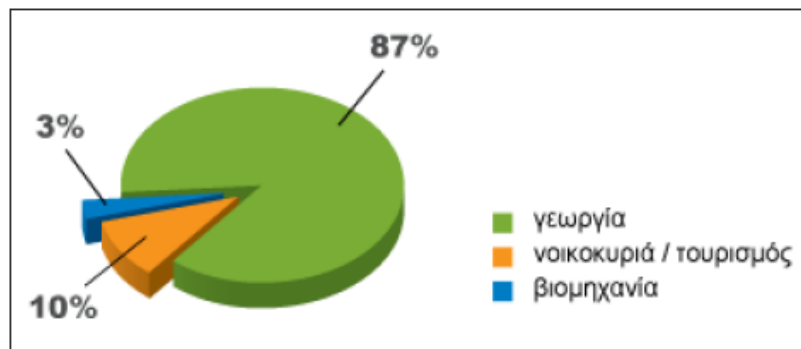
Οι χρήσεις του νερού διακρίνονται σε καταναλωτικές και μη. Οι καταναλωτικές χρήσεις απαιτούν την απόληψη/εκροή συγκεκριμένης ποσότητας νερού, η οποία εξέρχεται από το φυσικό υδάτινο σύστημα και της οποίας μόνο ένα μέρος ή καθόλου επιστρέφει στο εν λόγω σύστημα (άμεσα ή έμμεσα), με διαφοροποιημένη τη φυσική 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 ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του και χωρίς να απομακρύνεται από το φυσικό υδάτινο σύστημα. Στις μη καταναλωτικές υδατικές χρήσεις συγκαταλέγονται η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η περιβαλλοντική διαχείριση, η αναψυχή, η ναυσιπλοΐα και η ιχθυοκαλλιέργεια (Κουτσογιάννης, 2007).

- **Αστική χρήση.** Η σημαντικότερη μορφή αστικής ζήτησης είναι η ύδρευση. 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 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 κι η αυξημένη χρήση του, κυρίως στον τομέα της προσωπικής υγιεινής, έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της κατανάλωσής του. Πέραν των αναγκών ύδρευσης των μονίμων κι εποχιακών κατοίκων (παραθεριστικές περιοχές), στην αστική χρήση συγκαταλέγονται επίσης η τουριστική χρήση του νερού (ξενοδοχειακές μονάδες, ενοικιαζόμενα δωμάτια), η βιοτεχνική χρήση, οι μικροαρδευτικές ανάγκες (μη οικιακή γεωργική χρήση), οι απώλειες των δικτύων κατά τη μεταφορά και 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 δεν μπορεί να παραβλέψει το ζωτικό ρόλο της άρδευσης στην παραγωγική τροφή.

- **Βιομηχανία.** Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στα ανεπτυγμένα 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 κι 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 21^{ου} αιώνα, όχι μόνο εξαιτίας δημογραφικών πιέσεων αλλά και εξαιτίας των συνεχώς βελτιούμενων προδιαγραφών διαβίωσης, την αστική και βιομηχανική δίογκωση και τις αυξανόμενες προσδοκίες.

Όσον αφορά στις χρήσεις του νερού στην Ελλάδα, η γεωργία καταναλώνει το 87%, τα νοικοκυριά (αστική χρήση) και ο τουρισμός το 10%, κι η βιομηχανία το 3%. Οι υψηλές αρδευτικές ανάγκες, ο τουρισμός που αυξάνεται τη ξηρή καλοκαιρινή περίοδο και οι οικιακές ανάγκες ασκούν σημαντική πίεση στα αποθέματα γλυκού νερού (WWF).



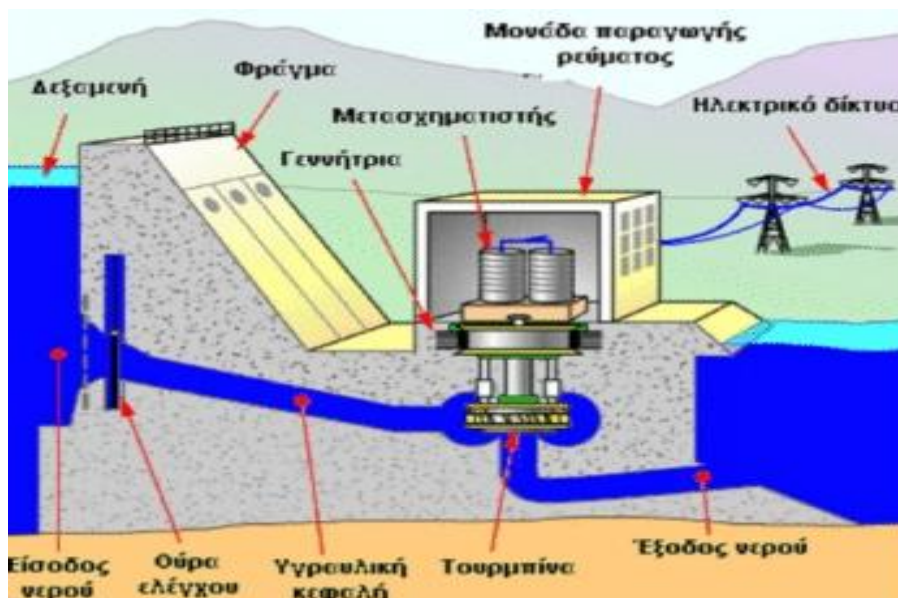
Σχ. 2-1: Ποσοστιαία κατανάλωση νερού ανά τομέα απασχόλησης (Πηγή: WWF, 22.03.2012)

Όπως διαπιστώνεται και από το παραπάνω σχήμα, οι αγροτικές καλλιέργειες αποτελούν τον κυριότερο καταναλωτή νερού στη χώρα. Στο σημείο αυτό η χώρα μας διαφέρει σημαντικά από άλλες χώρες της Ε.Ε. Η διαφορά αυτή είναι αποτέλεσμα κλιματολογικών συνθηκών και αποτελεί μόνιμη και αναπόφευκτη χαρακτηριστική διάσταση της διαχείρισης των υδατικών πόρων της Ελλάδας, στο βαθμό που η γεωργία παραμένει ως μία από τις σημαντικές παραγωγικές δραστηριότητες της χώρας.

2.5 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

2.5.1 Γενικά για την Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση και στη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή της γίνεται μέσω μιας μονάδας μετατροπής της κινητικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική, η οποία ονομάζεται υδροστρόβιλος. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής του στροβίλου, γίνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια με τη μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων γίνεται η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο.



Σχ. 2-2: Σχηματική απεικόνιση υδροηλεκτρικής παραγωγής (www.google.com)

Η δέσμευση/αποθήκευση ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες, για ένα Υδροηλεκτρικό Σταθμό, ισοδυναμεί πρακτικά με αποταμίευση Υδροηλεκτρικής Ενέργειας. Η προγραμματισμένη αποδέσμευση αυτών των ποσοτήτων ύδατος κι η εκτόνωση τους στους υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδάτινων πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις, η Υδροηλεκτρική Ενέργεια καθίσταται μία σημαντικότερη εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Πίν. 2-1: Η υδροηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως(http://greek-energy.blogspot.com/2008/09/blog-post_07.html)

Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια Παγκοσμίως

Producers	TWh	% of World total	Installed Capacity (based on production)	GW	Country (based on first 10 producers)	% of hydro in total domestic electricity generation
People's Rep. of China	397	13.3	People's Rep. of China	108	Norway	98.9
Canada	364	12.1	United States	96	Brazil	83.7
Brazil	337	11.3	Brazil	69	Venezuela	73.9
United States	290	9.7	Canada	67	Canada	57.9
Russia	175	5.8	Japan	45	Sweden	46.0
Norway	137	4.6	Russia	44	Russia	18.3
India	100	3.3	India	31	People's Rep. of China	15.9
Japan	86	2.9	Norway	27	India	14.3
Venezuela	75	2.5	France	24	Japan	7.8
Sweden	73	2.4	Italy	21	United States	6.8
Rest of the World	960	32.1	Rest of the World	304	Rest of the World*	13.9
World	2 994	100.0	World	836	World	16.4

2005 data

2004 data
Sources: United Nations, IEA.

2005 data

2.5.2 Τα Υδροηλεκτρικά Έργα

Τα υδροηλεκτρικά έργα ταξινομούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Μικρά υδροηλεκτρικά έργα θεωρούνται αυτά των οποίων οι μονάδες έχουν δυναμικότητα μικρότερη των 30MW, ενώ αντίθετα μεγάλα είναι αυτά των οποίων οι μονάδες έχουν δυναμικότητα που υπερβαίνει τα 30MW. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά διαφέρουν σημαντικά από τα μεγάλης κλίμακας σε ότι αφορά τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων περιορίζει τη μετακίνηση των ψαριών, της άγριας ζωής και επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής. Αντίθετα, τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια κι η λειτουργία τους παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική όχληση. Για το λόγο αυτό, οι υδροηλεκτρικές μονάδες δυναμικότητας μικρότερης των 30MW χαρακτηρίζονται ως μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα και συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Κατά τη λειτουργία τους, μέρος της ροής ενός ποταμού οδηγείται σε στρόβιλο για τη παραγωγή μηχανικής ενέργειας και συνακόλουθα ηλεκτρικής μέσω της γεννήτριας. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού κατόπιν επιστρέφει στο φυσικό ταμιευτήρα ακολουθώντας τη φυσική της ροή.

Πίν. 2-2: Τα 4 μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου (Μαμάσης και Στεφανάκος, 2010)

Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα				
Τα 4 μεγαλύτερα του κόσμου				
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



Σχ. 2-3: Τα 4 μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου(Μαμάσης και Στεφανάκος, 2010)

Συνοπτικά, τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΥΗΕ αναφέρονται παρακάτω (Παπαντώνης,2008):

2.5.3 Πλεονεκτήματα Υδροηλεκτρικών Έργων

Συνοπτικά, τα βασικά πλεονεκτήματα των ΥΗΕ αναφέρονται παρακάτω (Παπαντώνης, 2008):

- Οι υδατοπτώσεις είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας κι έτσι δεν αντιμετωπίζουν ορατό κίνδυνο εξαντλήσεως τους.
- Δεν έχουν απόβλητα ή κατάλοιπα, δεν μολύνουν το περιβάλλον και (ουσιαστικά) δεν αυξάνουν τη θερμοκρασία του νερού των ποταμών.
- Η κατασκευή τους συνδυάζεται συχνά και με άλλες διευθετήσεις όπως άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση πλημμύρας, αλιεία, αναψυχή, κ.λ.π
- Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου. Το λειτουργικό κόστος των ΥΗΕ (το κόστος συντήρησης και προσωπικού) είναι μικρό.
- Οι υδροστρόβιλοι είναι στιβαρές και αξιόπιστες μηχανές και απαιτούν μικρή συντήρηση κι επίβλεψη και για το λόγο αυτό το προσωπικό των ΥΗΕ είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με την εγκατεστημένη ισχύ
- Για τις ανάγκες κατασκευής του ΥΗΕ κατασκευάζονται έργα υποδομής (δρόμοι, γέφυρες) που βοηθούν στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών.
- Η διάρκεια ζωής των ΥΗΕ είναι μεγάλη, της τάξεως των 50 ετών για τα μεγάλα και των 20-30 ετών για τα μικρά. Η διάρκεια ζωής τους μπορεί να γίνει μεγαλύτερη με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Το πλέον σημαντικό κι αναντικατάστατο πλεονέκτημα των υδροηλεκτρικών έργων είναι η δυνατότητα πολύ γρήγορης παραλαβής και απόρριψης φορτίου έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κι η κάλυψη των αιχμών ζήτησης του διασυνδεδεμένου δικτύου. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν τα μεγάλης ισχύος υδροηλεκτρικά έργα αποθήκευσης, δηλαδή αυτά των οποίων το φράγμα δημιουργεί ταμιευτήρα μεγάλης χωρητικότητας. Η δυνατότητα κάλυψης των αιχμών ισχύος του δικτύου είναι πολύ σημαντική από τεχνικής κι οικονομικής άποψης επειδή η αξία της kW αιχμής είναι πολλαπλάσια της αξία της kW βάσεως. Σ' αυτό ακριβώς το πλεονέκτημα των ΥΗΕ βασίζεται η κατασκευή αναστρέψιμων μονάδων οι οποίες κατά τη διάρκεια της χαμηλής ζήτησης (νύχτα) λειτουργούν αντλώντας νερό από τον κάτω ταμιευτήρα προς τον άνω, δηλαδή αποταμιεύοντας ενέργεια την οποία είναι έτοιμα να αποδώσουν κατά τις ώρες αιχμής. Τα μικρά ΥΗΕ, λόγω ακριβώς της μικρής ισχύος τους, δεν μπορούν να συνεισφέρουν στην κάλυψη των αιχμών ενός διασυνδεδεμένου δικτύου και για το λόγο αυτό δεν υπάρχει σε αυτά ενδιαφέρον κατασκευής ταμιευτήρα.

2.5.4 Μειονεκτήματα Υδροηλεκτρικών Έργων

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των ΥΗΕ είναι τα εξής (Παπαντώνης,2008):

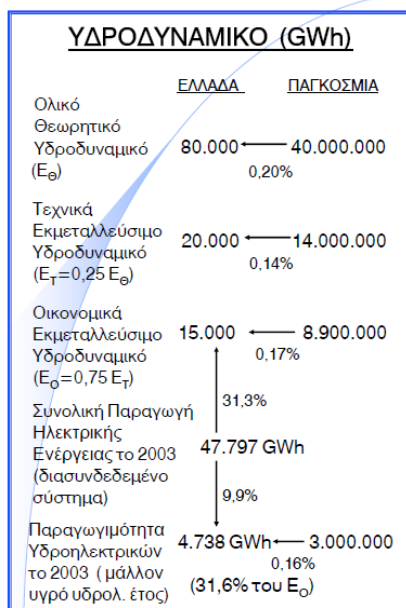
- Έχουν μεγάλη διάρκεια κατασκευής (της τάξεως των 5-10 ετών για μεγάλα ΥΗΕ και 1-2 χρόνια για μικρό ΥΗΕ) ενώ επίσης μεγάλη είναι η διάρκεια των μελετών και συλλογής-επεξεργασίας υδρολογικών και γεωλογικών κλπ στοιχείων, τα οποία πρέπει να είναι τόσο πιο πλήρη κι αξιόπιστα όσο μεγαλύτερο είναι το έργο.
- Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται διακυμάνσεις που σχετίζονται με την υδραυλικότητα της χρονιάς, δηλαδή την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων).
- Έχουν πολύ υψηλό κόστος κατασκευής (της τάξεως των 2000-4000 €/KW) και για αυτό απαιτούν τη διάθεση μεγάλων σχετικά κεφαλαίων.
- Η κατασκευή τους προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων υδατοπτώσεων και μεγάλων παροχών. Για το λόγο αυτό η θέση τους είναι πολλές φορές πολύ μακριά από την κατανάλωση με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται σημαντικά το κόστος κατασκευής τους από το κόστος των έργων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.5.5 Τα Υδροηλεκτρικά Έργα της Ελλάδας

Όσον αφορά στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο μέρος του υδροδυναμικού εντοπίζεται στο δυτικό και βόρειο τμήμα της χώρας, τόσο λόγω της διαμόρφωσης μεγάλων λεκανών απορροής σε εκείνες της περιοχές, όσο και λόγω των σημαντικών βροχοπτώσεων. Στη χώρα μας λειτουργούν συνολικά 16 μεγάλα ΥΗΕ, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των οποίων είναι 3.060 MW, δηλαδή περίπου το 22% της συνολικής ισχύος του διασυνδεδεμένου συστήματος. Τα τρία μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα της Ελλάδας είναι τα Κρεμαστά (437MW), ο Θησαυρός (384MW) και το Πολύφυτο (375MW). Η υδροηλεκτρική παραγωγή, όπως προβλεπόταν από τις μελέτες, θα έπρεπε να είναι της τάξεως των 6.400GWh το χρόνο. Παρόλα αυτά, η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας από όλα τα υδροηλεκτρικά κυμαίνεται μεταξύ 4.000 και 5.000GWh, δηλαδή η μέση συνεισφορά των υδροηλεκτρικών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου το 10% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής. Ο διαθέσιμος ωφέλιμος όγκος όλων των ταμιευτήρων των υδροηλεκτρικών φτάνει τα 5.300 εκατομμύρια m³, εκ των οποίων το 30% διατίθεται κατά προτεραιότητα για άλλες, πέραν της ηλεκτροπαραγωγής, χρήσεις.

Παρόλο που υπάρχει μεγάλη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης υδροηλεκτρικών σταθμών, δεν έχει προγραμματιστεί από τη ΔΕΗ η κατασκευή νέων μεγάλων ΥΗΕ. Επίσης, δεν έχουν ενεργοποιηθεί ακόμη οι ιδιώτες επενδυτές.

Πίν. 2-3: Ετήσιο Ελληνικό και Παγκόσμιο υδροδυναμικό (Στεφανάκος, 2011)



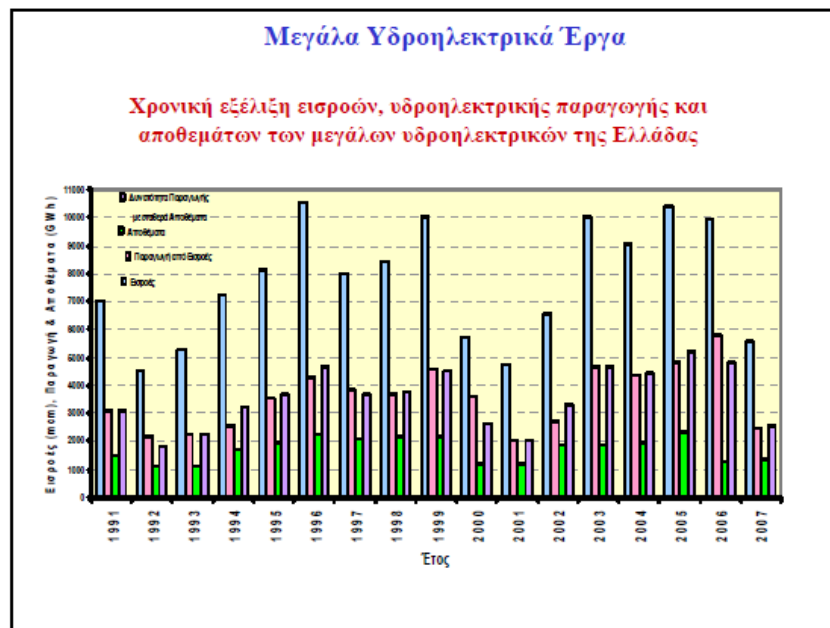
Πίν. 2-4: Τα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ σε λειτουργία

Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα
25 υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ σε λειτουργία

16 ΜΕΓΑΛΑ ΥΗ ΕΡΓΑ (έτος ένταξης-ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα hm ³)	11 ΜΙΚΡΑ ΥΗ ΕΡΓΑ
<ul style="list-style-type: none"> > ΛΟΥΡΟΣ (1954-0,035) > ΑΓΡΑΣ (1954- 3,8) > ΛΑΔΩΝΑΣ (1955- 46,2) > ΠΛΑΣΤΗΡΑΣ (1960- 300) > ΚΡΕΜΑΣΤΑ (1966- 2805) > ΚΑΣΤΡΑΚΙ (1969- 53) > ΕΔΕΣΣΑΙΟΣ (1969- 0,46) > ΠΟΛΥΦΥΤΟ (1974- 1020) > ΠΟΥΡΝΑΡΙ (1981- 303) > ΑΣΩΜΑΤΑ (1985-10) > ΣΦΗΚΙΑ (1985-16) > ΣΤΡΑΤΟΣ (1989-11) > ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ (1990-145) > ΘΗΣΑΥΡΟΣ (1997-570) > ΠΟΥΡΝΑΡΙ II (1999- 3,6) > ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ (1999- 12) 	<ul style="list-style-type: none"> > ΓΛΑΥΚΟΣ (1927) > ΒΕΡΜΙΟ (1929) > ΑΓΙΑ ΚΡΗΤΗΣ (1929) > ΑΛΜΥΡΟΣ ΚΡΗΤΗΣ (1931) > ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΕΡΡΩΝ (1931) > ΓΚΙΩΝΑ (1988) > ΣΤΡΑΤΟΣ II (1988) > ΜΑΚΡΟΧΩΡΙ (1992) > ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ (2008) > ΣΜΟΚΟΒΟ (2008) > ΠΑΠΑΔΙΑ (2010)

Πίν. 2-5: Μεγάλα ΥΗΕ που αναμένονται να λειτουργήσουν (Κουτσογιάννης, 2007)

A/A	ΥΗΕ	Ποταμός	Συνολική εγκατ. ισχύς (MW)
1	Μεσοχώρα	Ανω Αχελώος	161.6
2	Συκιά		126.5
3	Πευκόφυτο		160.0
4	Μετσοβίτικος	Αραχθός	25.0
5	Παρίονας	Αλιάκμονας	120.0
6	Τέμενος	Νέστος	19.0
	Σύνολο		612.1



Σχ. 2-4: Χρονική εξέλιξη εισροών υδροηλεκτρικής παραγωγής και αποθεμάτων των μεγάλων υδροηλεκτρικών της Ελλάδας (Μαμάσης και Στεφανάκος, 2010)

2.5.6 Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Ενέργεια Υδροηλεκτρικών Έργων

Η υδροηλεκτρική παραγωγή από τους ΥΗΣ κάθε υδροσυστήματος διακρίνεται σε δύο συνιστώσες: στην πρωτεύουσα και στη δευτερεύουσα υδροηλεκτρική ενέργεια. Ως **πρωτεύουσα ενέργεια Ε** καλείται η εξασφαλισμένη υδροηλεκτρική ενέργεια η οποία μπορεί να παραχθεί πάντα από το υδροσύστημα, ακόμα και κάτω από τις δυσμενέστερες υδρολογικά συνθήκες (ξηρασία κ.λ.π). Η πρωτεύουσα ενέργεια αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της ενεργειακής παραγωγής ενός συστήματος, χρησιμοποιείται στην ανάλυση ωφελιμότητας ενός ΥΗΕ και εξαρτάται:

- Από τη στοχαστικότητα των φυσικών εισροών στον ταμιευτήρα
- Από τον όγκο που διατίθεται αποθηκευμένος και ρυθμισμένος μέσα στον ταμιευτήρα

Κάθε επιπλέον ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα, πέραν της πρωτεύουσας, καλείται **δευτερεύουσα**. Η δευτερεύουσα ενέργεια αποτελεί ενεργειακό δυναμικό μικρότερης αξίας γιατί δεν είναι εγγυημένη, και μπορεί να παραχθεί μόνο κατά τις χρονικές περιόδους μεγάλων εισροών στους ταμιευτήρες.

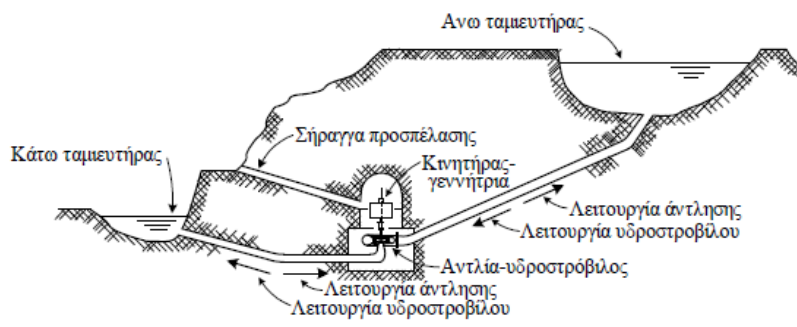
2.5.7 Το Σύστημα Άντλησης Ταμίευσης των ΥΗΕ

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα που δεν κάνουν ρύθμιση της ροής, όπως και οι περισσότερες ΑΠΕ, έχουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής, η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με τη ζήτηση. Δημιουργείται επομένως η ανάγκη της αποθήκευσης ενέργειας για μικρά έως μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ανάγκη αυτή για αποθήκευση της ενέργειας υπήρχε και παλαιότερα, ωστόσο αναμένεται ότι στο μέλλον θα μεγαλώσει σημαντικά, λόγω της μεγαλύτερης συμμετοχής των ΑΠΕ.

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). Συγκεκριμένα, σε περιόδους χαμηλής έως και μηδενικής ζήτησης (κυρίως δηλαδή κατά τις νυχτερινές ώρες), αντλείται νερό από τα χαμηλά υψόμετρα προς τα ψηλά, το οποίο και αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού έργου. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η άντληση, απαιτείται επιπλέον ενέργεια η οποία προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικές μονάδες σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Κατά τη διάρκεια των περιόδων μεγάλης ζήτησης (ώρες αιχμής), το νερό που είναι αποθηκευμένο στον ταμιευτήρα απελευθερώνεται, και περνώντας μέσα από τις τουρμπίνες, παράγεται η ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των αιχμών. Αν και η διαδικασία της άντλησης συνοδεύεται από απώλειες ενέργειας, στο σύνολο του το σύστημα της άντλησης ταμίευσης κρίνεται αρκετά συμφέρον και κερδοφόρο, αφού η πώληση της ενέργειας γίνεται στις ώρες αιχμής, στις οποίες η τιμή πώλησης της ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή βάσεως (ώρες χαμηλής ζήτησης).

Στο σύνολό της, η μέθοδος της άντλησης – ταμίευσης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Είναι αναστρέψιμη.
- Έχει γρήγορη απόκριση, δηλαδή δυνατότητα γρήγορης παραλαβής και γρήγορης απόρριψης φορτίου πολύ μεγάλης ισχύος, με αποτέλεσμα να αποτελεί την καλύτερη λύση που διαθέτει ο διαχειριστής ενός δικτύου ώστε να καλύπτει τις αιχμές φορτίου που παρουσιάζονται.
- Έχει σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης σε έναν πλήρη κύκλο, που κυμαίνεται σε τιμές από 70% έως 90%. Οι τιμές αυτές είναι ασύλληπτα υψηλές συγκρινόμενες με αυτές άλλων τρόπων ενεργειακών μετατροπών.
- Σχηματικά, η λειτουργία των συστημάτων άντλησης ταμίευσης φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 2-5: Διάταξη αντιστρεπτού ΥΗΕ (Παπαντώνης, 2009)

3 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων – Παρουσίαση του WEAP 21 και του Optimization Toolbox του MATLAB

3.1 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων

3.1.1 Ορισμός

Στο πολύπλοκο και ασταθές περιβάλλον των σύγχρονων επιχειρήσεων και οργανισμών, η λήψη των αποφάσεων είναι πλέον αποτέλεσμα σύνθετων διαδικασιών που ξεφεύγουν από την ευθύνη του ενός και μόνο ατόμου. Τέτοιες διαδικασίες αποσκοπούν στην μελέτη, ανάλυση και τεκμηρίωση των επιπτώσεων ενδεχόμενων αποφάσεων καθώς και στη σύγκλιση προς τις τελικές προτάσεις που ικανοποιούν τους στόχους όλων των εμπλεκόμενων μερών. Η λήψη μιας τελικής απόφασης γίνεται μέσα από συνεχείς κύκλους μελέτης των δεδομένων, των εναλλακτικών λύσεων ή ακόμα και του ίδιου του αντικειμένου της απόφασης.

Τα **Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ)** (Decision Support Systems (DSS)) είναι αλληλεπιδραστικά συστήματα λογισμικού που αποσκοπούν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών λήψης αποφάσεων σε χώρους προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από χαμηλό βαθμό δόμησης. Στα πλαίσια ενός ΣΥΑ, ο αποφασίζων (αναλυτής αποφάσεων) υποστηρίζεται από αναλυτικές μεθόδους και μοντέλα για να θέτει στόχους και να ορίζει εναλλακτικά σενάρια (λύσεις), να αναλύει τις επιπτώσεις τους, να αξιολογεί τις εναλλακτικές λύσεις και τελικά να επιλέγει την κατάλληλη λύση που θα εφαρμοστεί. Δηλαδή τα ΣΥΑ υποστηρίζουν χωρίς να αντικαθιστούν τη κρίση των αποφασιζόντων, παρέχοντας τους πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και αναλυτικά-ποσοτικά μοντέλα. Η χρήση των ΣΥΑ για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων απόφασης διευρύνει το πεδίο αντίληψης των χρηστών/αποφασιζόντων και προοδευτικά αναπτύσσει τις δεξιότητες τους σε βαθμό που οι ίδιοι να βελτιώνουν τις αποφάσεις τους.

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ ΣΥΑ και πληροφοριακών συστημάτων διοίκησης (ΠΣΔ) είναι ότι τα μεν πρώτα σχεδιάζονται για να διευκολύνουν και να ενισχύουν τη συμμετοχή του αποφασίζοντα στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, ενώ τα ΠΣΔ αποσκοπούν στην αυτοματοποίηση καλά δομημένων λειτουργιών, στην καταχώρηση κι επεξεργασία δεδομένων και στην έκδοση πληροφοριών. Δηλαδή τα ΣΥΑ δεν είναι απλά συστήματα αναζήτησης πληροφοριών. Είναι συστήματα που αξιοποιούν την πληροφορία εισάγοντας μια συστηματική προσέγγιση στην προπαρασκευή των αποφάσεων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ΣΥΑ είναι τα εξής:

- Υποστήριξη για τη λήψη αποφάσεων ειδικά σε ημιδομημένα ή αδόμητα προβλήματα.

-
- Παροχή υπηρεσιών σε διάφορα διοικητικά επίπεδα.
 - Υποστήριξη σε αλληλοεπηρεαζόμενες ή διαδοχικές αποφάσεις.
 - Υποστήριξη σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας λήψης αποφάσεων
 - Φιλικότητα προς το χρήστη, δυνατότητες γραφικών παραστάσεων και διάλογος με το χρήστη σε κάποια γλώσσα που μοιάζει με τη φυσική γλώσσα.
 - Χρήση προτύπων που επιτρέπουν στο χρήστη να πειραματιστεί με διάφορες στρατηγικές.
 - Δυνατότητες ανάλυσης «τι θα γίνει αν...».

3.1.2 Στάδια Χρήσης Ενός ΣΥΑ

Τα στάδια χρήσης ενός ΣΥΑ είναι τα εξής:

1. Αναγνώριση του προβλήματος. Ανάλυση και διαπίστωση ότι δεν μπορεί να λυθεί με απλό τρόπο.
2. Επιλογή του κατάλληλου ΣΥΑ.
3. Δόμηση του προβλήματος ώστε να ικανοποιεί τους περιορισμούς του επιλεγμένου ΣΥΑ.
4. Αναγνώριση των απαιτήσεων δεδομένων για το πρόβλημα.
5. Μοντελοποίηση του προβλήματος στο ΣΥΑ.
6. Επιλογή και οργάνωση των κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν για τη λήψη των αποφάσεων.
7. Αναγνώριση, συλλογή, μορφοποίηση και εισαγωγή των δεδομένων.
8. Λειτουργία του ΣΥΑ για τη συλλογή των λύσεων μέχρι να έχουν εξεταστεί αρκετές λύσεις και να υπάρχει η πεποίθηση ότι το μοντέλο είναι σωστό.
9. Παρουσίαση κι επανεξέταση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Τα αποτελέσματα είναι η βάση για τη λήψη αποφάσεων κι ενεργειών.

Η κύρια χρήση των ΣΥΑ όμως επικεντρώνεται στη συλλογή κι επεξεργασία των δεδομένων καθώς και στη διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω εφαρμογών διαχείρισης κι επεξεργασίας των πληροφοριών (από απλά εργαλεία λογιστικών φύλλων μέχρι εργαλεία σχεσιακών βάσεων δεδομένων και συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας). Από την άλλη πλευρά, η διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων αναφέρεται στην εφαρμογή εξειδικευμένων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία αναπαριστούν τη δυναμική εξέλιξη του υπό μελέτη

συστήματος, διερευνώντας τις επιπτώσεις εναλλακτικών δράσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία και διαχείριση αυτού. Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι η λήψη απόφασης κι η ανάληψη δράσεων προσιδιάζει στον άνθρωπο, ο οποίος έχει και τη ευθύνη για τις συνέπειες και δεν μπορεί να υποκατασταθεί από το ΣΥΑ.

3.1.3 Εφαρμογές των ΣΥΑ στη Διαχείριση Συστημάτων Υδατικών Πόρων

Το σύνθετο πρόβλημα της Διαχείρισης Συστημάτων Υδατικών Πόρων αντιμετωπίζεται πολλές φορές ακόμα και σήμερα με εμπειρικό τρόπο ή με τη βοήθεια λογισμικών εργαλείων απλής προσομοίωσης του συστήματος υδατικών πόρων, που εφαρμόζουν κανόνες λειτουργίας και σενάρια που επιλέγει με μάλλον αυθαίρετο τρόπο ο χρήστης. Μια τέτοια αντιμετώπιση αδυνατεί να εξασφαλίσει την εφαρμογή της πλέον αποδοτικής διαχείρισης, καθότι τα σενάρια κι οι κανόνες λειτουργίας δεν αποτελούν αποτέλεσμα κάποιας συστηματικής διεργασίας αλλά εξαρτώνται από την εμπειρία και τις επιλογές του εκάστοτε χρήστη.

Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται με εισαγωγή ΣΥΑ στη Διαχείριση των Συστημάτων Υδατικών Πόρων. Τα Συστήματα Υδατικών Πόρων είναι ένα από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής των ΣΥΑ. Αυτό συμβαίνει επειδή:

- Παρουσιάζουν πολυπλοκότητα στη δομή και στη λειτουργία τους.
- Οι σχετιζόμενες με αυτά φυσικές διεργασίες είναι στοχαστικής φύσης.
- Η διαχείριση τους απαιτεί πληθώρα δεδομένων.
- Η διαχείριση τους αποσκοπεί στην ικανοποίηση κατά κανόνα αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών.

Μερικές 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 ποταμών αλλά και αστικές 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.

-
- Έλεγχος ρύπανσης σε λεκάνες απορροής και δέλτα ποταμών.
 - Διαχείριση μη σημειακών πηγών ρύπανσης σε γεωργικές περιοχές.

Η παρούσα εργασία ασχολείται εκτενώς με το θέμα της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων, και συγκεκριμένα με τη διαχείριση του υδροσυστήματος του ποταμού Νέστου. Η χρήση ΣΥΑ επομένως, προκειμένου να βρεθεί ένα σωστό κι αποδοτικό μοντέλο διαχείρισης κρίνεται απαραίτητη. Η συνδυασμένη χρήση του λογισμικού WEAP21 που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του συστήματος, και των διαφόρων αλγορίθμων βελτιστοποίησης που εμπεριέχονται στο Optimization Toolbox του MATLAB εξασφαλίζει την ύπαρξη ενός αποτελεσματικού και ιδιαίτερα χρήσιμου ΣΥΑ. Η περιγραφή του λογισμικού WEAP21 γίνεται στις επόμενες παραγράφους.

3.2 Το Λογισμικό WEAP21

3.2.1 Εισαγωγή στο WEAP21

Οι προκλήσεις της διαχείρισης του γλυκού νερού αποτελούν ένα θέμα διαρκώς αυξανόμενου ενδιαφέροντος. Η κατανομή των πεπερασμένων σε διαθεσιμότητα υδατικών πόρων μεταξύ αστικών, αγροτικών και περιβαλλοντικών χρήσεων απαιτεί μια ολοκληρωμένη θεώρηση της προσφοράς, της ζήτησης, της ποιότητας νερού και των οικολογικών ζητημάτων. Το WEAP21 είναι ένα φιλικό προς το χρήστη εργαλείο λογισμικού που προσφέρει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση στο θέμα της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Το WEAP21 αναπτύχθηκε από το Stockholm Environment Institute (SEI) και χρησιμοποιείται από πολλούς επαγγελματίες που ασχολούνται με το θέμα της διαχείρισης των υδατικών πόρων, αφού αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο συμπλήρωμα σε εργαλεία που ήδη χρησιμοποιούνται, όπως μοντέλα, βάσεις δεδομένων, φύλλα λογιστικά και άλλα λογισμικά.

Το WEAP21 λειτουργεί στη βάση της αρχής του υδατικού ισοζυγίου και μπορεί να εφαρμοστεί σε αστικά και αγροτικά συστήματα, σε σύστημα μιας λεκάνης απορροής ή και σε πολύπλοκα συστήματα διασυνοριακών λεκανών απορροής. Παρέχει μια ολοκληρωμένη, ευέλικτη και φιλική προς το χρήστη δομή για το σχεδιασμό και την ανάλυση πολιτικών.

Οι πεπερασμένοι σε διαθεσιμότητα υδατικοί πόροι, οι πολλές και αντικρουόμενες χρήσεις νερού, οι προβληματισμοί σε σχέση με την περιβαλλοντική ποιότητα, ο σχεδιασμός κάτω από συνθήκες έντονης διακύμανσης και κλιματικής αβεβαιότητας καθώς κι η ανάγκη για ανάπτυξη και υλοποίηση στρατηγικών αειφόρου χρήσης νερού αποτελούν ολοένα και πιο πιεστικά ζητήματα για τους σχεδιαστές των συστημάτων υδατικών πόρων. Τα συμβατικά μοντέλα προσομοίωσης με βάση την προσφορά δεν είναι πάντα επαρκή για την εξερεύνηση όλου του εύρους των δυνατών επιλογών διαχείρισης. Το WEAP21 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

νερού σε ισότιμη βάση με θέματα διαχείρισης προσφοράς, όπως η παροχή υδατορρέυματος, οι πόροι υπόγειων υδάτων, οι ταμιευτήρες κι η μεταφορά ύδατος.

Πέρα από αυτά, το WEAP21 προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση σχετικά με την προσομοίωση τόσο των φυσικών(π.χ απαιτήσεις εξατμισοδιαπνοής, απορροή, βασική παροχή) όσο και των τεχνητών στοιχείων (π.χ ταμιευτήρες, άντληση υπογείων υδάτων) των υδατικών οικοσυστημάτων. Έτσι ο σχεδιαστής μπορεί ευκολότερα να λαμβάνει υπόψη του όλους τους παράγοντες και να οδηγείται σε ένα πιο ολοκληρωμένο και σωστό σχεδιασμό.

Το WEAP21 υποστηρίζει διάφορες λειτουργίες:

- **Βάση δεδομένων υδατικού ισοζυγίου**, όπου παρέχεται ένα σύστημα διατήρησης πληροφοριών για την προσφορά και τη ζήτηση νερού.
- **Εργαλείο δημιουργίας σεναρίων**, όπου προσομοιώνεται η ζήτηση κι η προσφορά του νερού, η απορροή, η παροχή υδατορρέυματος, η αποθήκευση, η ρύπανση, η επεξεργασία κι η απόρριψη, καθώς κι η ποιότητα των ρευμάτων.
- **Εργαλείο ανάλυσης πολιτικών**, όπου το WEAP αξιολογεί ένα εύρος επιλογών ανάπτυξης και διαχείρισης υδατικών πόρων και λαμβάνει υπόψη του τις πολλαπλές και ανταγωνιστικές χρήσεις των υδατικών οικοσυστημάτων.

3.2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά του WEAP21

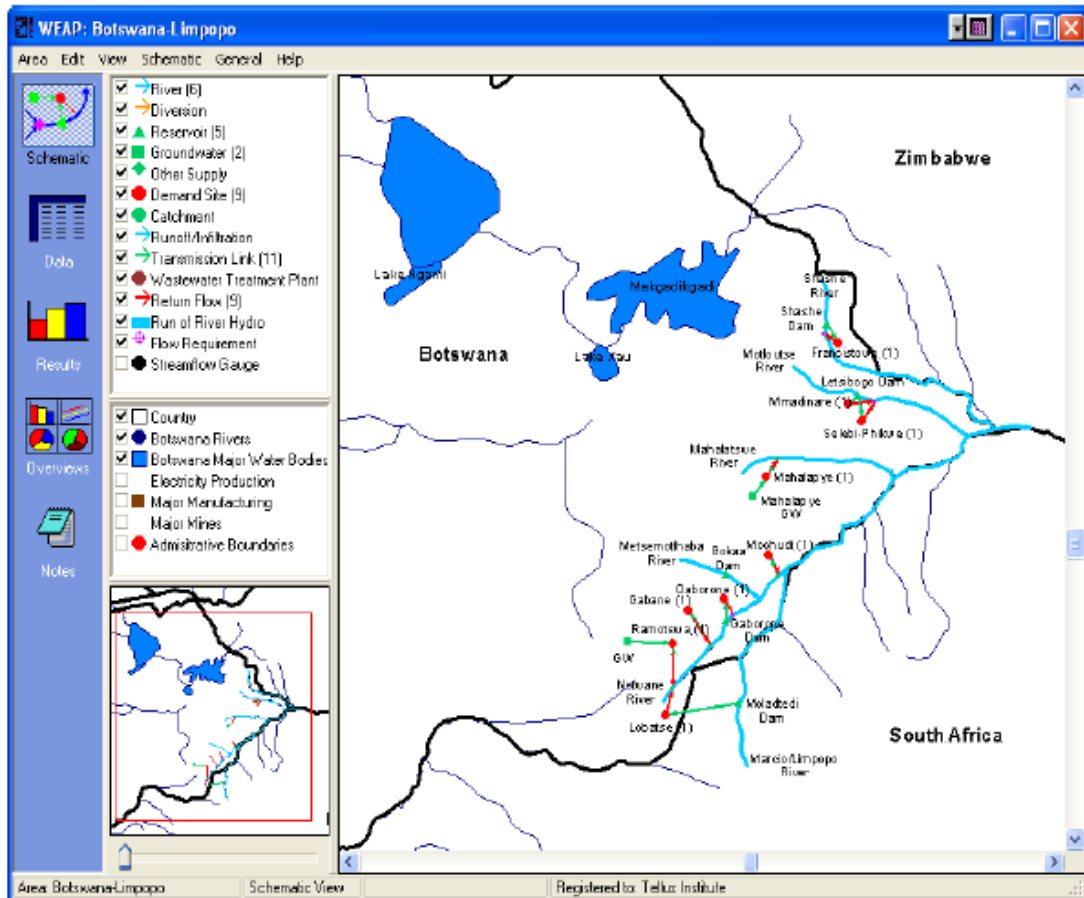
Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του WEAP21 είναι τα ακόλουθα:

- Είναι ένα σύστημα ολοκληρωμένου σχεδιασμού των υδατικών πόρων.
- Έχει ενσωματωμένα μοντέλα για πληθώρα φαινομένων όπως κατακρημνίσεις-απορροή και διήθηση, εξατμισοδιαπνοή, απαιτήσεις καλλιεργειών και αποδόσεις, αλληλεπιδράσεις επιφανειακών και υπόγειων υδάτων κ.λ.π.
- Είναι βασισμένο σε γραφικό περιβάλλον GIS, με γραφικό περιβάλλον διεπιφάνειας χρήστη “drag and drop”.
- Έχει την ικανότητα δημιουργίας μοντέλων με έναν αριθμό ενσωματωμένων συναρτήσεων.
- Οριζόμενες από το χρήστη μεταβλητές και εξισώσεις.
- Προσφέρει τη δυνατότητα δυναμικής σύνδεσης με υπολογιστικά φύλλα και άλλα μοντέλα, όπως το excel, το MATLAB, το QUAL2K, το MODFLOW κ.α.
- Έχει ενσωματωμένο γραμμικό πρόγραμμα επίλυσης εξισώσεων κατανομής πόρων.
- Περιέχει ευέλικτες και επεκτεινόμενες δομές δεδομένων.
- Έχει ένα δυνατό σύστημα παραγωγής αναφορών που περιλαμβάνει γραφήματα, πίνακες και χάρτες.

3.2.3 Η Δομή του WEAP21

Το WEAP21 αποτελείται από πέντε κυρίως προβολές:

-
- **Γραφική απεικόνιση.** Μέσω των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με τα οποία είναι εφοδιασμένο το WEAP21, πραγματοποιείται σχετικά εύκολα η αναπαράσταση του συστήματος-περιοχής. Η εισαγωγή των φυσικών και των τεχνητών γνωρισμάτων του συστήματος όπως για παράδειγμα τα ποτάμια, οι ταμιευτήρες κι οι κόμβοι ζήτησης γίνεται μέσω της δυνατότητας drag and drop και επιλέγοντας από ένα μενού στοιχείων που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης. Επίσης, στην προβολή της γραφικής απεικόνισης μπορεί να γίνει και προσθήκη αρχείων διανυσματικής μορφής (vector files) ή αρχεία ψηφιδωτών (raster files) ως φόντο στα διάφορα επίπεδα πληροφορίας.
 - **Δεδομένα.** Μέσω της προβολής αυτής εισάγονται στο WEAP21 όλα τα υπάρχοντα δεδομένα για κάθε στοιχείο του συστήματος, όπως για παράδειγμα οι χρονοσειρές βροχής και εξατμισοδιαπνοής, τα εμβαδά των διαφόρων υπολεκανών, τα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων φραγμάτων κ.λ.π. Επίσης δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μεταβλητών και σχέσεων, αλλά και εισαγωγής παραδοχών και προβλέψεων μέσω διαφόρων μαθηματικών σχέσεων. Τέλος, το WEAP21 μέσω αυτής της προβολής δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιτύχει μία δυναμική σύνδεση των δεδομένων εισόδου κι εξόδου με το Excel, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο.
 - **Αποτελέσματα.** Η προβολή αυτή προσφέρει μία ευέλικτη και λεπτομερή προβολή των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές: στα γραφήματα, όπου γίνεται η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων συναρτήσει του χρόνου, στον πίνακα, όπου γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, και στον χάρτη, όπου και πάλι παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων συναρτήσει του χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να εξάγει αποτελέσματα για μια πληθώρα διαφορετικών μεταβλητών, επιλέγοντας κάθε φορά τόσο τις μονάδες μέτρησης όσο και τα σενάρια για τα οποία επιθυμεί να γίνει ο υπολογισμός.
 - **Περιηγητής σεναρίων.** Σε αυτήν την προβολή γίνεται η παρουσίαση μίας ομάδας συγκεντρωτικών γραφημάτων που υποδεικνύουν τους βασικούς δείκτες του συστήματος και προσφέρουν μία γρήγορη επισκόπηση. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, αφού ο χρήστης μπορεί έτσι εύκολα να μελετήσει πως οι αλλαγές στα δεδομένα επηρεάζουν τα αποτελέσματα.
 - **Σημειώσεις.** Παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να σημειώσει τα δεδομένα, τις παραδοχές του και οτιδήποτε άλλο τον βοηθάει στη μελέτη του.



