



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο
λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ – Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας**



Διπλωματική εργασία

Δημήτρης Μπουζιώτας

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ – Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας

Διπλωματική εργασία

Δημήτρης Μπουζιώτας

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

And it ought to be remembered that there is nothing more difficult to take in hand, more perilous to conduct, or more uncertain of success, than to take the lead in the introduction of a new order of things. Because the innovator has for enemies all those who have done well under the old conditions, and lukewarm defenders in those who may do well under the new. This coolness arises partly from fear of the opponents, who have the laws on their side, and partly from the incredulity of men, who do not readily believe in new things until they have had a long experience with them. Thus it happens that whenever those who are hostile have the opportunity to attack they do it like partisans, whilst the others defend lukewarmly....

Niccolo Machiavelli (1513)

Οι εικόνες του εξωφύλλου είναι φωτογραφίες του συγγραφέα από εκπαιδευτικές εκδρομές του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος στα έργα του Αχελώου. Από αριστερά και κατά την ωρολογιακή φορά διακρίνονται: Άποψη του φράγματος Κρεμαστών, η εικόνα κατάντη του Καστρακίου από τον υπερχειλιστή και άποψη του φράγματος Μεσοχώρας.

Στη μνήμη του παππού μου Κώστα και της γιαγιάς μου Στέλλας,
η οποία είχε πρώτη την υπομονή να μου μάθει την αλφάβητο
ανοίγοντάς μου το δρόμο στη γνώση

Ευχαριστίες

Οι τελευταίες αυτές γραμμές της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτούν το τέλος μίας πολύμηνης προσπάθειας, αλλά και γενικότερα το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αυτοί οι στόχοι δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν χωρίς τη συμβολή, καθοδήγηση και στήριξη ορισμένων ανθρώπων που βρέθηκαν δίπλα μου.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και επιβλέποντά μου, Δημήτρη Κουτσογιάννη, ο οποίος παρά το ιδιαίτερα απαιτητικό του πρόγραμμα είχε την όρεξη να αφιερώσει πολλές ώρες βοηθώντας με σε οποιοδήποτε ζήτημα ανέκυψε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Οι ευχαριστίες απευθύνονται και στο γενικότερο έργο που επιτελεί, καθώς ανήκει σε λαμπρή μερίδα διδασκόντων η οποία, παρά τα σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει στο ελληνικό Πανεπιστήμιο, κατορθώνει και μεταδίδει γνώση αλλά, κυρίως, ήθος στους φοιτητές. Το πάθος του για το λειτούργημά του αλλά και ο ιδιαίζων τρόπος σκέψης του έχουν επηρεάσει σημαντικά τόσο τα επιστημονικά μου ενδιαφέροντα όσο και τον τρόπο με τον οποίο τα προσεγγίζω και αυτό ίσως είναι το μεγαλύτερο όφελος που έχω αποκομίσει από τη συνεργασία μαζί του τα τελευταία χρόνια.

Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ανδρέα Ευστρατιάδη, μέλος της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ, για το πηγαίο ενδιαφέρον του και τη συνεχή καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Η ορθή εξέλιξη και ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς το μεγάλο εύρος θεωρητικών και τεχνικών γνώσεων που μου προσέφερε, ενώ η συνεχής του στήριξη ήταν ιδιαίτερα σημαντική τις στιγμές που η συνέχιση της εργασίας φάνταζε αδύνατη.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Νίκο Μαμάση για τη βοήθειά του στην παροχή δεδομένων που ήταν πολύτιμα κατά τα αρχικά στάδια συλλογής και επεξεργασίας της πρωτογενούς πληροφορίας, καθώς και για τη μετάδοση γνώσεων σχετικά με τα έργα εκτροπής στην Ελλάδα. Ευχαριστώ επίσης το Γιώργο Καραβοκυρό για τη συνδρομή του στη διόρθωση ενός αριθμού bugs που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της τριβής με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον κοντινό μου φίλο Δημοσθένη Τσακνιά, με τον οποίο μας συνδέει κοινή πορεία στη σχολή και ένα πλούσιο ιστορικό συνεργασίας, τόσο για το συνεχές ενδιαφέρον του όσο και για τις καίριες παρατηρήσεις που μου έκανε επί του κειμένου της εργασίας.