Σχ. 3-1: Περιβάλλον εργασίας στο WEAP (www.weap21.org)

3.2.4 Μοντελοποίηση και Δημιουργία Σεναρίων στο WEAP21

Το πρώτο βήμα για την μοντελοποίηση του συστήματος είναι η αναπαράσταση του στο WEAP21 στην υφιστάμενη του κατάσταση, δηλαδή στην κατάσταση που βρίσκεται τη χρονιά που θεωρείται ως η αρχή της χρονικής περιόδου ενδιαφέροντος. Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής Current Accounts. Συγκεκριμένα, διαλέγοντας την επιλογή Current Accounts από το μενού στο πάνω μέρος της οθόνης, επιλέγεται η χρονιά που θεωρείται ως η βάση του συστήματος και εκεί γίνεται η εισαγωγή όλων των δεδομένων και των φυσικών και τεχνητών χαρακτηριστικών που έχει το σύστημα τη συγκεκριμένη χρονιά. Στη συνέχεια, κι έχοντας ως βάση την κατάσταση που περιγράφεται στο Current Accounts, ξεκινάει η δημιουργία σεναρίων από το χρήστη, τα οποία αναπαριστούν μία μελλοντική εικόνα του συστήματος και διερευνούν τις πιθανές αλλαγές που θα συμβούν τα μελλοντικά χρόνια στο σύστημα με την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών και στρατηγικών. Σημειώνεται ότι το κάθε σενάριο είναι εντελώς ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα και αναπαριστά μία διαφορετική μελλοντική κατάσταση.

Το WEAP21 στη συνέχεια υπολογίζει για το κάθε σενάριο ξεχωριστά τις ποσότητες νερού που θα δοθούν σε κάθε κόμβο ζήτησης, τηρώντας κάθε φορά τους εκάστοτε περιορισμούς

που τίθενται από το κάθε σενάριο, καθώς και τις προτεραιότητες που έχουν ορισθεί μεταξύ των κόμβων ζήτησης. Οι προτεραιότητες των κόμβων στο WEAP21 μπορούν να πάρουν μία τιμή μεταξύ των τιμών 1-99(με 1 συμβολίζεται η υψηλότερη και με 99 η χαμηλότερη). Το WEAP21 θα προσπαθήσει να ικανοποιήσει όλες τις ζητήσεις, ξεκινώντας τη διανομή του νερού από τους κόμβους με υψηλότερη προτεραιότητα και ύστερα συνεχίζοντας σε αυτούς με τη χαμηλότερη προτεραιότητα, έως ότου ικανοποιηθούν όλες οι ζητήσεις ή έως ότου τελειώσουν τα αποθέματα, οτιδήποτε από τα δύο συμβεί πρώτο. Μπορεί επίσης να κάνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων σεναρίων, έτσι ώστε να μπορέσει εύκολα ο χρήστης να καταλήξει στις καταλληλότερες και σωστότερες πολιτικές και αποφάσεις.

Συνοπτικά, τα βασικά βήματα της αναπαράστασης και της προσομοίωσης των υδροσυστημάτων στο WEAP είναι τα ακόλουθα:

1. **Ορισμός της μελέτης**, όπου ορίζονται τα χρονικά και τα χωρικά όρια του συστήματος και οι διάφορες συνιστώσες του, ενώ παράλληλα διατυπώνονται και τα βασικά προβλήματα.
2. **Τρέχοντες υπολογισμοί**, όπου αναπτύσσεται μία αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης όσον αφορά στη ζήτηση του νερού, στο ρυπαντικό φορτίο, στους πόρους και τις προμήθειες του συστήματος.
3. **Σενάρια**, όπου γίνεται η διατύπωση μίας σειράς εναλλακτικών υποθέσεων και εκτιμώνται οι μελλοντικές επιδράσεις των διαφόρων πολιτικών σε διάφορα θέματα, όπως για παράδειγμα στη ζήτηση και στην προσφορά νερού αλλά και στη ρύπανση.
4. **Αξιολόγηση**, όπου τα σενάρια αξιολογούνται με γνώμονα την επάρκεια του νερού, το κόστος, τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς στόχους κ.λ.π.

3.2.5 WEAP21 και Διεργασίες Λεκάνης Απορροής

Στο WEAP21 υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι για τη προσομοίωση των διαφόρων υδρολογικών διεργασιών που γίνονται στις λεκάνες απορροής, όπως η εξάτμιση, η απορροή, η διήθηση κ.λ.π. Η σωστή κάθε φορά επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου πρέπει να γίνεται με βάση τόσο την επιθυμητή πολυπλοκότητα όσο και την διαθεσιμότητα των δεδομένων.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- **Irrigation Demands Only Method (FAO Crop Requirements Method)**. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τους συντελεστές καλλιέργειας για να υπολογίσει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή στη λεκάνη απορροής. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι η απλούστερη από τις 4, έχει όμως το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να υπολογίσει την απορροή, τη διήθηση καθώς και μικρές αλλαγές της εδαφικής υγρασίας.

- **Rainfall Runoff Method (FAO Crop Requirements Method).** Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή σε αρδευόμενες και ξηρές περιοχές, χρησιμοποιώντας συντελεστές καλλιέργειας. Το ποσοστό της βροχής που δεν έγινε εξατμισοδιαπνοή προσομοιώνεται όλο ως απευθείας απορροή ή ως απευθείας απορροή και διήθηση στο έδαφος.
- **Rainfall Runoff Method (Soil Moisture Method).** Πρόκειται για την πιο περίπλοκη από της 4 μεθόδους. Σε αυτήν τη μέθοδο, το έδαφος θεωρείται ότι αποτελείται από δύο στρώματα: το ανώτερο εδαφικό στρώμα και το κατώτερο εδαφικό στρώμα. Σε κάθε στρώμα θεωρείται ότι επιτελούνται διαφορετικές διεργασίες. Η μέθοδος αυτή γενικά αποφεύγεται, αφού απαιτεί εκτενή παραμετροποίηση του εδάφους και του κλίματος για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών.
- **MABIA Method (FAO 56, kc, Daily).** Η μέθοδος αυτή πραγματοποιεί ημερήσια προσομοίωση της διαπνοής, της εξάτμισης, των απαιτήσεων άρδευσης και της ανάπτυξης των καλλιεργειών.

Στην παρούσα εργασία, για την προσομοίωση όλων των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής του Νέστου χρησιμοποιείται η Rainfall Runoff Method (FAO Crop Requirements Method).

3.2.6 Η Αναπαράσταση των Φραγμάτων στο WEAP21

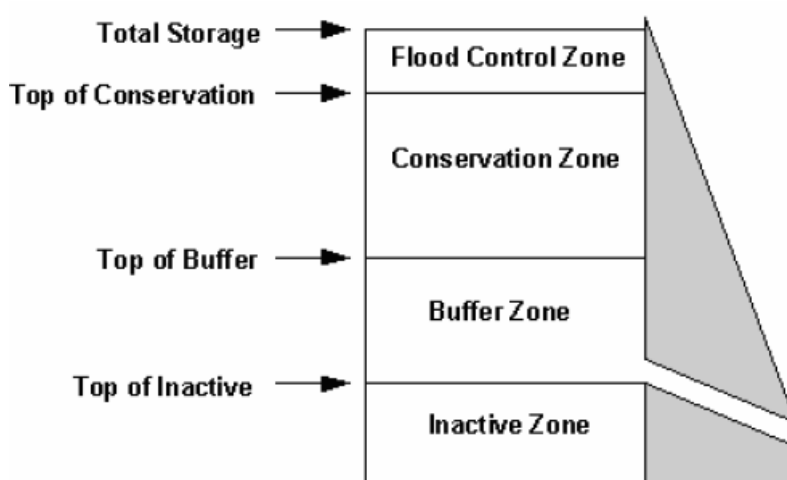
Στο WEAP21 υπάρχει η δυνατότητα της αναπαράστασης των φραγμάτων και των ταμιευτήρων που δημιουργούνται ανάντη τους. Συγκεκριμένα, μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα σαν δεδομένα διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων, όπως για παράδειγμα η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα και η καμπύλη στάθμης-όγκου. Επίσης μπορούν να καθορισθούν και τα υδροηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φραγμάτων, όπως ο βαθμός απόδοσης, η ονομαστική ισχύς των στροβίλων, καθώς κι η στάθμη της διώρυγας φυγής. Εκτός από αυτά, μπορούν να προσδιορισθούν και κάποια άλλα στοιχεία που αφορούν στα κόστη, στην ποιότητα νερού και στις προτεραιότητες μεταξύ των ταμιευτήρων και των διαφόρων κόμβων ζήτησης.

Όσον αφορά στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και των φραγμάτων, το WEAP21 έχει μία διαφορετική προσέγγιση στον τρόπο με τον οποίο χωρίζει τον ταμιευτήρα στις διάφορες ζώνες. Συγκεκριμένα, στο WEAP21 ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα υποδιαιρείται στις εξής τέσσερις ζώνες:

1. **Inactive zone.** Πρόκειται για τον νεκρό όγκο του ταμιευτήρα, δηλαδή τον όγκο που προβλέπεται να γεμίσει με τα φερτά κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.
2. **Buffer zone.** Πρόκειται για τον ρυθμιστικό όγκο του ταμιευτήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για την κάλυψη αναγκών σε περίπτωση ύπαρξης ελλειμμάτων.

3. **Conservation zone.** Είναι ο όγκος κανονικής λειτουργίας του ταμιευτήρα, ο οποίος καθορίζει κάθε φορά την ποσότητα νερού που είναι διαθέσιμη για απελευθέρωση για την κάλυψη των διαφόρων αναγκών. Σημειώνεται ότι το άθροισμα του Buffer zone και του Conservation zone αποτελεί το συνολικό «ενεργό» όγκο του ταμιευτήρα.
4. **Flood Control zone.** Πρόκειται για τον πλημμυρικό όγκο του ταμιευτήρα. Εκεί συγκρατείται προσωρινά το νερό που υπερβαίνει τη στάθμη του όγκου κανονικής λειτουργίας, και το οποίο απελευθερώνεται κάθε φορά στο τέλος του χρονικού βήματος.

Σχηματικά, ο χωρισμός των ταμιευτήρων σε ζώνες στο WEAP21P φαίνεται παρακάτω.



Σχ. 3-2: Διαχωρισμός ζωνών ταμιευτήρα στο WEAP (SEI, User Guide for WEAP21)

3.2.7 Δημιουργία Νέων Μεταβλητών στο WEAP21

Στο WEAP21 δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει τις δικές του μεταβλητές, τις οποίες στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιήσει οπουδήποτε αλλού σε εκφράσεις για την εξαγωγή διαφόρων αποτελεσμάτων. Η δυνατότητα αυτή που παρέχεται είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργεί τα δικά του μοντέλα μέσα στο WEAP21 και να εξάγει οποιαδήποτε αποτελέσματα επιθυμεί, κάτι το οποίο μπορεί να μην είναι πάντα εφικτό με τις υφιστάμενες μεταβλητές του προγράμματος.

Η διαδικασία δημιουργίας μίας νέας μεταβλητής στο WEAP21 ξεκινάει με τον καθορισμό του ονόματος της, της μονάδας μέτρησης της και της κατηγορίας στην οποία ανήκει. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα να καθοριστεί εάν οι τιμές της μεταβλητής θα εμφανίζονται στον πίνακα αποτελεσμάτων ή όχι. Επιλέγεται η χρονική κλίμακα που θα χρησιμοποιηθεί (εάν οι υπολογισμοί θα γίνονται σε μηνιαία ή ετήσια βάση) και τα σενάρια στα οποία θα εμφανίζεται η νέα αυτή μεταβλητή. Τέλος, καθορίζεται η τιμή της, η οποία είτε είναι προκαθορισμένη, είτε προκύπτει από κάποια μαθηματική σχέση, ενώ παράλληλα τίθενται και περιορισμοί σχετικά με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει.

3.3 MATLAB και Optimization Toolbox

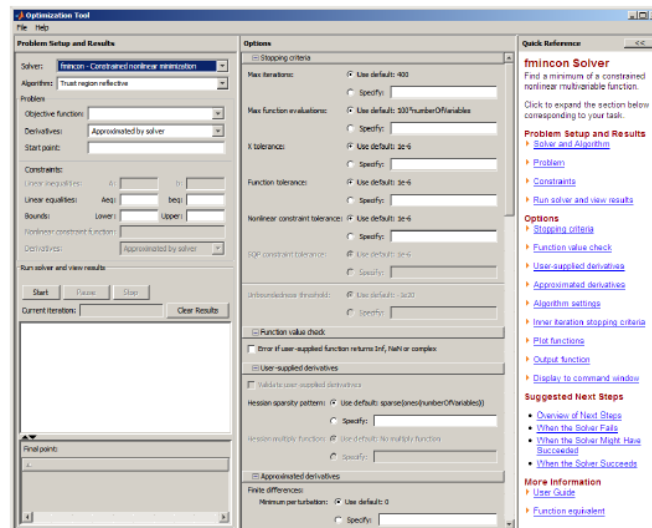
3.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η βαθμονόμηση όσο κι η βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος του Νέστου, αναπτύχθηκε ένας σύνδεσμος επικοινωνίας μεταξύ WEA21P και MATLAB.

Το MATLAB διαθέτει μια σειρά εργαλειαθκών, μέσω των οποίων επιτυγχάνει την επίλυση προβλημάτων. Ανάμεσα σε αυτές, βρίσκεται και το optimization toolbox, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Μέσω του optimization toolbox είναι δυνατή η επίλυση προβλημάτων με διάφορες μεθόδους. Ανεξάρτητα της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί, για να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση θα πρέπει πρώτα να έχει γίνει ο καθορισμός της ή των αντικειμενικών συναρτήσεων. Το optimization toolbox πραγματοποιεί βελτιστοποίηση με 4 τρόπους:

- Minimizers (σε περίπτωση που η αντικειμενική συνάρτηση είναι μία) (minimizers).
- Multiobjective minimizers (σε περίπτωση που υπάρχουν δύο ή παραπάνω αντικειμενικές συναρτήσεις) (multiobjective minimizers).
- Equation solvers.
- Least-Squares (curve-fitting) solvers.



Σχ. 3-3: Περιβάλλον εργασίας Optimization Toolbox του MATLAB (MATLAB, 2009 “Optimization Toolbox TM User’s Guide”)

Επίσης, θα πρέπει να καθοριστεί ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση, καθώς και οι απαραίτητες, κάθε φορά, παράμετροί του. Στην παρούσα εργασία, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και τη βελτιστοποίηση ήταν ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης ανόπτησης κι οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι και παρουσιάζονται παρακάτω.

3.3.2 MATLAB και Προσομοιωμένη Ανόπτηση

Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης ανόπτησης στο MATLAB αναζητά το ελάχιστο μιας δοθείσας συνάρτησης. Προκειμένου να λειτουργήσει σωστά, πρέπει να δοθούν αρχικά τουλάχιστον δύο συνθήκες, και συγκεκριμένα η αντικειμενική συνάρτηση κι ένα αρχικό σημείο λύσεων, δηλαδή ένα αρχικό «σετ» τιμών των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών. Ορίζονται επίσης τα όρια των τιμών που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές. Στη συνέχεια, καθορίζεται ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (max iterations), καθώς και αρκετά άλλα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου, ενώ παράλληλα επιλέγονται και τα αποτελέσματα που θα εμφανίζονται στα διαγράμματα. Μπορούν να δημιουργηθούν διάφορα διαγράμματα, όπως για παράδειγμα αυτό της διακύμανσης της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, της τρέχουσας (σε κάθε επανάληψη) τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, της θερμοκρασίας κ.ο.κ.

Αφού γίνει ο καθορισμός όλων αυτών των παραμέτρων, το MATLAB τρέχει τον αλγόριθμο και βρίσκει τις τιμές των μεταβλητών για τις οποίες επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

3.3.3 MATLAB και Γενετικοί Αλγόριθμοι

Όπως κι ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης ανόπτησης, έτσι κι οι γενετικοί αλγόριθμοι, αναζητούν το ελάχιστο μίας ή περισσότερων (εάν πρόκειται για πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης) αντικειμενικών συναρτήσεων. Και σε αυτήν την περίπτωση, η σωστή λειτουργία του αλγορίθμου προϋποθέτει το καθορισμό δύο παραμέτρων: της αντικειμενικής συνάρτησης και του αριθμού των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών. Στη συνέχεια, καθορίζονται τα όρια των τιμών που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές καθώς και κάποιοι πιθανοί γραμμικοί περιορισμοί (ισότητες και ανισότητες), που θα πρέπει να ικανοποιούν οι τιμές των μεταβλητών. Ορίζονται επίσης κάποια στοιχεία που αφορούν στον πληθυσμό, όπως για παράδειγμα το μέγεθος του, ο αρχικός πληθυσμός, οι αρχικές τιμές κ.τ.λ, καθώς και κάποια άλλα στοιχεία που αφορούν στις διαδικασίες της επιλογής, της αναπαραγωγής κ.λ.π. Τέλος, καθορίζονται κάποια κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου, ανάμεσα στα οποία είναι κι ο αριθμός των γενεών που θα δημιουργηθεί κι επιλέγονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων που θα εμφανίζονται. Στα διαγράμματα αυτά περιλαμβάνεται η διακύμανση της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, η απόσταση κάθε γενιάς από την προηγούμενη και την επόμενη της κ.α. Σε περίπτωση

πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης δημιουργείται κι εμφανίζεται κι το σύνολο Pareto των βέλτιστων λύσεων.

Αφού γίνει ο καθορισμός όλων αυτών των παραμέτρων, το MATLAB τρέχει τον αλγόριθμο και βρίσκει τις τιμές των μεταβλητών για τις οποίες επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της ή των αντικειμενικών συναρτήσεων.

3.4 Το Υπολογιστικό Σύστημα «ΚΑΣΤΑΛΙΑ»

Το σύστημα «Κασταλία» αποτελεί ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πακέτο στοχαστικής προσομοίωσης, το οποίο επιτρέπει τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μηνιαίου βήματος μεγάλου μήκους, διατηρώντας τις ουσιώδεις στατιστικές παραμέτρους της ιστορικής πληροφορίας (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία, δομή της αυτοσυσχέτισης). Εφαρμόζει πρωτότυπες και διεθνώς καταξιωμένες μεθοδολογίες στοχαστικής ανάλυσης για τη γέννηση συνθετικών υδρολογικών χρονοσειρών που είναι στατιστικά συνεπείς με τις αντίστοιχες ιστορικές, ενώ παράλληλα μπορεί να αναπαράγει τις ιδιαιτερότητες των στοχαστικών ανεξίτητων, όπως της εμμονής, της περιοδικότητας και της ασυμμετρίας.

Το φαινόμενο της υδρολογικής εμμονής, της τάσης δηλαδή ομαδοποίησης των περιόδων χαμηλής και υψηλής υδροφορίας, παρατηρείται σε όλες τις γεωφυσικές διεργασίες και είναι άμεσα σχετιζόμενο με τις παρατεταμένες ξηρασίες και την κλιματική μεταβλητότητα που παρατηρείται σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Η προσομοίωση της εμμονής επιτυγχάνεται με την προσαρμογή μιας κατάλληλης συνάρτησης αυτοσυσχέτισης στις ετήσιες υδρολογικές μεταβλητές. Με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της συνάρτησης, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της εμμονής για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με μακρές ή όχι περιόδους ξηρασίας.

Οι συνθετικές χρονοσειρές που παράγονται αναφέρονται στις υδρομετεωρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν μέρος σε ένα υδροσύστημα, όπως απορροές, βροχοπτώσεις, και εξατμίσεις των ταμιευτήρων. Η «Κασταλία» λειτουργεί ως ένα αυτόνομο σύστημα, το οποίο υποστηρίζεται από μία βάση δεδομένων και συνεργάζεται με το υπολογιστικό σύστημα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδατικών πόρων «Υδρονομέας».

Οι λειτουργίες που επιτελεί το πρόγραμμα «Κασταλία» είναι οι εξής:

1. Ανάκτηση ιστορικών και διαχείριση συνθετικών χρονοσειρών.
2. Στατιστική ανάλυση ιστορικών υδρολογικών χρονοσειρών.
3. Προσαρμογή μαθηματικών μοντέλων στοχαστικής προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών.
4. Γέννηση ετήσιων και μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών σε μία ή περισσότερες θέσεις.

5. Γραφική παρουσίαση δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων.

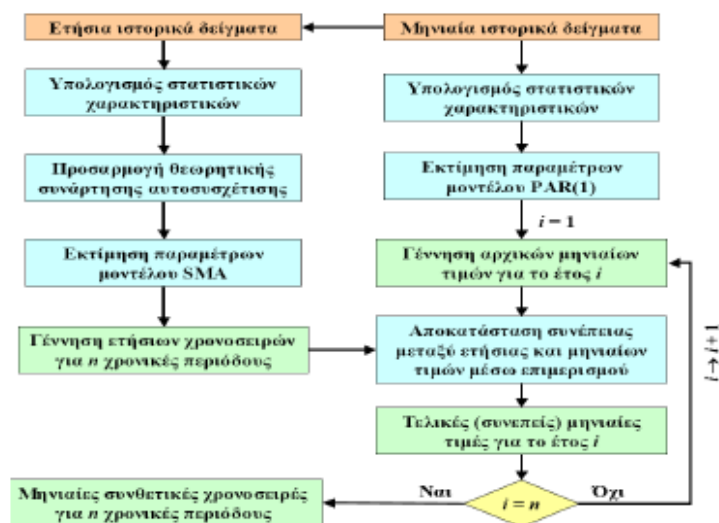
Για τη γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών υιοθετήθηκε ένα στοχαστικό σχήμα πολλών μεταβλητών, το οποίο υλοποιείται σε δύο χρονικά επίπεδα. Κάθε μεταβλητή αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία, που λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση. Το πρώτο επίπεδο (υψηλό επίπεδο) αναφέρεται σε 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 ανελίξεις θεωρούνται στάσιμες, ενώ ως χαμηλή χρονική κλίμακα επιλέγεται η μηνιαία, που είναι η συνήθης κλίμακα στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά που διατηρούνται και αναπαράγονται στις συνθετικές χρονοσειρές εντάσσονται σε δύο κατηγορίες παραμέτρων και είναι:

1. Οι παράμετροι των περιθώριων συναρτήσεων κατανομής, και συγκεκριμένα οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις και οι συντελεστές ασυμμετρίας.
2. 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 αναπαράσταση 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.

Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας γέννησης γέννησης συνθετικών χρονοσειρών απεικονίζεται αμέσως παρακάτω:



Σχ. 3-4: Διάγραμμα ροής σχήματος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών για τη стоχαστική προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη (Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάνης και Σ. Κοζάνης, 2005)

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 μία θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (πόσο καλά εκτιμάται η τιμή x_{i+1} αν θεωρηθεί γραμμική συνάρτηση της x_i), 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, το οποίο είναι γενικευμένο ώστε να προσαρμόζεται σε πολυμεταβλητά σχήματα προσομοίωσης, χρησιμοποιείται για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών σε όλες τις θέσεις και για όλο τον χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης.

Για τη стоχαστική 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 μία διαδικασία γραμμικής αναγωγής (μοντέλο επιμερισμού), μέσω της οποίας οι μηνιαίες συνθετικές τιμές διορθώνονται, ώστε συναθροιζόμενες να ισούνται με την αντίστοιχη ετήσια. Η διαδικασία γέννησης μηνιαίων τιμών επαναλαμβάνεται για όλα τα έτη, οπότε

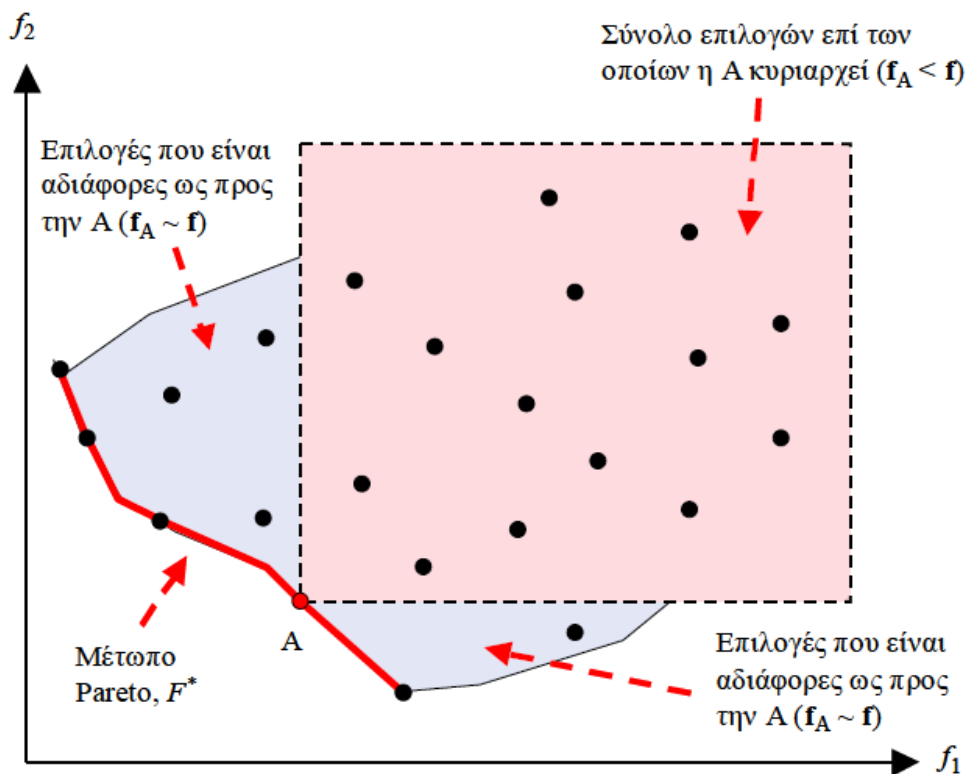
προκύπτει ένα τελικό συνθετικό δείγμα μηνιαίων τιμών που είναι συνεπές με το ετήσιο, το οποίο έχει προκύψει με εφαρμογή του μοντέλου SMA, αναπαράγοντας κατ' αυτό το τρόπο το ιδιαίτερα κρίσιμο φαινόμενο της εμμόνης (Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης και Σ. Κοζάνης-2005).

4 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

4.1 Εισαγωγή στην Έννοια της Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα συστήματα υδατικών πόρων είναι συστήματα αποτελούμενα από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα, τα οποία συνεργαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς. Οι ταμειυτήρες των υδροσυστημάτων χαρακτηρίζονται τις περισσότερες φορές ως πολλαπλού σκοπού, αφού ο άνθρωπος τους εκμεταλλεύεται προκειμένου να καλύψει πολλές και εντελώς διαφορετικές μεταξύ τους ανάγκες. Είναι λοιπόν φανερό ότι το βασικό πρόβλημα που προκύπτει στο σχεδιασμό και στη λειτουργία ενός ταμειυτήρα πολλαπλής σκοπιμότητας είναι οι αντιθέσεις ανάμεσα στις προτεραιότητες αποθήκευσης και αποφόρτισης νερού για τις διάφορες χρήσεις. Οι αντιθέσεις ανάμεσα στις διάφορες χρήσεις ενός ταμειυτήρα μπορούν να προέλθουν από διάφορα αίτια. Για παράδειγμα, ο έλεγχος των πλημμυρών μέσα στον ταμειυτήρα έρχεται σε πλήρη αντίθεση με όλες τις άλλες χρήσεις που απαιτούν την αποθήκευση νερού. Επίσης, αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι τα πολλά και ανταγωνιστικά μεταξύ τους κριτήρια μετρώνται και αποτιμώνται με διαφορετική μονάδα μέτρησης. Αυτό αποτελεί ένα επιπλέον πρόβλημα, το οποίο δυσχεραίνει την ανάλυση των υδροσυστημάτων και το σχεδιασμό των πολιτικών που πρέπει να ακολουθηθούν.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχειριστική πολιτική των ταμειυτήρων αποτελεί πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση εντοπίζεται ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων, ύστερα από πολλαπλή επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας. Κάθε βέλτιστη λύση, η οποία είναι συνδυασμός «τιμών» των διαφορετικών κριτηρίων, αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική κατάσταση του συστήματος. Οι διάφοροι συνδυασμοί, δηλαδή οι διάφορες βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν, μπορεί να οδηγούν σε εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα. Το σύνολο αυτών των βέλτιστων λύσεων που προκύπτουν από την επαναληπτική διαδικασία της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αποτυπώνεται στο λεγόμενο μέτωπο Pareto. Στο μέτωπο Pareto, η μετακίνηση από ένα σημείο στο άλλο υποδηλώνει τη βελτίωση ενός κριτηρίου με ταυτόχρονη επιδείνωση του άλλου κριτηρίου. Στην υποθετική περίπτωση που έχουμε ένα πρόβλημα το οποίο αξιολογείται ως προς δύο διαφορετικά κριτήρια, η απεικόνιση του μετώπου Pareto δίνεται παρακάτω:



Σχ. 4-1: Απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας και του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίηση δύο κριτηρίων (Ευστρατιάδης, 2008)

Οι διάφορες λύσεις που προκύπτουν μπορούν να αναπαρασταθούν ως σημεία στο διάγραμμα των δύο αξόνων. Με f_1 και f_2 συμβολίζονται τα δύο διαφορετικά κριτήρια, οι τιμές των οποίων απεικονίζονται στους άξονες x και y αντίστοιχα. Έχοντας ως βάση μία υποθετική λύση A και εισάγοντας την έννοια της κυριαρχίας μεταξύ των διαφόρων πιθανών λύσεων, το παραπάνω σχήμα χωρίζεται στις εξής υποπεριοχές:

- Περιοχή πάνω και δεξιά του σημείου A . Όλα τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε αυτήν την περιοχή κυριαρχούνται από το A , δηλαδή η λύση που αναπαριστούν είναι χειρότερη από τη λύση που αναπαρίσταται από το σημείο A όσον αφορά και τα δύο κριτήρια επίδοσης.
- Περιοχή πάνω και αριστερά του A . Όλα τα σημεία που βρίσκονται σε αυτήν την περιοχή αναπαριστούν λύσεις οι οποίες είναι καλύτερες του A ως προς το ένα κριτήριο (f_1), αλλά χειρότερες του A ως προς το άλλο (f_2). Οι λύσεις αυτές χαρακτηρίζονται ως αδιάφορες ως προς το A .
- Περιοχή κάτω και δεξιά του A . Ισχύουν όλα όσα αναφέρθηκαν αμέσως παραπάνω. Οι λύσεις είναι και πάλι αδιάφορες ως προς τη λύση που αναπαρίσταται από το A , με τη μόνη διαφορά ότι οι λύσεις σε αυτήν την περίπτωση είναι καλύτερες από το A όσον αφορά στο κριτήριο f_2 και χειρότερες ως προς το κριτήριο f_1 .
- Μπορεί επίσης να ορισθεί και μία ακόμη σχέση κυριαρχίας του A , ως προς μία λύση που πιθανά να βρίσκεται πάνω στις γραμμές του ροζ τετραγώνου που τέμνονται με

το A. Σε αυτήν την περίπτωση, η εκάστοτε λύση είναι χειρότερη από την A για ένα μόνο κριτήριο και ίση ως προς το άλλο και τότε λέγεται ότι η λύση A κυριαρχεί ασθενώς ως προς τη λύση αυτή.

Τα σημεία που βρίσκονται πάνω στην κόκκινη γραμμή αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν από την επαναληπτική διαδικασία και είναι οι βέλτιστες λύσεις κατά Pareto. Μία λύση θεωρείται βέλτιστη κατά Pareto **αν και μόνο αν**:

1. Είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο και οι άλλες λύσεις για όλους τους στόχους/κριτήρια.
2. Είναι καλύτερη από όλες τις άλλες λύσεις σε τουλάχιστον ένα στόχο/κριτήριο.

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα που αναφέρθηκε παραπάνω, η έννοια της κυριαρχίας επιτρέπει το 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 κριτήριο f_1 , χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει το άλλο κριτήριο f_2 .»(Ευστρατιάδης 2008)

Το σύνολο των σημείων που ανήκουν στη γραμμή Pareto είναι γνωστό ως σύνολο μη **κυριαρχούμενων** ή **μη κατώτερων** σημείων. Τα σημεία του συνόλου Pareto είναι αδιάφορα μεταξύ τους, ενώ καθένα από αυτά είτε κυριαρχεί είτε είναι αδιάφορο ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού χώρου αναζήτησης.

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση επομένως ο κύριος στόχος είναι η εύρεση ενός ικανοποιητικού αριθμού μη κατώτερων λύσεων, με βάση τις οποίες θα γίνει η χάραξη του μετώπου Pareto.

Η λήψη της τελικής απόφασης σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα έγκειται σε μεγάλο βαθμό στην κρίση του ερευνητή και είναι υποκειμενική. Σε αντίθεση με την εκ των προτέρων απόδοση βαρών στα κριτήρια ώστε τελικά από το σύνολο των ισοδύναμων λύσεων Pareto να προκύπτει η μία και μοναδική βέλτιστη λύση, η επιλογή της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης προτιμάται να γίνεται μετά την αναζήτηση, με επιλογή από το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Μεγάλη σημασία για την ορθότητα κάθε λήψης απόφασης έχει βέβαια ο σωστός καθορισμός του μετώπου που καθορίζεται από τη γεωμετρία του. Η τελευταία είναι άγνωστη στα περισσότερα προβλήματα, και κατά συνέπεια η χάραξη του γίνεται πάντα κατά προσέγγιση, εντοπίζοντας όσο το δυνατόν πιο πολλές μη κατώτερες λύσεις.

Η αναζήτηση του ολικού ακροτάτου ή του ολικού μετώπου Pareto υλοποιείται μέσω μίας διαδικασίας που ακολουθεί ένας αλγόριθμος κι η επιτυχία της εξαρτάται έντονα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης, το πλήθος των μεταβλητών

απόφασης, από το διατιθέμενο χρόνο για την πραγματοποίηση δοκιμών αλλά σε μεγάλο βαθμό κι από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του αλγορίθμου.

4.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

4.2.1 Ο Ορισμός του Γενετικού Αλγορίθμου

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είχαν αναπτυχθεί από επιστήμονες της βιολογίας το 1950, αλλά σημαντική ανάπτυξη είχαν κατά το 1970 από τον John Holland και αρκετούς συνεργάτες του, οι οποίοι δημιούργησαν αλγόριθμο χρησιμοποιώντας μηχανισμούς που χρησιμοποιεί η ίδια η φύση για να δώσει λύση σε προβλήματα τεχνητής νοημοσύνης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδοι αναζήτησης οι οποίες χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν προβλήματα αναζήτησης και στόχος τους είναι να δώσουν λύση η οποία θα πληρεί συγκεκριμένα επιθυμητά κριτήρια. Κύριο χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων είναι ότι προσπαθούν να μιμηθούν την ίδια τη φύση μέσω της θεωρίας της εξέλιξης των ειδών η οποία αναπτύχθηκε από το Δαρβίνο. Χαρακτηριστικά της θεωρίας αυτής που χρησιμοποιούν οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ότι οι οργανισμοί με βάση τις δυσκολίες που συναντούν κατά τη διάρκεια της ζωής του κάποιοι από αυτούς θα επιζήσουν, στη συνέχεια πιθανό να αλλάξουν και χαρακτηριστικά, ενώ κάποιοι άλλοι θα πεθάνουν. Αλλάζουν τα χρωμοσώματα στους βιολογικούς οργανισμούς, τα οποία είναι μεγάλου μεγέθους μόρια και αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται γονίδια, τα οποία επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου. Η πληροφορία η οποία αποθηκεύεται στα γονίδια ονομάζεται γενότυπος. Στη συνέχεια, για να δημιουργηθεί ένας καινούριος πληθυσμός αναπαράγονται οργανισμοί οι οποίοι παίρνουν χαρακτηριστικά γονίδια και από τους δύο γονείς.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι κλασικές μέθοδοι αναζήτησης λύσης για ένα πρόβλημα συχνά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα πολύ μεγάλου μεγέθους. Επομένως, υπήρξε το κίνητρο για αναζήτηση νέων μεθόδων επίλυσης προβλημάτων οι οποίες θα χρησιμοποιούσαν την έννοια της πιθανότητας και θα παρουσίαζαν ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε ένα αποδεκτό χρονικό διάστημα. Ένα τέτοιο είδος αλγορίθμου που αναπτύχθηκε ήταν οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι έχουν ως βάση τις αρχές της βιολογικής εξέλιξης και είναι από τις πιο ευέλικτες μεθόδους. Οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν ένα σύνολο από πιθανές λύσεις του συγκεκριμένου προβλήματος που προσπαθούν να λύσουν κι εκτελούν μία αναζήτηση στο χώρο των υποψήφιων λύσεων έχοντας ως κίνητρο να καταλήξουν σε ένα αποδεκτό αποτέλεσμα σε σχέση με συγκεκριμένα κριτήρια. Με αυτή τη μέθοδο σε κάθε επανάληψη δημιουργούνται πληθυσμοί οι οποίοι είναι καλύτερα προσαρμοσμένοι σε συγκεκριμένο περιβάλλον σε σχέση με τους προηγούμενους, μιμούμενοι τους νόμους της φυσικής επιλογής.

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. Δεν απαιτούν γνώση ή πληροφορία για την κλίση του χώρου αναζήτησης και δεν επηρεάζονται από πιθανές ασυνέχειες στο χώρο αναζήτησης. 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.

4.2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη εμφάνιση των ΓΑ χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι βιολόγοι επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιάσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον Holland και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Michigan. Ο αρχικός στόχος του Holland ήταν να κάνει μια αυστηρή εξήγηση των διαδικασιών προσαρμογής των φυσικών συστημάτων καθώς και να σχεδιάσει τεχνητά συστήματα λογισμικού που διατηρούν τους σημαντικούς μηχανισμούς των φυσικών συστημάτων.

Ο Bagley (1967) με τη διδακτορική του διατριβή ουσιαστικά «βαφτίζει» τους γενετικούς αλγορίθμους.

Ο Rosenberg (1967) δημοσιεύει εργασία, στην οποία γίνεται λόγος για προσομοίωση πληθυσμών μονοκύτταρων οργανισμών σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Ο Holland (1975) εκδίδει το βιβλίο «Προσαρμογή στα Φυσικά και Τεχνητά συστήματα», στο οποίο αναπτύσσει τις ιδέες και τη θεωρία των ΓΑ. Το βιβλίο θεωρείται πλέον κλασικό για το χώρο. Θίγονται θέματα όπως η θεωρία των σχημάτων, η βέλτιστη κατανομή των ευκαιριών, σχέδια αναπαραγωγής, γενετικές λειτουργίες, η ευρωστία των ΓΑ και πλήθος άλλα.

Ο De Jong (1975) με την εργασία που εκδίδει βοηθά την πειραματική αξιολόγηση των ΓΑ. Σύμφωνα με αυτήν, προτείνονται λειτουργίες που ελέγχουν ένα ΓΑ και την ικανότητα του να αντιμετωπίζει δύσκολα προβλήματα.

Ο Grefenstette (1980) δημιουργεί το GENESIS, ένα σύστημα ανάπτυξης ΓΑ υλοποιημένο στη γλώσσα προγραμματισμού C, που έχει βοηθήσει σημαντικά στη διάδοση του γενετικού προγραμματισμού καθώς έγινε διαθέσιμο στο ευρύ κοινό.

Το 1985 πραγματοποιείται το πρώτο Διεθνές Συνέδριο των ΓΑ και των εφαρμογών τους. Μετά από αυτό ο χώρος των ΓΑ αποκτά ένα μεγάλο συνέδριο που πλέον λαμβάνει χώρα κάθε δύο χρόνια και αντικατοπτρίζει τη μεγάλη έξαρση που παρατηρείται τόσο σε επίπεδο θεωρίας όσο και εφαρμογών.

Από το 2000 έως και σήμερα έχουν δημιουργηθεί πλήθος εφαρμογών βασισμένες στους ΓΑ. Πολλές επιστημονικές δημοσιεύσεις τείνουν να επιλύσουν καθημερινά προβλήματα με τη βοήθεια των ΓΑ. Η ενσωμάτωση τους στην επίλυση καθημερινών προβλημάτων αποτελεί πλέον γεγονός.

4.2.3 Κύρια Χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων

Οι ΓΑ πλεονεκτούν στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που επιδρούν στην υπεροχή τους αυτή σύμφωνα με τον Golgberg (1989) είναι τα εξής:

1. **Κωδικοποιούν το σύνολο των τιμών που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές του προβλήματος και χρησιμοποιούν αυτήν την κωδικοποίηση κι όχι τις μεταβλητές καθαυτές για την επίλυση.** Συγκεκριμένα απαιτούν το σύνολο των φυσικών παραμέτρων της βελτιστοποίησης να κωδικοποιηθεί σε συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους, κάνοντας χρήση ενός πεπερασμένου αλφαβήτου. Η κωδικοποίηση δεν είναι απαραίτητο να είναι πάντα δυαδική. Μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, αρκετοί από τους οποίους ίσως να μην είναι προφανείς. Το στοιχείο της κωδικοποίησης είναι εκείνο που επιτρέπει στους ΓΑ να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.
2. **Κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα κι όχι μόνο σε ένα.** Στις περισσότερες μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Ωστόσο με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται κίνδυνοι, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μία περιοχή τοπικού ακροτάτου, που δεν είναι ολικό. Οι ΓΑ εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές). Έτσι μπορούν να ανεβαίνουν πολλούς λόφους (hill climbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μία λάθος κορυφή.
3. **Χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία.** Η αναζήτηση για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων είναι κατά κάποιο τρόπο «τυφλή», καθώς αξιοποιεί μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση, πράγμα που της προσδίδει μεγάλη ευελιξία. Αντίθετα, οι περισσότερες κοινές μέθοδοι απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους ΓΑ. Έτσι όμως προκύπτει το ερώτημα αν συμφέρει αν αγνοούνται οι βοηθητικές πληροφορίες. Γι αυτό ακριβώς το λόγο έχουν αναπτυχθεί μορφές ΓΑ που αξιοποιούν και τέτοιου είδους πληροφορίες, δηλαδή χρησιμοποιούν υπάρχουσα γνώση για την αντικειμενική συνάρτηση, την οποία συνδυάζουν και με εφαρμογή ΓΑ.

-
4. **Χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης κι όχι ντετερμινιστικούς.** Η χρήση πιθανοθεωρητικών κανόνων μετάβασης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των ΓΑ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη. Το στοιχείο της τύχης χρησιμοποιείται σαν οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

4.2.4 Η Ανατομία Ενός Προγράμματος Γενετικών Αλγορίθμων

Ένας ΓΑ για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε τμήματα:

- Μία γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
- Έναν τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
- Μία αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητα τους.
- Γενετικούς τελεστές που μετατρέπουν τη σύνθεση των παιδιών.
- Τιμές για διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών κ.τ.λ).

4.2.5 Βασικά Στοιχεία Γενετικών Αλγορίθμων

Ένας αλγόριθμος πρέπει να έχει κάποια βασικά στοιχεία έτσι ώστε να θεωρείται γενετικός. Τα απαραίτητα συστατικά τα οποία τον συνδέουν με το προς επίλυση πρόβλημα είναι η κωδικοποίηση των πιθανών λύσεων κι η αντικειμενική συνάρτηση (Λυκοθανάσης 2001).

Κωδικοποίηση (coding): Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις λειτουργίες του αλγορίθμου. Η κωδικοποίηση που αφορά σε ένα σύνολο πιθανών λύσεων πρέπει να γίνει με ένα μαθηματικό, φορμαλιστικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από τον υπολογιστή.

Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους αναλόγως και του προβλήματος. Η πιο απλή κωδικοποίηση είναι με δυαδικά ψηφία. Στην περίπτωση αυτή, κάθε λύση αναπαρίσταται από μία δυαδική συμβολοσειρά (binary string) καθορισμένου μήκους, αποτελούμενη μόνο από στοιχεία 0 και 1. Ο αριθμός των συμβόλων ονομάζεται μήκος της συμβολοσειράς. Πάντως, έχουν αναφερθεί ποικίλες μορφές κωδικοποιήσεων, που καθεμία εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Δεν υπάρχει κάποια κωδικοποίηση που να θεωρείται αποτελεσματική για κάθε είδους πρόβλημα, όπως επίσης είναι δυνατό κάποιο πρόβλημα να επιδέχεται περισσότερες από μία κωδικοποιήσεις. Το σίγουρο είναι ότι η κωδικοποίηση είναι το κρίσιμο αρχικό βήμα στην εφαρμογή του ΓΑ και αν δεν είναι προσεκτική, πιθανότατα θα αποβεί μοιραία για την επιτυχία του.

Αντικειμενική συνάρτηση (fitness function): Το επόμενο ουσιαστικό στοιχείο για τον ΓΑ σε σχέση με το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αποτέλεσμα της συνάρτησης αυτής είναι μία τιμή, ανάλογη του πόσο καλά λύνεται το πρόβλημα, για κάθε αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά που λαμβάνει. Η τιμή αυτή αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης και πολλαπλασιασμού ή όχι του ατόμου. Η αντικειμενική συνάρτηση παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο τεχνητό μοντέλο. Ουσιαστικά είναι η μόνη πληροφορία που δέχεται ο αλγόριθμος για το πρόβλημα που λύνει. Όσο πιο εύκολα υπολογίσιμη είναι η συνάρτηση αυτή, τόσο πιο γρήγορα εκτελείται ο αλγόριθμος.

Μετά τον καθορισμό της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης, ορίζεται το πρόβλημα και ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο της εφαρμογής ενός ΓΑ. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο στάδιο είναι εντελώς ανεξάρτητο και αυτόνομο από τα επόμενα. Οι λειτουργίες που ακολουθούν από εδώ και πέρα δεν εξαρτώνται από το πως γίνεται η αναπαράσταση των ατόμων στο τεχνητό περιβάλλον και με ποιον τρόπο αξιολογούνται οι ικανότητές τους. Η φάση ορισμού της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης υπάρχουν πάντα σε κάθε ΓΑ, ανεξαρτήτως του προβλήματος.

4.2.6 Γενετικές Διαδικασίες

Ακολουθεί η ανάλυση των γενετικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την υλοποίηση ενός ΓΑ, μετά το πέρας των δύο προηγούμενων βημάτων. Σε αυτές τις διαδικασίες εκτελείται ο κύριος όγκος της εργασίας και παράγεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης.

Αρχικοποίηση (initialization): Σε αυτό το βήμα γίνεται η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, δηλαδή επιλέγεται το πλήθος και οι τιμές των αρχικών λύσεων. Ο ορισμός του αρχικού πληθυσμού είναι πολύ σημαντικός γιατί πάνω σε αυτόν στηρίζονται οι λειτουργίες του ΓΑ. Το μέγεθος του πληθυσμού αυτού ορίζεται από τον χρήστη, είναι μικρότερο από το δυνατό πλήθος τιμών της συνάρτησης του προβλήματος, ενώ η τιμή του κάθε χρωμοσώματος επιλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος. Σε μερικές υλοποιήσεις, η επιλογή των αρχικών σημείων γίνεται με ευρετικές μεθόδους δίνοντας εξαρχής ένα πλεονέκτημα στην αναζήτηση.

Αποκωδικοποίηση (decoding): Προκειμένου να μπορέσει ο εκάστοτε πληθυσμός είτε της πρώτης είτε οποιασδήποτε άλλης γενιάς να αξιολογηθεί, πρέπει πρώτα να γίνει η αποκωδικοποίησή του. Ο παραλληλισμός με το φυσικό μοντέλο βοηθάει στην κατανόηση αυτής της διαδικασίας: Στη φύση, τα χρωμοσώματα ενός οργανισμού έχουν στα γονίδια τους κωδικοποιημένα τα χαρακτηριστικά τους. Το σύνολο αυτής της κωδικοποιημένης γενετικής πληροφορίας ονομάζεται γονότυπος. Ο γονότυπος δεν είναι αντιληπτός με τις φυσικές αισθήσεις των έμβιων όντων. Αντίθετα, αντιληπτή γίνεται η αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον, που έχει ως αποτέλεσμα την ορατή εμφάνιση των χαρακτηριστικών αυτών.

Εδώ το ρόλο του γονότυπου παίζει η δομή της συμβολοσειράς με τα δυαδικά ψηφία ως αντιστοιχία των γονιδίων π.χ 110001. Ο φαινότυπος αναφέρεται στην παρατηρημένη εμφάνιση μίας συμβολοσειράς, δηλαδή στο πως φαίνεται στο περιβάλλον της. Περιβάλλον όμως θεωρείται η αντικειμενική συνάρτηση, άρα ο φαινότυπος μίας συμβολοσειράς αντιστοιχεί στην αποκωδικοποιημένη τιμή της, δηλαδή $49 = 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^0$ που ανήκει στο σύνολο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης.

Υπολογισμός Ικανότητας ή Αξιολόγησης (Fitness Value): Εφόσον πραγματοποιηθεί η αποκωδικοποίηση, υπολογίζεται για κάθε αποκωδικοποιημένο άτομο η ικανότητα του για επιβίωση. Στη φύση οι ικανότητες των ατόμων δεν είναι προσδιορίσιμες με αυστηρό τρόπο. Είναι όμως καθορισμένες από το γενετικό υλικό των χρωμοσωμάτων τους. Συνεπώς, ο υπολογισμός της ικανότητας είναι θεμελιώδης λειτουργία για το ΓΑ. Η εφαρμογή της είναι πολύ απλή ιδίως για απλά προβλήματα όπου για κάθε αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά του τρέχοντος πληθυσμού υπολογίζεται η απόδοσή της από την ήδη γνωστή αντικειμενική συνάρτηση. Σε πιο σύνθετα προβλήματα, ο υπολογισμός ικανότητας μπορεί να ισοδυναμεί με την εκτέλεση μίας εργαστηριακής προσομοίωσης.

Αναπαραγωγή (creating next generation): Η διαδικασία αυτή αποτελεί την σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ. Η δομή της είναι σύνθετη κι αποτελείται από την διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Για να πραγματοποιηθούν όμως αυτές πρέπει προηγουμένως να έχει γίνει η επιλογή των ατόμων που θα αποτελέσουν τους γονείς, ώστε να δημιουργηθεί με βάση αυτά, η επόμενη γενιά.

Επιλογή (selection): Με την επιλογή βρίσκει εφαρμογή στα πλαίσια του αλγορίθμου ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου. Ουσιαστικά επιλέγονται τα άτομα τα οποία θα λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και θα κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Ο κάθε πληθυσμός αποτελείται από ένα σύνολο ατόμων τα οποία πολλαπλασιαζόμενα εκθετικά, δρουν μεταξύ τους ανταγωνιστικά, ώστε να εξασφαλίσουν την επικράτειά τους. Η διαδικασία της επιλογής ξεκινάει όταν οι διαθέσιμοι για την επικράτησή τους πόροι δεν είναι πλέον επαρκείς, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός ανάπτυξης τους και να δημιουργείται έντονος ανταγωνισμός μεταξύ των ατόμων για την εξασφάλιση της ζωής. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτρέπει εκθετική αύξηση των ικανότερων ατόμων και τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενεών, την επικράτησή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη διαδικασία της επιλογής οδηγούμαστε σε μία 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 να φθάσει στην ολική βέλτιστη λύση. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές επιλογής, καθεμία από τις οποίες για να μπορεί να κριθεί θετικά, οφείλει να δίνει με κάποιο τρόπο, μεγαλύτερες πιθανότητες αναπαραγωγής σε άτομα που αξιολογούνται μέσα στο τεχνητό περιβάλλον ως πιο ικανά. Οι κύριες τεχνικές επιλογής που χρησιμοποιούνται είναι α) η επιλογή μέσω μίας εξαναγκασμένης ρουλέτας, στην οποία κάθε συμβολοσειρά ενός πληθυσμού

αντιπροσωπεύεται σε ένα μέρος της ρουλέτας, σε αναλογία με την απόδοσή της και β) η επιλογή ανάλογα με την κατάταξη (διαγωνισμός- tournament).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη διαδικασία της επιλογής δεν είναι απίθανο το ενδεχόμενο να μην επιλεγεί το ικανότερο άτομο του πληθυσμού. Προκειμένου να αποφευχθεί κάτι τέτοιο εφαρμόζεται μια τεχνική που ονομάζεται **ελιτισμός (elitism)**. Με τον ελιτισμό αντιγράφεται «χαριστικά» το ικανότερο άτομο στην επόμενη γενιά, προτού καν αρχίσει η επιλογή και εξασφαλίζεται έτσι η επιβίωση του.

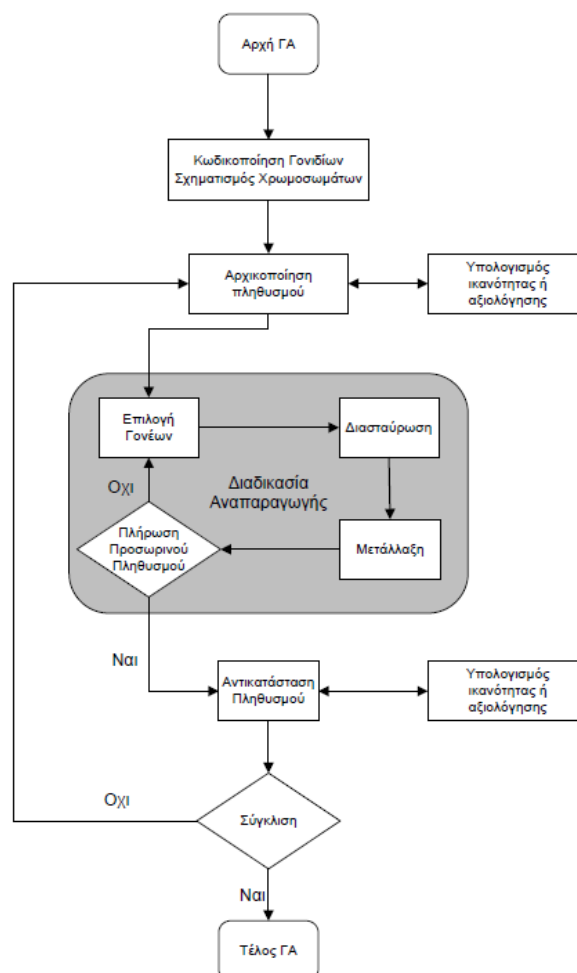
Η τεχνική του ελιτισμού ενέχει τον κίνδυνο της γρήγορης κυριαρχίας του πληθυσμού από ένα άτομο, το οποίο ναι μεν έχει συνήθως μεγάλη ικανότητα, αλλά δεν αποτελεί προϊόν εξαντλητικού ψαξίματος και αποδοτικής εργασίας του αλγορίθμου και τις περισσότερες φορές δεν είναι βέλτιστο σημείο του χώρου αναζήτησης. Γι αυτόν ακριβώς το λόγο, και σύμφωνα με τη διδακτορική εργασία του De Jong (1975), ο ελιτισμός είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις τοπικής αναζήτησης, όπου όντως μπορεί να βελτιώσει αξιοσημείωτα την απόδοση.

Διασταύρωση (Crossover): Ο προσωρινός πληθυσμός που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία πρέπει να περάσει από τη διαδικασία ζευγαρώματος για να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση. Η νέα ομάδα ατόμων που προέκυψε από την επιλογή σχηματίζει με τυχαίο τρόπο ομάδες των δύο. Σε κάθε ομάδα, τα δύο μέλη παίρνουν μέρος σε μία απλή διαδικασία που ονομάζεται διασταύρωση. Πρόκειται ουσιαστικά για μία απλή λειτουργία ανταλλαγής γενετικού υλικού, μεταξύ δύο ατόμων (γονέων) του πληθυσμού, που ζευγαρώνουν με τυχαίο τρόπο δημιουργώντας έτσι δύο νέα χρωμοσώματα. Η διασταύρωση είναι μία απαραίτητη λειτουργία που συμβάλλει αποφασιστικά στην επίδοση ενός ΓΑ. 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. Υπάρχει βέβαια το ενδεχόμενο η διασταύρωση να δώσει χειρότερα παιδιά από τους γονείς, αλλά αυτά δεν θα έχουν μεγάλη πιθανότητα πολλαπλασιασμού στον επόμενο αναπαραγωγικό κύκλο, λόγω μικρής απόδοσης. Στην πράξη, η διασταύρωση χρησιμοποιείται με παραμετροποιημένη μορφή, δηλαδή λαμβάνει χώρα με πιθανότητα, τη λεγόμενη πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability), η οποία καθορίζεται από το σχεδιαστή του ΓΑ. Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό να αλλάζει και κατά το χρόνο τρεξίματος.

Μετάλλαξη (Mutation): Μετά τη διαδικασία της διασταύρωσης ακολουθεί η διαδικασία της μετάλλαξης. Η λειτουργία της είναι απλή: ενεργεί σε έναν μόνο οργανισμό τη φορά. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από τον γονέα στον απόγονο, επιλέγεται τυχαία, με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης, ένα ψηφίο και αντιστρέφεται (από 0 σε 1 ή το αντίστροφο), στην περίπτωση της δυαδικής κωδικοποίησης. Αν έχει υπάρξει κάποιο άλλο είδος κωδικοποίησης, τότε η διαδικασία της μετάλλαξης μπορεί να

εφαρμοστεί με την εύρεση π.χ του συμπληρώματος ως προς το αριθμητικό σύστημα της κωδικοποίησης του ψηφίου που επιλέχθηκε με βάση την πιθανότητα μετάλλαξης. Είναι πολύ σημαντικό η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η μετάλλαξη να είναι αρκετά μικρή (περίπου μία μετάλλαξη σε κάθε χίλια ψηφία που αντιγράφονται), γιατί σε αντίθετη περίπτωση ο ΓΑ εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο.

Αν και υπάρχει κάποια σύγχυση για το ρόλο της μετάλλαξης, τόσο της φυσικής όσο και της τεχνητής, το σίγουρο είναι ότι είναι απαραίτητη. Η μετάλλαξη λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η επιλογή κι η διασταύρωση ενδεχομένως χάσουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Όταν συμβαίνει, επιφέρει ποικιλία στον πληθυσμό, ανακατευθύνει την αναζήτηση, και εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν μπορεί να αποκλειστεί εντελώς από τη διαδικασία του ψαξίματος (Λυκοθανάσης 2001). Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής που αναπαριστά τη λειτουργία των ΓΑ:



Σχ. 4-2: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής των ΓΑ (Κουμιανάκης, 2011)

4.2.7 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση ΓΑ για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής:

1. **Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.** Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των ΓΑ είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορίσιμες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακροτάτων τους, για τους ΓΑ δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
2. **Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.** Οι ΓΑ προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίαση 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.
3. **Είναι εύκολα επεκτάσιμοι κι εξελίξιμοι.** Οι ΓΑ δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ 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.
4. **Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.** Αν και η ισχύς των ΓΑ είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ.
5. **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, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
6. **Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται.** Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά

προβλήματα είναι η απαίτηση για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώνων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κ.τ.λ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους ΓΑ, πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για ευρύ φάσμα προβλημάτων.

7. **Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας.** Η μόνη επικοινωνία του ΓΑ με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους ΓΑ. Όπου όμως δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
8. **Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού.** Οι ΓΑ σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξης $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι λοιπόν προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
9. **Είναι μία 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 ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς κι ελκυστικούς.
10. **Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.** Οι ΓΑ 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.

4.2.8 Μειονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Παρά τη μεγάλη τους χρησιμότητα σε πολλές εφαρμογές της καθημερινής ζωής, οι ΓΑ έχουν και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα, τα οποία θα μπορούσαν να σταθούν εμπόδιο στην ολοένα και μεγαλύτερη εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας (Λυκοθανάσης 2001). Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα εξής:

1. **Προβλήματα εξοικείωσης με τη Γενετική.** Για την κατανόηση των ΓΑ δεν απαιτούνται γνώσεις γενετικής ή Βιολογίας. Οι ΓΑ μιμούνται με αφαιρετικό τρόπο κάποιες διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση, χωρίς να ενδιαφέρει σε μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας η λειτουργία τους και χωρίς να είναι απαραίτητο το γνωστικό υπόβαθρο που έχουν οι βιολόγοι για να μελετήσουν αυτά τα φαινόμενα. Οι όροι είναι δανεισμένοι από τη Βιολογία με σκοπό την καλύτερη εισαγωγή και κατανόηση του θέματος κι όχι την παραπομπή του μελετητή στα άγνωστα πεδία μίας ξένης επιστήμης. Επιπλέον, η εξέλιξη των ΓΑ δεν είναι συνυφασμένη με την αντίστοιχη εξέλιξη των θεωριών της Βιολογία. Το αρχικό μοντέλο είναι δανεισμένο από εκεί, όμως η εφαρμογή στα Τεχνικά Συστήματα έγινε με πλήθος διαφοροποιήσεων και προσαρμοσέων, με στόχο πάντα τη βελτίωση της απόδοσης.
2. **Το πρόβλημα του χρόνου.** Ο μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων καταλληλότητας όπως κι η τυχόν πολυπλοκότητα της συνάρτησης αποτίμησης, ακριβώς επειδή αυτή υπολογίζεται για κάθε χρωμόσωμα κάθε γενιάς, συνεπάγεται σημαντικό υπολογιστικό χρόνο.
3. **Η αδυναμία παροχής εγγυήσεων εύρεσης της βέλτιστης λύσης.** Αυτό σημαίνει ότι τις περισσότερες φορές δεν υπάρχει βεβαιότητα ότι ο ΓΑ έδωσε την καλύτερη δυνατή λύση στο εκάστοτε πρόβλημα.

4.3 Προσομοιωμένη Ανόπτηση

Η προσομοιωμένη ανόπτηση (ΠΑ) είναι μία μέθοδος που αναπτύχθηκε για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκε και στην επίλυση προβλημάτων με συνεχείς μεταβλητές. Η ΠΑ προτάθηκε ανεξάρτητα από τους Kirkpatrick et al το 1983 και από τον Cerny το 1985, και μεταφέρει τη φυσική διαδικασία της ανόπτησης ενός υλικού στη διαδικασία εύρεσης λύσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Ανόπτηση καλείται η διαδικασία ανακατανομής των μορίων κατά τη σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου, δηλαδή κατά τη μετάβασή του από μία αρχική θερμοκρασία Το σε μία πολύ χαμηλότερη τελική. Στις υψηλές θερμοκρασίες, τα μόρια του μετάλλου κινούνται ελεύθερα προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς το μέταλλο ψύχεται, η θερμική κινητικότητα των μορίων του περιορίζεται. Η διαδικασία αυτή οδηγεί τελικά σε μία κρυσταλλική στερεή κατάσταση, στην οποία αντιστοιχεί το ολικό ελάχιστο της ενέργειας του υλικού. Εάν η ψύξη γίνει με ταχύτερο ρυθμό, οδηγεί σε μία άμορφη κατάσταση του υλικού που αντιστοιχεί σε ένα τοπικό ελάχιστο ενέργειας.

Πίν. 4-1: Αναλογία μεταξύ ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και ενός φυσικού συστήματος
(Κατσιγιαννης, 2008)

Πρόβλημα βελτιστοποίησης	Φυσικό σύστημα
Αντικειμενική συνάρτηση	Ενέργεια του συστήματος
Λύσεις του προβλήματος	Καταστάσεις του φυσικού συστήματος
Εύρεση βέλτιστης λύσης	Εύρεση της κατάστασης ελάχιστης ενέργειας

Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης απόπτωσης βασίζεται σε δύο αποτελέσματα της στατιστικής φυσικής. Καταρχήν, όταν σε μία δεδομένη θερμοκρασία T έχει επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία, η πιθανότητα του υλικού $P(E,T)$ να έχει μία δεδομένη ενέργεια E είναι ανάλογη του παράγοντα Boltzmann:

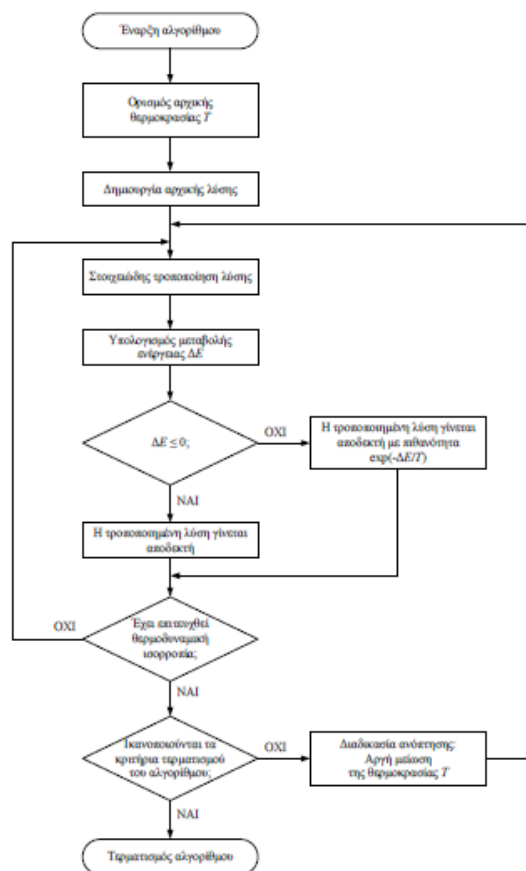
$$p(E, T) \approx \exp\left(-\frac{E}{T k_B}\right)$$

Όπου k_B είναι η σταθερά του Boltzmann. Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει εξ ορισμού μία μη μηδενική πιθανότητα μετάβασης σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας, δίνοντας στο σύστημα την ευκαιρία να «υπερπηδήσει» ένα «τοπικό» ενεργειακό ελάχιστο και να βρεθεί, μακροπρόθεσμα, σε μία 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 τη δημιουργία τέλειων κρυστάλλων είναι ο αργός ρυθμός ψύξης.

Επιπλέον, για να προσομοιωθεί η εξέλιξη ενός φυσικού συστήματος προς τη θερμοδυναμική του ισορροπία σε μία δεδομένη θερμοκρασία T , χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Metropolis. Η εφαρμογή του έχει ως εξής: ξεκινώντας από μία αρχική διαμόρφωση, το σύστημα υπόκειται σε μία στοιχειώδη τροποποίηση (π.χ ένα συστατικό του μεταβάλλεται). Εάν η παραπάνω τροποποίηση μειώσει την αντικειμενική συνάρτηση («ενέργεια») του συστήματος, τότε γίνεται αποδεκτή. Διαφορετικά, εάν προκαλέσει μία αύξηση ΔE στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα $\exp(-\Delta E/\Delta T)$. Με την επαναλαμβανόμενη χρήση του αλγορίθμου του Metropolis δημιουργείται μία ακολουθία διαμορφώσεων του συστήματος, που αποτελούν μία αλυσίδα Markov, καθώς κάθε διαμόρφωση εξαρτάται μόνο από την προηγούμενή της. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, είναι δυνατό να αποδειχτεί ότι στην περίπτωση που η αλυσίδα Markov έχει επαρκές μήκος, το σύστημα μπορεί να προσεγγίσει την κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας σε μία δεδομένη θερμοκρασία.

Ο ρόλος της θερμοκρασίας στον αλγόριθμο του Metropolis είναι καθοριστικής σημασίας. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η πιθανότητα $\exp(-\Delta E/\Delta T)$ προσεγγίζει τη μονάδα, επομένως η πλειονότητα των τροποποιήσεων γίνονται αποδεκτές και ο αλγόριθμος πρακτικά ισοδυναμεί με μία διαδικασία τυχαίου περιπάτου. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η πιθανότητα $\exp(-\Delta E/\Delta T)$ προσεγγίζει το μηδέν, οπότε η πλειονότητα των τροποποιήσεων που αυξάνουν την ενέργεια δεν γίνεται αποδεκτή. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες ο αλγόριθμος επιτρέπει σε ορισμένες τροποποιήσεις που αυξάνουν την αντικειμενική συνάρτηση να γίνουν αποδεκτές, κάτι που βοηθά το σύστημα να διαφύγει από ένα τοπικό ελάχιστο.

Όταν έχει επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία σε μία δεδομένη θερμοκρασία, η θερμοκρασία μειώνεται ελαφρά και μία νέα αλυσίδα Markov υλοποιείται στη νέα θερμοκρασία. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία αποδεικνύεται ότι όταν η θερμοκρασία τείνει στο μηδέν, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο ολικό ελάχιστο της ενέργειας. Σε πραγματικές συνθήκες, η διαδικασία τερματίζεται είτε όταν το σύστημα φτάσει σε μία προεπιλεγμένη ελάχιστη θερμοκρασία, είτε όταν δεν υπάρξει αποδοχή κάποιας τροποποίησης του συστήματος σε ένα δεδομένο αριθμό θερμοκρασιακών βημάτων. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της ΠΑ παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

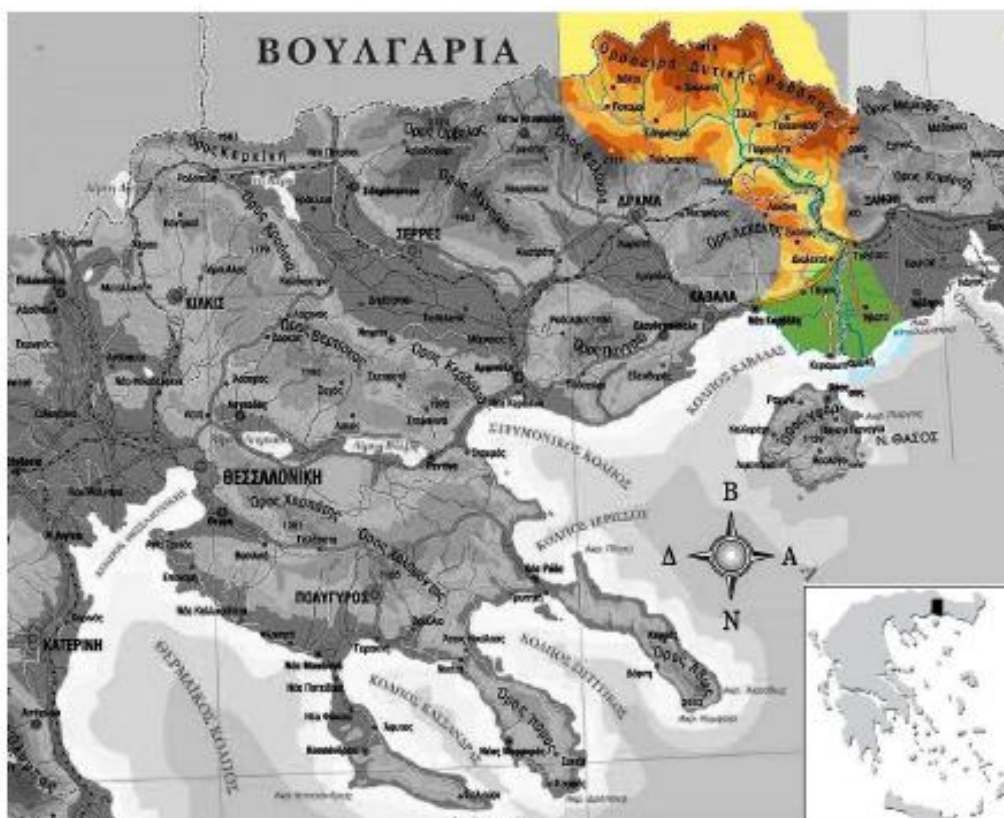


Σχ. 4-3: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτωσης (Κατσίγιαννης, 2008)

5 Το Υδροσύστημα του ποταμού Νέστου

5.1 Γεωγραφικά Στοιχεία της Περιοχής του Νέστου

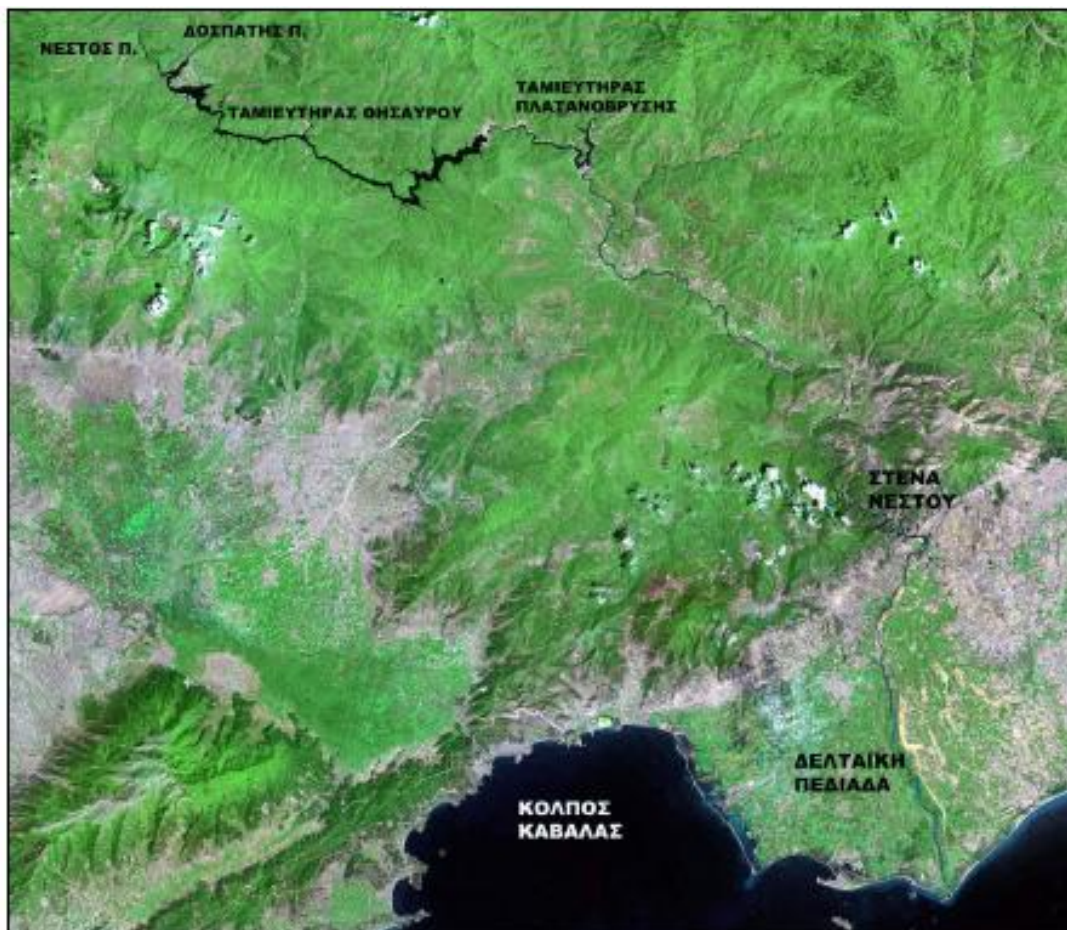
Ο ποταμός Νέστος αποτελεί το όριο της Μακεδονίας με τη Θράκη. Η λεκάνη απορροής του βρίσκεται στη Βαλκανική Χερσόνησο, στη νοτιοανατολική Ευρώπη, και μοιράζεται μεταξύ Ελλάδας και Βουλγαρίας. Πηγάζει από τα όρη Ρίλα και Ροδόπη της ΝΔ Βουλγαρίας, και μόλις εισέλθει σε ελληνικό έδαφος, συμβάλλει με έναν κύριο παραπόταμό του, τον Δοσπάτη, στο χωριό Ποταμοί, μόλις 3km από τα σύνορα. Ο Δοσπάτης εισέρχεται και αυτός στο ελληνικό έδαφος από τη Βουλγαρία. Η συνολική του πορεία στο ελληνικό και βουλγαρικό έδαφος έχει μήκος 234 km (με 130 km εντός του ελληνικού εδάφους) και εκβάλλει στο Θρακικό πέλαγος, απέναντι από τη Θάσο. Η λεκάνη απορροής του έχει έκταση 5479 km², από τα οποία τα 3437 km² (περίπου το 60%) ανήκουν στη Βουλγαρία και τα υπόλοιπα 2042 km² στην Ελλάδα. Η μορφολογία της περιοχής είναι κυρίως ορεινή, με εξαίρεση την περιοχή του δέλτα.



Σχ. 5-1: Το ελληνικό τμήμα της λεκάνης απορροής του Νέστου (έγχρωμο) στο χάρτη της κεντρικής και δυτικής Μακεδονίας (ασπρόμαυρο) (Παπαδάς, 2010)

Στο τελευταίο τμήμα της διαδρομής του Νέστου, πριν την εκροή του στο Αιγαίο πέλαγος, το κύριο ρεύμα διαδίδεται κι απλώνεται στην πεδιάδα της Χρυσούπολης, ως δελταϊκό

σύστημα, με λίμνες γλυκού νερού, σχηματίζοντας το δέλτα του Νέστου. Η περιοχή του Δέλτα προστατεύεται από διεθνείς νόμους και συμβάσεις για τη μεγάλη περιβαλλοντική του αξία.



Σχ. 5-2: Η πορεία του π. Νέστου στο ελληνικό έδαφος, όπως απεικονίζεται σε δορυφορική εικόνα, όπου φαίνονται οι κύριοι παραπόταμοι, οι τεχνητοί ταμειευτήρες, τα στενά κι η Δελταϊκή πεδιάδα του ποταμού (Αλμπανάκης, 2007)

5.2 Γεωλογικά Στοιχεία της Λεκάνης του Νέστου

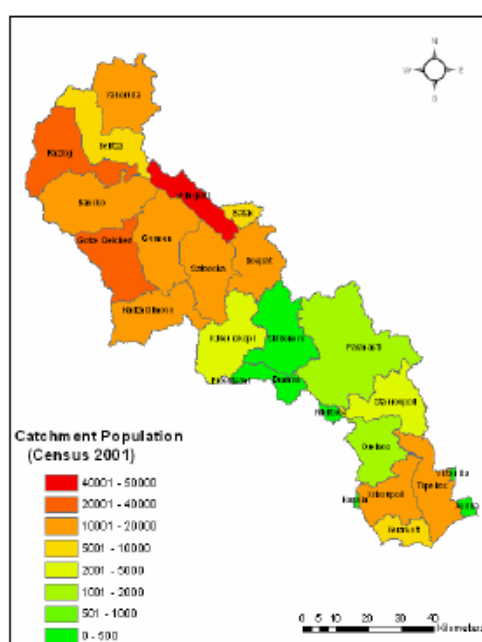
Στην ορεινή λεκάνη του Νέστου παρατηρούνται τέσσερις ομάδες σχηματισμών: μεταμορφωμένα, ιζηματογενή, πυριγενή πετρώματα και μάρμαρα. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα (γνεύσιοι, σχιστόλιθοι) καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος της λεκάνης σε μια ζώνη ΒΔ-ΝΑ στο μέσο περίπου της περιοχής. Τα μάρμαρα καλύπτουν περίπου το 25% της λεκάνης και χαρακτηριστικά τους είναι ο έντονος τεκτονισμός, η καρστικοποίηση και η πλήρωση πολλών κενών με μεταλλεύματα. Γρανιτοειδή και ηφαιστειακά πετρώματα παρατηρούνται μεταξύ της ζώνης των μεταμορφωμένων πετρωμάτων και των Βουλγαρικών συνόρων. Τα ιζήματα είτε έχουν προέλθει από τη διάβρωση του νερού και την απόθεση των φερτών υλών είτε από τα μικρά βυθίσματα εξαιτίας τεκτονισμού του υποβάθρου.

Στο Δέλτα του ποταμού υπάρχουν ιζήματα από αποθέσεις του Νέστου, ενώ σε ορισμένες θέσεις υπάρχει οργανική άργιλος που οφείλεται στα τενάγη του Δέλτα. Πιο συγκεκριμένα, στο δυτικό τμήμα του Νέστου (παλιά κοίτη ποταμού) παρατηρούνται διακριτά επάλληλα στρώματα υλικών, ενώ στο ανατολικό τμήμα οι αποθέσεις είναι αποτέλεσμα πλημμυρικών γεγονότων (Stournaras, 1998).

5.3 Πληθυσμιακά Δεδομένα

Όσον αφορά στο ελληνικό τμήμα της λεκάνης, αυτό καλύπτει περιοχές που ανήκουν στις νομαρχίες Δράμας, Ξάνθης και Καβάλας. Ο συνολικός πληθυσμός της λεκάνης είναι περίπου 42.000 κάτοικοι, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε 115 οικισμούς (μικρές πόλεις και χωριά). Ο πιο πυκνοκατοικημένος Δήμος βρίσκεται στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου και είναι ο Δήμος Χρυσούπολης, με την ομώνυμη πόλη να αποτελεί και τη μεγαλύτερη πόλη (8.000 κατοίκων) εντός της ελληνικής λεκάνης.

Όσον αφορά στο βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης, ο συνολικός πληθυσμός της λεκάνης του Μέστα είναι περίπου 190.000 κάτοικοι, οι οποίοι αποτελούν το 2,5% του συνολικού πληθυσμού της Βουλγαρίας. (Ruszczyk H. et al, 2001). Οι μεγαλύτερες πόλεις είναι οι: Gotse Delchev (33.000 κατοίκων), Razlog (22.100 κατοίκων), και Bansko (13.000 κατοίκων).

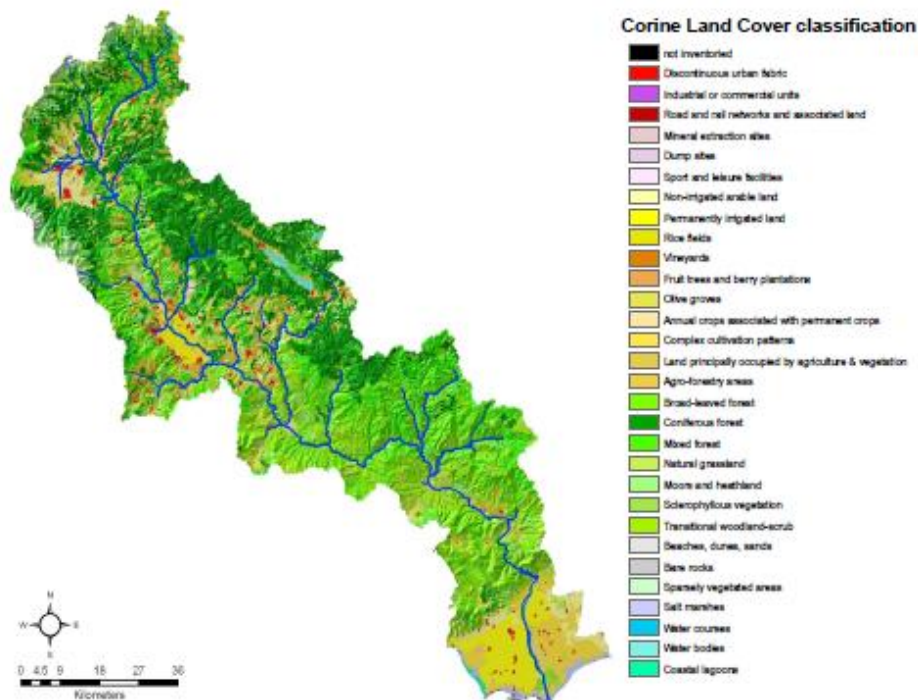


Σχ. 5-3: Πληθυσμιακή κατανομή στη λεκάνη του Νέστου (Σκουλικάρης, 2008)

5.4 Χρήσεις Γης

Όσον αφορά στις χρήσεις γης της λεκάνης του ποταμού Μέστα/Νέστου, 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 στη περιοχή του δέλτα του Νέστου. Στο δέλτα του ποταμού βρίσκονται επίσης φυσικές υδάτινες μάζες (water bodies) όπως αλυκές και παράκτιες λιμνοθάλασσες οι οποίες καλύπτουν το 1,3% της λεκάνης. Τέλος, οι αστικές περιοχές καλύπτουν μόνο το 1% των χρήσεων γης της λεκάνης απορροής και η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ασυνεχείς αστικές περιοχές, βιομηχανικές και εμπορικές μονάδες, οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα, λιμενικές ζώνες, αεροδρόμια, χώρους εξόρυξης ορυκτών, χώρους εναπόθεσης απορριμάτων, κατασκευαστικές ζώνες, αστικούς χώρους πρασίνου και χώρους αθλητισμού και αναψυχής.



Σχ. 5-4: Χρήσεις γης και κάλυψη εδαφικών εκτάσεων της λεκάνης του ποταμού Μέστα/Νέστου σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση CORINE Land Cover (Σκουλικάρης, 2008)

5.5 Οικονομικές Δραστηριότητες

Στο βουλγαρικό τμήμα της λεκάνης ο αριθμός των απασχολούμενων εκτιμάται ότι είναι περίπου 60.000 άτομα. Από αυτούς, το 33,8% απασχολείται στους τομείς της γεωργίας και της δασοκομίας, ενώ σημαντικό τομέα απασχόλησης αποτελεί κι η βιομηχανία, η οποία απασχολεί το 28,7% του εργατικού δυναμικού της περιοχής. Η υψηλότερη όμως ανάπτυξη παρουσιάζεται στο τριτογενή τομέα, δηλαδή στον τουρισμό.

Στην ελληνική πλευρά της λεκάνης, οι περισσότερες οικονομικές δραστηριότητες επικεντρώνονται κυρίως γύρω από τη γεωργία στο δέλτα του Νέστου. Οι βιομηχανικές μονάδες που έχουν αναπτυχθεί στην περιοχή βρίσκονται κυρίως κοντά στο λιμάνι της Καβάλας και την πόλη της Ξάνθης, δηλαδή περιφερειακά της λεκάνης. Συγκεκριμένα, η γεωργία απασχολεί το 50% του εργατικού δυναμικού, η βιομηχανία το 24%, ενώ το υπόλοιπο 26% των εργατών απασχολείται στον τριτογενή τομέα και στην παροχή υπηρεσιών.

Ο αγροτικός τομέας αποτελεί τον κύριο τομέα κατανάλωσης νερού με συνολική κατανάλωση 345 εκατ. m³ ετησίως, εκ των οποίων τα 255 απαιτούνται για την άρδευση των αγροτεμαχίων που βρίσκονται στην πλευρά της Καβάλας, και τα 90 ανά έτος απαιτούνται για την άρδευση του ανατολικού τμήματος του δέλτα στο Ν. Ξάνθης (Νομαρχία Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, 2000). Η εκτροπή του νερού προς το δυτικό και ανατολικό τμήμα του δέλτα γίνεται μέσω του αρδευτικού φράγματος των Τοξοτών, που βρίσκεται στην αρχή του δέλτα, και με τη χρήση δύο αρδευτικών καναλιών.

Στα ανάντη του ποταμού και κοντά στα σύνορα με τη Βουλγαρία, υπάρχουν τα δύο μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα, του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης. Ο ταμιευτήρας του φράγματος του Θησαυρού έχει δυνατότητα αποθήκευσης 565 νερό, ενώ της Πλατανόβρυσης έχει δυνατότητα αποθήκευσης 63. Πρέπει να σημειωθεί ότι κανένα από τα δύο φράγματα δεν χρησιμοποιείται για την εκτροπή υδάτων εκτός των ορίων της λεκάνης απορροής.

5.6 Διακρατική Συμφωνία για την Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στην Περιοχή του Νέστου

5.6.1 Εισαγωγή

Οι συνοριακές περιοχές αποτελούν αναπόφευκτα προβληματικά πεδία για πολλές χώρες, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν κοινοί υδατικοί πόροι μεταξύ των γειτονικών κρατών. Σημειώνεται ότι το 50% περίπου παγκοσμίως βρίσκεται σε διακρατικές λεκάνες απορροής και υπάρχουν 200 διακρατικές συμφωνίες μέχρι σήμερα. Οι συμφωνίες αυτές αποσκοπούν στην εξομάλυνση των εντάσεων και διαμαχών σχετικά με τη χρήση των κοινών υδατικών πόρων και οφείλουν να συμμορφώνονται με το διεθνές δίκαιο και τις σχετικές διεθνείς συμβάσεις.

Το θέμα των διασυνοριακών ποταμών αποτελεί μείζον θέμα για τη χώρα μας, καθώς η πλειοψηφία των ποταμών της Β. Ελλάδας είναι διασυνοριακοί. Αναπόφευκτα λοιπόν, η διαχείριση των υδατικών πόρων των ανάντη χωρών επηρεάζει άμεσα κάθε οικονομική, βιομηχανική και τουριστική ανάπτυξη, καθώς και την προστασία των οικοσυστημάτων και του φυσικού περιβάλλοντος της Β. Ελλάδας.

5.6.2 Η Περίπτωση του Νέστου

Ο ποταμός Νέστος πηγάζει από το όρος Ρίλα της Βουλγαρίας και εκβάλλει στο Θρακικό Πέλαγος με το 60% της λεκάνης να ανήκει στη Βουλγαρία και το υπόλοιπο στην Ελλάδα. Οι πολλές και ανταγωνιστικές χρήσεις του Νέστου τον καθιστούν απαραίτητο φυσικό πόρο της περιοχής. Το νερό του ποταμού Νέστου χρησιμοποιείται:

- Για άρδευση, ένα σημαντικό τομέα απασχόλησης της περιοχής.
- Για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας στα φράγματα Θησαυρού και Πλατανόβρυσης της Δ.Ε.Η.
- Για δραστηριότητες αναψυχής και ανάπτυξη οικότουρισμού.

Οι διαπραγματεύσεις των δύο κρατών σχετικά με τη διαχείριση του Νέστου ξεκίνησαν το 1964. Μέχρι το 1991 υπογράφηκαν 3 συμφωνίες για θέματα όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κι η παρακολούθηση ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων του ποταμού. Αρχικά, οι συζητήσεις έκλιναν προς την κατανομή του νερού με βάση συγκεκριμένες ποσότητες σε κυβικά μέτρα, χωρίς όμως να καταλήξουν σε κάποια συμφωνία. Από το 1992 και μετά ξεκίνησαν οι διαπραγματεύσεις με βάση την ποσοστιαία κατανομή των νερών.

Η συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Βουλγαρίας υπογράφηκε το 1995 και αποτελείται από 8 άρθρα. 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 απορροή βάσει στοιχείων των ετών 1935-1970 σε 1.500.000.000m³.
- Τα Συμβαλλόμενα Μέρη θα ανταλλάσσουν πληροφορίες και στοιχεία σχετικά με την κατάσταση των υδάτων.
- Σύσταση Μόνιμης Ελληνο-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.

Από τότε δεν υπήρξε καμία συντονισμένη προσπάθεια για συνέχιση της συνεργασίας μεταξύ Ελλάδας- Βουλγαρίας. Το κύριο μέλημα της ελληνικής πλευράς ήταν ο καθορισμός του δικαιώματος χρήσης κάθε χώρας. Η συμφωνία δεν εφαρμόζεται μέχρι σήμερα και αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη οικονομικών πόρων και στην αδυναμία των τοπικών διοικητικών και θεσμικών δομών.

5.6.3 Ελλείψεις και Ασάφειες της Συμφωνίας

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της υπάρχουσας συμφωνίας είναι η αποτυχία εφαρμογής της. Η επικαιροποίηση της αναγραφόμενης ποσότητας νερού δεν έλαβε χώρα όπως είχε συμφωνηθεί βάσει κοινών μετρήσεων και στις δύο χώρες. Είναι φανερό ότι η συμφωνία παραμένει ανενεργή μέχρι σήμερα, καθώς η προβλεπόμενη επιτροπή Υδροοικονομίας, υπεύθυνη για την εφαρμογή της, δεν έχει προχωρήσει στο έργο της.

Οι προγραμματιζόμενες ενέργειες που προβλέπονται στα άρθρα της συμφωνίας δεν έχουν πραγματοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, δεν έχει γίνει ο υπολογισμός της πραγματικής ποσότητας νερού που δικαιούται η Ελλάδα λόγω σημαντικών ελλείψεων δεδομένων κυρίως από τη Βουλγαρική πλευρά. Επίσης, υπάρχει σοβαρό πρόβλημα συνεργασίας μεταξύ των δύο χωρών. Δεν υπάρχει ενημέρωση από την πλευρά της Βουλγαρίας για ρίψεις αποβλήτων στο ποτάμι ούτε για προγραμματιζόμενες ή μη παρακρατήσεις υδάτων. Εκτός από αυτά, παρατηρείται μία συνεχής υποβάθμιση των οικοσυστημάτων κατά μήκος του Νέστου. Τέλος, η Ελληνο- Βουλγαρική επιτροπή Υδροοικονομίας, αν και έχει συσταθεί, έχει συνεδριάσει ελάχιστες φορές και κατά συνέπεια δεν γίνεται η απαραίτητη επίβλεψη της εφαρμογής της συμφωνίας. Είναι ο μόνος υπεύθυνος φορέας για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της συμφωνίας και χωρίς την ουσιαστική συμβολή του δε δύναται η εφαρμογή της συμφωνίας.