Πέραν της βοήθειας κατά τη συγγραφή της διπλωματικής, οφείλω να ευχαριστήσω τους καλούς μου φίλους από τη συντονιστική ομάδα του forum της σχολής www.mqn.gr για την παρέα και τις όμορφες στιγμές που ζήσαμε μαζί. Θεωρώ ότι η πολυετής, κοινή μας πορεία συνδιαμόρφωσης και συνδιαχείρισης του site – καρπός ενός συλλογικού κόπου που πηγάζει

από την ανάγκη για τη βελτίωση των πραγμάτων στη σχολή – ήταν μία από τις πιο πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα τα φοιτητικά μου χρόνια.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να σταθώ και στα πρόσωπα που με στηρίζουν με την εμπιστοσύνη τους όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Στέφανο και Ιουλία, για την αμέριστη συμπαράσταση και την αγάπη τους και την Ήρα, για την ηθική της υποστήριξη και την υπομονή της.

Δημήτρης Μπουζιώτας

Οκτώβριος 2012

Περιεχόμενα

| | |
|--|---------------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | III |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | V |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | VII |
| ABSTRACT | VIII |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | - 1 - |
| 1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ..... | - 1 - |
| 1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | - 2 - |
| 1.3. ΣΗΜΕΙΑ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ..... | - 2 - |
| 1.4. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ | - 3 - |
| 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ | - 5 - |
| 2.1. ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ | - 5 - |
| 2.2. ΟΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ..... | - 8 - |
| 2.3. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | - 9 - |
| 2.4. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ | - 11 - |
| 2.5. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ..... | - 13 - |
| 2.6. ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ..... | - 15 - |
| 2.7. Η ΑΝΑΓΚΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ | - 16 - |
| 2.8. ΤΟ ΓΕΝΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ | - 18 - |
| 3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ | - 23 - |
| 3.1. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ | - 23 - |
| 3.2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ HURST-KOLMOGOROV | - 25 - |
| 3.3. ΓΕΝΝΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ..... | - 27 - |
| 4. ΤΟ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ – ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ | - 31 - |
| 4.1. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ..... | - 31 - |
| 4.2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ | - 33 - |
| 4.3. Η ΕΚΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ – ΤΟ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ – ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ..... | - 36 - |
| 4.4. ΠΕΡΙ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ ΕΚΤΡΟΠΗΣ | - 38 - |
| 4.5. ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ | - 40 - |
| 5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ | - 43 - |
| 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 43 - |
| 5.2. ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ | - 44 - |
| 5.3. ΤΟ ΣΚΕΛΟΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ | - 53 - |

| | |
|--|----------------|
| 6. ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ | - 57 - |
| 6.1. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ | - 57 - |
| 6.2. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ - ΤΑΜΙΕΥΣΗΣ- 61 | |
| 6.3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | - 62 - |
| 6.4. ΓΕΝΝΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ..... | - 66 - |
| 6.5. ΖΗΤΗΣΕΙΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ | - 69 - |
| 6.6. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΣΕΝΑΡΙΑ | - 72 - |
| 6.7. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΑΝΤΛΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ | - 81 - |
| 6.8. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | - 82 - |
| 6.9. ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | - 84 - |
| 7. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ..... | - 87 - |
| 7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | - 87 - |
| 7.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | - 87 - |
| 7.3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΦΕΛΟΥΣ..... | - 89 - |
| 7.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ | - 93 - |
| 7.5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ | - 104 - |
| 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | - 109 - |
| 8.1. ΤΟ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΡΟΗΣ ΚΑΤΑΝΤΗ ΤΟΥ ΣΤΡΑΤΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΟΥ ΚΑΤΩ ΑΧΕΛΩΟΥ | - 109 - |
| 8.2. Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ ΣΤΟ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΡΓΩΝ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ..... | - 113 - |
| 8.3. Η ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ..... | - 115 - |
| 8.4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΚΤΡΟΠΗΣ..... | - 122 - |
| 8.5. ΕΥΡΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΕΝΑΡΙΑ | - 129 - |
| 8.6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΟΣΤΟΥΣ / ΟΦΕΛΟΥΣ | - 132 - |
| 8.7. ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ AR(1) ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΗΚ..... | - 135 - |
| 8.8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ..... | - 137 - |
| 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ..... | - 141 - |
| 9.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΑΝ..... | - 141 - |
| 9.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ-ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ | - 142 - |
| 9.3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ | - 143 - |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... | - 145 - |