Αν υποθεθεί ότι οι δύο χώρες συμφωνούν στην επανέναρξη των διαπραγματεύσεων, θα έχουν να αντιμετωπίσουν μία σειρά προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα:

1. Αν η συμφωνία εφαρμοστεί και η παροχή μειωθεί στο 29% (σήμερα θεωρείται ότι η Ελλάδα λαμβάνει περίπου το 70-80%), θα υπάρξει ανεπάρκεια της ποσότητας του νερού για την εύρυθμη λειτουργία των φραγμάτων, γεγονός που θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό και τις αρδεύσεις.
2. Η νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για το νερό 2000/60, ενώ έχει ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία από το Δεκέμβριο του 2003, δεν εφαρμόζεται μέχρι σήμερα. Από την άλλη μεριά, η Βουλγαρία θέσπισε το 2000 ένα καινούριο νόμο για τη διαχείριση των υδάτων, ακολουθώντας το «γαλλικό μοντέλο» που εμπεριέχει τις αρχές της Οδηγίας Πλαίσιο για τη διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης.
3. 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.



Σχ. 5-5: Η λεκάνη του ποταμού Μέστα/Νέστου

5.7 Τα Φράγματα στο Νέστο

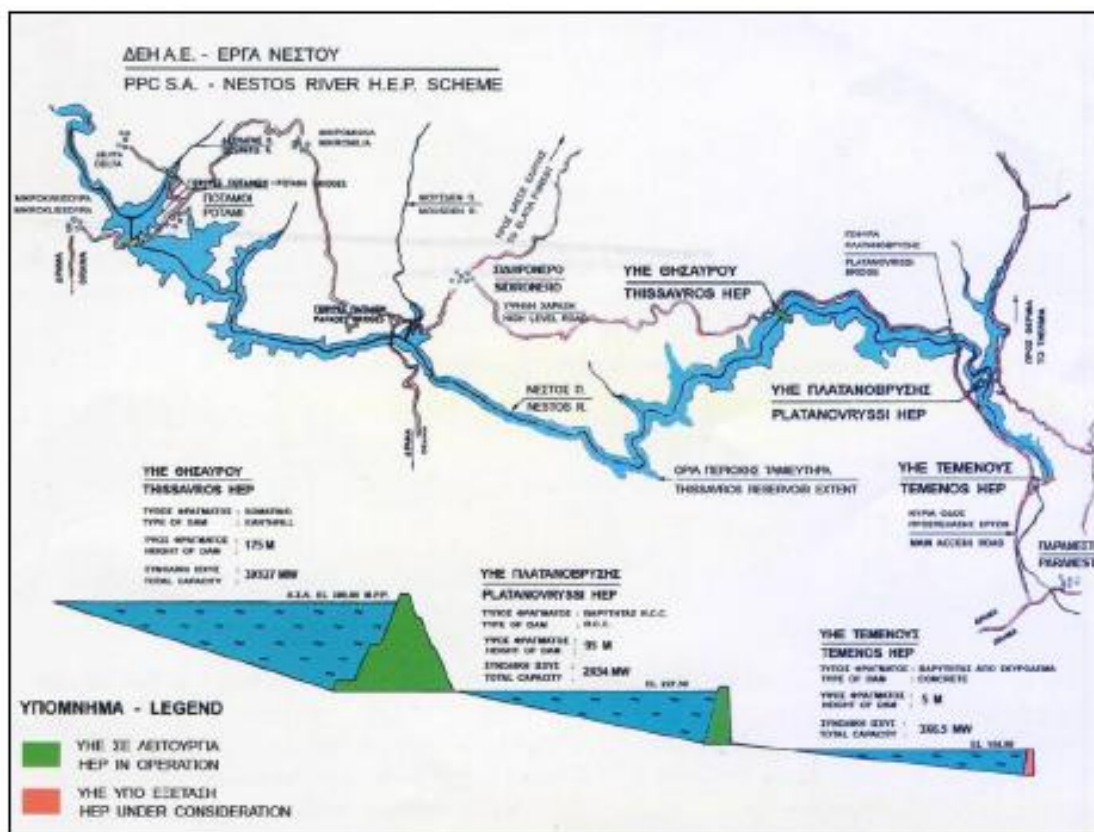
Τα αναπτυξιακά έργα επί του ποταμού Νέστου ξεκίνησαν με την κατασκευή των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων εκατέρωθεν του κυρίου ρεύματος του ποταμού στην περιοχή του δέλτα του Νέστου (1952-1958). Το πέρας των εργασιών αυτών των αντιπλημμυρικών έργων ακολούθησε η κατασκευή του φράγματος των Τοξοτών (1960-1966). Πρόκειται για το πρώτο φράγμα που κατασκευάστηκε στην περιοχή. Έχει μήκος 280 μέτρα και βρίσκεται στο λαιμό του Δέλτα, εκτρέποντας τις ποσότητες των υδάτων προς την αριστερή (Ν. Ξάνθης) και δεξιά (Ν. Καβάλας) όχθη του κυρίου ρεύματος του ποταμού στα αντίστοιχα αρδευτικά δίκτυα. Η μελέτη σκοπιμότητας του φράγματος των Τοξοτών πραγματοποιήθηκε από μια αμερικάνικη κατασκευαστική εταιρία, την Knarpen – Tirperts-Abbett – McCarthy Engineering (ΥΔΕ, 1954).



Σχ. 5-6: Δυτικό κανάλι εκτροπής φράγματος Τοξοτών (www.google.com)

Η μελέτη σκοπιμότητας για την κατασκευή των ανάντη φραγμάτων πραγματοποιήθηκε το 1971-1972 από μια ξένη εταιρία συμβούλων μηχανικών για λογαριασμό της ΔΕΗ. Παρόλα αυτά, η κατασκευή του έργου ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, βασιζόμενο σε μια ενδιάμεση συμφωνία με τη Βουλγαρία σχετικά με τις εισερχόμενες ποσότητες υδάτων στην Ελλάδα. Το αρχικό σχέδιο περιελάμβανε την κατασκευή τριών «εν σειρά» υδροηλεκτρικών σταθμών: του αναστρέψιμου ΥΗΣ Θησαυρού, του αναστρέψιμου ΥΗΣ Πλατανόβρυσης και του υδροηλεκτρικού- αρδευτικού σταθμού Τεμένους.

Τόσο ο ΥΗΣ Θησαυρού όσο και ο ΥΗΣ Πλατανόβρυσης σχεδιάστηκαν ώστε λειτουργώντας μερικές ώρες την ημέρα να μπορούν να καλύπτουν τις ώρες αιχμής, δηλαδή τις ώρες αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, διοχετεύοντας την παραγόμενη ενέργεια στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς. Ο ΥΗΣ του Τεμένους από την άλλη μεριά έχει ως στόχο την αναρρύθμιση της παροχής, δηλαδή τη συγκράτηση της μη σταθερής παροχής κατά τη διάρκεια της παραγωγής ενέργειας από τα ανάντη φράγματα, και τη διοχέτευση των υδάτων για την άρδευση των κατάντη αυτού περιοχών, καθώς και για την εξασφάλιση των περιβαλλοντικών αναγκών σε νερό. Ωστόσο, λόγω έλλειψης κεφαλαίων δεν μπόρεσε να επιτευχθεί η κατασκευή του συνολικού έργου, με αποτέλεσμα μόνο δύο φράγματα να έχουν ολοκληρωθεί μέχρι στιγμής: αυτά του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης.



Σχ. 5-7: Απεικόνιση των τριών ΥΗΣ εν σειρά και των κύριων χαρακτηριστικών τους επί του ποταμού Νέστου (ΔΕΗ)

5.7.1 ΥΠΕΙΣ ΘΗΣΑΥΡΟΥ

Είναι ο πρώτος ανάντη σταθμός του υδροηλεκτρικού συγκροτήματος στην περιοχή του Νέστου «εν σειρά», που κατασκευάστηκε σε μία μεγάλη καμπή του ποταμού γύρω από το όρος Ραχίστα, 30km βορειοανατολικά της Δράμας, κοντά στα Ελληνο-Βουλγαρικά σύνορα στην Ανατολική Μακεδονία.

Το φράγμα του Θησαυρού είναι το υψηλότερο και μεγαλύτερο σε όγκο χωμάτινο φράγμα που κατασκευάστηκε ποτέ στην Ελλάδα. Είναι λιθόρριπτο με κεντρικό αργιλικό πυρήνα, συνολικού όγκου 12 εκατομμυρίων m^3 , ύψους 175m και μήκους στη στέψη 480 μέτρων. Ο ταμιευτήρας του είναι ωφέλιμος χωρητικότητας 565 εκατομ. m^3 . Η σήραγγα εκτροπής, διαμέτρου 11m και συνολικού μήκους 1600m, βρίσκεται στο δεξιό αντέρεισμα και συνδυάζεται με εκκενωτή πυθμένα. Ο εκχειλιστής, που περιλαμβάνει τρία τοξωτά θυροφράγματα και ανοικτή διώρυγα, βρίσκεται στο αριστερό αντέρεισμα και καταλήγει σε κατασκευή αναπήδησης.

Είναι έργο άντλησης- ταμίευσης, εξοπλισμένο με τρεις αναστρέψιμες μονάδες τύπου Francis κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 127MW η καθεμία, που παράγουν συνολική ετήσια ενέργεια περί τις 440GWh. Επίσης, είναι έργο πολλαπλού σκοπού που

ικανοποιεί τις αρδευτικές ανάγκες των γειτονικών περιοχών, προσφέροντας τους παράλληλα και αντιπλημμυρική προστασία.



Σχ. 5-8: Το φράγμα του Θησαυρού (itia.ntua.gr)

5.7.2 ΥΗΕ Πλατανόβρυσης

Το υδροηλεκτρικό έργο της Πλατανόβρυσης αποτελεί το ενδιάμεσο από τα τρία τμήματα του συστήματος των έργων της ΔΕΗ στον ποταμό Νέστο. Βρίσκεται 12km κατάντη του ΥΗΕ Θησαυρού, εκεί όπου ο ποταμός σχηματίζει ένα πεταλοειδή μαίανδρο στη συμβολή του με το Διαβολόρεμα. Ο ταμιευτήρας του λειτουργεί σαν κάτω ταμιευτήρας του αντλητικού σταθμού του Θησαυρού.

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης είναι ένα από τα υψηλότερα κατασκευασθέντα φράγματα στην Ευρώπη. Είναι κατασκευασμένο από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (σημειώνεται ότι είναι το πρώτο RCC (κυλινδρούμενο τεφροσκυρόδεμα) φράγμα που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα), έχει ύψος 95m, μήκος στέφης 230m και συνολικό όγκο 450.000m³. Η σήραγγα έχει διάμετρο 11/12m και μήκος 485m και βρίσκεται στο δεξιό αντέρεισμα. Ο σταθμός διαθέτει δύο μονάδες τύπου Francis κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 54MW η καθεμία, που παράγουν συνολικά ετήσια ενέργεια της τάξης των 240GWh.



Σχ. 5-9: Το φράγμα της Πλατανόβρυσης (www.airdynamics.gr)

5.7.3 ΥΗΕ Τεμένους

Κατάντη του ΥΗΕ Πλατανόβρυσης, στον κάτω ρου του ποταμού Νέστου, βορειοανατολικά του ομώνυμου χωριού, υπάρχει θέση σε απόσταση 4km περίπου βόρεια από το Παρανέστι Δράμας, όπου έχει μελετηθεί το ΥΗΕ Τεμένους. Η απόσταση του έργου από το υπάρχον ΥΗΕ Πλατανόβρυσης θα είναι περίπου 6km κατάντη.

Το Υδροηλεκτρικό Έργο Τεμένους αποτελεί έργο πολλαπλής σκοπιμότητας, καθώς εκτός από την παραγωγή ενέργειας θα εξυπηρετεί και τις μεγάλες ανάγκες σε νερό στην ευρύτερη περιοχή του έργου. Συγκεκριμένα, η κατασκευή του ΥΗΕ Τεμένους θα εξασφαλίσει τη διάθεση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη διάθεση σημαντικών ποσοτήτων νερού για την κάλυψη των σημερινών και των μελλοντικών αναγκών των κατάντη πεδιάδων στους Νομούς Δράμας, Ξάνθης και Καβάλας, αλλά και την ομαλοποίηση της ροής του ποταμού Νέστου.

Το ΥΗΕ Τεμένους έχει σχεδιαστεί από τη ΔΕΗ/ΔΑΥΕ σε συνδυασμό με τους υπάρχοντες ΥΗΣ Θησαυρού και Πλατανόβρυσης προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση του διαθέσιμου υδροδυναμικού του ποταμού, ώστε τα δύο μεγάλα ανάντη ΥΗΕ να αποκτήσουν καθαρά ενεργειακό προσανατολισμό και το ΥΗΕ Τεμένους να καλύπτει ενεργειακές ανάγκες με ταυτόχρονη ικανοποίηση των κατάντη αρδευτικών και περιβαλλοντικών αναγκών.

Το φράγμα ,έτσι όπως έχει σχεδιαστεί από τη ΔΕΗ/ΔΑΥΕ, περιλαμβάνει φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα, ύψους 45m και μήκους στη στέψη 100m. Επίσης, υπάρχει ενσωματωμένος ανοικτός υπερχειλιστής. Ο ΥΗΣ είναι υπαίθριος με τρεις μονάδες τύπου TABULAR ,μέγιστης ισχύος 6,3MW έκαστη.

6 Μεθοδολογία

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία. Για την εκπόνηση της εργασίας έγινε χρήση του λογισμικού WEAP21, μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του υδροσυστήματος του Νέστου, και του MATLAB, μέσω του οποίου επιτεύχθηκε τόσο η βαθμονόμηση όσο κι η βελτιστοποίηση του. Η συνεργασία των δύο προγραμμάτων επιτεύχθηκε μέσω ενός κώδικα προγραμματισμού που δημιουργήθηκε από τον Ιωάννη Τσουκαλά στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του εργασίας. Στόχος της εργασίας ήταν η εξαγωγή κανόνων λειτουργίας για το υδροσύστημα.

Σε πρώτο στάδιο έγινε η επεξεργασία όλων των απαραίτητων υδρολογικών και μη δεδομένων, ενώ παράλληλα δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα Thiessen με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGis. Με τη δημιουργία των πολυγώνων Thiessen έγινε η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στις υπολεκάνες του υδροσυστήματος. Στη συνέχεια, έγινε εισαγωγή της λεκάνης του Νέστου και όλων των παραπάνω στοιχείων στο μοντέλο WEAP21, και με τη βοήθεια του συνδέσμου αμφίδρομης επικοινωνίας που συνδέει το WEAP21 με το MATLAB, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του υδροσυστήματος. Προκειμένου να γίνει η βαθμονόμηση έγινε χρήση του Optimization Toolbox του MATLAB. Μετά τη βαθμονόμηση του συστήματος, έγινε εισαγωγή στο WEAP21 όλων των τεχνικών έργων-φραγμάτων που υπάρχουν στην περιοχή του Νέστου και των χαρακτηριστικών τους. Επίσης, ορίστηκαν οι κόμβοι ζήτησης της περιοχής, που αντιπροσωπεύουν τις διάφορες απαιτήσεις σε νερό. Τέλος, χρησιμοποιώντας ξανά τον σύνδεσμο αμφίδρομης επικοινωνίας που συνδέει τα δύο προγράμματα (WEAP21 και MATLAB), καθώς και το Optimization Toolbox του MATLAB, πραγματοποιήθηκε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος, έτσι ώστε να προκύψουν οι τελικοί κανόνες λειτουργίας του.

6.2 Δεδομένα

6.2.1 Δεδομένα Βροχόπτωσης

Όλα τα απαραίτητα στοιχεία βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν από το τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, και συγκεκριμένα από τη διδακτορική διατριβή του Δρ. Σκουλικάρη Χαράλαμπου. Όλα τα δεδομένα ήταν μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης, οι οποίες είχαν συγκεντρωθεί από διάφορες πηγές όπως την ΔΕΗ, την ΕΜΥ κ.τ.λ. Στο ελληνικό κομμάτι της λεκάνης του Νέστου υπάρχουν 22 βροχομετρικοί σταθμοί. Ύστερα από μελέτη όλων των διαθέσιμων δεδομένων, αποφασίστηκε να γίνει χρήση πέντε βροχομετρικών σταθμών που καλύπτουν την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1964 έως 31 Δεκεμβρίου 1996. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση των δεδομένων που καλύπτουν την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1968 έως 31 Δεκεμβρίου

1982 προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση του υδροσυστήματος, και στη συνέχεια έγινε επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, χρησιμοποιώντας τα υδρολογικά δεδομένα της περιόδου 1 Ιανουαρίου 1991 έως 31 Δεκεμβρίου 1994. Ο κύριος λόγος που δεν χρησιμοποιήθηκε το συνολικό χρονικό διάστημα για το οποίο υπήρχαν μετρήσεις ήταν η έλλειψη δεδομένων για την περίοδο 1983-1990 και 1995-1996 στους διαθέσιμους σταθμούς μέτρησης απορροής του ελληνικού κομματιού της λεκάνης, κι η έλλειψη δεδομένων για την περίοδο 1963-1967 στους διαθέσιμους σταθμούς μέτρησης απορροής του βουλγαρικού κομματιού της λεκάνης, οι οποίοι και αναφέρονται στη συνέχεια.

Οι βροχομετρικοί σταθμοί οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Πίν. 6-1: Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν

1	ΑΧΛΑΔΙΑ
2	ΚΑΡΥΟΦΥΤΟ
3	ΠΟΤΑΜΟΙ
4	ΠΤΕΛΕΑ
5	ΣΙΔΗΡΟΝΕΡΟ

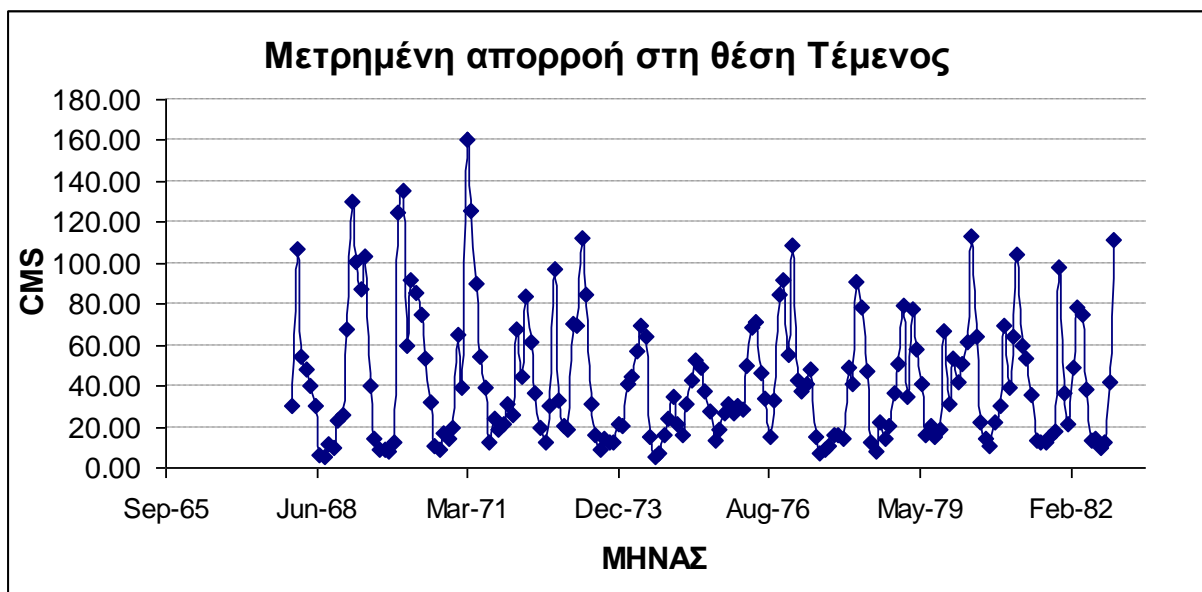
Παρακάτω δίνεται η θέση των πέντε βροχομετρικών σταθμών στην λεκάνη του Νέστου.



Σχ. 6-1: Η θέση των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στη λεκάνη του Νέστου

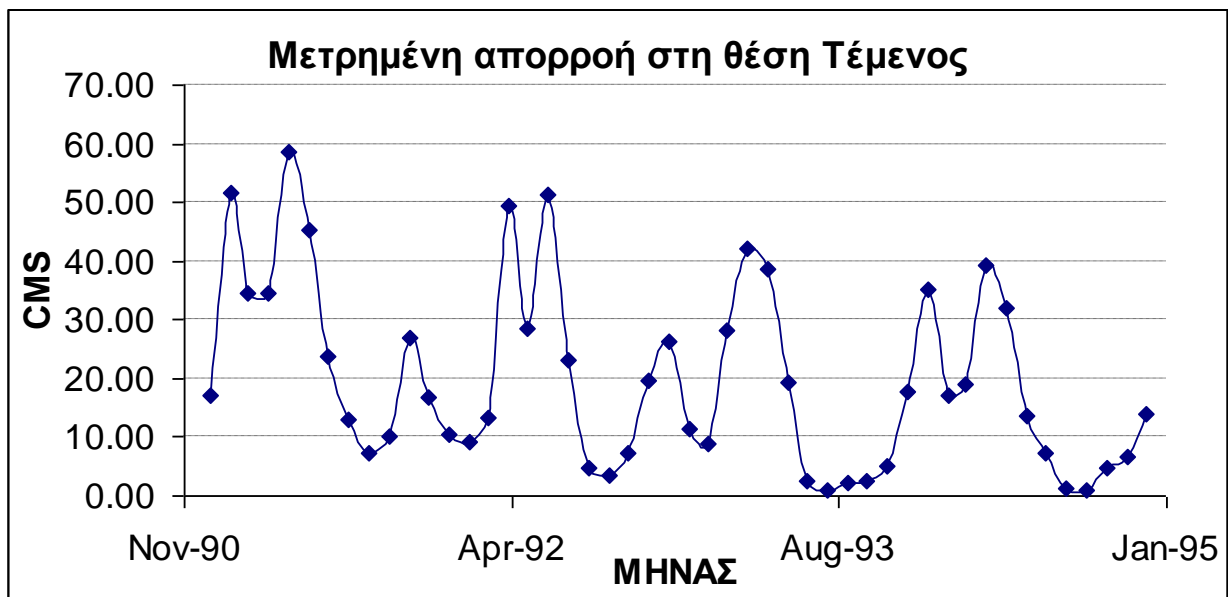
6.2.2 Διαθέσιμοι Σταθμοί Μέτρησης Απορροής

Όσον αφορά στα στοιχεία της μετρημένης απορροής στο ελληνικό κομμάτι της περιοχής του Νέστου, υπήρχαν στοιχεία μόνο από έναν σταθμό μέτρησης απορροής, το σταθμό του Τεμένους. Τα διαθέσιμα στοιχεία από αυτόν τον σταθμό κάλυπταν την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1964 έως 31 Δεκεμβρίου 1982 και από 1 Ιανουαρίου 1991 έως 31 Δεκεμβρίου 1994. Η έλλειψη δεδομένων που υπήρχε για την περίοδο 1983-1990 ήταν ο βασικός λόγος για τον οποίο η βαθμονόμηση του συστήματος έγινε χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα της περιόδου 1968-1982, μιας κι η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στη θέση Τέμενος. Η παρατηρημένη ροή στη θέση Τέμενος για την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1968 έως 31 Δεκεμβρίου 1982 φαίνεται παρακάτω:



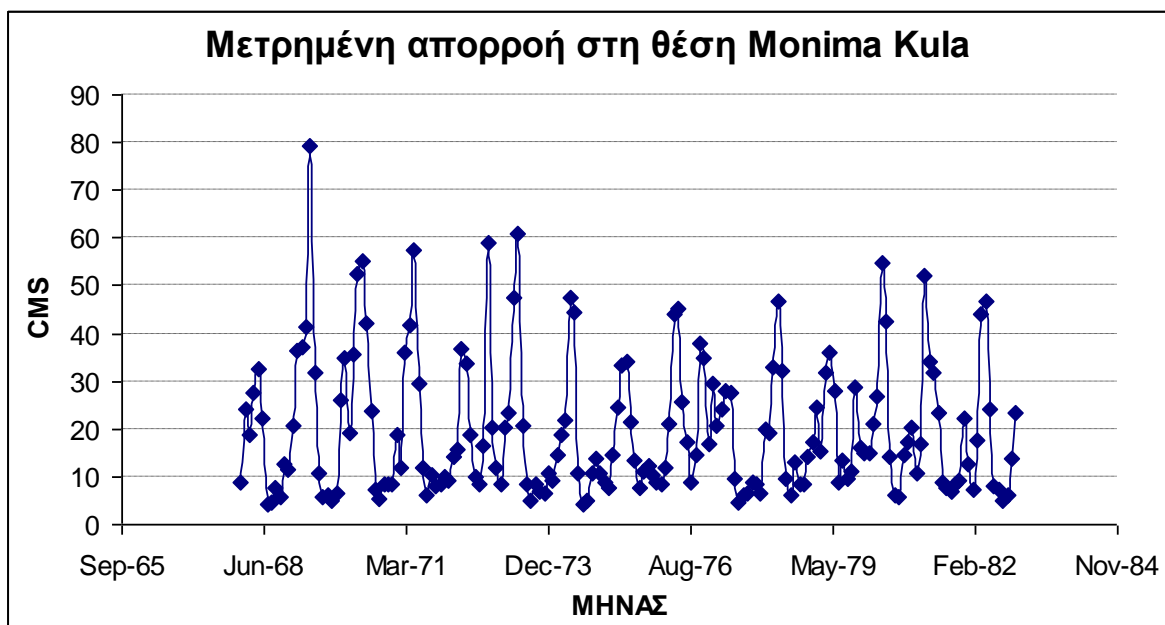
Σχ. 6-2: Μετρημένη απορροή στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1968-1982

Αντίστοιχα, η παρατηρημένη ροή στην ίδια θέση για την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1991 έως 31 Δεκεμβρίου 1994 φαίνεται παρακάτω:



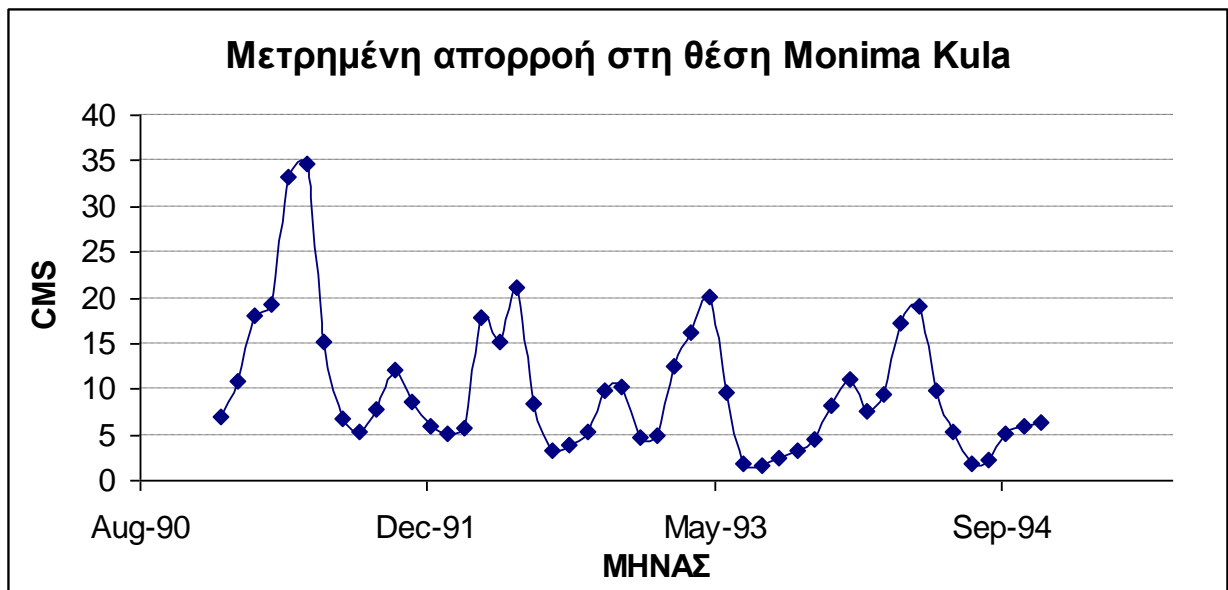
Σχ. 6-3: Μετρημένη απορροή στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1991-1995

Όσον αφορά στο βουλγαρικό κομμάτι της περιοχής του Νέστου, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία μετρημένης απορροής από το σταθμό Monima Kula, προκειμένου να προσδιοριστεί η απορροή στα σύνορα Ελλάδας – Βουλγαρίας. Διαθέσιμα στοιχεία από αυτόν το σταθμό υπήρχαν για την περίοδο 1 Ιανουαρίου 1968 έως 31 Δεκεμβρίου 1997. Η παρατηρημένη ροή στη θέση του σταθμού Monima Kula για την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1968 έως 31 Δεκεμβρίου 1982 φαίνεται παρακάτω:



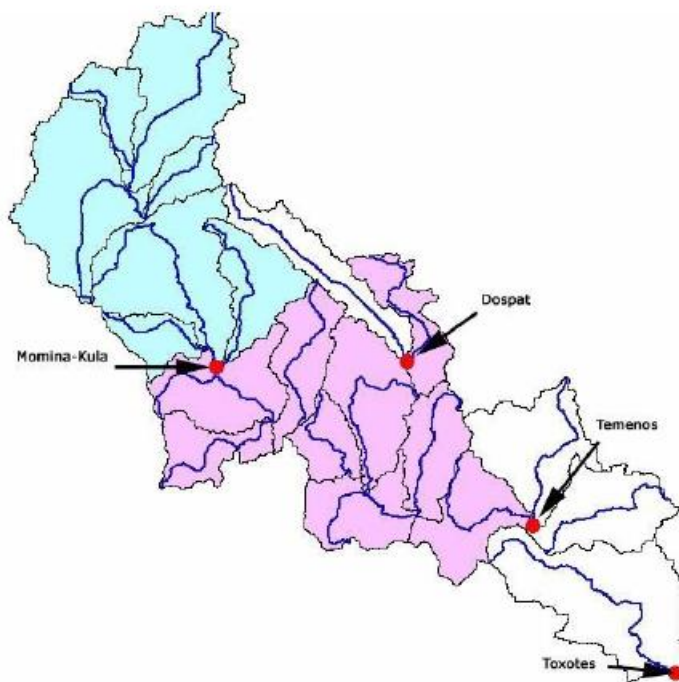
Σχ. 6-4: Μετρημένη απορροή στη θέση Monima Kula για την περίοδο 1968-1982

Αντίστοιχα, η παρατηρημένη ροή στη θέση του σταθμού Monima Kula για την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 1991 έως 31 Δεκεμβρίου 1994 φαίνεται παρακάτω:



Σχ. 6-5: Μετρημένη απορροή στη θέση Monima Kula για την περίοδο 1991-1995.

Επίσης, δίνεται η θέση των σταθμών Τέμενος και Monima Kula στην λεκάνη του Νέστου.



Σχ. 6-6: Θέση των σταθμών Τέμενος και Monima Kula στην λεκάνη του Νέστου (Σκουλικάρης, 2008).

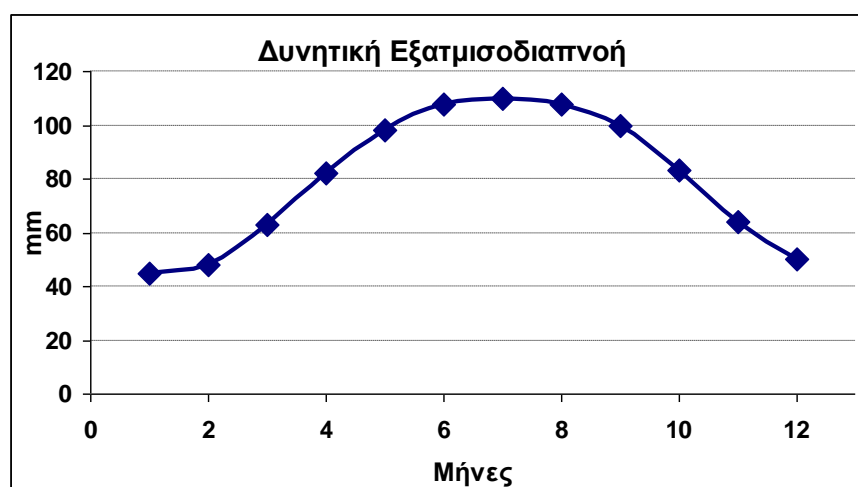
6.2.3 Δεδομένα Εξαμυσοδιαπνοής

Ο καθορισμός της δυνητικής εξαμυσοδιαπνοής στη λεκάνη του Νέστου βασίστηκε στη χρήση μίας μοναδικής μέσης μηνιαίας τιμής που κάλυπτε το σύνολο της λεκάνης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό αντιστοιχούν στη δυνητική

εξατμισοδιαπνοή όπως αυτή υπολογίστηκε για την περιοχή της Θεσσαλονίκης (Σκουλικάρης 2008), κι είναι τα ακόλουθα:

Πίν. 6-2: Μηνιαίες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στη λεκάνη του Νέστου (Σκουλικάρης, 2008).

ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΡΕΤ	
ΜΗΝΑΣ	ΡΕΤ (mm)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	45
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	48
ΜΑΡΤΙΟΣ	63
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	82
ΜΑΙΟΣ	98
ΙΟΥΝΙΟΣ	108
ΙΟΥΛΙΟΣ	110
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	108
ΣΕΠΤΕΜΒΡΗΣ	100
ΟΚΤΩΒΡΗΣ	83
ΝΟΕΜΒΡΗΣ	64
ΔΕΚΕΜΒΡΗΣ	50



Σχ. 6-7: Μηνιαίες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στη λεκάνη του Νέστου

6.3 Εξαγωγή Πολυγώνων Thiessen

6.3.1 Γενικά για τη Μέθοδο των Πολυγώνων Thiessen

Η μέθοδος Thiessen (Thiessen,1911) επιτρέπει τον υπολογισμό της μέσης επιφανειακής βροχής για ανομοιόμορφη κατανομή σταθμών και για μη επίπεδες επιφάνειες. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές, τα όρια των οποίων προκύπτουν από τις μεσοκαθέτους στις ευθείες που ενώνουν δύο παρακείμενους σταθμούς. Οι υποπεριοχές που δημιουργούνται με το τρόπο αυτό έχουν το χαρακτηριστικό ότι περιλαμβάνουν όλα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στο σταθμό που περικλείει η υποπεριοχή αυτή, παρά σε οποιοδήποτε άλλο σταθμό. Γίνεται δεκτό ότι κάθε σημείο της περιοχής δέχεται ίδιο ύψος βροχής με τον πλησιέστερο προς αυτό σταθμό. Ο υπολογισμός του ισοδύναμου ύψους βροχής για την περιοχή γίνεται με τον εξής τρόπο: ο λόγος του εμβαδού της κάθε υποπεριοχής προς το συνολικό εμβαδό της περιοχής μελέτης χρησιμοποιείται σαν συντελεστής βάρους, με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το ύψος βροχής του αντίστοιχου σταθμού. Αθροίζοντας τα παραπάνω γινόμενα για το σύνολο των σταθμών της περιοχής, προκύπτει το μέσο ισοδύναμο ύψος κατακρημνίσεων στην περιοχή.

$$P_{\text{ισοδύναμο}} = \sum_{i=1}^n (E_i \times P_i) / \sum_{i=1}^n E_i$$

Η μέθοδος Thiessen είναι πολύ απλή στην εφαρμογή της και δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιοχές με ομαλό εδαφικό ανάγλυφο. Βασικά μειονεκτήματα της είναι το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψη της το εδαφικό ανάγλυφο και ότι σε δύο γειτονικά σημεία εκατέρωθεν μιας ευθείας που διαχωρίζει δύο περιοχές, μπορεί να αντιστοιχίσει πολύ διαφορετικά ύψη βροχής.

6.3.2 Εξαγωγή Πολυγώνων Thiessen στη Λεκάνη του Νέστου

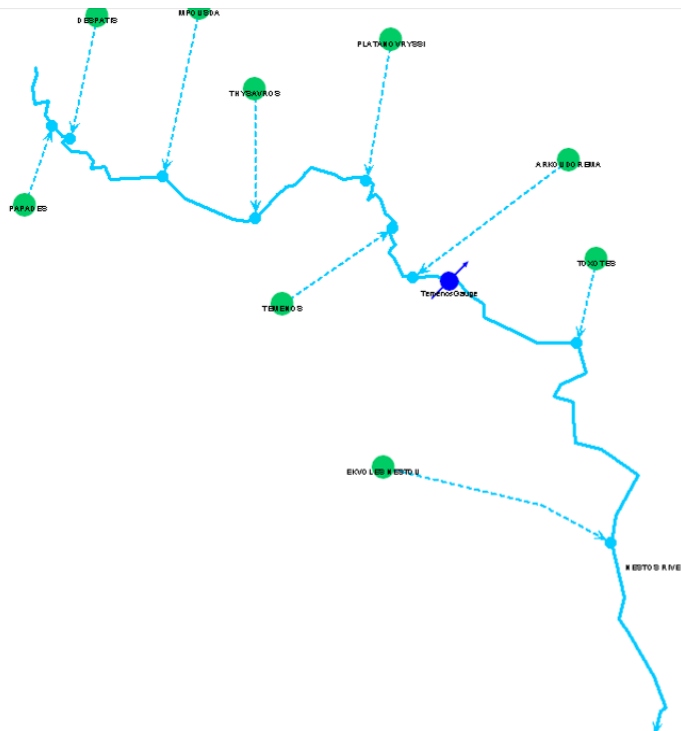
Η δημιουργία των πολυγώνων Thiessen στη λεκάνη του Νέστου έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGis. Με την κατασκευή των πολυγώνων Thiessen επιτυγχάνεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στις 9 υπολεκάνες στις οποίες χωρίζεται η λεκάνη του Νέστου. Στη συνέχεια, οι χρονοσειρές της βροχής που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία για την κάθε υπολεκάνη του υδροσυστήματος θα εισαχθούν ως δεδομένα στο WEAP21 για την προσομοίωση του υδροσυστήματος του Νέστου. Τα πολύγωνα Thiessen όπως προέκυψαν από την χρήση του προγράμματος ArcGis έχουν τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 6-8: Τα πολύγωνα Thiessen όπως προέκυψαν από το ArcGIS για τη λεκάνη απορροής του Νέστου

6.4 Εισαγωγή των Δεδομένων και Δημιουργία του Υδροσυστήματος στο WEAP21

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του υδροσυστήματος, γίνεται αρχικά η εισαγωγή της λεκάνης απορροής του Νέστου στο WEAP, καθώς κι ο επιμερισμός αυτής στις 9 υπολεκάνες στις οποίες χωρίζεται. Στη συνέχεια, και με τη βοήθεια των πολυγώνων Thiessen που δημιουργήθηκαν παραπάνω, γίνεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στις υπολεκάνες και δημιουργούνται οι χρονοσειρές βροχής των υπολεκανών, οι οποίες και εισάγονται ως δεδομένα στο WEAP. Εισάγονται επίσης οι χρονοσειρές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, ενώ δίνονται και τα εμβαδά των υπολεκανών. Τέλος, γίνεται η εισαγωγή των στοιχείων της μετρημένης απορροής στη θέση Τέμενος, ενώ παράλληλα τοποθετούνται και τα δεδομένα της απορροής στο σταθμό Monima Kula, θεωρώντας ότι αυτά αντιπροσωπεύουν την εισροή στα σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας. Το περιβάλλον εργασίας στο WEAP έχει την ακόλουθη μορφή:



Σχ. 6-9: Η εικόνα του υδροσυστήματος του Νέστου στο WEAP21

6.5 Βαθμονόμηση του Υδροσυστήματος του Νέστου

Μετά την αναπαράσταση της λεκάνης του Νέστου στο WEAP και την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων, το επόμενο βήμα είναι η βαθμονόμηση του υδροσυστήματος. Στόχος της βαθμονόμησης είναι η εύρεση των τιμών των συντελεστών καλλιέργειας των υπολεκανών αλλά και της τιμής του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης για το σύνολο της λεκάνης (εκφρασμένου ως ποσοστό επί τοις εκατό). Η εκτίμηση όλων των παραμέτρων γίνεται εμμέσως, μέσω «σύγκρισης» των αποκρίσεων του μοντέλου με μετρημένες τιμές απορροής. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση, χρησιμοποιήθηκε κώδικας προγραμματισμού που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη μεταπτυχιακή εργασία και επιτυγχάνει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ WEAP και MATLAB.

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στη θέση Τέμενος, όπου και έγινε σύγκριση μεταξύ της μετρημένης (παρατηρημένης) απορροής που έχει καταγραφεί από το σταθμό μέτρησης απορροής της περιοχής, με την απορροή που δημιουργήθηκε από το μοντέλο στην ίδια θέση. Οι μεταβλητές της βαθμονόμησης ήταν έντεκα. Οι επτά πρώτες ήταν οι συντελεστές καλλιέργειας kc των υπολεκανών στις οποίες έχει χωριστεί η λεκάνη του Νέστου. Σημειώνεται ότι συνολικά οι υπολεκάνες είναι εννέα, η βαθμονόμηση όμως έγινε στη θέση Τέμενος, γι αυτό και ελήφθησαν υπόψη μόνο οι επτά υπολεκάνες που συμβάλλουν στην τροφοδότηση του σταθμού του Τεμένους. Οι υπόλοιπες τέσσερις μεταβλητές της βαθμονόμησης αντιπροσωπεύουν τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης ($Effr$), ο οποίος υπολογίστηκε για το σύνολο της λεκάνης κι είναι εκφρασμένος ως ποσοστό επί τοις εκατό. Έγινε η παραδοχή ότι ο συντελεστής ενεργής βροχόπτωσης που αφορά στο σύνολο της

λεκάνης έχει εποχιακή κατανομή, οπότε και υπολογίστηκαν τέσσερις τιμές του, μία για την κάθε εποχή του έτους. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο η ιδιαιτερότητα του WEAP, το οποίο θεωρεί και υπολογίζει ως ποσοστό ενεργής βροχόπτωσης το ποσοστό της βροχής το οποίο είναι διαθέσιμο για εξατμισοδιαπνοή, με αποτέλεσμα η απευθείας απορροή να είναι αυτό που απομένει.

Όσον αφορά στις τιμές που μπορούν να πάρουν οι έντεκα μεταβλητές της βαθμονόμησης, δίνονται οι οριακές τιμές τους στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίν. 6-3: Ανώτατα και κατώτατα όρια τιμών μεταβλητών.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΚΑΤΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ	ΑΝΩΤΑΤΟ ΟΡΙΟ
kc	0.8	1.3
Effp	0%	100%

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση, έγινε χρήση του Optimization Toolbox του MATLAB. Συγκεκριμένα, η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε δύο φορές. Την πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης απόπτωσης, ενώ τη δεύτερη έγινε χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Και στις δύο περιπτώσεις ως αντικειμενική συνάρτηση ορίστηκε η εξίσωση Nash-Sutcliffe:

$$E = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^T)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_0^{av})^2}$$

Όπου:

Q₀: αντιπροσωπεύει την παρατηρημένη απορροή στη θέση Τέμενος.

Q_m: αντιπροσωπεύει την απορροή που δημιουργήθηκε από το μοντέλο στην ίδια θέση.

Q_{av}: η μέση τιμή της παρατηρημένης απορροής.

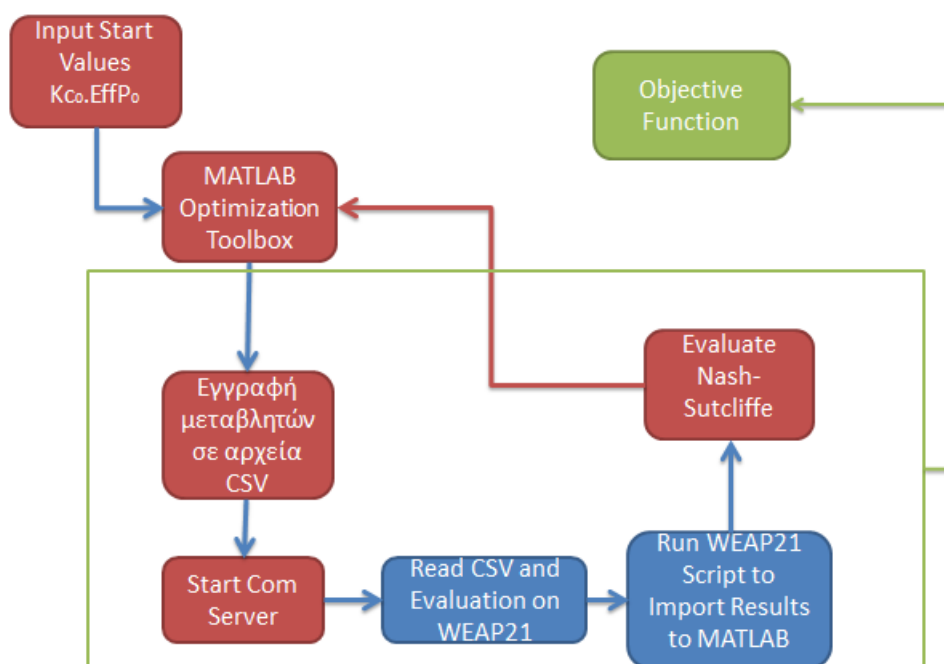
Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Επειδή όμως οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης στο MATLAB επιτελούν μόνο ελαχιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων, η τελική αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^T)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_0^{av})^2}$$

Ο κύριος βρόγχος της επαναληπτικής διαδικασίας ξεκινάει με τη μετατροπή των αρχείων σε κατάλληλη μορφή αναγνώσιμη από το WEAP. Στη συνέχεια γίνεται η σύνδεση του MATLAB με το WEAP μέσω COM-API, το μοντέλο διαβάζει τις μεταβλητές και υπολογίζει τα

αποτελέσματα, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται στο MATLAB με σκοπό τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η συλλογιστική πορεία του κώδικα προγραμματισμού που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Σχ. 6-10: Διάγραμμα ροής κώδικα προγραμματισμού για τη βαθμονόμηση (Τσουκαλάς, 2012)

6.6 Αποτελέσματα της Βαθμονόμησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε δύο φορές. Την πρώτη φορά, η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτωσης του Optimization Toolbox του MATLAB, ενώ τη δεύτερη έγινε χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Και στις δύο περιπτώσεις, η βαθμονόμηση του υδросυστήματος έγινε χρησιμοποιώντας δεδομένα της περιόδου 1968-1982, ενώ στη συνέχεια έγινε επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με χρήση των δεδομένων της περιόδου 1991-1995, με σκοπό τον έλεγχο της απόκρισης του συστήματος σε διαφορετική χρονική περίοδο. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρατίθενται αμέσως παρακάτω.

6.6.1 Αποτελέσματα Βαθμονόμησης με Χρήση του Αλγόριθμου της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing)

Το πρώτο βήμα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ήταν ο καθορισμός όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτωσης. Συγκεκριμένα, ορίστηκαν

οι οριακές τιμές των μεταβλητών βελτιστοποίησης καθώς και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ίσος με 8000.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες. Συγκεκριμένα, στον πίνακα 6.4 φαίνονται οι τιμές που δόθηκαν στους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών, ενώ στον πίνακα 6.5 φαίνονται οι εποχιακές τιμές του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης για το σύνολο της λεκάνης του Νέστου. Η αντιστοιχία των μεταβλητών της ενεργής βροχόπτωσης με τις εποχές του έτους είναι η εξής:

Effp1: Ιανουάριος - Φεβρουάριος - Μάρτιος

Effp2: Απρίλιος – Μαΐος – Ιούνιος

Effp3: Ιούλιος – Αύγουστος – Σεπτέμβριος

Effp4: Οκτώβριος – Νοέμβριος – Δεκέμβριος

Πίν. 6-4: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτωσης για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΤΙΜΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
Effp1	11.4957
Effp2	37.47
Effp3	67.8049
Effp4	75.5679

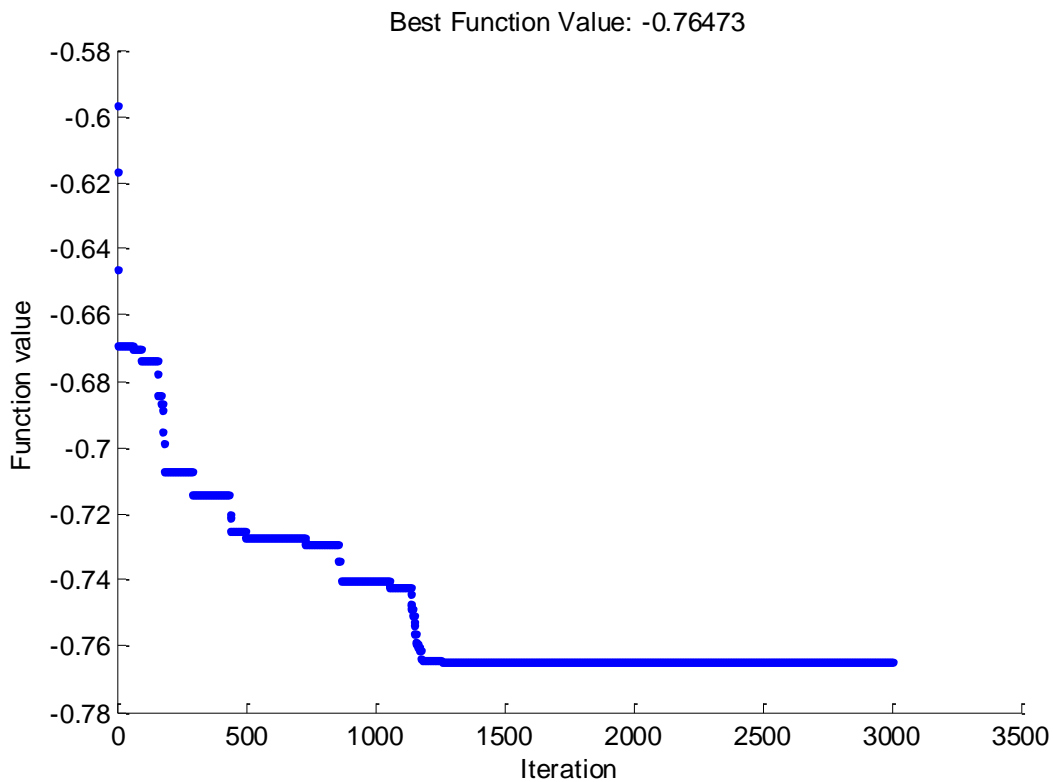
Πίν. 6-5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης ανόπτωσης για τους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ	ΤΙΜΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
kc1(ΠΑΠΑΔΕΣ)	0.9665
kc2(ΔΕΣΠΑΤΗΣ)	0.8214
kc3(ΜΠΟΥΣΔΑ)	1.1812
kc4(ΘΗΣΑΥΡΟΣ)	1.2863
kc5(ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ)	0.9612
kc6(ΤΕΜΕΝΟΣ)	0.8406
kc7(ΑΡΚΟΥΔΟΡΕΜΑ)	0.9063



Σχ. 6-11: Αποτελέσματα προσομοιωμένης ανόπτωσης για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης

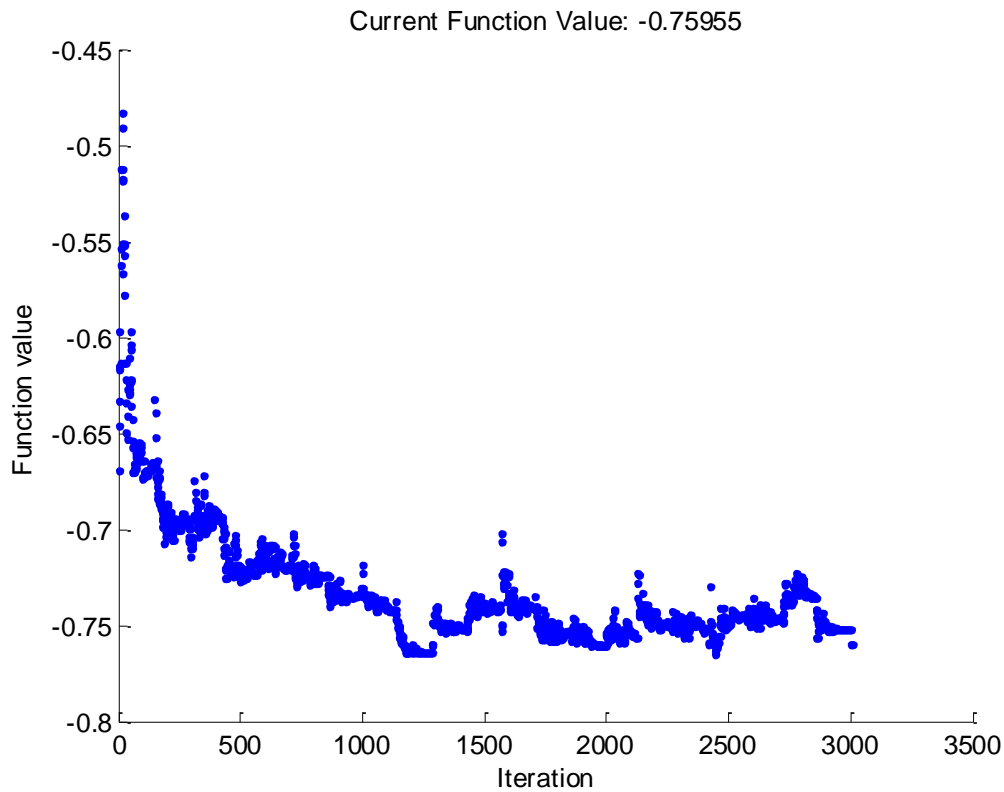
Επίσης, παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο απεικονίζει τη διακύμανση της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια των 8000 επαναλήψεων.



Σχ. 6-12: Διάγραμμα διακύμανσης της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των επαναλήψεων

Παρατηρούμε ότι κατά τις πρώτες επαναλήψεις ο αλγόριθμος πετυχαίνει με σχετικά γρήγορο ρυθμό όλο και καλύτερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, έως ότου καταλήξει κοντά στις 1200 επαναλήψεις στην τιμή -0.76473 . Μετά τις 1200 επαναλήψεις, η τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe παραμένει σταθερή και δεν δέχεται περαιτέρω βελτίωση. Επομένως, η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που πετυχαίνει ο αλγόριθμος είναι η -0.76473 , η οποία θεωρείται αρκετά ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψη και το εύρος της χρονικής περιόδου που εξετάζεται.

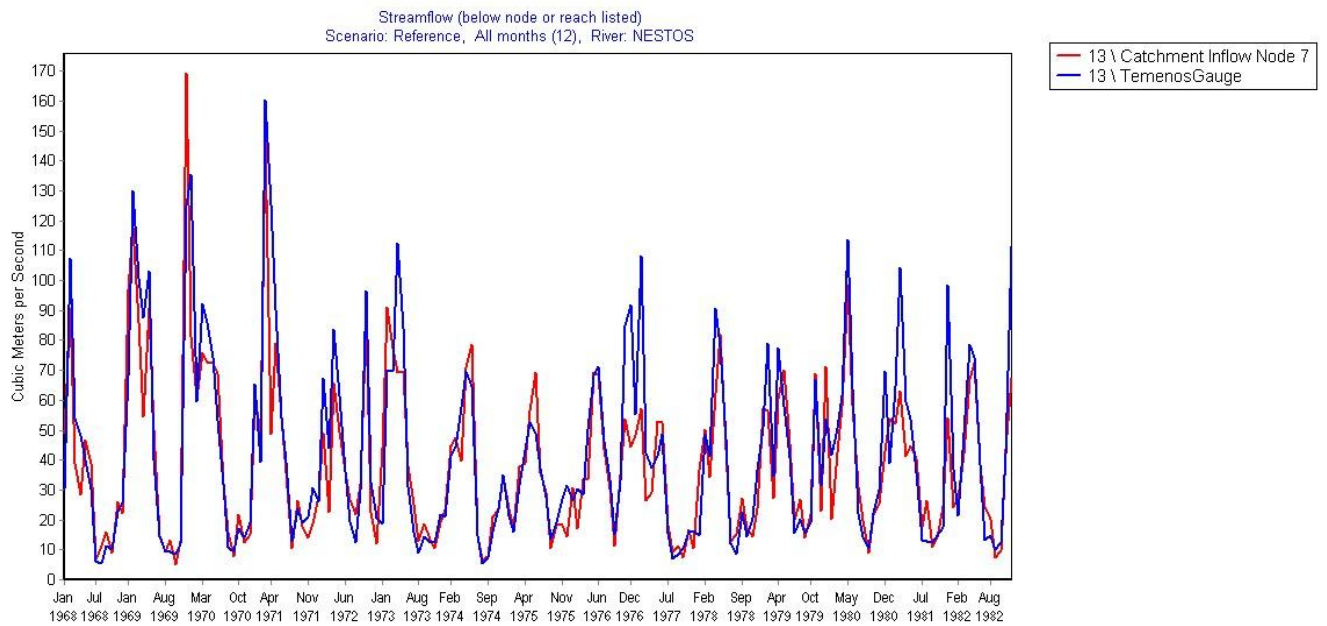
Δίνεται επίσης και το διάγραμμα 6.15, το οποίο απεικονίζει τη διακύμανση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης καθ' όλη τη διάρκεια των επαναλήψεων.



Σχ. 6-13: Διάγραμμα διακύμανσης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των επαναλήψεων

Παρατηρούμε ότι σε πολλά σημεία υπάρχει «αύξηση των θερμοκρασιών», κάτι που είναι βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου της προσομοιωμένης απόπτωσης.

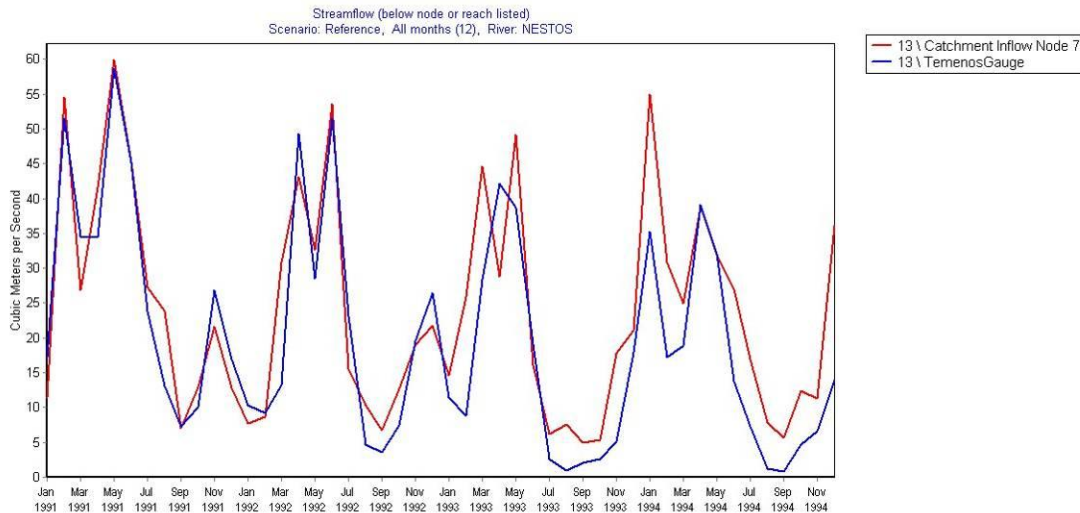
Τελικά, για τελική τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe 0.76473 , η παρατηρημένη απορροή στη θέση Τέμενος και η απορροή που δημιουργήθηκε από το μοντέλο στην ίδια θέση παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης. Η σύγκριση των δύο χρονοσειρών απορροής γίνεται στο ακόλουθο γράφημα, όπως αυτό υπολογίστηκε από το WEAP.



Σχ. 6-14: Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόρροης στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1968-1982

6.6.1.1 Επαλήθευση Τιμών για την Περίοδο 1991 – 1995

Αφού πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου κι έγινε εισαγωγή όλων των αποτελεσμάτων στην περιοχή μελέτης στο WEAP, αποφασίστηκε να γίνει επαλήθευση των τιμών που προέκυψαν, χρησιμοποιώντας δεδομένα της περιόδου 1991-1995, προκειμένου να ελεγχθούν τα αποτελέσματα κι η απόκριση του συστήματος σε μια χρονική περίοδο διαφορετική από αυτήν της βαθμονόμησης. Συγκεκριμένα, έγινε εισαγωγή στο WEAP των χρονοσειρών βροχής, απορροής και εξατμισοδιαπνοής για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο και στη συνέχεια υπολογίστηκε ξανά η απορροή στη θέση Τέμενος, προκειμένου να συγκριθεί με την αντίστοιχη παρατηρημένη από τον υδρομετρικό σταθμό. Η χρονοσειρά απορροής που δημιουργήθηκε κι η αντίστοιχη παρατηρημένη φαίνονται στο παρακάτω γράφημα, όπως υπολογίστηκε από το WEAP.



Σχ. 6-15: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1991-1995

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το διάγραμμα, οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο χρονοσειρών (δηλαδή της μετρημένης και αυτής που δημιουργήθηκε από το μοντέλο) είναι πολύ μικρές. Η τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe που προέκυψε είναι ίση με 0,698, κάτι που αποδεικνύει την ισχυρή συσχέτιση των δύο χρονοσειρών.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω επαλήθευσης που πραγματοποιήθηκε προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εκτίμηση των μεταβλητών μέσω της βελτιστοποίησης είναι λογική, αφού το σύστημα αποδείχθηκε ότι ανταποκρίνεται καλά και σε δεδομένα χρονικής περιόδου διαφορετικής από την αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

6.6.2 Αποτελέσματα Βαθμονόμησης με Χρήση των Γενετικών Αλγορίθμων

Και σε αυτήν την περίπτωση, το πρώτο βήμα για την έναρξη της διαδικασίας της βελτιστοποίησης ήταν ο καθορισμός των αρχικών παραμέτρων των γενετικών αλγορίθμων. Ορίστηκαν τα ανώτερα και κατώτερα όρια των τιμών των μεταβλητών βελτιστοποίησης (προφανώς ίδια με τα όρια που ορίστηκαν στην προσομοιωμένη απόπτωση), ενώ αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί πληθυσμός 100 ατόμων και 500 γενιές.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες. Συγκεκριμένα, στον πίνακα 6.6 φαίνονται οι τιμές που δόθηκαν στους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών, ενώ στον πίνακα 6.7 φαίνονται οι εποχιακές τιμές του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης για το σύνολο της λεκάνης του Νέστου. Υπενθυμίζεται η αντιστοιχία των μεταβλητών της ενεργής βροχόπτωσης με τις εποχές του έτους:

Effr1: Ιανουάριος - Φεβρουάριος - Μάρτιος

Effp2: Απρίλιος – Μάιος – Ιούνιος

Effp3: Ιούλιος – Αύγουστος – Σεπτέμβριος

Effp1: Οκτώβριος – Νοέμβριος – Δεκέμβριος

Πίν. 6-6: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τους συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ	ΤΙΜΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
kc1 (ΠΑΠΑΔΕΣ)	0.8
kc2 (ΔΕΣΠΑΤΗΣ)	1.298
kc3 (ΜΠΟΥΣΔΑ)	1.296
kc4 (ΘΗΣΑΥΡΟΣ)	0.816
kc5 (ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ)	0.8
kc6 (ΤΕΜΕΝΟΣ)	0.8
kc7 (ΑΡΚΟΥΔΟΡΕΜΑ)	0.8

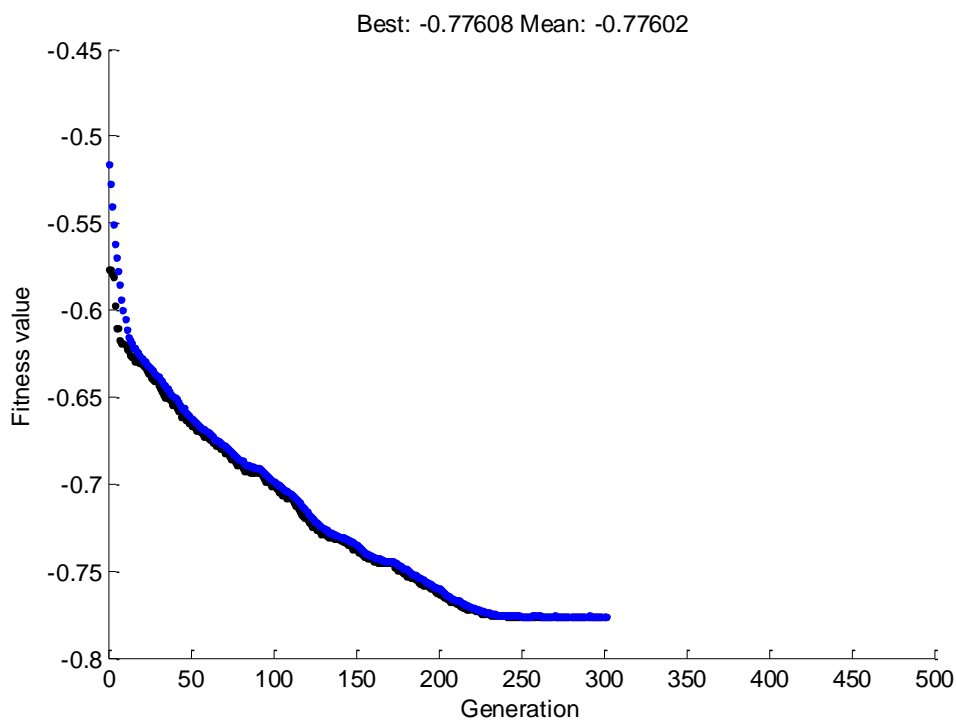
Πίν. 6-7: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΤΙΜΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
Effp1	7.297
Effp2	30.206
Effp3	80.696
Effp4	65.099



Σχ. 6-16: Αποτελέσματα βαθμονόμησης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων για τον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης

Επίσης παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο απεικονίζει τη διακύμανση της καλύτερης και της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη φάση δημιουργίας των 500 γενεών.

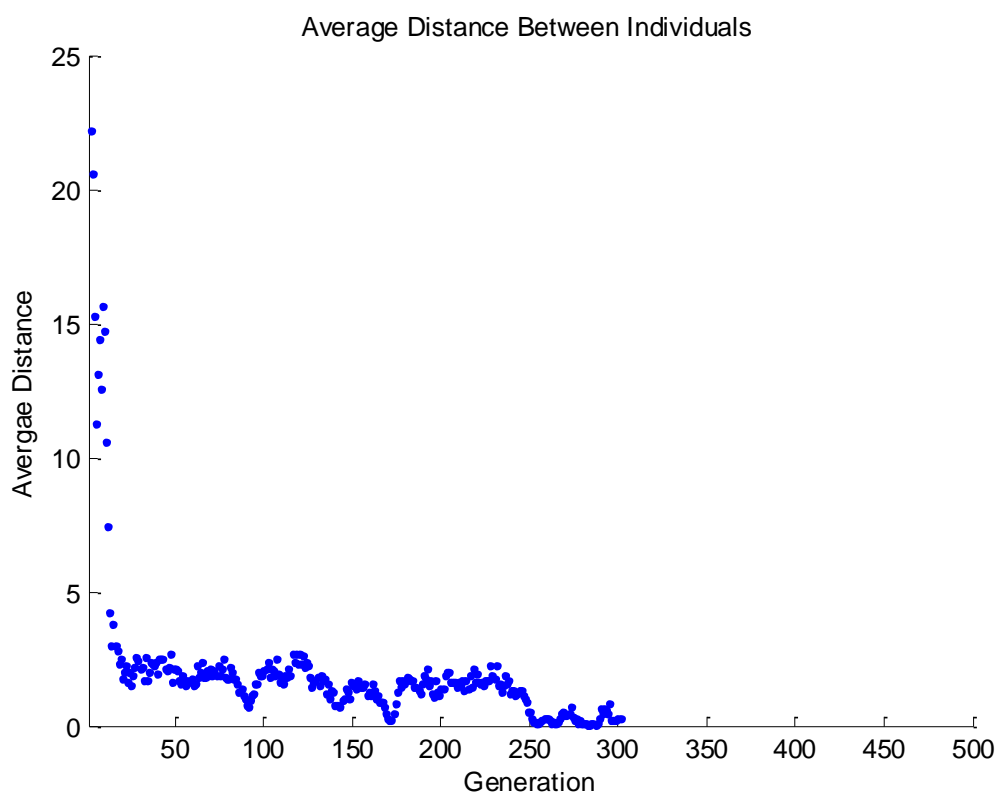


Σχ. 6-17: Διάγραμμα διακύμανσης της καλύτερης και της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των γενεών

Με τη μπλε γραμμή απεικονίζεται η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ενώ με τη μαύρη η μέση τιμή. Παρατηρούμε ότι υπάρχει σταδιακή βελτίωση της καλύτερης τιμής

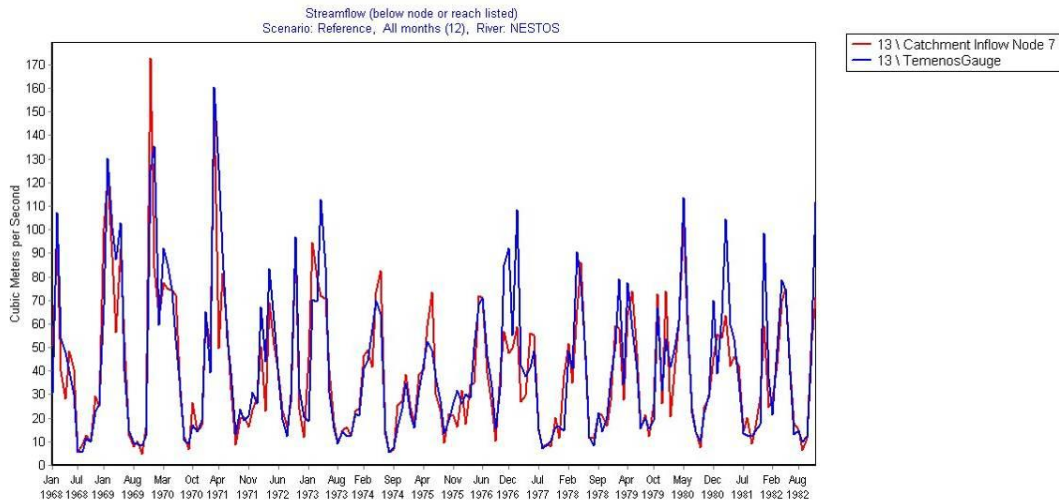
της αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι την τιμή 0,77608 που παρατηρείται κοντά στην 230^η γενιά. Από εκεί και πέρα δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση, κι η τιμή παραμένει σταθερή. Επομένως, η τελική τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe που προέκυψε είναι ίση με 0,77608, η οποία θεωρείται και σε αυτήν την περίπτωση αρκετά ικανοποιητική.

Δίνεται επίσης και το διάγραμμα 6.19, το οποίο απεικονίζει τη διακύμανση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης καθ' όλη τη διάρκεια των επαναλήψεων.



Σχ. 6-18: Διάγραμμα διακύμανσης της καλύτερης και της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των γενεών

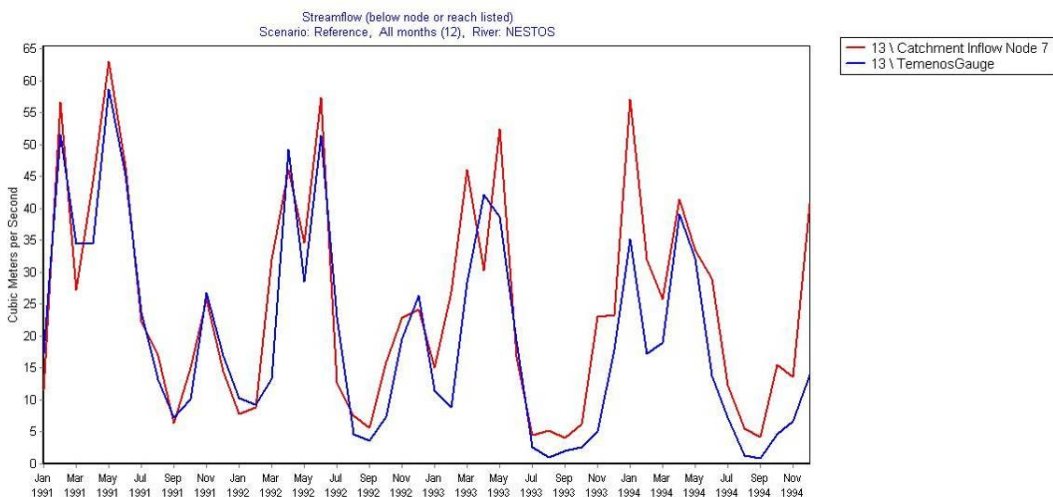
Τελικά, για τελική τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe 0.77608, η παρατηρημένη απορροή στη θέση Τέμενος και η απορροή που δημιουργήθηκε από το μοντέλο στην ίδια θέση παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση. Η σύγκριση των δύο χρονοσειρών απορροής γίνεται στο ακόλουθο γράφημα, όπως αυτό υπολογίστηκε από το WEAP.



Σχ. 6-19: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1968-1982

6.6.2.1 Επαλήθευση Τιμών για την Περίοδο 1991 – 1995

Και σε αυτήν την περίπτωση η επαλήθευση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε εισάγοντας στο WEAP τα υδρολογικά δεδομένα της περιόδου 1991-1995 και υπολογίζοντας ξανά την απορροή που δημιουργείται από το μοντέλο στη θέση Τέμενος. Στη συνέχεια, η χρονοσειρά της απορροής που δημιουργείται συγκρίνεται με αυτήν που έχει καταγραφεί από τον υγρομετρικό σταθμό του Τεμένους για την ίδια χρονική περίοδο, δίνοντας το αποτέλεσμα που φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα.



Σχ. 6-20: Σύγκριση μετρημένης κι υπολογισμένης με χρήση των γενετικών αλγορίθμων απορροής στη θέση Τέμενος για την περίοδο 1991-1995

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το διάγραμμα, οι αποκλίσεις των δύο χρονοσειρών (δηλαδή της μετρημένης και αυτής που δημιουργήθηκε από το μοντέλο),

είναι πολύ μικρές. Η τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe που προέκυψε είναι ίση με 0,635, κάτι που αποδεικνύει την ισχυρή συσχέτιση των δύο χρονοσειρών.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω επαλήθευσης οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η εκτίμηση των μεταβλητών μέσω της βελτιστοποίησης είναι αρκετά λογική, αφού το σύστημα αποδείχθηκε ότι ανταποκρίνεται καλά και σε δεδομένα χρονικής περιόδου διαφορετικής από την αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

6.7 Σύγκριση των Δύο Μεθόδων και των Αποτελεσμάτων τους

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα παραπάνω αποτελέσματα και διαγράμματα, και οι δύο αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, δίνουν πολύ κοντινές τελικές τιμές για το συντελεστή Nash-Sutcliffe. Συγκεκριμένα, με την προσομοιωμένη ανόπτηση επιτυγχάνεται βέλτιστη τιμή 0.76473, ενώ η χρήση των γενετικών αλγορίθμων δίνει βέλτιστη τιμή 0.77608. Και οι δύο τιμές κρίνονται αρκετά ικανοποιητικές, αφού υποδηλώνουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ παρατηρημένων και δημιουργημένων από το μοντέλο τιμών απορροής, επομένως και αρκετά συνετή εκτίμηση των τιμών των μεταβλητών της βελτιστοποίησης. Οι τιμές του συντελεστή Nash-Sutcliffe βρίσκονται σχετικά κοντά όσον αφορά και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε, με την προσομοιωμένη ανόπτηση να δίνει τελική τιμή 0,698, υπερέχοντας ελαφρά των γενετικών αλγορίθμων οι οποίοι δίνουν τελική τιμή 0,635.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου της προσομοιωμένης ανόπτησης είναι η αρκετά υψηλή ταχύτητα με την οποία πραγματοποιήθηκε η όλη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, για να ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση στην οποία είχε οριστεί μέγιστος αριθμός επαναλήψεων 8000, χρειάστηκαν γύρω στις 12 ώρες. Αντίθετα, η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων είναι πολύ περισσότερο χρονοβόρα, αφού για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης με ορισμένες παραμέτρους 150 για τον πληθυσμό και 500 για τις γενιές χρειάστηκαν πάνω από 48 ώρες.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι όσον αφορά στη μέθοδο της προσομοιωμένης ανόπτησης, η καλύτερη τιμή για τον συντελεστή Nash-Sutcliffe εντοπίζεται αρκετά γρήγορα, δηλαδή γύρω στην 1200^η επανάληψη. Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων εντοπίζει κι αυτή σχετικά γρήγορα την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (περίπου στην 230^η γενιά), με αργότερο όμως ρυθμό συγκρινόμενο με αυτόν της ανόπτησης.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, εντοπίζονται σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των τιμών του συντελεστή ενεργής βροχοπτώσης όσο κυρίως και μεταξύ των τιμών των συντελεστών καλλιέργειας.

Ο συντελεστής καλλιέργειας k_c είναι ένας φυτικός συντελεστής, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας έχοντας ως δεδομένη την εξατμισοδιαπνοή μίας καλλιέργειας αναφοράς. Συγκεκριμένα, η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας E_{Tc} προκύπτει με πολλαπλασιασμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς E_{Tr} επί τον φυτικό συντελεστή k_c .

$$E_{Tc} = k_c \times E_{Tr}$$

Ο συντελεστής αυτός ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε καλλιέργειας και επηρεάζεται από το είδος του φυτού, το στάδιο και το ρυθμό ανάπτυξης, τις εδαφοκλιματικές συνθήκες και το ποσοστό φυτοκάλυψης του εδάφους.

Πρέπει παρόλα αυτά να σημειωθεί ότι η παραπάνω σχέση προσδιορίζει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (E_{Tc}) της καλλιέργειας, δηλαδή την εξατμισοδιαπνοή που θα μπορούσε θεωρητικά να συμβεί κάτω από άριστες συνθήκες ανάπτυξης. Οι συνθήκες ανάπτυξης μιας καλλιέργειας θεωρούνται άριστες όταν υπάρχει απεριόριστη διαθεσιμότητα νερού, όταν η καλλιέργεια είναι απαλλαγμένη από εχθρούς και ασθένειες και όταν γενικά ακολουθούνται όλες οι προβλεπόμενες καλλιεργητικές τεχνικές και συνθήκες.

Στην περίπτωση της προσομοιωμένης ανόπτησης προέκυψαν σχετικά μικρές τιμές για τους συντελεστές καλλιέργειας των περισσότερων υπολεκανών, που κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0.8-0.96. Αυτό σημαίνει πως η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών αυτών είναι μικρότερη από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς. Παρόλα αυτά για τις υπολεκάνες Μπούσδα και Θησαυρός προέκυψαν μεγάλες τιμές (1.1812 και 1.2863 αντίστοιχα), γεγονός που υποδηλώνει ότι η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών αυτών είναι κάπως μεγαλύτερη από αυτή της καλλιέργειας αναφοράς.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση η πλειοψηφία των συντελεστών καλλιέργειας λαμβάνει χαμηλές τιμές (οι περισσότεροι συντελεστές καλλιέργειας προέκυψαν ίσοι με 0.8 που είναι το κατώτερο όριο που έχουμε ορίσει για την τιμή τους), ενώ μόνο δύο από αυτούς (οι συντελεστές καλλιέργειας των υπολεκανών Δεσπάτης και Μπούσδα) παίρνουν πολύ υψηλές τιμές που πλησιάζουν το 1.3, τιμή που έχει ορισθεί ως το ανώτατο όριο. Και σε αυτήν την περίπτωση λοιπόν, η πλειοψηφία των καλλιεργειών εμφανίζει τιμές εξατμισοδιαπνοής μικρότερες από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα που έδωσαν οι δύο μέθοδοι για τις εποχιακές τιμές του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης, παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής ενεργής βροχόπτωσης λαμβάνει χαμηλές τιμές το χειμώνα. Συγκεκριμένα, η εποχιακή τιμή του προέκυψε ίση με 11,4958% με τη μέθοδο της προσομοιωμένης ανόπτησης και 7,297% με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Επειδή, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, το WEAP θεωρεί ως ποσοστό ενεργής βροχόπτωσης το ποσοστό

της βροχής που είναι διαθέσιμο για εξατμισοδιαπνοή, τα μικρά ποσοστά που προέκυψαν σε αυτήν την περίπτωση υποδηλώνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης του χειμώνα δεν εξατμίζεται, αλλά αντίθετα απορρέει στη λεκάνη. Η τιμή αυτή κρίνεται λογική, δεδομένου ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες το χειμώνα, η απουσία υγρασίας του εδάφους και του αέρα αλλά κι η μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία λόγω της μειωμένης ηλιοφάνειας το χειμώνα, δεν ευνοούν την διαδικασία της εξάτμισης από την εδαφική επιφάνεια, με αποτέλεσμα το νερό που φτάνει στο έδαφος μέσω της βροχής να μην εξατμίζεται αλλά να απορρέει επιφανειακά.

Όσον αφορά στην τιμή του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης που προέκυψε για την άνοιξη, παρατηρούμε ότι και οι δύο αλγόριθμοι έδωσαν περίπου το ίδιο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, με την προσομοιωμένη ανόπτηση προέκυψε τιμή 37,47%, ενώ οι γενετικοί αλγόριθμοι έδωσαν τιμή 30,206%. Το αποτέλεσμα κρίνεται λογικό, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους και του αέρα την άνοιξη αλλά και η ανάπτυξη των φυτών, σε συνδυασμό με τη μείωση των κατακρημνίσεων, είναι αναμενόμενο να ευνοούν τις διεργασίες της εξάτμισης και της διαπνοής, με αποτέλεσμα μικρότερο μέρος των κατακρημνίσεων να απορρέει επιφανειακά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί η επιρροή που ασκεί στον συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης της άνοιξης η εισροή στα σύνορα Ελλάδας- Βουλγαρίας. Λόγω των έντονων μεταβολών των κλιματικών συνθηκών από το χειμώνα στην άνοιξη (μείωση κατακρημνίσεων, άυξηση ηλιοφάνειας, αύξηση θερμοκρασίας), η αναμενόμενη μεταβολή στην τιμή του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης από το χειμώνα στην άνοιξη είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πραγματική. Δηλαδή, η αναμενόμενη τιμή του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης της άνοιξης είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις τιμές 30,206% και 37,47% που προέκυψαν. Αυτή η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ αναμενόμενης και πραγματικής τιμής οφείλεται κατά κύριο λόγο στην εισροή στα σύνορα Ελλάδας- Βουλγαρίας. Το λιώσιμο των χιονιών του Βουλγαρικού τμήματος τροφοδοτεί την ελληνική λεκάνη απορροής την άνοιξη (η χρονική αυτή καθυστέρηση οφείλεται στο χρόνο που χρειάζονται τα χιόνια για να λιώσουν και να φτάσουν μέχρι τα Ελληνικά σύνορα), με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική ποσότητα νερού που απορρέει επιφανειακά, κι έτσι να μειώνεται ο λόγος του νερού που εξατμίζεται προς το νερό που απορρέει, δηλαδή να μειώνεται ο συντελεστής ενεργής βροχόπτωσης.

Όσον αφορά στην τιμή του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης που προέκυψε για το καλοκαίρι, αυτή είναι σαφώς αυξημένη, συγκρινόμενη με αυτή του χειμώνα και της άνοιξης. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες, η απουσία βροχοπτώσεων, η αυξημένη υγρασία κ.λ.π είναι η βασική αιτία για αυτή την αύξηση του συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης που παρατηρείται. Η τιμή που παίρνει ο συντελεστής ενεργής βροχόπτωσης το φθινόπωρο είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν της άνοιξης, παρά το γεγονός ότι τα κλιματικά χαρακτηριστικά στις δύο εποχές έχουν πολλά κοινά στοιχεία. Η διαφορά που παρατηρείται

οφείλεται στα εισρέοντα νερά από τα σύνορα Ελλάδας- Βουλγαρίας κατά τη διάρκεια της άνοιξης, όπως επισημάνθηκε και παραπάνω.

Η βασική διαφορά στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων εντοπίζεται στη σχέση μεταξύ των τιμών που παίρνει ο συντελεστής ενεργής βροχόπτωσης το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Η προσομοιωμένη ανόπτηση δίνει τιμές του συντελεστή 67,8049% για το καλοκαίρι και 75.5679% για το φθινόπωρο, ενώ αντίθετα οι γενετικοί αλγόριθμοι δίνουν τιμές 80,696% και 65,099% αντίστοιχα. Εκτός από την διαφορά των αποτελεσμάτων όσον αφορά στην απόλυτη τιμή τους, η βασική τους διαφοροποίηση εντοπίζεται στο γεγονός ότι με τη μέθοδο της προσομοιωμένης ανόπτησης παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό εξατμισοδιαπνοής το φθινόπωρο, ενώ αντίθετα οι γενετικοί αλγόριθμοι δίνουν το μεγαλύτερο ποσοστό εξατμισοδιαπνοής το καλοκαίρι. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι θερμοκρασίες του καλοκαιριού είναι συνήθως σαφώς μεγαλύτερες από αυτές του φθινοπώρου, ότι τα ποσοστά υγρασίας το καλοκαίρι είναι αυξημένα σε σχέση με το φθινόπωρο και ότι κατά κανόνα το φθινόπωρο οι βροχοπτώσεις είναι μεγαλύτερες από ότι το καλοκαίρι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συντελεστή ενεργής βροχόπτωσης με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων αναπαριστούν πιο ρεαλιστικά τις σχέσεις βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής-απορροής που πραγματοποιούνται στη φύση. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο ως τελικά αποτελέσματα της βαθμονόμησης ελήφθησαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με χρήση των γενετικών αλγορίθμων. Τα αποτελέσματα αυτά στη συνέχεια εισήχθησαν στο WEAP, με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση του υδροσυστήματος.

6.8 Βελτιστοποίηση του Υδροσυστήματος του Νέστου

6.8.1 Εισαγωγή Τεχνικών Έργων και Κόμβων Ζήτησης στο WEAP

Αφού ολοκληρώθηκε η βαθμονόμηση του συστήματος και βρέθηκαν οι τιμές των συντελεστών ενεργής βροχόπτωσης καθώς και των συντελεστών καλλιέργειας των υπολεκανών, έγινε εισαγωγή στο WEAP των φραγμάτων και των χαρακτηριστικών τους, των κόμβων ζήτησης καθώς και διαφόρων άλλων παραμέτρων.

Όσον αφορά στους κόμβους ζήτησης, αυτοί αντιπροσωπεύουν τις απαιτήσεις σε νερό για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στην περιοχή του Νέστου. Συγκεκριμένα, ο κόμβος ζήτησης «DELTA» αντιπροσωπεύει τις παρούσες αρδευτικές απαιτήσεις στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου, ενώ ο κόμβος ζήτησης «ΧΑΝΘΗ» αντιπροσωπεύει τις μελλοντικές απαιτήσεις που περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις σε νερό της πεδιάδας της Ξάνθης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο WEAP για την αναπαράσταση αυτών των αναγκών ελήφθησαν από τη μεταπτυχιακή εργασία του Ι. Τσουκαλά και αφορούν το έτος 2000, όπως αυτά δημοσιεύτηκαν από την Νομαρχία Καβάλας. Σημειώνεται ότι όσον αφορά στα δεδομένα για την Ξάνθη, που αντικατοπτρίζουν τις μελλοντικές αρδευτικές ανάγκες, αυτά υπολογίστηκαν βάσει ενός συντελεστή που είναι ίσος με το ποσοστό μεταξύ των

υφιστάμενων αρδευτικών εκτάσεων και των μελλοντικών. Περισσότερες πληροφορίες για το θέμα αυτό παρατίθενται στη διδακτορική διατριβή του Χ. Σκουλικάρη.

Πίν. 6-8: Απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των υφιστάμενων 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	13

Πίν. 6-9: Εκτιμώμενες απαιτήσεις σε νερό για κάλυψη των μελλοντικών αρδευτικών αναγκών στην περιοχή της πεδιάδας της Ξάνθης (Σκουλικάρης, 2008)

Μήνας	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος
Μελλοντικές ποσότητες νερού (m ³ /s)	5.7	7.8	9.2	10.4	10	6.5

Εκτός από τις απαιτήσεις σε νερό λόγω των αρδευτικών αναγκών, υπάρχει κι η απαίτηση για μία ελάχιστη οικολογική παροχή, μία ελάχιστη δηλαδή ροή που θα πρέπει να φτάνει στις εκβολές του ποταμού, έτσι ώστε να διατηρείται η καλή οικολογική κατάσταση του οικοσυστήματος. Για την περιοχή του Νέστου, η οικολογική αυτή παροχή έχει οριστεί στα 6 m³/s.

Όσον αφορά στην αναπαράσταση των φραγμάτων και των υδροηλεκτρικών σταθμών στο WEAP, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τη μεταπτυχιακή εργασία του Ι. Τσουκαλά προκειμένου να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι λειτουργίας τους. Στο ποταμό Νέστο υπάρχουν δύο φράγματα, αυτά του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης, ενώ έχει προγραμματιστεί κι η λειτουργία ενός τρίτου, του φράγματος του Τεμένους. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά παραγωγής ενέργειας των ΥΗΕ βρίσκονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίν. 6-10: Τεχνικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά παραγωγής ενέργειας ΥΗΕ (Τσουκαλάς, 2012)

Παράμετρος	Θησαυρός	Πλατανόβρυσ η	Τέμενος
Λεκάνη απορροής πλημμυρών (km ²)	4263	4655	4666
Λεκάνη απορροής απορροών	3698	4090	4101
Μέση παροχή (1964-65/1982-83) (m ³ /s)	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

Θα πρέπει να γίνουν οι εξής επισημάνσεις:

1. Όσον αφορά στην παράμετρο **initial storage**, αυτή αντιπροσωπεύει την πλήρωση των ταμιευτήρων στην αρχή της χρονικής περιόδου ενδιαφέροντος. Η επιλογή της τιμής της παραμέτρου αυτής για το κάθε φράγμα έγινε βάσει δύο παραγόντων: πρώτον, της συνολικής χωρητικότητας του ταμιευτήρα, και δεύτερον, του μήνα κατά τον οποίο ξεκινά η χρονική περίοδος ενδιαφέροντος. Λόγω του μικρού μήκους των χρονοσειρών εισόδου, η τιμή αυτής της παραμέτρου επηρεάζει σημαντικά τα

αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου, κι επομένως η επιλογή των τιμών έπρεπε να είναι αρκετά προσεκτική, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εξαγωγή (μη ρεαλιστικών) αποτελεσμάτων. Έτσι, όσον αφορά στη χρονική περίοδο 1973-1977, η οποία ξεκινάει τον Ιανουάριο, η αρχική πλήρωση των ταμιευτήρων αποφασίστηκε να αντιστοιχεί στο 50% της συνολικής τους χωρητικότητας. Για την περίοδο 1991-1995 αντίθετα, η οποία ξεκινάει τον μήνα Οκτώβριο, οι τιμές στους ταμιευτήρες της Πλατανόβρυσης, του Τεμένους και των Τοξοτών παρέμειναν οι ίδιες (εξαιτίας κυρίως του μικρού μεγέθους τους κι επομένως του δευτερεύοντα ρόλου που έχουν), ενώ η τιμή στον ταμιευτήρα του Θησαυρού μειώθηκε λίγο, με σκοπό να αποτυπωθούν οι διαφορές στην αποθηκευμένη ποσότητα νερού, η οποία κυρίως λόγω των βροχοπτώσεων κατά τους χειμερινούς μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο είναι λογικό να είναι μικρότερη τον Οκτώβριο από ότι τον Ιανουάριο.

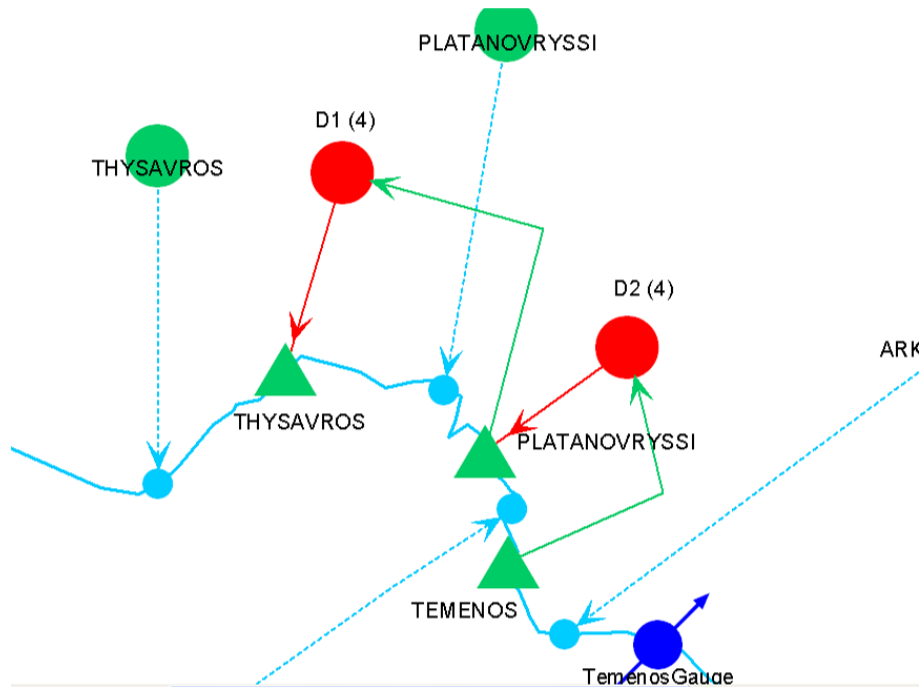
2. Η παράμετρος **reservoir evaporation**, η οποία αντικατοπτρίζει τη διαφορά βροχής-εξάτμισης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την χρονοσειρά της εξάτμισης που αντιπροσωπεύει όλη τη λεκάνη του Νέστου και τις χρονοσειρές βροχής των βροχομετρικών σταθμών, ανάλογα με τη θέση του κάθε φράγματος στα πολύγωνα Thiessen.
3. Η παράμετρος **tailwater elevation** αντιπροσωπεύει τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού κατάντη των στροβίλων, η διαφορά της οποίας από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού του ανάντη ταμιευτήρα αποτελεί το γεωμετρικό ύψος πτώσης. Η στάθμη αυτή εξαρτάται από τη στάθμη του νερού του κατάντη ταμιευτήρα στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος. Δηλαδή η τιμή tailwater elevation του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης εξαρτάται από τη στάθμη, στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος, του ταμιευτήρα της Πλατανόβρυσης και του Τεμένους αντίστοιχα. Όταν η στάθμη αυτή είναι μικρότερη από τη στάθμη της διώρυγας φυγής του ταμιευτήρα, τίθεται στην παράμετρο ως τιμή η στάθμη της διώρυγας φυγής. Σε αντίθετη περίπτωση, τίθεται ως τιμή η στάθμη του κατάντη ταμιευτήρα στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος.
4. Ο συντελεστής **plant factor** αντιπροσωπεύει το ποσοστό (%) του χρόνου κάθε μήνα που ο σταθμός λειτουργεί ως υδροστρόβιλος για την παραγωγή ενέργειας. Για τους σταθμούς Θησαυρός και Πλατανόβρυση, οι οποίοι είναι αναστρέψιμοι, θεωρήθηκε ότι λειτουργούν 18 ώρες την ημέρα ως υδροστρόβιλοι για την παραγωγή ενέργειας και 6 ώρες την ημέρα ως αντλίες. Επομένως ο συντελεστής αυτός ορίστηκε ίσος με 75%. Για τον υδροηλεκτρικό σταθμό του Τεμένους, ο οποίος δεν είναι αναστρέψιμος η τιμή του συντελεστή ορίστηκε προφανώς ίση με 100%.
5. Όσον αφορά στην παράμετρο **maximum turbine flow**, αυτή αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να παροχетеυθεί από την τουρμπίνα του κάθε στροβίλου (στην ποσότητα δηλαδή που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ των υδροστροβίλων). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης οι οποίοι είναι αναστρέψιμοι,

θεωρήθηκε ότι λειτουργούν 18 ώρες την ημέρα ως υδροστροβίλοι για την παραγωγή ενέργειας και 6 ώρες την ημέρα ως αντλίες. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Τεμένους λειτουργεί 24 ώρες το 24ώρο ως υδροστροβίλος. Έχοντας λοιπόν γνωστά τα μεγέθη της ονομαστικής ισχύος κάθε σταθμού (P_{max} σε MW), το μέγιστο ύψος πτώσης, το οποίο προκύπτει με αφαίρεση της στάθμης διώρυγας φυγής από την ΑΣΛ (σε m), το βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου, αλλά και το βαθμό απόδοσης της αντλίας, ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 70% και για τους δύο σταθμούς, και χρησιμοποιώντας τη σχέση $P=\rho g n Q H$ για τη λειτουργία του υδροστροβίλου και $P=\rho g Q H/n$ για τη λειτουργία της αντλίας, προκύπτουν οι μέγιστες παροχетеυόμενες ποσότητες για κάθε φράγμα που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίν. 6-11: Μέγιστες παροχетеυόμενες ποσότητες από τους στροβίλους και τις αντλίες

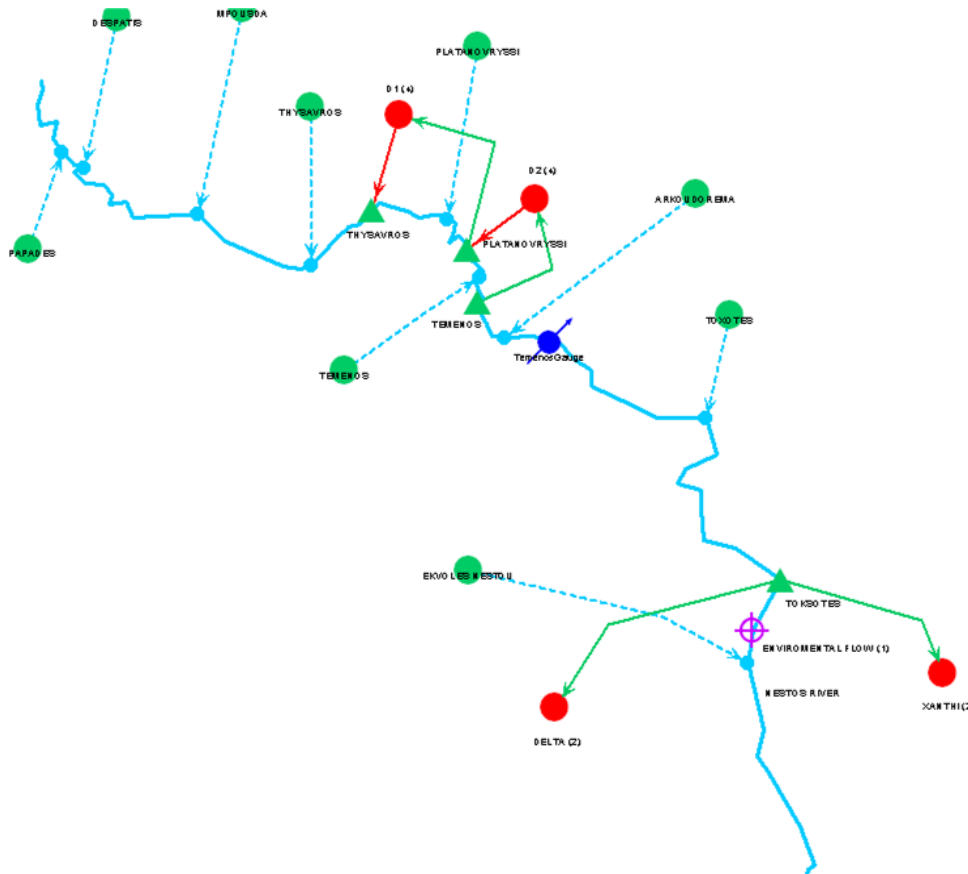
	ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗΤΕΥΟΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟ (m ³ /sec)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗΤΕΥΟΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΤΛΙΑ (Hm ³ /month)
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	220	116
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	133	76
ΤΕΜΕΝΟΣ	86	

6. Τέλος, προκειμένου να προσομοιωθεί στο WEAP η ανάστροφη λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών Θησαυρού και Πλατανόβρυσης, δημιουργήθηκαν οι ψευδείς κόμβοι ζήτησης D1 και D2. Ο λόγος της δημιουργίας αυτών των κόμβων είναι ότι προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία της άντλησης, πρέπει το νερό να μην περνάει από το στροβίλο, και ο μόνος τρόπος για να γίνει αυτό στο WEAP είναι με τη δημιουργία των δύο αυτών κόμβων. Ως ζητήσεις στους κόμβους αυτούς τέθηκαν οι μέγιστες παροχетеυόμενες ποσότητες που μπορούν να περάσουν από το στροβίλο κατά τη διαδικασία της άντλησης, κι οποίες είναι 116Hm³ και 76Hm³ για το Θησαυρό και την Πλατανόβρυση αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαδικασία της ανάστροφης λειτουργίας των ΥΗΣ Θησαυρού και Πλατανόβρυσης, όπως αυτή προσομοιώθηκε στο μοντέλο WEAP.



Σχ. 6-21: Σχηματική λεπτομέρεια προσομοίωσης συστήματος ανάστροφης λειτουργίας

Η εικόνα του ολοκληρωμένου υδροσυστήματος του Νέστου, ύστερα από την εισαγωγή των κόμβων ζήτησης, των φραγμάτων και όλων των υπολοίπων στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως απεικονίζεται στο περιβάλλον του WEAP, φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Σχ. 6-22: Το υδrosυστημα του Νέστου στο περιβάλλον εργασίας του WEAP21

6.8.2 Περιγραφή των Σεναρίων που Εξετάσθηκαν

Το υδrosυστημα του Νέστου περιλαμβάνει τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης, ενώ στο μέλλον αναμένεται να κατασκευασθεί κι ένας τρίτος υδροηλεκτρικός σταθμός, αυτός του Τεμένου. Είναι επομένως φανερό ότι η ενεργειακή παραγωγή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες συνιστώσες της διαχείρισης του συγκεκριμένου υδrosυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι η εγκατεστημένη ισχύς όλου του συστήματος και κυρίως του Θησαυρού είναι αρκετά μεγάλη και επομένως παίζει σημαντικό ρόλο στην εθνική ενεργειακή παραγωγή. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ενεργειακή συνιστώσα της διαχείρισης του υδrosυστήματος, έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται τα κέρδη από την παραγωγή της ενέργειας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους αντικρουόμενους στόχους τόσο των αρδευτικών αναγκών όσο και των περιβαλλοντικών απαιτήσεων.

6.8.2.1 Η Έννοια του Energy Demand στο WEAP21

Στο WEAP21 υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού των ενεργειακών απαιτήσεων από τον κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό χωριστά ή από το σύνολο των υδροηλεκτρικών σταθμών του υδrosυστήματος μαζί. Είναι δυνατή επίσης η χρονική διακύμανση των απαιτήσεων αυτών, σε χρονικό βήμα ίδιο με αυτό που έχει καθορισθεί και στην υπόλοιπη μελέτη, προκειμένου

να αποτυπώνονται με ρεαλιστικότερο τρόπο οι ανάγκες του υδροσυστήματος. Στην παρούσα εργασία, ο καθορισμός των ενεργειακών στόχων γίνεται ξεχωριστά για τον κάθε σταθμό, κι ο καθένας από αυτούς παίρνει διαφορετική τιμή το φθινόπωρο και το χειμώνα από ότι την άνοιξη και το καλοκαίρι.

Αυτό που θα πρέπει να τονισθεί είναι ότι οι ενεργειακοί στόχοι που τίθενται δεν αποτελούν και τις πραγματικές ποσότητες ενέργειας που παράγονται στο κάθε χρονικό βήμα. Η πραγματικά παραγόμενη ενέργεια κάθε φορά μπορεί να είναι μικρότερη, ίση ή και μεγαλύτερη των τιμών που έχουν τεθεί ως στόχοι, κι εξαρτάται από το συνδυασμό πολλών παραγόντων, όπως τα αποθέματα νερού, οι ποσότητες νερού που διατίθενται για την κάλυψη των αντικρουόμενων στόχων κ.λ.π. Η τιμή που τίθεται ως στόχος αποτελεί ουσιαστικά την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια την οποία προσπαθεί να παράγει ο υδροηλεκτρικός σταθμός σε κάθε χρονικό βήμα. Η ελάχιστη αυτή τιμή τις περισσότερες φορές υπερβαίνεται, μιας κι αποτελεί ένα κατώτατο όριο (κατώφλι), μπορεί να υπάρξουν όμως και φορές που η πραγματικά παραγόμενη ενέργεια είναι μικρότερη από την τιμή αυτή, οι στόχοι δηλαδή δεν ικανοποιούνται πλήρως (πιθανώς λόγω ανεπάρκειας των αποθεμάτων).

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονισθεί η ιδιότητα του WEAP21 να προσπαθεί να αποφύγει κατά το δυνατό περισσότερο τις υπερχειλίσεις. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που σε κάποιο χρονικό βήμα η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα ξεπεράσει την ΑΣΛ, η επιπλέον ποσότητα νερού δεν υπερχειλίζει, αλλά περνά από το στρόβιλο κι έτσι παράγεται επιπλέον ενέργεια. Σε περίπτωση επομένως που η συνολική ποσότητα νερού που περνά από τους στρόβιλους δεν υπερβαίνει την παροχτετευτική τους ικανότητα, δεν υπάρχουν καθόλου υπερχειλίσεις, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπερχειλίζει απλά η επιπλέον ποσότητα νερού που δεν μπορεί να περάσει από τους στρόβιλους.

6.8.2.2 Ορισμός Προτεραιοτήτων στο WEAP21

Προκειμένου το WEAP να διανεμεί το νερό με τον επιθυμητό κάθε φορά τρόπο ανάμεσα στους κόμβους ζήτησης, στην παραγωγή ενέργειας και σε οποιοδήποτε άλλες απαιτήσεις του συστήματος, έχει ορίσει ένα σύστημα προτεραιοτήτων, σύμφωνα με το οποίο το νερό κατανέμεται στους διάφορους κόμβους αναλόγως των προτεραιοτήτων που τους έχουν επιβληθεί. Οι προτεραιότητες αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες γιατί βοηθούν στην αναπαράσταση και διαχείριση του υδροσυστήματος, ειδικά σε περιόδους με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Χρησιμοποιώντας τις προτεραιότητες αυτές, το WEAP καθορίζει ουσιαστικά την «σειρά διανομής» του νερού. Αυτό που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι η διανομή αυτή του νερού στο WEAP21 γίνεται με μία τεχνική γραμμικού προγραμματισμού, όπου επιδιώκεται η βέλτιστη κατανομή των αποθεμάτων σε επίπεδο χρονικού βήματος.

Στο WEAP έχουν καθοριστεί τριών ειδών προτεραιότητες. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στις προτεραιότητες των κόμβων ζήτησης καθώς και διαφόρων άλλων απαιτήσεων του συστήματος, όπως μπορεί να είναι για παράδειγμα οι οικολογικές παροχές. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στην προτεραιότητα για παραγωγή ενέργειας από τα

υδροηλεκτρικά έργα (hydropower priority). Η προτεραιότητα αυτή μπορεί να καθοριστεί είτε για κάθε φράγμα ξεχωριστά, είτε συνολικά για το σύστημα των φραγμάτων. Τέλος, η τρίτη κατηγορία αναφέρεται στην προτεραιότητα για επαναπλήρωση των ταμιευτήρων των φραγμάτων (reservoir filling priority). Οι τιμές των προτεραιοτήτων ποικίλλουν και μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε ακέραια τιμή μεταξύ των τιμών 1 και 99, με 1 να συμβολίζεται η υψηλότερη προτεραιότητα και 99 η χαμηλότερη.

Πολλοί κόμβοι ζήτησης μπορεί να έχουν την ίδια προτεραιότητα. Επίσης, την ίδια προτεραιότητα μπορεί να μοιράζονται και οι διάφορες χρήσεις νερού. Το WEAP προσπαθεί πρώτα να καλύψει τη ζήτηση όλων των κόμβων που έχουν την υψηλότερη προτεραιότητα. Αν αυτοί είναι παραπάνω από ένας, προσπαθεί ταυτοχρόνως να καλύψει τις απαιτήσεις τους σε νερό. Σε περίπτωση που τα αποθέματα νερού του συστήματος δεν επαρκούν για την πλήρη κάλυψη των απαιτήσεων αυτών, τότε η διαθέσιμη ποσότητα νερού μοιράζεται στους κόμβους αναλόγως της ζήτησης του καθενός. Στην περίπτωση που οι παραπάνω απαιτήσεις σε νερό καλυφθούν πλήρως, το WEAP συνεχίζει με τους κόμβους που έχουν την αμέσως χαμηλότερη προτεραιότητα κ.ο.κ. Η διαδικασία τερματίζεται όταν ικανοποιηθούν όλες οι ζητήσεις ή όταν τελειώσουν τα αποθέματα νερού.

Στην παρούσα εργασία, όπου εξετάζεται το υδροσύστημα του Νέστου, υπάρχουν δύο κόμβοι ζήτησης. Ο ένας αντιπροσωπεύει τις παρούσες απαιτήσεις σε νερό για την κάλυψη των υφιστάμενων αρδευτικών δικτύων στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου, και ο άλλος τις μελλοντικές απαιτήσεις σε νερό για την άρδευση της πεδιάδας της Ξάνθης. Υπάρχει επίσης η ανάγκη μίας ελάχιστης περιβαλλοντικής παροχής, της τάξης των $6 \text{ m}^3/\text{s}$, η οποία θα πρέπει να φτάνει στις εκβολές του ποταμού για την προστασία του οικοσυστήματος. Όσον αφορά στους στόχους παραγωγής ενέργειας, αυτοί καθορίζονται ξεχωριστά για τον κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό. Επομένως υπάρχουν τρεις διαφορετικοί ενεργειακοί στόχοι.

Η βελτιστοποίηση που θα πραγματοποιηθεί έχει ως στόχο να βρεθούν οι τιμές ενεργειακής ζήτησης από το κάθε φράγμα, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται αφενός η κάλυψη των αρδευτικών και οικολογικών απαιτήσεων και αφετέρου η παραγόμενη ενέργεια, άρα και το οικονομικό όφελος από αυτήν. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το WEAP προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα της διανομής του νερού με μία μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού, όπου σε κάθε χρονικό βήμα καλύπτονται πρώτα οι απαιτήσεις του στόχου 1, ακολούθως του 2 κ.ο.κ. Ο καθορισμός επομένως των προτεραιοτήτων του συστήματος πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε τα τελικά αποτελέσματα που θα εξαχθούν να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις από τον κάθε σταθμό. Γι αυτό το λόγο, οι προτεραιότητες ορίστηκαν ως εξής:

1. Κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων από το Θησαυρό
2. Επαναπλήρωση ταμιευτήρα Θησαυρού
3. Κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων από την Πλατανόβρυση
4. Επαναπλήρωση ταμιευτήρα Πλατανόβρυσης
5. Κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων από το Τέμενος
6. Επαναπλήρωση ταμιευτήρα Τεμένους

-
7. Άντληση από το σύστημα άντλησης ταμίευσης του Θησαυρού
 8. Άντληση από το σύστημα άντλησης ταμίευσης της Πλατανόβρυσης
 9. Κάλυψη περιβαλλοντικής παροχής
 10. Κάλυψη αρδευτικών απαιτήσεων στο Δέλτα και στην Ξάνθη
 11. Επαναπλήρωση ταμιευτήρα Τοξοτών

Βάσει της παραπάνω σειράς προτεραιοτήτων, το WEAP θα προσπαθήσει πρώτα να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση του Θησαυρού, στη συνέχεια θα προσπαθήσει να επαναπληρώσει τον ταμιευτήρα του Θησαυρού, μετά θα ικανοποιήσει την ενεργειακή απαίτηση της Πλατανόβρυσης, ακολούθως θα επαναπληρώσει τον ταμιευτήρα της Πλατανόβρυσης κ.ο.κ. Με αυτό το τρόπο, οι ενεργειακές ζητήσεις του Θησαυρού θα μπορούν να ικανοποιούνται μόνο από τον σταθμό του Θησαυρού, της Πλατανόβρυσης μόνο από την Πλατανόβρυση και του Τεμένους μόνο από το Τέμενος. Εάν δεν είχαν ορισθεί με τον παραπάνω τρόπο οι προτεραιότητες για την επαναπλήρωση του κάθε ταμιευτήρα, η ενεργειακή ζήτηση της Πλατανόβρυσης θα μπορούσε να καλυφθεί έχοντας πρόσβαση στα αποθέματα και της Πλατανόβρυσης αλλά και του Θησαυρού. Αντίστοιχα, για να καλυφθεί η ζήτηση ενέργειας του Τεμένους, το WEAP θα είχε πρόσβαση στα αποθέματα και των τριών ταμιευτήρων. Οι τιμές ενεργειακών απαιτήσεων επομένως που θα προέκυπταν από την βελτιστοποίηση δεν θα ήταν οι σωστές.

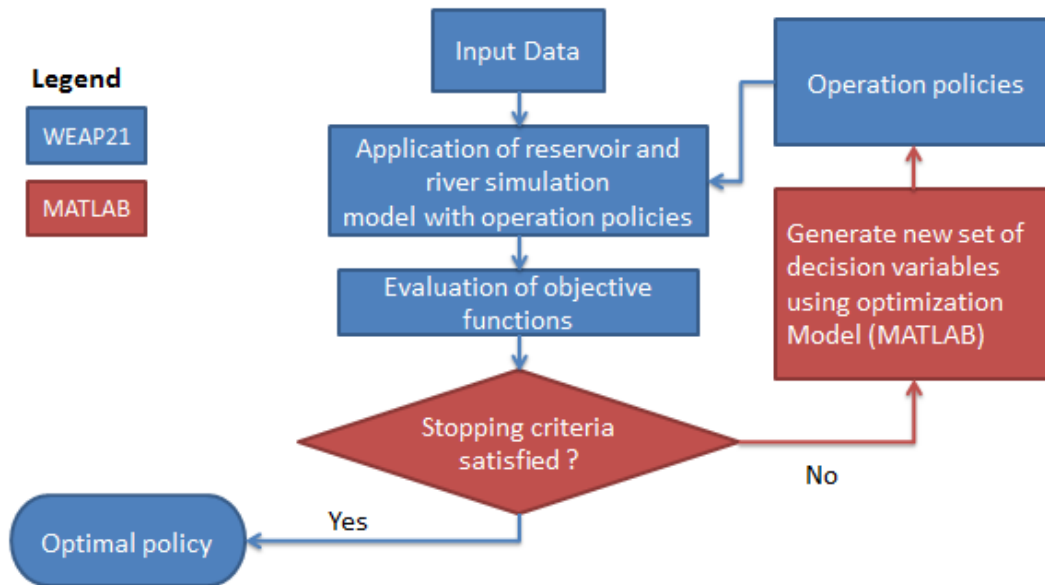
Αφού έγινε η εισαγωγή όλων των παραπάνω έργων, στοιχείων και δεδομένων στο WEAP, εξετάστηκε το ακόλουθο σενάριο.

6.8.2.3 Σύζευξη MATLAB και WEAP μέσω COM-API για τη Βελτιστοποίηση του Υδροσυστήματος

Για τη βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος αναπτύχθηκε κώδικας προγραμματισμού που επιτυγχάνει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ WEAP και MATLAB. Στο MATLAB έγινε χρήση του Optimization Toolbox και συγκεκριμένα των γενετικών αλγορίθμων, όπου χρησιμοποιήθηκε πληθυσμός 80 ατόμων και 400 γενιές.

Ο βρόγχος της επαναληπτικής διαδικασίας, όπως αυτός αναπτύχθηκε από τον Ι. Τσουκαλά στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του εργασίας, ξεκινάει με τη μετατροπή των μεταβλητών σε αρχεία κατάλληλης μορφής αναγνώσιμης από το WEAP. Στη συνέχεια, γίνεται έναρξη της σύνδεσης με το WEAP μέσω COM-API, το μοντέλο διαβάζει τις μεταβλητές και υπολογίζει τα αποτελέσματα, τα οποία εξάγονται στο MATLAB όπου και υπολογίζεται η τιμή των αντικειμενικών συναρτήσεων.

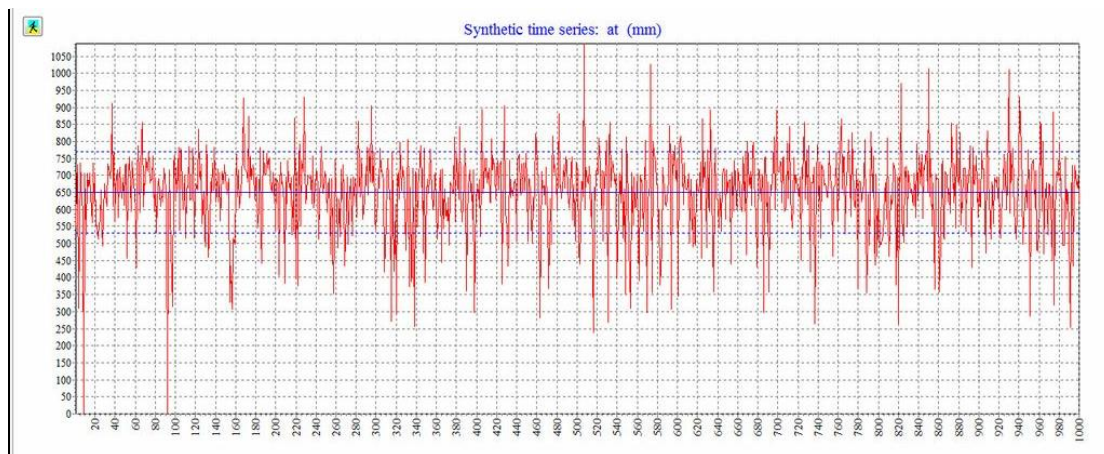
Η συλλογιστική πορεία του κώδικα προγραμματισμού που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Σχ. 6-23: Διάγραμμα ροής για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του υδросυστήματος (Τσουκαλάς, 2012)

6.8.2.4 Δημιουργία Συνθετικών Χρονοσειρών με το Σύστημα «ΚΑΣΤΑΛΙΑ»

Λόγω του ότι η χρονική περίοδος που εξετάστηκε στα σενάρια ήταν αρκετά μικρή (4 χρόνια), αποφασίστηκε να γίνει έλεγχος της απόκρισης του συστήματος χρησιμοποιώντας χρονοσειρές πολύ μεγαλύτερης χρονικής περιόδου, και συγκεκριμένα 1000 ετών. Η χρήση αυτών των χρονοσειρών αποσκοπεί στο να γίνει ένας έλεγχος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση της περιόδου 1991-1995 στο Α και Β σενάριο, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτά ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις συνθήκες μίας πολύ μεγαλύτερης, άρα και πιο κοντινής στην πραγματικότητα, χρονικής περιόδου. Οι χρονοσειρές αυτές καλύπτουν την περίοδο 1500-2500 (το WEAP δεν μπορεί να δεχθεί δεδομένα ούτε για έτη πριν το 1500 αλλά ούτε και για έτη μετά το 2500) και δημιουργήθηκαν με χρήση του μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης «Κασταλία». Με το «Κασταλία» δημιουργήθηκαν 6 χρονοσειρές: 5 χρονοσειρές βροχοπτώσεων για τους 5 βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης του Νέστου που λήφθηκαν υπόψη και μία χρονοσειρά απορροής για την απορροή στα σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας. Με τη χρήση του «Κασταλία» δημιουργούνται χρονοσειρές που διατηρούν το φαινόμενο της εμμονής, της ιδιότητας δηλαδή των ξηρών και των υγρών ετών να εμφανίζονται κατά ομάδες. Η δημιουργία των συνθετικών χρονοσειρών έγινε χρησιμοποιώντας ως βάση δεδομένων τα υδρολογικά δεδομένα όλης της περιόδου 1968-1982.



Σχ. 6-24: Συνθετική χρονοσειρά βροχής του βροχομετρικού σταθμού Καρυόφυτο

6.8.2.5 Περιγραφή Σεναρίου A

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η παρούσα εργασία δίνει έμφαση στην ενεργειακή συνιστώσα της διαχείρισης του υδροσυστήματος του Νέστου. Οι μεταβλητές επομένως που τίθενται προς βελτιστοποίηση είναι οι ενεργειακοί στόχοι (ζήτηση ενέργειας) από τον καθένα από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς της περιοχής. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι οι απορροές στα σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας είναι οι καταγεγραμμένες από το σταθμό μέτρησης απορροής Monima Kula, ενώ στη δεύτερη γίνεται η θεώρηση ότι έχει αρχίσει να εφαρμόζεται η Ελληνο-Βουλγαρική Συμφωνία, σύμφωνα με την οποία η Βουλγαρία είναι υποχρεωμένη να απελευθερώνει προς την Ελλάδα το 29% των υδάτων του Νέστου. Γνωρίζοντας ότι αυτή τη στιγμή η ποσότητα που απελευθερώνεται προς την Ελλάδα αντιστοιχεί περίπου στο 80% των νερών του Νέστου, οι καταγεγραμμένες απορροές από το σταθμό Monima Kula πολλαπλασιάστηκαν με κατάλληλο μειωτικό συντελεστή, έτσι ώστε να αντιστοιχούν στο 30% της παροχής του Νέστου. Η δεύτερη περίπτωση εξετάζεται πρκειμένου να γίνει μία σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση και να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις και οι συνέπειες της συμφωνίας για την Ελλάδα. Και στα δύο σενάρια που εξετάζονται, γίνεται η παραδοχή ότι έχει κατασκευαστεί και βρίσκεται σε λειτουργία και ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Τεμένους. Αποφασίστηκε οι ενεργειακές απαιτήσεις από τον κάθε σταθμό να έχουν διαφορετική τιμή τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες του χρόνου (Οκτώβριο-Μάρτιο) από τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς (Απρίλιο-Σεπτέμβριο), με στόχο την εξαγωγή αντιπροσωπευτικότερων αποτελεσμάτων. Έτσι ο συνολικός αριθμός των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών είναι 6.

Οι στόχοι της βελτιστοποίησης ήταν δύο:

1. Η κάλυψη των αναγκών σε νερό (αρδευτικές ανάγκες στο Δέλτα και στην Ξάνθη και περιβαλλοντική παροχή).

2. Η μεγιστοποίηση των κερδών, η οποία προκύπτει από τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

Όσον αφορά στην κάλυψη των αναγκών σε νερό, δηλαδή στη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$f(1) = a \times \text{Mean}(\text{ReliabilityDelta}) + a \times \text{Mean}(\text{ReliabilityXanthi}) + b \times \text{Mean}(\text{ReliabilityEnv})$$

Αυτό που θα πρέπει να επισημανθεί είναι ότι στο WEAP ως αξιοπιστία ορίζεται το πηλίκο του αριθμού των χρονικών βημάτων στα οποία η ζήτηση καλύφθηκε πλήρως προς το συνολικό αριθμό χρονικών βημάτων της περιόδου ενδιαφέροντος.

Οι συντελεστές a, b είναι συντελεστές βάρους, οι οποίοι προσδιορίζουν τη σημασία της κάλυψης της κάθε ανάγκης και προσδιορίστηκαν βάση της μεθόδου R.O.C (Rank Order Centroid).

Όσον αφορά στη μεγιστοποίηση των κερδών, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$f(2) = (\Sigma \text{Hydropower}) \times \text{profit} - (\Sigma \text{Hydroconsumption}) \times \text{pumping cost}$$

όπου:

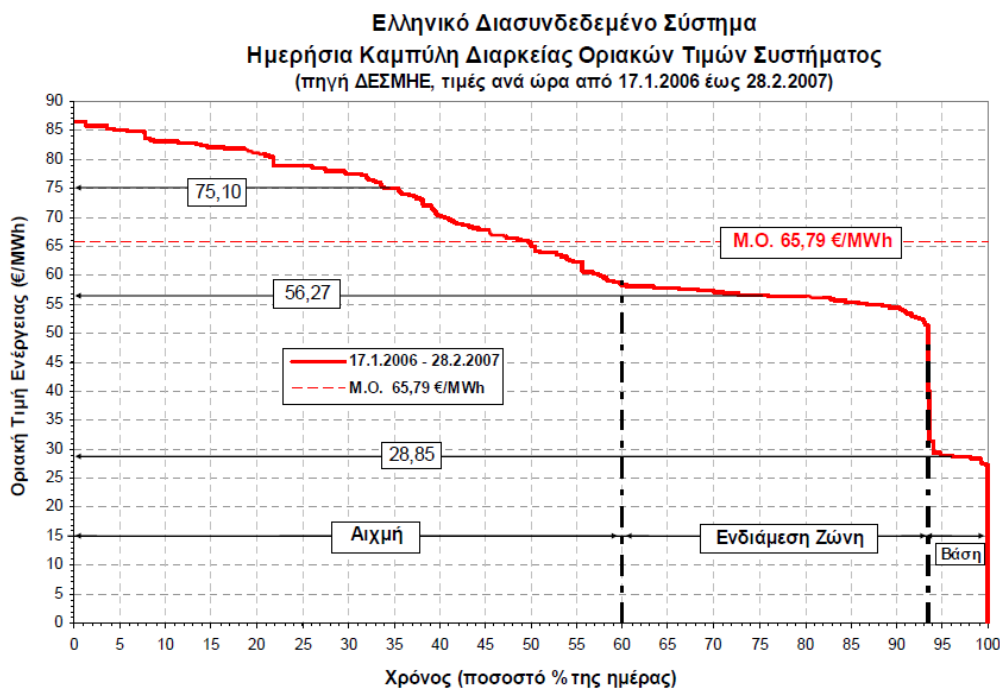
profit: το μοναδιαίο κέρδος από την παραγωγή ενέργειας (€/GWh).

pumping cost: το μοναδιαίο κόστος από την κατανάλωση ενέργειας (αντλήσεις) (€/GWh).

$\Sigma \text{Hydropower}$: συνολική παραγόμενη ενέργεια για τα έτη 1991-1995 και από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

$\Sigma \text{Hydroconsumption}$: συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια (λόγω αντλήσεων) για τα έτη 1991-1995 και από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Όσον αφορά στις τιμές πώλησης και κατανάλωσης της ενέργειας, αυτές ορίστηκαν βάσει της ημερήσιας καμπύλης διαρκείας οριακών τιμών συστήματος που φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Σχ. 6-25: Καμπύλη μηνιαίων οριακών τιμών συστήματος (Στεφανάκος, 2009)

Συγκεκριμένα, ως τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας ορίστηκε η τιμή που αντιστοιχεί στην αιχμή της παραπάνω καμπύλης, ενώ ως τιμή αγοράς (κόστος αντλήσεων) ορίστηκε η τιμή που αντιστοιχεί στη βάση της καμπύλης, αφού οι αντλήσεις γίνονται κατά κανόνα τις νυχτερινές ώρες όπου η ζήτηση είναι σχεδόν μηδενική, επομένως κι η τιμή αγοράς της ενέργειας χαμηλή.

Όπως και με τη διαδικασία της βαθμονόμησης, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση αναπτύχθηκε κώδικας προγραμματισμού που επιτυγχάνει την αμφίδρομη επικοινωνία MATLAB και WEAP. Επειδή η διαδικασία της βελτιστοποίησης θεωρώντας την περίοδο 1968-1982 ως περίοδο ενδιαφέροντος ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα (χρειάζονταν περίπου 4 ημέρες για να ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση), αποφασίστηκε να μειωθεί το χρονικό διάστημα στα 5 έτη. Από την αρχική περίοδο των 15 ετών αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα των πέντε συνεχόμενων ξηρότερων ετών, έτσι ώστε να εξετασθεί το σύστημα κάτω από τις δυσμενέστερες υδρολογικά συνθήκες. Έτσι ως τελική περίοδος ενδιαφέροντος ορίστηκε η περίοδος 1973-1977.

Όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, η περίοδος 1973-1977, αν και η δυσμενέστερη υδρολογικά από τη συνολική περίοδο 1968-1982, είναι αρκετά υγρή, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλα αποθέματα νερού τα οποία επαρκούν για την κάλυψη όλων των απαιτήσεων του συστήματος. Γι αυτό το λόγο αποφασίστηκε να επαναληφθεί η βελτιστοποίηση, επιλέγοντας ως περίοδος ενδιαφέροντος αυτή τη φορά την περίοδο 1991-1995.

6.8.2.6 Περιγραφή Σεναρίου B

Το σενάριο B επιλύει ένα αρκετά διαφορετικό πρόβλημα. Συγκεκριμένα, αναζητούνται οι τιμές των ενεργειακών στόχων για τις οποίες (έχοντας πρώτα από όλα εξασφαλίσει την κάλυψη αρδευτικών και περιβαλλοντικών αναγκών) επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της πρωτεύουσας ενέργειας, της εξασφαλισμένης δηλαδή ενέργειας η οποία παράγεται πάντα (στο 100% του χρονικής περιόδου που εξετάζεται).

Η ανάγκη εξασφάλισης πρώτα από όλα των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων οδήγησε στην αλλαγή των προτεραιοτήτων όσον αφορά στη διανομή του νερού σε σχέση με τα δύο προηγούμενα σενάρια. Αυτή τη φορά, οι προτεραιότητες των αρδευτικών και περιβαλλοντικών στόχων ορίστηκαν ίσες με 1, ενώ οι προτεραιότητες ενεργειακής παραγωγής ορίστηκαν ίσες με 2. Προτεραιότητα 2 αποφασίστηκε να έχουν κι οι ψευδείς κόμβοι ζήτησης που αντιπροσωπεύουν τις αντλήσεις (έχει αποδειχθεί ότι οι προτεραιότητες αυτών των κόμβων δεν παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο). Τέλος, οι προτεραιότητες της επαναπλήρωσης των ταμιευτήρων παρέμειναν στην προκαθορισμένη από το WEAP τιμή τους, δηλαδή στην τιμή 99.

Ο καθορισμός των προτεραιοτήτων βάσει των παραπάνω πρακτικά σημαίνει ότι σε κάθε χρονικό βήμα το WEAP θα προσπαθεί πρώτα από όλα να καλύψει τις ανάγκες της άρδευσης στο Δέλτα και στην Ξάνθη, ενώ στη συνέχεια, με όποια ποσότητα νερού περισσεύει, θα προσπαθεί να καλύψει τους ενεργειακούς στόχους μεγιστοποιώντας την παραγωγή ενέργειας.

Η αντικειμενική συνάρτηση στο σενάριο αυτό θα είναι η εξής:

$$f(\mathbf{1}) = \text{MIN}(\text{Hydropower}_1 + \text{Hydropower}_2 + \text{Hydropower}_3)_i$$

Με αυτόν τον τρόπο επιχειρείται η μεγιστοποίηση της πρωτεύουσας ενέργειας, της ενέργειας δηλαδή που παράγεται πάντα, από το σύνολο των τριών σταθμών, ακόμα και κάτω από τις δυσμενέστερες συνθήκες της χρονικής περιόδου που εξετάζεται. Η μεγιστοποίηση αυτή στη συγκεκριμένη περίπτωση επιχειρήθηκε μέσω του καθορισμού των καταλληλότερων τιμών των ενεργειακών στόχων από τον καθένα από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς της περιοχής.

Επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα άμεσης εξαγωγής αποτελεσμάτων από το WEAP στο MATLAB όσον αφορά στην συνολική ενέργεια που παράγεται από το υδροσύστημα κάθε μήνα, χρειάστηκε να δημιουργηθεί στο WEAP μία νέα μεταβλητή. Η μεταβλητή αυτή ονομάστηκε ΣHydropower και αντιπροσωπεύει τη συνολική μηνιαία παραγόμενη ενέργεια, ως το άθροισμα των επιμέρους μηνιαίων ποσοτήτων που παράγονται από τον κάθε σταθμό.

Στο συγκεκριμένο σενάριο δεν υπήρχε ανάγκη καθορισμού και δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης που να αφορά στην αξιοπιστία κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων, καθώς αυτές έχουν την πρώτη προτεραιότητα κι επομένως το WEAP θα

προσπαθεί κάθε φορά να τις ικανοποιήσει στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, προτού προβεί σε οποιαδήποτε άλλη ενέργεια.

Για την βελτιστοποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος κώδικας προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε και κατά τη βαθμονόμηση του υδροσυστήματος, ο οποίος επιτυγχάνει την αμφίδρομη επικοινωνία WEAP21 και MATLAB. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτός της προσομοιωμένης ανόπτησης.

6.8.2.7 Περιγραφή Σεναρίου Γ

Τέλος, εξετάστηκε κι ένα τρίτο σενάριο το οποίο αφορά και αυτό στη μεγιστοποίηση της πρωτεύουσας ενέργειας. Η διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο έγκειται στον ορισμό της πρωτεύουσας ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση, ως εγγυημένη ενέργεια ορίζεται το άθροισμα των πρωτευουσών ενεργειών των επιμέρους υδροηλεκτρικών σταθμών. Βρίσκεται δηλαδή η εγγυημένη ενέργεια που μπορεί να παράγει ο κάθε σταθμός και στη συνέχεια προκύπτει η εγγυημένη ενέργεια του υδροσυστήματος ως το άθροισμα αυτών των ενεργειών. Η προσέγγιση αυτή βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η διαχείριση του υδροσυστήματος δεν είναι ενιαία και υπάρχουν διάφοροι, ανεξάρτητοι μεταξύ τους διαχειριστές για τη λειτουργία του κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού (π.χ σε περιπτώσεις που κάποιοι σταθμοί ελέγχονται από τη Δ.Ε.Η και κάποιοι άλλοι από ιδιώτες). Στο προηγούμενο σενάριο αντίθετα, δίνεται έμφαση στη συνολική λειτουργία του συστήματος, θεωρώντας ότι αυτό λειτουργεί ως ένα ενιαίο σύνολο με ένα μοναδικό διαχειριστή.

Βάσει των παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση που ορίζει την πρωτεύουσα ενέργεια και που τίθεται προς βελτιστοποίηση είναι η εξής:

$$f(1)=\text{MIN}(\text{Hydropower}_1)+\text{MIN}(\text{Hydropower}_2)+\text{MIN}(\text{Hydropower}_3)$$

Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάστηκε ο καθορισμός νέας μεταβλητής στο WEAP, καθώς η πληροφορία που ενδιαφέρει σε αυτήν την περίπτωση είναι η ελάχιστη τιμή παραγόμενης ενέργειας από τον κάθε σταθμό κι όχι από όλο το σύστημα. Η πληροφορία αυτή μπορεί να δοθεί από το WEAP στο MATLAB με τις ήδη υπάρχουσες μεταβλητές.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο υπό εξέταση υδροσύστημα η ανεξάρτητη διαχείριση του κάθε σταθμού έχει θεωρητική μόνο έννοια, καθώς τόσο οι υφιστάμενοι σταθμοί του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης όσο κι ο μελλοντικός σταθμός του Τεμένους ανήκουν στην Δ.Ε.Η, η οποία και συντονίζει τη λειτουργία τους, και δεν προβλέπεται αλλαγή αυτού του καθεστώτος. Παρόλα αυτά, η θεώρηση της ανεξάρτητης διαχείρισης είναι σκόπιμη, αφού προσφέρει ένα μέτρο σύγκρισης στην υφιστάμενη λειτουργία και απόδοση του υδροσυστήματος.

Ο κώδικας προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης ήταν ο ίδιος με αυτόν του προηγούμενου σεναρίου, ενώ και πάλι έγινε χρήση του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης.

7 Παρουσίαση και Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια τα οποία αφορούν όλα στη βελτιστοποίηση του energy demand, δηλαδή των ενεργειακών απαιτήσεων από τον κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό του υδροσυστήματος του Νέστου. Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το κάθε σενάριο, ενώ παράλληλα γίνεται και σύγκριση μεταξύ τους προκειμένου να εντοπιστούν και να αιτιολογηθούν οι διαφορές που υπάρχουν.

7.1 Αποτελέσματα Σεναρίου Α

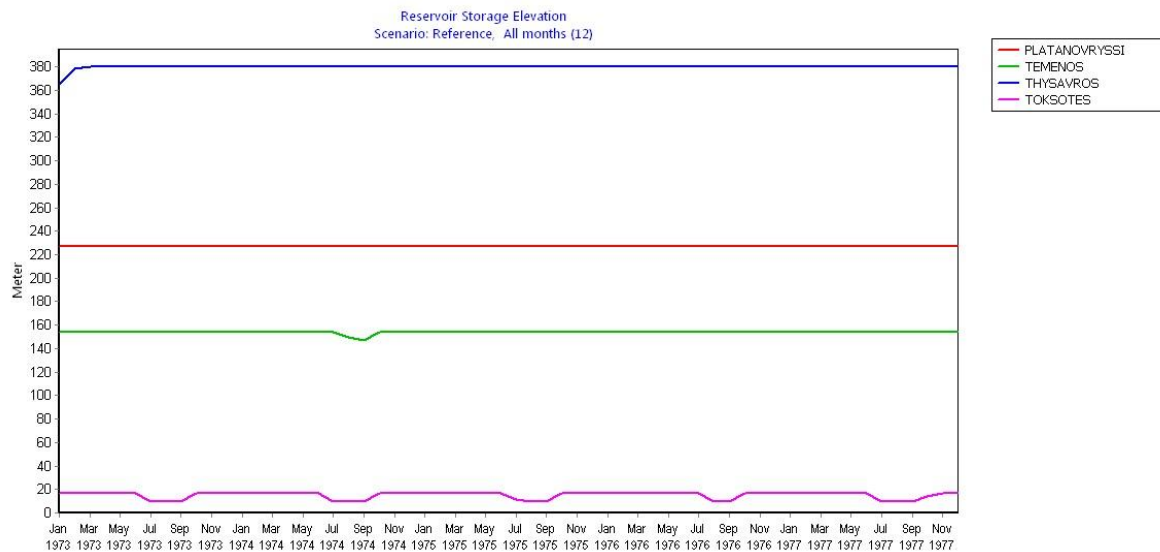
7.1.1 Χρονοσειρές 1973-1977

Στο σενάριο αυτό επιχειρείται η βελτιστοποίηση των τιμών των ενεργειακών απαιτήσεων από το κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό, έτσι ώστε να καλύπτονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι διάφορες απαιτήσεις του συστήματος και να μεγιστοποιείται η παραγωγή της ενέργειας. Τα υδρολογικά και μη δεδομένα που χρησιμοποιούνται αφορούν στην περίοδο 1973-1977. Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης όσον αφορά στην πρώτη περίπτωση όπου οι απορροές στα σύνορα Ελλάδας Βουλγαρίας θεωρούνται ίσες με τις καταγεγραμμένες από το σταθμό Monima Kula, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίν. 7-1: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση

	ΧΕΙΜΩΝΑΣ			ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ		
	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ
GWh	0.5488	0.0662	0.0419	1.525	1.506	1.29

Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν σχηματίζεται μέτωπο Pareto καθώς ο αλγόριθμος βρίσκει κατευθείαν μία λύση η οποία βελτιστοποιεί ταυτόχρονα και τα δύο κριτήρια που τέθηκαν, δηλαδή την αξιοπιστία κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων και το κέρδος από την παραγωγή ενέργειας. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων προέκυψαν ίσες με 100 για την αξιοπιστία των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων και $249.9 \cdot 10^6$ € για το κέρδος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οποιαδήποτε άλλη λύση (συνδυασμός δηλαδή τιμών ενεργειακών στόχων) δεν προκαλεί περαιτέρω βελτίωση σε κανένα από τα δύο κριτήρια. Αντίθετα, όλες οι υπόλοιπες λύσεις είτε κρατούν σταθερή είτε μειώνουν την επίδοση του ενός ή και των δύο κριτηρίων. Οι δύο στόχοι δηλαδή που έχουν τεθεί δεν είναι αντικρουόμενοι. Για αυτό το λόγο δεν επιχειρήθηκε να γίνει βελτιστοποίηση της δεύτερης εξεταζόμενης περίπτωσης. Επίσης παρατηρείται ότι οι τιμές που προέκυψαν για τους ενεργειακούς στόχους είναι πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές.



Σχ. 7-1: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης ταμιευτήρων

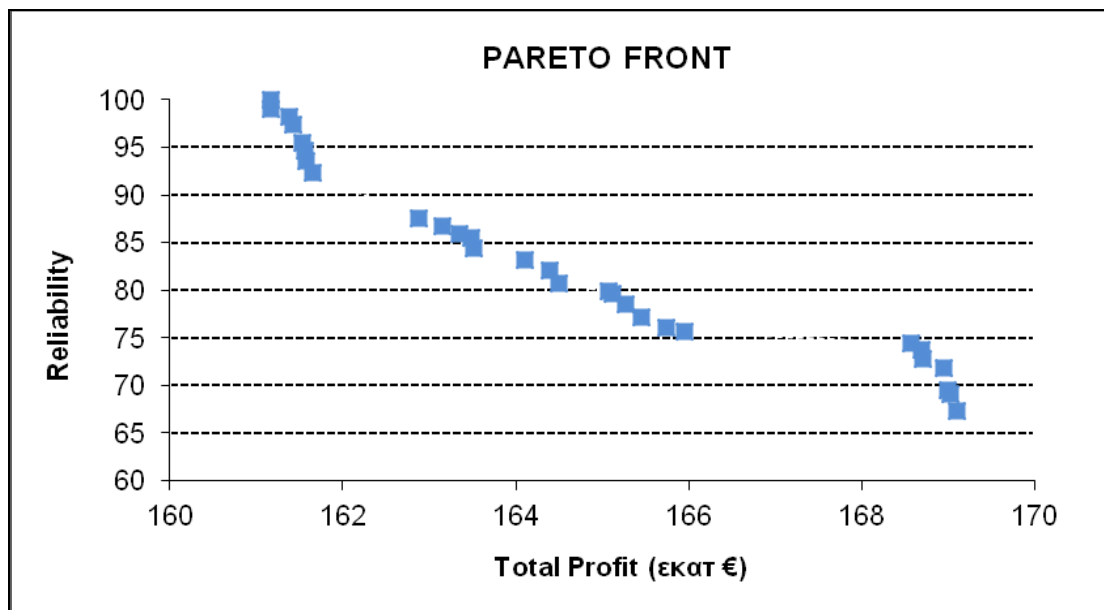
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της στάθμης των ταμιευτήρων καθ’ όλη τη διάρκεια της περιόδου 1973-1977. Παρατηρείται ότι η στάθμη όλων των ταμιευτήρων αλλά κυρίως του Θησαυρού, ο οποίος παίζει και το καθοριστικό ρόλο, παραμένουν πάντα γεμάτοι. Συγκεκριμένα, οι ταμιευτήρες του Θησαυρού, της Πλατανόβρυσης και του Τέμενους παραμένουν πάντα γεμάτοι τους χειμερινούς μήνες και γίνονται κάποιες απολήψεις από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το φθινόπωρο και το χειμώνα οι βροχοπτώσεις κι οι απορροές της λεκάνης είναι πολλές και επαρκούν για την κάλυψη των διαφόρων αναγκών, ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι τα αποθέματα είναι και πάλι σχετικά μεγάλα και χρειάζεται μία πολύ μικρή μόνο απελευθέρωση νερού από το Τέμενος προκειμένου να καλύπτονται πλήρως όλες οι ανάγκες. Αυτός είναι και ο λόγος που οι τιμές των στόχων που προέκυψαν είναι τόσο μικρές.

Έτσι, ο ταμιευτήρας του Θησαυρού παραμένει γεμάτος, μεγιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο το ύψος πτώσης, ενώ παράλληλα η ποσότητα νερού που πάει να υπερχειλίζει περνά από τους στροβίλους. Με το νερό των υπερχειλίσεων καλύπτονται όλες οι κατάντη ανάγκες, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας αφού υπάρχει μέγιστο ύψος πτώσης και μεγάλη διαθεσιμότητα νερού. Η απελευθέρωση επομένως μηδενικών ή πολύ μικρών ποσοτήτων νερού από τους ταμιευτήρες (οι οποίες εκφράζονται ουσιαστικά από τις τιμές του energy demand) αποτελεί τη βέλτιστη λύση για το σύστημα και προκαλεί την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν πραγματοποιείται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση και δεν γίνεται σχηματισμός του μετώπου Pareto.

7.1.2 Χρονοσειρές 1991-1995

Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά τα υδρολογικά και μη δεδομένα που αντιστοιχούν στην περίοδο 1991-1995, η οποία είναι αρκετά

ξηρότερη σε σχέση με την περίοδο 1973-1977. Η μη επάρκεια των αποθεμάτων σε αυτή τη περίπτωση καθιστά τα δύο κριτήρια που τέθηκαν αντικρουόμενα, με αποτέλεσμα να εντοπίζονται αυτή τη φορά αρκετές λύσεις, οι οποίες βελτιώνουν το ένα κριτήριο ενώ ταυτόχρονα επιδεινώνουν το άλλο. Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα Pareto όπως προέκυψε για την πρώτη περίπτωση που εξετάζεται, καθώς και κάποιες από τις λύσεις που προέκυψαν από αυτή τη βελτιστοποίηση.



Σχ. 7-2: Μέτωπο Pareto των λύσεων της βελτιστοποίησης

Πίν. 7-2: Ενδεικτικές τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης και αντικειμενικών συναρτήσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση

ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ						ΤΙΜΕΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	
a	b	c	d	e	f	profit (10 ⁶ €)	Reliability
0.0065	0.3109	0.4535	0.1265	0.0646	0.9712	169.10	67.318
0.9936	0.7953	0.4774	1.7302	1.3182	0.9586	168.69	73.698
2.3803	1.8566	0.1307	10.9911	2.7792	1.0577	165.27	78.516
1.8302	1.4552	0.1668	12.8172	2.1257	1.2197	164.51	80.729
2.8435	1.2286	0.0223	15.8765	3.7119	0.3052	162.88	87.500
0.1613	0.4895	2.0034	20.7121	1.4344	2.3919	161.57	93.490
0.1483	0.4764	1.9727	22.2649	1.3076	2.3599	161.42	97.396
0.3973	0.7676	1.9678	22.3357	1.7715	2.2051	161.16	100.000

Οι μεταβλητές a, b, c αφορούν στις τιμές των ενεργειακών στόχων του Θησαυρού, της Πλατανόβρυσης και του Τεμένους αντίστοιχα κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, ενώ αντίθετα οι μεταβλητές d, e, f αντιπροσωπεύουν τις ενεργειακές απαιτήσεις την άνοιξη και το καλοκαίρι. Παρατηρείται ότι σε όλες τις λύσεις που προέκυψαν, οι μεταβλητές a, b, c παίρνουν αρκετά μικρές (σχεδόν μηδενικές τις περισσότερες φορές) τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι το φθινόπωρο και το χειμώνα αφενός δεν υπάρχουν αρδευτικές ανάγκες κι επομένως οι απαιτήσεις σε νερό είναι αρκετά περιορισμένες και αφορούν μόνο στην οικολογική παροχή, κι αφετέρου οι βροχοπτώσεις κι οι απορροές είναι πολύ μεγαλύτερες. Γίνεται επομένως μία προσπάθεια να γεμίζουν οι ταμιευτήρες το χειμώνα, έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής ποσότητα νερού διαθέσιμη για απελευθέρωση την άνοιξη και το καλοκαίρι που οι απαιτήσεις είναι αυξημένες. Παράλληλα, με αυτό το τρόπο μεγιστοποιείται κι η παραγωγή ενέργειας, αφού αφενός μεγιστοποιείται το ύψος πτώσης, κι αφετέρου (λόγω της υψηλής στάθμης του ταμιευτήρα) υπάρχει αρκετή ποσότητα νερού που αντί να υπερχειλίζει περνά από τις τουρμπίνες και γίνεται ενέργεια. Το σύστημα δηλαδή κατά τη διάρκεια του χειμώνα λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που λειτουργεί στην περίοδο 1973-1977.

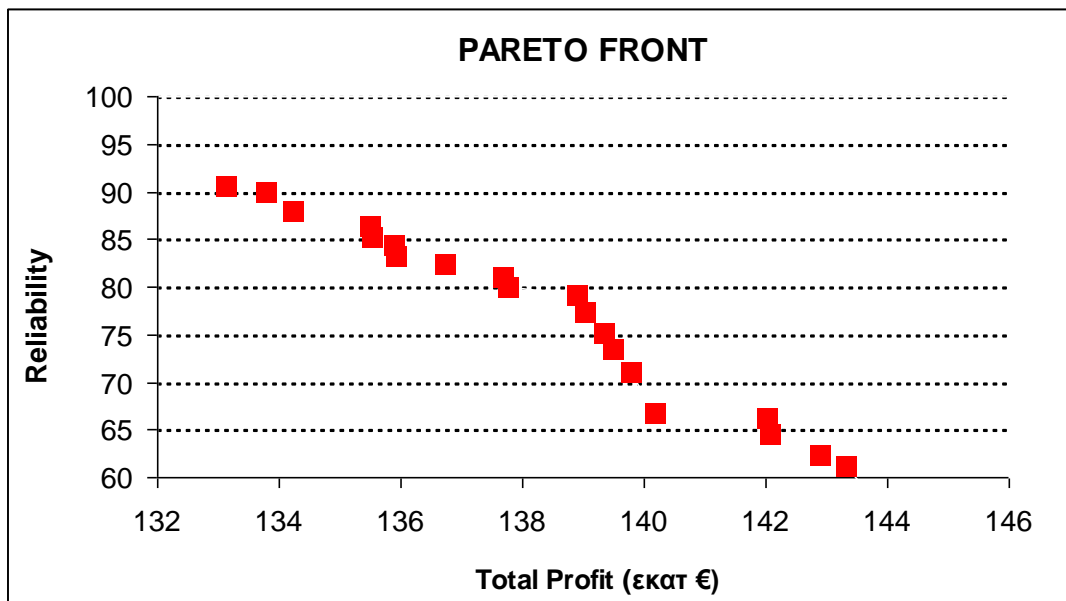
Όσον αφορά στην μεταβλητή d, που αντιπροσωπεύει τις ενεργειακές απαιτήσεις από τον Θησαυρό τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες, παρατηρείται ότι η τιμή της μεταβάλλεται σημαντικά σε κάθε λύση. Συγκεκριμένα, για τις λύσεις στις οποίες η αξιοπιστία της άρδευσης και της οικολογικής παροχής μεγιστοποιείται (με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κέρδους από την παραγωγή ενέργειας), η τιμή της μεταβλητής d

παίρνει αρκετά υψηλές τιμές, ενώ προχωρώντας σε λύσεις στις οποίες η αξιοπιστία μειώνεται, μειώνεται κι η τιμή της μεταβλητής. Η μεταβλητή d ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που πρέπει να απελευθερωθεί από το Θησαυρό σε καθένα από τους 6 μήνες, έτσι ώστε να καλυφθούν οι περιβαλλοντικοί κι αρδευτικοί στόχοι. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή των ενεργειακών απαιτήσεων, τόσο μεγαλύτερη είναι κι η ποσότητα νερού που θα πρέπει να απελευθερωθεί προκειμένου να τις καλύψει. Επομένως, είναι λογικό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο μεγαλύτερη θα είναι κι η τιμή της αξιοπιστίας, αφού οι διάφορες απαιτήσεις θα ικανοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό λόγω της απελευθέρωσης μεγαλύτερης ποσότητας νερού. Παράλληλα όμως, η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού οδηγεί σε σημαντική μείωση του ύψους πτώσης καθώς και σε μείωση των αποθεμάτων για το επόμενο χρονικό βήμα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας. Όσον αφορά στις λύσεις που προέκυψαν και στις οποίες η αξιοπιστία παίρνει χαμηλές τιμές, η τιμή της μεταβλητής d αλλά και των e και f είναι αρκετά χαμηλές. Ο αλγόριθμος καταλήγει δηλαδή σε ένα συνδυασμό τιμών, όπου δεν απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει το ύψος πτώσης και να αυξάνεται η ποσότητα του νερού που αντί να υπερχειλίζει περνά από το στρόβιλο, κι έτσι να μεγιστοποιείται η ενεργειακή παραγωγή.

Επίσης παρατηρείται ότι για λύσεις που προσφέρουν μεγάλη αξιοπιστία, οι τιμές της μεταβλητής d είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών e και f . Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η ποσότητα που απελευθερώνεται από το Θησαυρό είναι η καθοριστικότερη (αφού ο Θησαυρός είναι ο μεγαλύτερος με διαφορά από τους τρεις ταμιευτήρες).

Τέλος, θα πρέπει να σχολιασθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις ποσότητες νερού που αντλούνται από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης. Παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις, ανεξαρτήτως δηλαδή τιμής ενεργειακών απαιτήσεων, η ποσότητα νερού που αντλούταν από τον κάθε σταθμό ήταν σε κάθε χρονικό βήμα ίση ή σχεδόν ίση με την παροχτετευτική ικανότητα των αντλιών. Η αντλούμενη ποσότητα δηλαδή ήταν χρονικά σταθερή και ίση με τη μέγιστη δυνατή. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία της άντλησης δεν επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος.

Όσον αφορά στην δεύτερη περίπτωση, όπου θεωρείται ότι εφαρμόζεται η Ελληνο-Βουλγαρική συμφωνία, τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται στο παρακάτω μέτωπο Pareto καθώς και στον ακόλουθο πίνακα.



Σχ. 7-3: Μέτωπο Pareto των λύσεων της βελτιστοποίησης

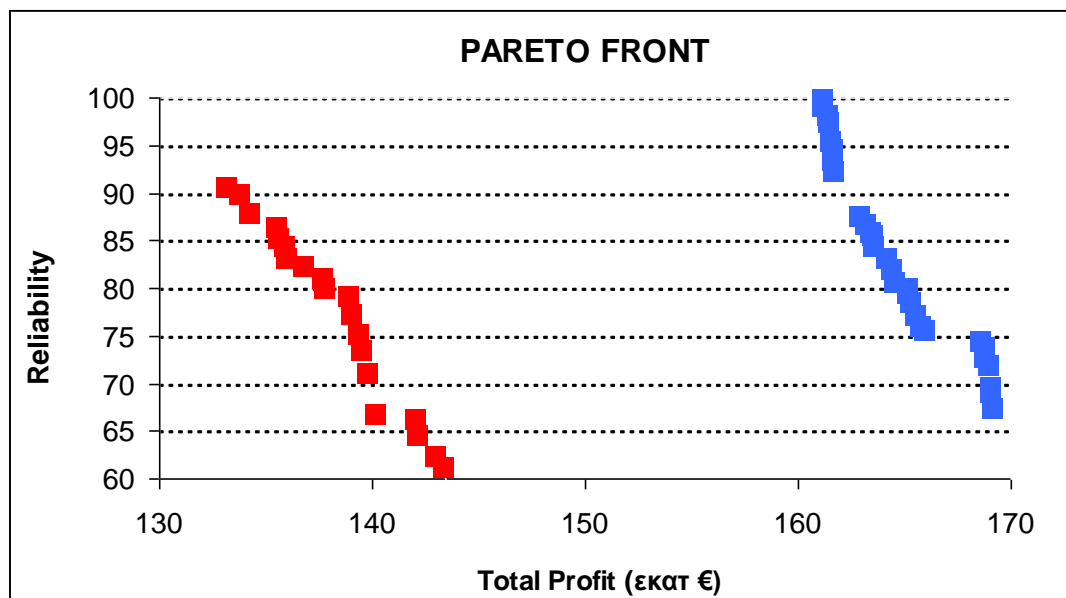
Πίν. 7-3: Ενδεικτικές τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης και αντικειμενικών συναρτήσεων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση

ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ						ΤΙΜΕΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	
a	b	c	d	e	f	profit (10 ⁶ €)	Reliability
0.017	0.400	0.463	0.084	0.029	2.426	143.63	57.03
0.798	0.402	0.454	0.119	0.053	2.400	143.31	61.20
1.199	0.610	0.098	2.653	1.339	0.974	142.02	66.28
0.043	0.423	0.841	11.373	0.523	2.122	139.49	73.44
0.077	0.592	0.567	11.716	1.087	1.805	138.89	79.17
0.162	0.596	0.521	12.989	1.252	1.229	136.74	82.29
0.148	0.621	0.479	14.709	1.254	1.227	135.53	85.16
0.349	0.568	0.419	17.950	1.284	1.153	133.78	89.84
1.294	1.534	0.164	17.984	1.556	1.086	133.13	90.63

Οι τιμές των μεταβλητών βελτιστοποίησης ακολουθούν την ίδια πορεία με της αντίστοιχες της πρώτης περίπτωσης. Οι μεταβλητές a, b, c που αντιπροσωπεύουν τις ενεργειακές απαιτήσεις του φθινοπώρου και του χειμώνα παίρνουν σε όλες τις λύσεις πολύ μικρές τιμές, ενώ η τιμή της μεταβλητής d, η οποία αντιπροσωπεύει την ενεργειακή ζήτηση του καλοκαιριού

στο Θησαυρό μεγαλώνει καθώς μεγαλώνει η αξιοπιστία κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων.

Επίσης παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα όπου συγκρίνονται τα δύο μέτωπα Pareto που προέκυψαν για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχ. 7-4: Μέτωπα Pareto των λύσεων των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, η εφαρμογή της Ελληνο-Βουλγαρικής συμφωνίας θα προκαλέσει προβλήματα στην Ελλάδα, τόσο όσον αφορά στην κάλυψη των απαιτήσεων του υδροσυστήματος του Νέστου όσο και στο θέμα των κερδών από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της συμφωνίας συνεπάγεται τη δραστική μείωση των εισερχόμενων από τη Βουλγαρία απορροών, με αποτέλεσμα σημαντικό περιορισμό των διαθέσιμων πόρων και επομένως αδυναμία κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών αναγκών, με αποτέλεσμα την μείωση της αξιοπιστίας του υδροσυστήματος. Όπως φαίνεται και από το μέτωπο Pareto που προέκυψε, η μέγιστη τιμή αξιοπιστίας που παρατηρείται δεν ξεπερνάει το 90%. Σημαντικό επίσης πρόβλημα θα αποτελέσει και η μείωση των κερδών. Η μείωση των διαθέσιμων πόρων οδηγεί στη μείωση της παραγόμενης ενέργειας και κατά συνέπεια στη μείωση των κερδών από αυτή. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, η μείωση αυτή είναι αρκετά σημαντική και κυμαίνεται περίπου στα 30 εκατομμύρια ευρώ, παρατηρείται δηλαδή μείωση της τάξης του 18-19%.

7.2 Προσομοιώσεις με τις Βέλτιστες Λύσεις

Για να κατανοηθεί καλύτερα η διαφορά στον τρόπο λειτουργίας του υδροσυστήματος ανάλογα με τις τιμές που παίρνουν οι ενεργειακοί στόχοι, αποφασίστηκε να διερευνηθούν περαιτέρω οι δύο περιπτώσεις που προέκυψαν από την παραπάνω βελτιστοποίηση της πρώτης περίπτωσης και οι οποίες δίνουν τα πιο ακραία αποτελέσματα. Έτσι, εκτελέστηκαν δύο προσομοιώσεις του υδροσυστήματος, όπου την πρώτη φορά ως ενεργειακοί στόχοι τέθηκαν αυτοί για τους οποίους επιτυγχάνεται αξιοπιστία 100% με μείωση όμως των

κερδών, και τη δεύτερη τέθηκαν οι τιμές με τις οποίες επέρχεται η μεγαλύτερη αύξηση των κερδών και παράλληλα η μικρότερη τιμή της αξιοπιστίας.

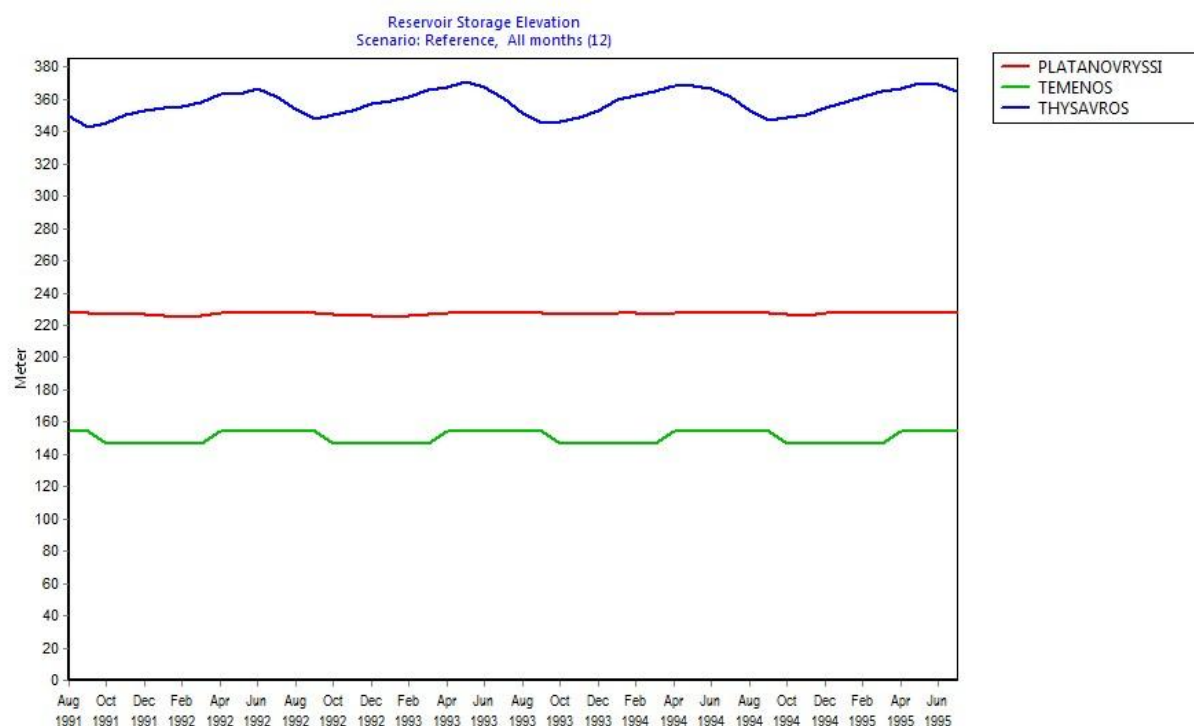
7.2.1 Προσομοίωση 1

Η πρώτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε θέτοντας ως ενεργειακούς στόχους αυτούς που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίν. 7-4: Τιμές ενεργειακών στόχων που χρησιμοποιήθηκαν

	ΧΕΙΜΩΝΑΣ			ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ		
	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ
GWh	0.397	0.768	1.968	22.338	1.772	2.205

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, θέτοντας αυτούς τους ενεργειακούς στόχους το υδρoσύστημα παρουσιάζει αξιοπιστία κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων 100%, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνεται η διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου.



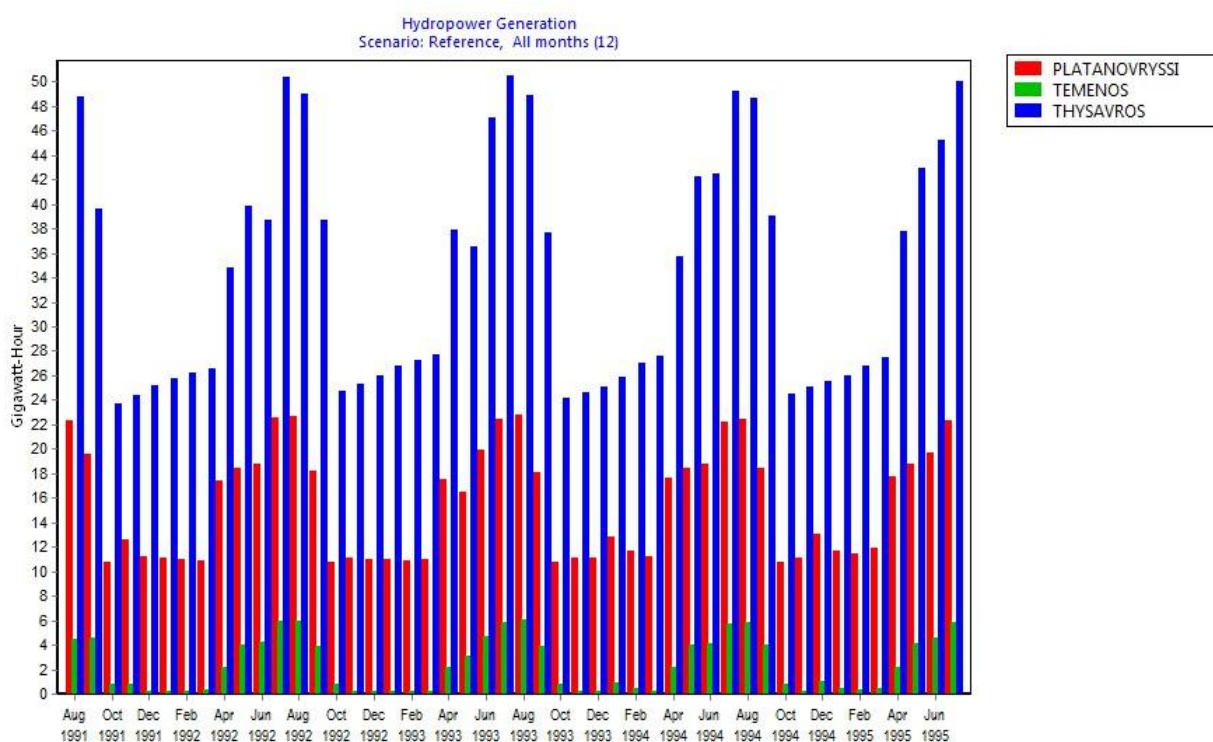
Σχ. 7-5: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.

Παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας του Θησαυρού υφίσταται αυξομειώσεις, με τη στάθμη του να ανεβαίνει από τον Οκτώβριο έως τον Απρίλιο και να κατεβαίνει από τον Απρίλιο έως το Σεπτέμβριο, όπου και αντλείται μεγάλη ποσότητα νερού για τις αρδεύσεις. Ο ταμιευτήρας

της Πλατανόβρυσης μένει σταθερά γεμάτος, ενώ μεγάλες αυξομειώσεις για τα μεγέθη του υφίσταται κι η στάθμη του ταμιευτήρα του Τεμένους.

Το γενικό συμπέρασμα πάντως είναι ότι το σύστημα λειτουργεί σε μεγάλο βαθμό χρησιμοποιώντας μεγάλα ποσοστά των αποθηκευμένων στους ταμιευτήρες όγκων νερού, αφού όπως φαίνεται και από τη διακύμανση της στάθμης των ταμιευτήρων, κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού απελευθερώνονται μεγάλοι όγκοι νερού προς τα κατάντη. Το μέγεθος των ποσοτήτων που απελευθερώνονται και χρησιμοποιούνται φαίνονται κι από το εύρος της διακύμανσης των σταθμών, οι οποίες για το Θησαυρό κυμαίνονται περίπου μεταξύ των τιμών 340m και 375m (κοντά στην Α.Σ.Α), ενώ για το Τέμενος φτάνουν μέχρι και τις οριακές τιμές, δηλαδή τη στάθμη 147m (Κ.Σ.Α) και τη στάθμη 154m (Α.Σ.Α).

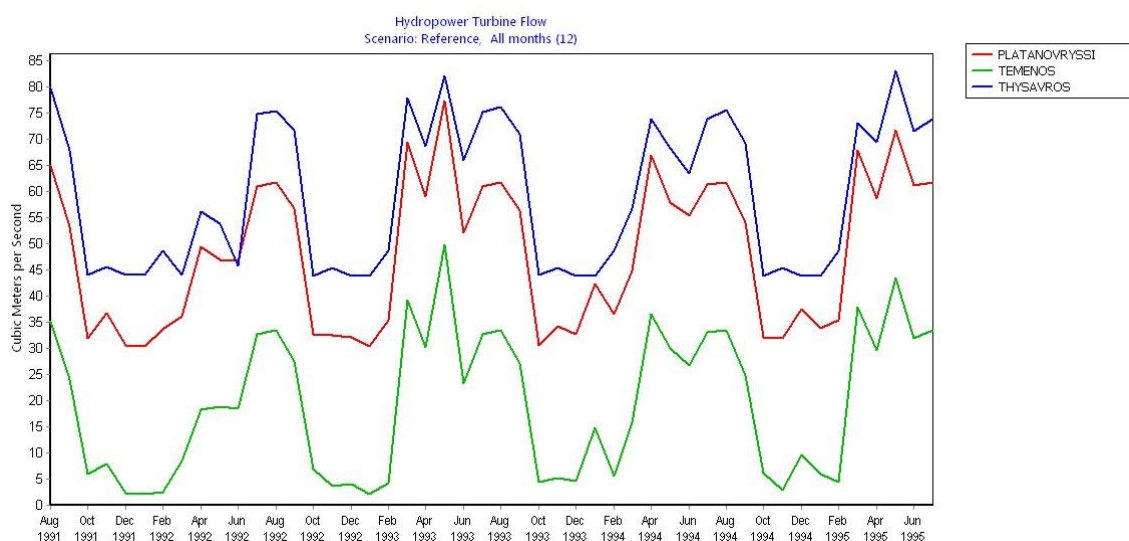
Επίσης παρατίθεται το διάγραμμα που απεικονίζει την μηνιαία παραγωγή ενέργειας καθόλη τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.



Σχ. 7-6: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής ενέργειας από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς του υδροσυστήματος

Όπως αναμενόταν, η παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού είναι μεγάλη, σε αντίθεση με το φθινόπωρο και το χειμώνα, όπου οι τιμές μειώνονται σημαντικά. Οι αιχμές στην ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας εντοπίζονται κυρίως κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, όπου παρουσιάζονται κι οι μεγαλύτερες αρδευτικές απαιτήσεις, ενώ οι μικρότερη ποσότητα παράγεται συνήθως κατά το μήνα Οκτώβριο. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη μηνιαία παραγωγή εντοπίζεται το μήνα Ιούλιο και είναι 75.25GWh ενώ η μικρότερη εντοπίζεται το μήνα Οκτώβριο και είναι 34.5GWh.

Τέλος, παρατίθεται και το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει την παροχή (m^3/s) που περνά από τους τρεις υδροστροβίλους του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα.



Σχ. 7-7: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους

Όπως ήταν αναμενόμενο, η παροχή που περνά και από τους τρεις στροβίλους κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών είναι σχετικά μικρή (περίπου $45 m^3/s$ για το Θησαυρό, $30-32 m^3/s$ για την Πλατανόβρυση και $1-2 m^3/s$ για το Τέμενος) και αυξάνεται πολύ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ($75-80 m^3/s$ για το Θησαυρό, $60-75 m^3/s$ για την Πλατανόβρυση και $30-40 m^3/s$ για το Τέμενος). Οι τιμές των παροχών που περνούν από τους στροβίλους το χειμώνα και το καλοκαίρι παραμένουν σχετικά σταθερές καθ'όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Σημειώνεται ότι η μέγιστη παροχή που περνάει από κάθε στροβίλο είναι αρκετά μικρότερη της παροχεταιυτικής ικανότητας του στροβίλου.

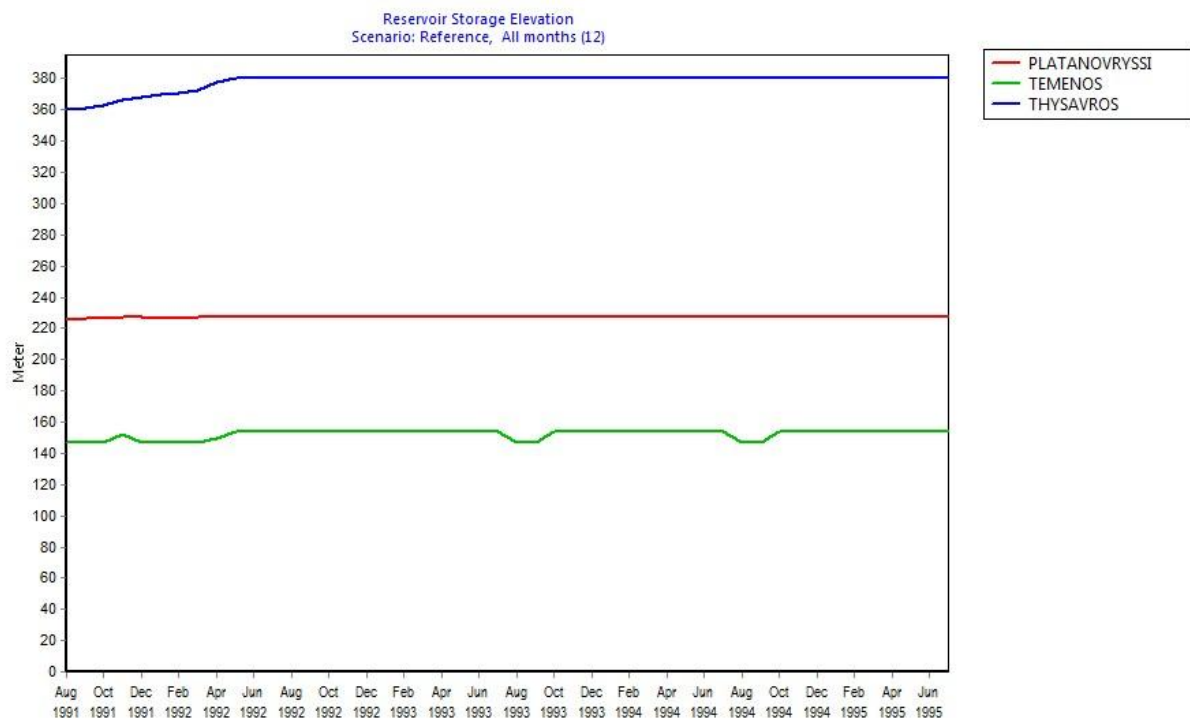
7.2.2 Προσομοίωση 2

Η δεύτερη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε θέτοντας ως ενεργειακούς στόχους αυτούς που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίν. 7-5: Τιμές ενεργειακών στόχων που χρησιμοποιήθηκαν

	ΧΕΙΜΩΝΑΣ			ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ		
	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ
GWh	0.006	0.311	0.453	0.127	0.064	0.971

Με αυτές τις ενεργειακές απαιτήσεις, το υδροσύστημα παρουσιάζει μικρή αξιοπιστία κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων, που δεν ξεπερνάει το 67.3%. Η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας από την άλλη πλευρά παρουσιάζει αύξηση. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της στάθμης των ταμιευτήρων για την περίοδο 1991-1995.

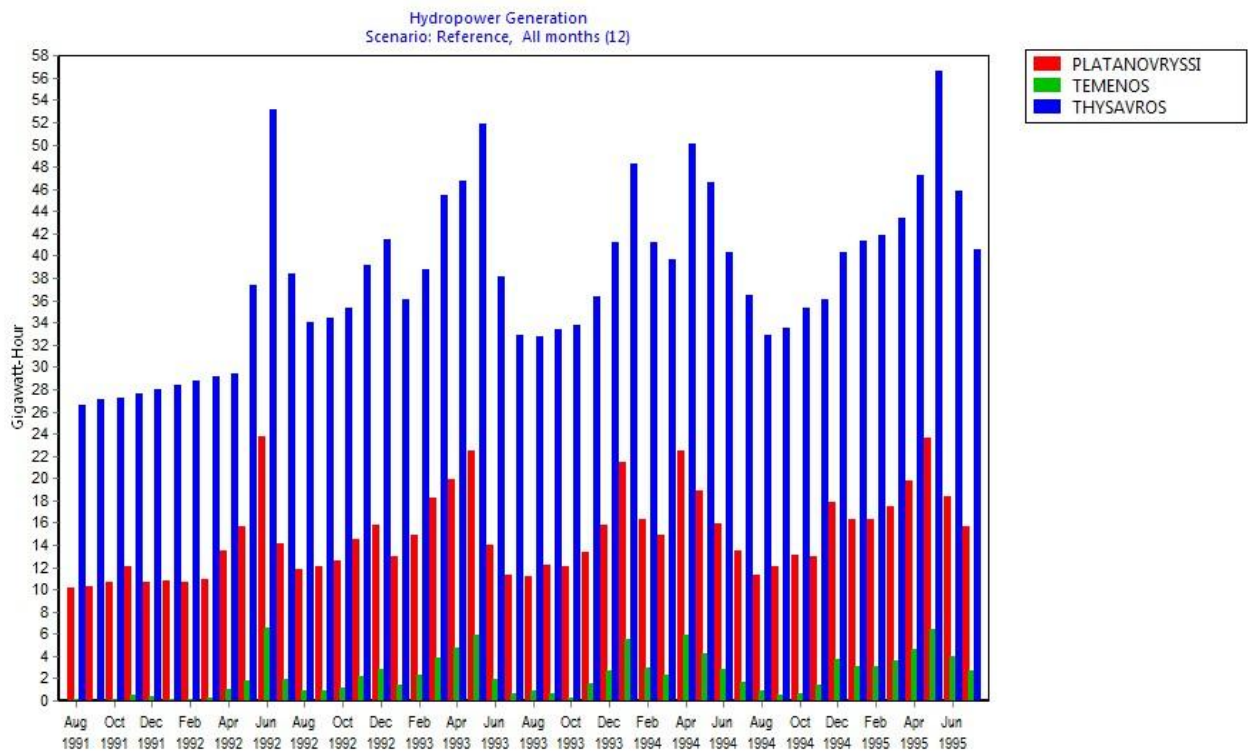


Σχ. 7-8: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.

Σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση, οι ταμιευτήρες εδώ γεμίζουν κατά τη διάρκεια των πρώτων μηνών ενώ στη συνέχεια μένουν σταθερά γεμάτοι, χωρίς να υφίστανται αυξομειώσεις στις στάθμες τους. Εξαιρεση αποτελεί μόνο το Τέμενος, όπου φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου κάποιων ετών γίνονται κάποιες αντλήσεις.

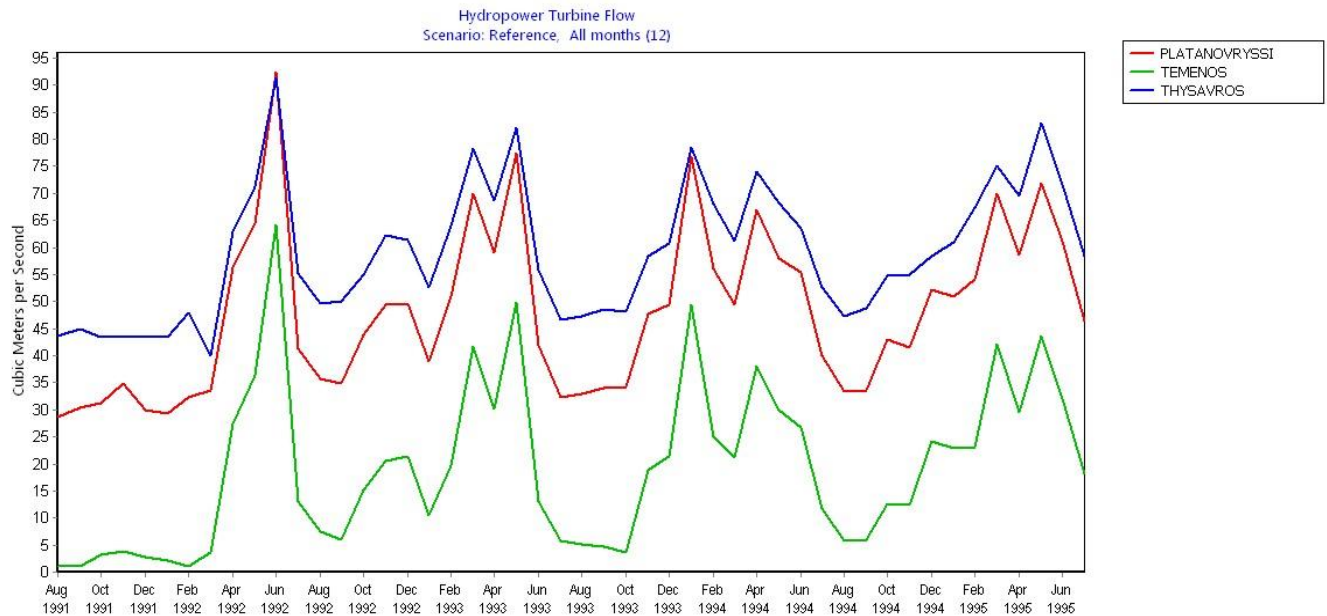
Το γενικό συμπέρασμα πάντως είναι ότι στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα δεν χρησιμοποιεί το νερό που είναι αποθηκευμένο στους ταμιευτήρες, αλλά λειτουργεί μόνο με τις ποσότητες νερού που ξεπερνούν την Α.Σ.Α και πάνε να υπερχειλίσουν. Το γεγονός του ότι δεν απελευθερώνεται νερό από τους ταμιευτήρες οδηγεί στην μερική μόνο κάλυψη όλων των κατάντη αναγκών, μιας και τα διαθέσιμα αποθέματα είναι περιορισμένα. Από την άλλη πλευρά διατηρείται σε όλους τους ταμιευτήρες ένα υψηλό ύψος πτώσης, ενώ η όποια ποσότητα εισρέει πάει να υπερχειλίσει. Με αυτό το τρόπο ευνοείται η μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.

Το επόμενο διάγραμμα αφορά στην μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τους τρεις σταθμούς. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι ποσότητες της ενέργειας είναι αυξημένες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα. Συγκεκριμένα, η αιχμή της ενέργειας εδώ είναι 83.4GWh και παρουσιάζεται το μήνα Ιούνιο ενώ η μικρότερη τιμή είναι 37.9GWh και εμφανίζεται τον Οκτώβριο. Πέρα από την αύξηση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, φαίνεται ότι εξομαλύνονται σε κάποιο βαθμό κι οι διαφορές μεταξύ των τιμών παραγόμενης ενέργειας καλοκαιριού και χειμώνα. Και πάλι, η ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι μεγαλύτερη από αυτή του χειμώνα, οι διαφορές μεταξύ τους όμως έχουν μειωθεί, κυρίως λόγω της αύξησης της ενέργειας το χειμώνα.



Σχ. 7-9: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής ενέργειας από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς του υδροσυστήματος

Τέλος, παρατίθεται και το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει την παροχή (m^3/s) που περνά από τους τρεις υδροστροβίλους του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα.



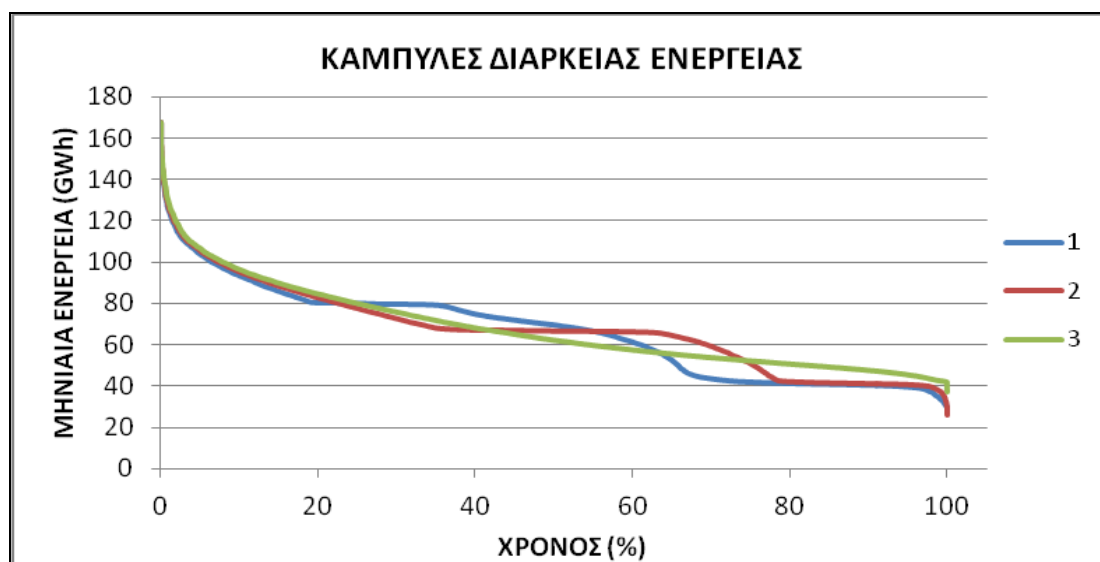
Σχ. 7-10: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους

Όσον αφορά στις παροχές που περνούν από τους στροβίλους κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, παρατηρείται ότι στα πρώτα χρόνια είναι μικρές ενώ στα επόμενα αυξάνονται αρκετά. Αυτό συμβαίνει γιατί στα πρώτα έτη οι ταμιευτήρες δεν έχουν γεμίσει, επομένως κι η απελευθέρωση νερού είναι περιορισμένη. Στα επόμενα χρόνια όμως οι ταμιευτήρες είναι πληρωμένοι, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές ποσότητες νερού που αντί να υπερχειλίσουν περνούν από τους στροβίλους και χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας. Όσον αφορά στους καλοκαιρινούς μήνες, οι παροχές που περνούν από τους στροβίλους στα πρώτα έτη είναι μεγάλες ενώ στη συνέχεια μειώνονται. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει μία καθοδική τάση στις τιμές της παροχής από τον Απρίλιο έως το Σεπτέμβριο. Αυτό συμβαίνει λόγω της μείωσης των αποθεμάτων νερού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και των μικρών ενεργειακών απαιτήσεων που δεν επιτρέπουν απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού.

7.3 Έλεγχος Απόκρισης του Υδροσυστήματος με Χρήση των Συνθετικών Χρονοσειρών

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή στο WEAP21 των συνθετικών χρονοσειρών που παρήχθησαν μέσω του προγράμματος «Κασταλία» και πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις του υδροσυστήματος. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν τρία χαρακτηριστικά σημεία (σύνολα λύσεων) από την βελτιστοποίηση της πρώτης περίπτωσης του Α σεναρίου (1. το σημείο για το οποίο επιτυγχάνεται max reliability-min energy, 2.το σημείο το οποίο δίνει σχετικά ενδιάμεσες τιμές και για τα δύο κριτήρια, 3.το σημείο για το οποίο επιτυγχάνεται max

energy-min reliability)), καθένα από τα οποία χρησιμοποιήθηκε για τον ορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων στην κάθε προσομοίωση. Από την κάθε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε εξήχθησαν οι καμπύλες διάρκειας της ενέργειας του συστήματος, δηλαδή της ενέργειας που παράγεται συνολικά και από τους τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίες φαίνονται αμέσως παρακάτω.



Σχ. 7-11: Καμπύλες διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας από το υδροσύστημα για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η μορφή των καμπύλων διάρκειας της ενέργειας στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν είναι η ίδια, αλλά αντίθετα παρουσιάζει αρκετές διαφοροποιήσεις. Στην πρώτη περίπτωση η καμπύλη εμφανίζει κάποια στάσιμα σημεία όπου η τιμή της παραγόμενης ενέργειας δεν μεταβάλλεται για κάποιο χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν απότομες αλλαγές στις τιμές, οι οποίες απεικονίζονται με απότομες πτώσεις της καμπύλης. Στη δεύτερη περίπτωση η καμπύλη είναι πιο ομαλή. Και πάλι υπάρχουν σημεία στα οποία η τιμή της ενέργειας μένει στάσιμη, αλλά οι έντονες μεταβολές είναι λιγότερες και παρατηρούνται κυρίως σε ένα σημείο. Τέλος, η καμπύλη της περίπτωσης 3 είναι απόλυτα ομαλή, με τις τιμές να μειώνονται βαθμιαία με την πάροδο του χρόνου. Οι διαφορές αυτές που υπάρχουν ως προς τη μορφή των καμπύλων διάρκειας οφείλονται κυρίως στη διαφορά ως προς τις ποσότητες ενέργειας που παράγονται το χειμώνα και το καλοκαίρι στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Όσο οι ενεργειακές απαιτήσεις μειώνονται, αυξάνεται αρκετά η παραγωγή ενέργειας το χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι η παραγωγή υφίσταται μειώσεις, που είναι όμως αρκετά μικρές. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται κι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που παράγεται τους χειμερινούς και τους καλοκαιρινούς μήνες. Η εξομάλυνση αυτή των διαφορών των τιμών συνεπάγεται και λιγότερο έντονες μεταβολές στην καμπύλη διάρκειας, άρα και ομαλότερη μορφή. Η μορφή

επομένως των παραπάνω καμπύλων κρίνεται λογική, αφού γίνεται ομαλότερη καθώς μειώνεται η ενεργειακή ζήτηση από την περίπτωση 1 στην περίπτωση 3.

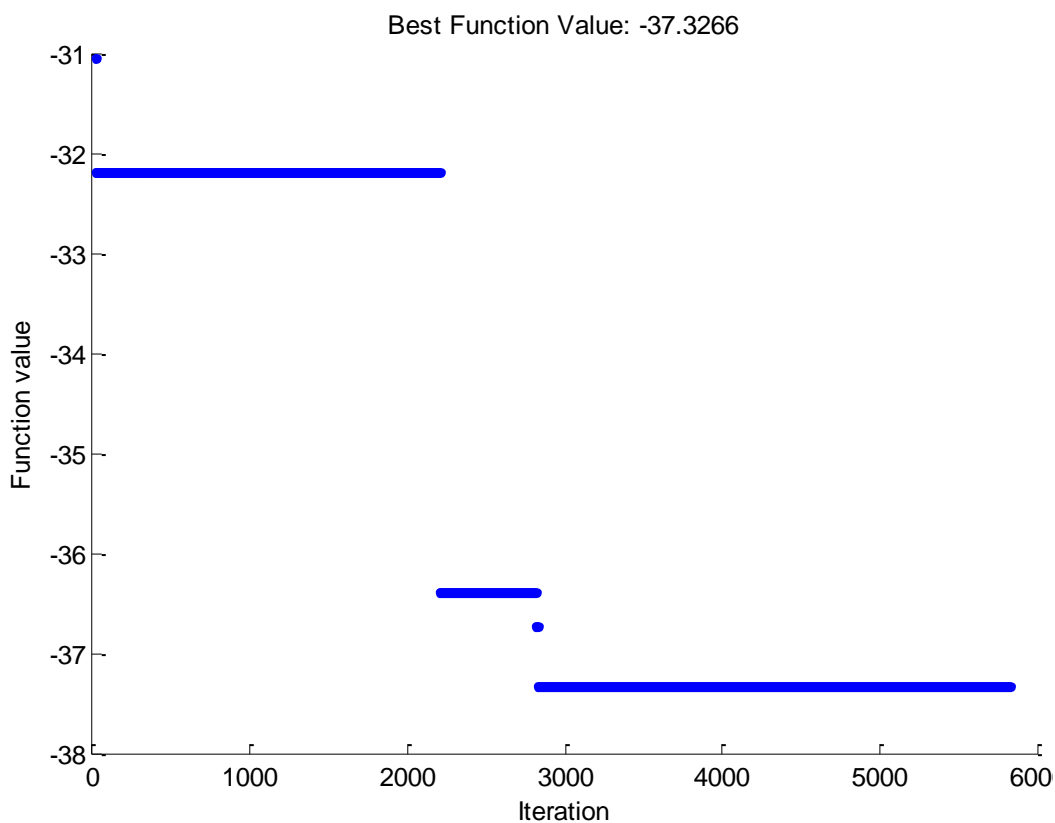
Όσον αφορά στην ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας, παρατηρείται ότι οι τιμές που προέκυψαν στις τις τρεις περιπτώσεις βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, καθώς η συνολική παραγωγή στην περίπτωση 1 είναι 795.340 GWh, στην περίπτωση 2 805.760 GWh και στην περίπτωση 3 812.470 GWh. Οι διαφορές δηλαδή είναι αρκετά μικρές. Θα πρέπει παρόλα αυτά να ληφθεί υπόψιν το γεγονός ότι οι συνθετικές χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις δημιουργήθηκαν από τη συνολική περίοδο 1968-1995 για την οποία υπήρχαν δεδομένα και όχι μόνο από την περίοδο 1991-1995. Η περίοδος όμως 1968-1995 είναι στο σύνολο της πολύ πιο υγρή από την περίοδο 1991-1995, η οποία περιλαμβάνει τα ξηρότερα έτη. Έτσι, και λόγω της ιδιότητας του λογισμικού «Κασταλία» να διατηρεί τα χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών, οι χρονοσειρές που προέκυψαν παρουσίαζαν μέσο όρο βροχοπτώσεων αρκετά μεγαλύτερο από αυτόν των ετών 1991-1995. Οι περισσότερες βροχοπτώσεις συνεπάγονται και μεγαλύτερη διαθέσιμη ποσότητα νερού, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ταυτόχρονη ικανοποίηση των διαφόρων στόχων σε μεγαλύτερο βαθμό, κι έτσι να μειώνεται η επιρροή των κανόνων λειτουργίας του υδροσυστήματος, δηλαδή των τιμών ενεργειακής ζήτησης. Το σύστημα δηλαδή γίνεται πιο «ανεξάρτητο» ως προς την τιμή των ενεργειακών στόχων, άρα και πιο ανεξάρτητο ως προς την ενεργειακή παραγωγή. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σε περίπτωση που οι συνθετικές χρονοσειρές είχαν δημιουργηθεί με βάση μόνο τα δεδομένα της περιόδου 1991-1995, τα αποτελέσματα ενδέχεται να ήταν διαφορετικά κι οι ποσότητες της παραγόμενης ενέργειας να είχαν μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ τους στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Τέλος, αυτό που διαπιστώνεται από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι η εγγυημένη ενέργεια του υδροσυστήματος αυξάνεται καθώς οι απαιτήσεις ενέργειας μειώνονται, με τη μεγαλύτερη τιμή να εμφανίζεται στην περίπτωση 3 και τη μικρότερη στην περίπτωση 1.

7.4 Αποτελέσματα Σεναρίου Β

Για την συγκεκριμένη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης ανόπτησης και ο αριθμός των επαναλήψεων ορίστηκε σε 8000.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η διακύμανση της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.



Σχ.7-12: Διακύμανση καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των επαναλήψεων.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μένει σταθερή για αρκετά μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, και οι μεταβολές που πραγματοποιούνται είναι αρκετά απότομες. Η καλύτερη τιμή εντοπίζεται σχετικά γρήγορα, πριν τις 3000 επαναλήψεις και είναι ίση με 37,33GWh. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει, όπως προαναφέρθηκε, την ελάχιστη παραγόμενη ενέργεια, αυτή δηλαδή που παράγεται από το υδροσύστημα πάντα, ακόμα και κάτω από τις δυσμενέστερες υδρολογικές συνθήκες. Η βελτιστοποίηση έγινε σε μηνιαία βάση, επομένως κι η τιμή αυτή αφορά στην ενέργεια που παράγεται σε ένα μήνα. Οι τιμές των ενεργειακών στόχων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίν. 7-6: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης που προέκυψαν.

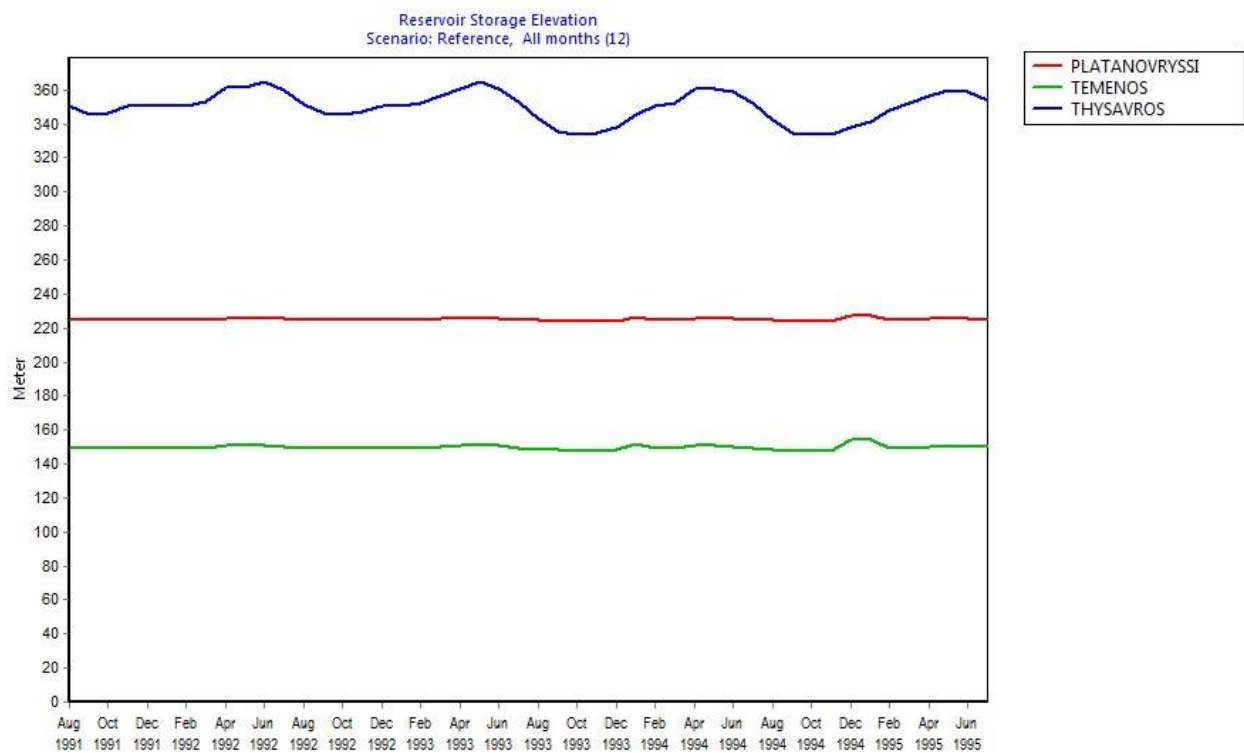
	ΧΕΙΜΩΝΑΣ			ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ		
	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ
GWh	24.36	9.34	1.06	5.96	2.53	0.84

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι και στα τρία φράγματα οι τιμές που προέκυψαν για τις ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του καλοκαιριού.

Το χειμώνα, λόγω της απουσίας των αρδευτικών απαιτήσεων, η ποσότητα νερού που πρέπει να απελευθερωθεί και να φτάσει στα κατάντη είναι πολύ μικρή κι αφορά μόνο στην κάλυψη της οικολογικής παροχής. Το χειμώνα επίσης είναι πολύ μεγαλύτερες οι απορροές, λόγω των εντονότερων βροχοπτώσεων. Η ποσότητα που περνά από τους στροβίλους, ανεξαρτήτως των ενεργειακών απαιτήσεων που έχουν τεθεί, είναι ίση με αυτήν που προορίζεται για την περιβαλλοντική παροχή συν όποια ποσότητα νερού ξεπεράσει την Α.Σ.Α των ταμιευτήρων και πάει να υπερχειλίσει. Εφόσον λοιπόν είναι περιορισμένη η ποσότητα νερού που περνά από τους στροβίλους, αντίστοιχα περιορισμένη είναι κι η παραγωγή ενέργειας. Τα αποθέματα νερού όμως το χειμώνα είναι μεγάλα, λόγω της αυξημένης απορροής, και υπάρχει δυνατότητα για μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, το σύστημα πρέπει να «αναγκάζεται» να απελευθερώνει μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των ενεργειακών στόχων, οι οποίοι παίρνοντας μεγαλύτερες τιμές ευνοούν την παραγωγή περισσότερης ενέργειας.

Το καλοκαίρι αντίθετα, λόγω και της ύπαρξης των αρδευτικών απαιτήσεων, οι ποσότητες νερού που περνούν από τους στροβίλους και πηγαίνουν προς τα κατάντη είναι αρκετά μεγάλες. Παράγεται επομένως, ανεξαρτήτως της τιμής των ενεργειακών στόχων, μία σχετικώς μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Παράλληλα τα διαθέσιμα αποθέματα νερού είναι μειωμένα, λόγω των λιγότερων βροχοπτώσεων. Οι ενεργειακές απαιτήσεις σε αυτήν την περίπτωση έχουν μικρές τιμές, καθώς αντιπροσωπεύουν την παραπάνω ενέργεια που μπορεί να παραχθεί, πέραν αυτής που παράγεται από το νερό των αρδεύσεων. Επειδή όμως τα αποθέματα είναι λίγα, αντίστοιχα μικρές θα είναι κι οι δυνατότητες παραγωγής περαιτέρω ενέργειας, άρα και οι τιμές των ενεργειακών στόχων.

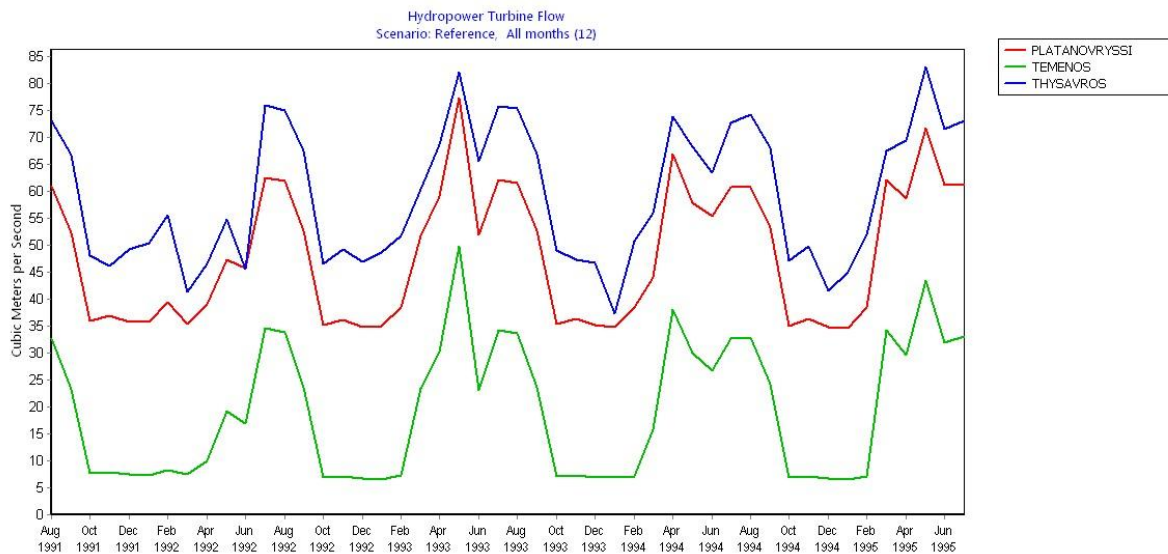
Η λειτουργία του υδροσυστήματος φαίνεται καλύτερα παρατηρώντας το παρακάτω διάγραμμα της διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων συναρτήσει του χρόνου.



Σχ. 7-13: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991-1995.

Παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας του Θησαυρού, που είναι και ο σημαντικότερος, υφίσταται αρκετές διακυμάνσεις. Συγκεκριμένα, το χειμώνα η στάθμη ανεβαίνει, χωρίς όμως ποτέ να φτάνει την Α.Σ.Α. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα φροντίζει να κρατήσει όσο νερό απαιτείται έτσι ώστε να μπορεί το καλοκαίρι να ικανοποιήσει πλήρως τις αρδευτικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις, και από κει και πέρα, όποια ποσότητα νερού περισσεύει απελευθερώνεται προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας. Οι ενεργειακές απαιτήσεις δηλαδή του χειμώνα αντιπροσωπεύουν τη μέγιστη δυνατή απελευθέρωση νερού, έτσι ώστε να μην προκαλείται πρόβλημα στην κάλυψη των θερινών αναγκών. Το καλοκαίρι αντίθετα, η στάθμη του ταμιευτήρα κατεβαίνει. Αυτό συμβαίνει λόγω της διάθεσης μεγάλων ποσοτήτων προς τα κατάντη. Η στάθμη, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, φτάνει σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Δεν υπάρχουν επομένως μεγάλες δυνατότητες για περαιτέρω απελευθέρωση νερού, γι αυτό κι οι ενεργειακοί στόχοι είναι αρκετά μικροί.

Επίσης παρατίθεται και το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει την παροχή (m^3/s) που περνά από τους τρεις υδροστροβίλους του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα.



Σχ. 7-14: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους

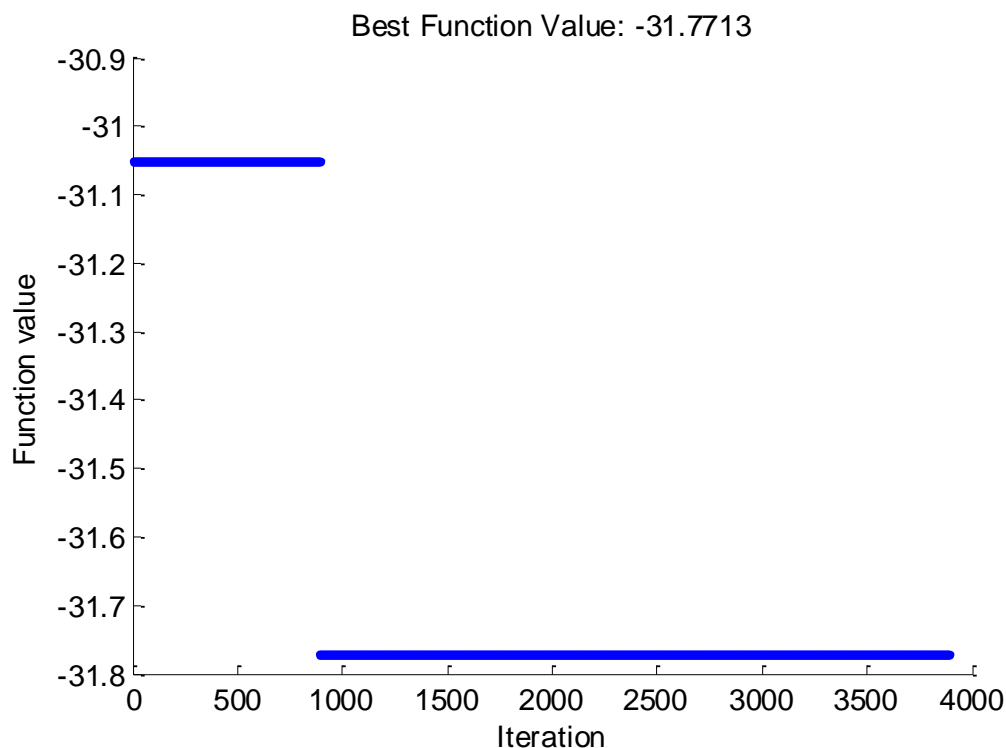
Όπως αναμενόταν, οι παροχές που περνούν από τους στροβίλους το χειμώνα είναι μικρές και σχετικά σταθερές (κυρίως στην Πλατανόβρυση και στο Τέμενος) ($40-45 \text{ m}^3/\text{s}$ στο Θησαυρό, $35 \text{ m}^3/\text{s}$ στην Πλατανόβρυση και $5 \text{ m}^3/\text{s}$ στο Τέμενος), ενώ το καλοκαίρι αυξάνονται σημαντικά ($75-80 \text{ m}^3/\text{s}$ στο Θησαυρό, $60-70 \text{ m}^3/\text{s}$ στην Πλατανόβρυση και $35 \text{ m}^3/\text{s}$ στο Τέμενος). Αυτό είναι λογικό, αφού λόγω των αρδευτικών απαιτήσεων η απελευθέρωση νερού το καλοκαίρι είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και πάλι οι συνθετικές χρονοσειρές των 1000 ετών, προκειμένου να εξετασθεί η απόκριση του συστήματος σε ένα πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να ελεγχθεί το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης για την τιμή της πρωτεύουσας ενέργειας.

Έτσι, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του υδροσυστήματος, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για τα 1000 έτη και θέτοντας ως ενεργειακούς στόχους τις τιμές που προέκυψαν παραπάνω. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι η τιμή που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση είναι αρκετά αξιόπιστη, καθώς από το σύνολο των 12000 μηνών μόνο στους 127 παρουσιάζονται μικρότερες τιμές ενέργειας από τις 37.33 GWh , περίπου δηλαδή στο 1% της συνολικής περιόδου. Το αποτέλεσμα επομένως της βελτιστοποίησης κρίνεται πολύ ικανοποιητικό.

7.5 Αποτελέσματα Σεναρίου Γ

Και σε αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των επαναλήψεων ορίστηκε ίσος με 8000. Η διακύμανση της καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Σχ. 7-15: Διακύμανση καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των επαναλήψεων

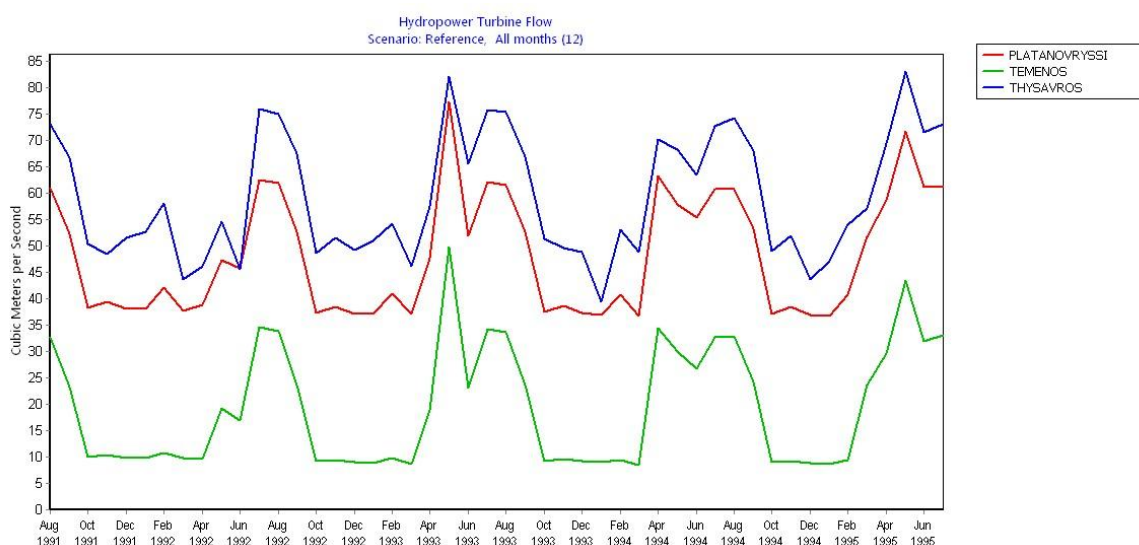
Όπως φαίνεται και παραπάνω, η καλύτερη τιμή της αντικειμενική συνάρτησης εντοπίζεται πολύ γρήγορα, δηλαδή περίπου στις 900 επαναλήψεις και είναι ίση με 31,77GWh. Η βελτιστοποίηση έγινε σε μηνιαία βάση, επομένως κι η τιμή αυτή αφορά στην ενέργεια που παράγεται σε ένα μήνα. Οι τιμές των ενεργειακών στόχων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίν. 7-7: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης που προέκυψαν

	ΧΕΙΜΩΝΑΣ			ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ		
	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΤΕΜΕΝΟΣ
GWh	23.453	4.129	1.386	16.593	2.325	0.153

Τα αποτελέσματα ακολουθούν σε γενικές γραμμές την ίδια πορεία με τα αποτελέσματα του σεναρίου Β, με τις τιμές των ενεργειακών στόχων να είναι μεγαλύτερες το χειμώνα και μικρότερες το καλοκαίρι για τον κάθε σταθμό. Σε σύγκριση με τις τιμές που προέκυψαν στο προηγούμενο σενάριο, η συσχέτιση τους δεν είναι σταθερή, καθώς κάποιες τιμές προέκυψαν μικρότερες από τις αντίστοιχες του σεναρίου Β ενώ κάποιες άλλες μεγαλύτερες. Επίσης παρατίθεται και το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει την παροχή (m^3/s) που περνά από τους τρεις υδροστροβίλους του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα.

Παρακάτω παρατίθεται και το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει την παροχή (m^3/s) που περνά από τους τρεις υδροστροβίλους του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα.

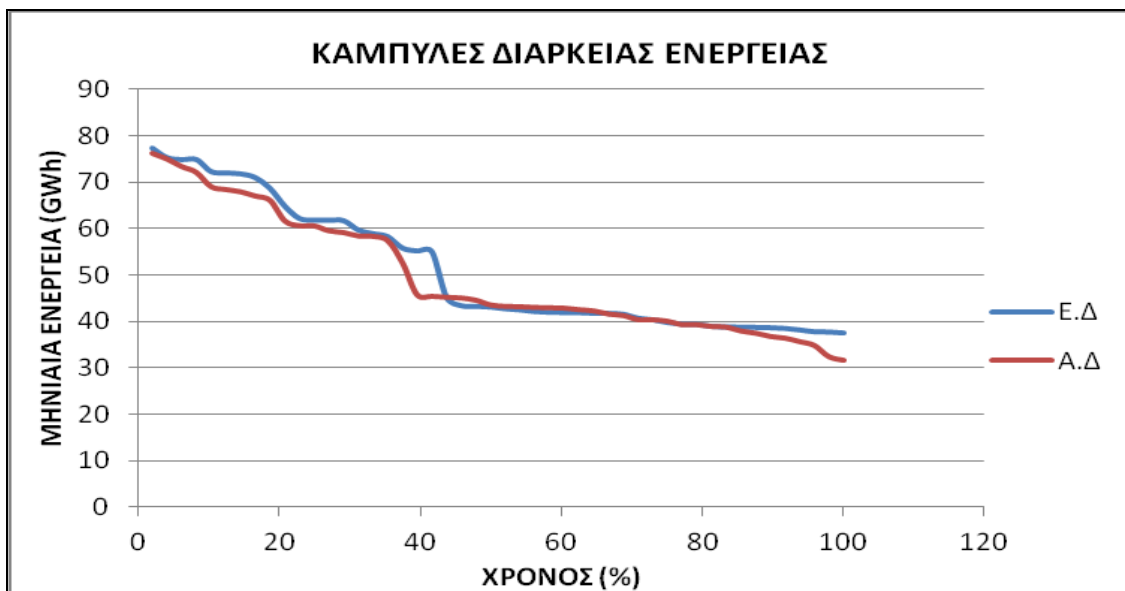


Σχ. 7-16: Διάγραμμα μηνιαίας παροχής νερού που περνά από τους υδροστροβίλους

Οι τιμές των παροχών που περνούν από τους στροβίλους ακολουθούν γενικά την ίδια πορεία με τις αντίστοιχες τιμές του σεναρίου Β, δηλαδή το χειμώνα είναι μικρές και σχετικά σταθερές (κυρίως στην Πλατανόβρυση και στο Τέμενος) ($45-50 m^3/s$ στο Θησαυρό, $38 m^3/s$ στην Πλατανόβρυση και $9-10 m^3/s$ στο Τέμενος), ενώ το καλοκαίρι αυξάνονται σημαντικά ($75-80 m^3/s$ στο Θησαυρό, $60-70 m^3/s$ στην Πλατανόβρυση και $35 m^3/s$ στο Τέμενος). Η μόνη διαφορά σε σχέση με το σενάριο Β εντοπίζεται στις παροχές του χειμώνα, οι οποίες σε αυτήν την περίπτωση είναι λίγο μεγαλύτερες.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η ανεξάρτητη διαχείριση των υδροηλεκτρικών σταθμών επιφέρει δυσμενέστερα αποτελέσματα ως προς την ποσότητα της εγγυημένης ενέργειας που μπορεί να παράγεται σε σχέση με την περίπτωση όπου το υδροσύστημα αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο σύνολο. Συγκεκριμένα, η πρωτεύουσα ενέργεια του υδροσυστήματος στην περίπτωση της ενιαίας διαχείρισης προέκυψε ίση με 37,33 GWh ενώ όταν οι σταθμοί αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητες μονάδες, η εγγυημένη ενέργεια φτάνει τις 31,77 GWh. Αντίστοιχη είναι η και σχέση μεταξύ της πρωτεύουσας ενέργειας που παράγεται από τον κάθε σταθμό για τα δύο σενάρια που εξετάστηκαν. Η πρωτεύουσα ενέργεια βάσει του πρώτου σεναρίου είναι 24.36 GWh για το Θησαυρό, 12.18 GWh για την Πλατανόβρυση και για 0.84 GWh το Τέμενος, ενώ στο δεύτερο σενάριο παράγονται 19.9 GWh στο Θησαυρό, 11.3 GWh στην Πλατανόβρυση και 0.49 GWh στο Τέμενος. Η ενιαία διαχείριση επομένως του υδροσυστήματος δίνει ευνοϊκότερα αποτελέσματα τόσο σε επίπεδο ανεξάρτητης λειτουργίας του κάθε σταθμού όσο και συνολικά.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει την καμπύλη διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας στην περίπτωση της ενιαίας διαχείρισης (Ε.Δ) και στην περίπτωση της ανεξάρτητης διαχείρισης (Α.Δ).



Σχ. 7-17: Καμπύλες διάρκειας της ενέργειας για τις περιπτώσεις της ενιαίας και της ανεξάρτητης ενεργειακής διαχείρισης του υδροσυστήματος

Αυτό που παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι το ενιαίο μοντέλο ενεργειακής διαχείρισης του υδροσυστήματος, εκτός από τη μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια, οδηγεί γενικότερα σε υψηλότερες τιμές ενέργειας για τα μεγαλύτερα ποσοστά του χρόνου. Η πολιτική της ενιαίας διαχείρισης επομένως είναι αποδοτικότερη όχι μόνο στο θέμα της πρωτεύουσας ενέργειας, αλλά γενικά της παραγόμενης ενέργειας.

Τέλος, η αντιμετώπιση κι η διαχείριση του υδροσυστήματος ως ενιαίο σύνολο έχει καλύτερη απόδοση και στο θέμα της κάλυψης των αρδευτικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων, αφού εγγυάται την πλήρη κάλυψη όλων των αναγκών (τιμή αξιοπιστίας 100%), σε αντίθεση με την περίπτωση της ανεξάρτητης διαχείρισης όπου η αξιοπιστία φτάνει την τιμή 95%, υπάρχουν δηλαδή κάποιες φορές που το σύστημα δεν μπορεί να ικανοποιήσει πλήρως τις ανάγκες του.

8 Συμπεράσματα και Προτάσεις

8.1 Γενικά Συμπεράσματα

Όσον αφορά στα μαθηματικά και υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Το WEAP21 είναι ένα ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη εργαλείο, η χρήση του οποίου επιτρέπει την εύκολη προσομοίωση των υδροσυστημάτων και τη δημιουργία πολλών και διαφορετικών υποθετικών σεναρίων.
- Το WEAP21 παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας και καθορισμού νέων μεταβλητών, πέραν των υπαρχουσών, βοηθώντας τον έτσι να επεκτείνει τις δυνατότητες του υπάρχοντος μοντέλου και να απεικονίσει με πιο ρεαλιστικό τρόπο τις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του υδροσυστήματος.
- Βασικό μειονέκτημα του μοντέλου WEAP21 είναι οι μεγάλοι χρόνοι προσομοίωσης που απαιτούνται. Προκειμένου να προσομοιωθούν οι περίοδοι 1973-1977 και 1991-1995 και να προκύψουν τα αποτελέσματα, χρειάζονταν περίπου 7 δευτερόλεπτα , ενώ η προσομοίωση της περιόδου 1968- 1982 απαιτούσε περίπου 15 δευτερόλεπτα. Αυτό αποτελούσε σημαντικό πρόβλημα στη βαθμονόμηση αλλά ακόμα περισσότερο στη βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος, καθώς η ολοκλήρωση τους που απαιτούσε τη συνδυασμένη χρήση του WEAP και των αλγορίθμων βελτιστοποίησης του Optimization Toolbox του MATLAB χρειαζόταν για να ολοκληρωθεί περίπου 2,5 και 4 ημέρες αντίστοιχα. Για αυτό τον λόγο δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και συνθετικές χρονοσειρές πολλών ετών.
- Η χρήση γραμμικού προγραμματισμού από το WEAP21 για την επίλυση των μοντέλων κι η απουσία ενσωματωμένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης στο πρόγραμμα εμποδίζει την διεξαγωγή βελτιστοποιήσεων και καθιστά αναγκαία τη συνεργασία του WEAP21 με άλλα λογισμικά και εργαλεία προκειμένου να βρίσκονται οι βέλτιστες λύσεις στο εκάστοτε σενάριο.
- Η συνεργασία του WEAP21 με το MATLAB δίνει στο χρήστη περισσότερες δυνατότητες ανάλυσης των υδροσυστημάτων και υπολογισμού των διαφόρων στοιχείων και χαρακτηριστικών που σχετίζονται με αυτά, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις διαδικασίες της βελτιστοποίησης.

8.2 Συμπεράσματα από την Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

Μετά από την ανάλυση και τη σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα που αφορούν στο υδροσύστημα του ποταμού Νέστου:

- Το υδροσύστημα έχει τη δυνατότητα να καλύπτει πλήρως τις αρδευτικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις του, εφόσον επιλεγθεί το σωστό μοντέλο διαχείρισης, δηλαδή οι κατάλληλες λύσεις από το σύνολο λύσεων Pareto.
- Η μεταβολή της ενεργειακής ζήτησης από τους ΥΗΣ του υδροσυστήματος επιδρά σημαντικά στην κατανομή της παραγόμενης ενέργειας στο χρόνο. Μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων συνεπάγεται πιο ομοιόμορφη κατανομή της συνολικής ενέργειας στη διάρκεια της χρονικής περιόδου και άρα πιο σταθερή διάθεση της στον διαχειριστή του συστήματος.
- Η μείωση της ενεργειακής ζήτησης από τους ΥΗΣ οδηγεί στην αύξηση της πρωτεύουσας ενέργειας του υδροσυστήματος. Στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν με τη χρήση των συνθετικών χρονοσειρών, η πρωτεύουσα ενέργεια αυξήθηκε από τις 22 GWh στις 28 GWh και μετά στις 37 GWh καθώς η ζήτηση ενέργειας μειωνόταν.
- Η εφαρμογή της Ελληνο-Βουλγαρικής συμφωνίας θα προκαλέσει προβλήματα στην Ελλάδα καθώς θα υπάρξει αδυναμία κάλυψης των απαιτήσεων του υδροσυστήματος, αλλά και σημαντική μείωση των κερδών από την παραγωγή ενέργειας.
- Η βέλτιστη διαχείριση του υδροσυστήματος προϋποθέτει σε κάθε χρονικό βήμα την άντληση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας νερού από τα αντλητικά συστήματα, καθώς παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι ποσότητες νερού που αντλούνται κι από τους δύο σταθμούς είναι χρονικά σταθερές και ποσοτικά ίσες με την παροχτευτική ικανότητα των αντλιών.
- Η ελάχιστη εξασφαλισμένη ενέργεια από το υδροσύστημα ανέρχεται περίπου στις 37 GWh. Η τιμή αυτή προέκυψε από τη βελτιστοποίηση κι επαληθεύτηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη χρήση των συνθετικών χρονοσειρών.
- Η διαχείριση του υδροσυστήματος όσον αφορά στην ενεργειακή παραγωγή θα πρέπει να είναι ενιαία, αφού έτσι επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, ενώ εμφανίζεται και υψηλότερη πρωτεύουσα ενέργεια. Παράλληλα επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός κάλυψης αρδευτικών και περιβαλλοντικών αναγκών.

8.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση του υδροσυστήματος του Νέστου, οι οποίες αφορούν στην τροποποίηση της παρούσας εργασίας και στην περαιτέρω ανάπτυξη της:

- Επανάληψη όλων των βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν, με χρήση μεγάλου μήκους ιστορικών ή συνθετικών χρονοσειρών, με χρήση πιθανώς parallel programming για τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης.
- Διεξαγωγή προσομοίωσης, βαθμονόμησης και βελτιστοποίησης του υδροσυστήματος του Νέστου με χρήση άλλου λογισμικού, προκειμένου να γίνει σύγκριση των εξαγόμενων από τα δύο προγράμματα αποτελεσμάτων.
- Επέκταση του μοντέλου στη Βουλγαρική λεκάνη απορροής, με σκοπό την πιο ολοκληρωμένη αναπαράσταση του υδροσυστήματος του ποταμού Μέστα-Νέστου και την διερεύνηση σεναρίων και από τη Βουλγαρική πλευρά.
- Πλήρης μελέτη σκοπιμότητας των υδροηλεκτρικών έργων του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη εκτός από τα οικονομικά στοιχεία της ενεργειακής παραγωγής και τα κόστη επένδυσης (κεφαλαίου κλπ.) αλλά και τις οικονομικές παραμέτρους της άρδευσης, προκειμένου να γίνει μία πλήρης οικονομική ανάλυση.

Βιβλιογραφία

Νομοθεσία

1. ΟΔΗΓΙΑ 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων (Φ.Ε.Κ I 327, 22/12/2000).

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Γεωργόπουλος Ε., Λυκοθανάσης Σ., Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους, Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πάτρα 1999.
2. Ελευθεριάδου Ε. και Μυλόπουλος Ι.Α, «Εξομάλυνση αντιθέσεων και συγκρούσεων στη διαχείριση διεθνών υδάτων: εφαρμογή στη λεκάνη του Νέστου», ΤΕΕ, Αθήνα, 2005.
3. Ευστρατιάδης Α., Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων. Διδακτορική διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
4. Ευστρατιάδης Α., Καραβοκυρός Γ., Κουτσογιάννης Δ., «Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ»», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
5. Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση, Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος Βελτιστοποίηση Συστημάτων Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
6. Κατσιγιάννης Ι.Α «Βελτιστοποίηση Δομής και Οικονομική Αξιολόγηση Απομονωμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας που βασίζεται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας». Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Τομέας Συστημάτων Παραγωγής, Χανιά, 2008.
7. Κουμινάκης Γ.Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στην Εξαγωγή Κτιριακών Εγκαταστάσεων από Τηλεσκοπικές Απεικονίσεις, με βάση τη μεθοδολογία του αλγορίθμου Mumford-Shah. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.

-
8. Κουτσογιάννης Δ., Από το μεμονωμένο υδραυλικό έργο στο υδροσύστημα: το παράδειγμα του υδρολογικού σχεδιασμού των έργων Ευήνου, Πανελλήνιο Συνέδριο των Τμημάτων Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, 1997.
 9. Κουτσογιάννης Δ., Σημειώσεις για το μάθημα Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
 10. Μακρόπουλος Χ., Σημειώσεις για το μάθημα Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
 11. Μακρόπουλος Χ. και Κουτσογιάννης Δ., Ο υδρολογικός κύκλος. Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ.
 12. Μαμάσης Ν. και Στεφανάκος Ι. Σημειώσεις για το μάθημα Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
 13. Μιμίκου Μ.Α, Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 3^η έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.
 14. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας, Προώθηση ολοκληρωμένης διαχείρισης διασυνοριακών υδάτων σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ.
 15. Μυλόπουλος Ι., Κολοκυθά Ε., Παπαχρήστου Ε., Νταρακάς Ε., «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στη Διακρατική Λεκάνη του ποταμού Νέστου», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Helesco 2003, Πρακτικά Συνεδρίου.
 16. Παπαδάς Κ., «Ιζηματολογικές διεργασίες της κύριας κοίτης και των παραπόταμων του ποταμού Νέστου στα κατάντη του φράγματος της Πλατανόβρυσης». Διατριβή ειδίκευσης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβάλλοντικής Γεωγραφίας, Θεσσαλονίκη, 2010.
 17. Παπαδουλάκης Β., «Ορθολογική Διαχείριση Υδατικών Πόρων για την προστασία του Περιβάλλοντος και την αειφορία.
 18. Παπαμιχαήλ Δ., «Ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό στα Αρδευτικά Δίκτυα του Νομού Δράμας-Βελτίωση των Αρδευτικών Δικτύων-Προβλήματα-Προοπτικές», Αναπτυξιακό Συνέδριο Νομού Δράμας, 2006. (<http://www.drama.gr/anaptyxiako/>)
 19. Παπαντώνης Δ.Ε, Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2^η έκδοση, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2008.
 20. Παπαντώνης Δ., Νέες προοπτικές για την ανάπτυξη της Ανλησοταμίευσης στην Ελλάδα. Τεχνολογία και τεχνολογικοί περιορισμοί, ΤΕΕ, Ιωάννινα, 2009.

-
21. Σκουλικάρης Χ., «Μαθηματική προσομοίωση για τη βιώσιμη διαχείριση έργων υδατικών πόρων σε κλίμακα λεκάνης απορροής: η περίπτωση του ποταμού Νέστου». Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, 2008.
 22. Στεφανάκος Ι., «Το υδροδυναμικό της Ελλάδας», σημειώσεις για το μάθημα Υδροηλεκτρικά Έργα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
 23. Τσίρα Δ.Π. Διερεύνηση δυνατότητας προσθήκης αντλητικών συγκροτημάτων σε υπάρχοντα εν σειρά υδροηλεκτρικά έργα του ποτάμιου συγκροτήματος Νέστου. Μεταπτυχιακή εργασία για το Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
 24. Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων», Υδροηλεκτρική Παραγωγή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα, 2009.
 25. Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωργίας. Οι υδατικές ανάγκες των αρδευόμενων καλλιεργειών, Λευκωσία, Κύπρος, Έκδοση 9/2010.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Buede D.M., The Engineering Design of Systems, Models and Methods (chapter 13), 2nd edition, 2009.
2. British Columbia, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries “Crop Coefficients for use in Irrigation Scheduling”, 2001.
3. Druzdel M.J and Flynn R.R, “Decision Support Systems”, Decision Systems Laboratory, School of Information Sciences and Intelligent Systems Program, University of Pittsburgh, 2002.
4. Kirkpatrick, S., Gelatt C. Jr., Vecchi, M., Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol. 220, pp. 671-680, 1983.
5. MATLAB, 2009 “Optimization Toolbox™ User’s Guide”, The Mathworks, Inc.
6. Mitchell M., “An Introduction to Genetic Algorithms”, A Bradford Book The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
7. Mylopoulos Y.A, Eleftheriadou E., Kampragou E. The transboundary catchment of River Nestos and the bilateral agreement between Greece and Bulgaria, Aristotle University of Thessaloniki.

-
8. SEI, WEAP (Water Evaluation And Planning): User Guide For WEAP21. Stockholm Enviromental Institute, 2010.
 9. Weise T., "Global Optimization Algorithms: Theory and Application", 2nd edition, 2009.
 10. Multi-criteria analysis: a manual. Department for communities and Local Government, January 2009.

Ιστοσελίδες

1. <http://ec.europa.eu/>

Επίσημη σελίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

2. <http://www.ypeka.gr/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.

3. <http://www.cs.unipi.gr/>

Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πειραιά.