Περίληψη

Η βελτιστοποίηση υδροσυστημάτων τα οποία έχουν ως κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις, διότι χαρακτηρίζεται από μία σειρά στοιχείων όπως ο στοχαστικός χαρακτήρας των εισροών και η μη-γραμμική δυναμική των υδροσυστημάτων. Ωστόσο, αποτελεί ένα πεδίο μελέτης με ιδιαίτερη βαρύτητα, μιας και η υδροηλεκτρική παραγωγή αναμένεται να αναβαθμιστεί ως παράγοντας εγγυημένης παροχής ενέργειας σε ένα ενεργειακό τοπίο που χαρακτηρίζεται από τη συνεχή μείωση των διαθέσιμων πόρων και την αναγκαιότητα αύξησης του ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι παλαιότερες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης ήταν περιορισμένες σε απλές τοπολογίες και ευρετικούς κανόνες, ενώ οι νεότερες προσεγγίσεις, χωρίς υπολογιστικούς πλέον περιορισμούς, ανέπτυξαν τεχνικές μη – γραμμικής βελτιστοποίησης.

Μια ιδιαίτερα σημαντική προσέγγιση είναι η σύζευξη στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, η οποία και υλοποιείται μέσω του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποτελεί ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων το οποίο υλοποιεί το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση (Nalbantis and Koutsoyiannis 1997) και έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία στην περίπτωση του ιδιαίτερα σύνθετου υδροσυστήματος των Αθηνών. Στην παρούσα διπλωματική επιχειρείται η επέκταση των δυνατοτήτων βελτιστοποίησης που παρέχει ούτως ώστε να συμπεριληφθούν υδροσυστήματα με κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή. Το πλαίσιο που αναπτύσσεται περιλαμβάνει τόσο προσεγγίσεις ενεργειακής βελτιστοποίησης όσο και βελτιστοποιήσεις στη λογική του κόστους/οφέλους. Μετά την ανάπτυξη του σχετικού πλαισίου πραγματοποιείται ένα πλήθος διερευνητικών εφαρμογών σε ένα από τα κυριότερα ενεργειακά υδροσυστήματα της Ελλάδας, το υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας, και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Εξερευνάται η δυναμική παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας του υδροσυστήματος, καθώς και το αναμενόμενο όφελος από τη διαχείρισή του για ένα πλήθος σεναρίων και εναλλακτικών διατάξεων. Επίσης δίνεται έμφαση στην ορθή αποτύπωση της στοχαστικής φύσης των εισροών με σχετικές διερευνήσεις, βάσει στοχαστικών μοντέλων εισροών που διατηρούν διαφορετικές δομές αυτοσυσχέτισης. Τέλος, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες αναλύσεις ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους εισόδου.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πλαίσιο που αναπτύχθηκε στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ παρουσιάζει θεωρητική επάρκεια και γενικότητα χρήσης, με συνέπεια να μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε περίπτωση υδροσυστημάτων που περιλαμβάνουν υδροηλεκτρικά έργα, είτε με τη λογική της πρωτεύουσας ενέργειας είτε με λογική κόστους/οφέλους.

Abstract

Hydropower systems optimization presents a strong challenge for the modeling community, since it is characterized by a number of difficulties such as the stochasticity of inflows and the non-linear nature of energy production. It is also an issue of increasing importance, in a world of increasing demands and rapid changes in energy production, where the imminent fossil fuel depletion leads to the rise of renewable energy resources. Older optimization attempts were restricted on simple hydrosystem topologies and heuristic rules, while newer attempts combine non-linear optimization with many supplementary techniques, such as fuzzy logic and neural networks, often with limited results on more complex issues. Hybrid simulation-optimisation approaches are also gaining ground, as they allow stochastic elements in the analysis.

In the case of the Hydronomeas Decision Support System (DSS), an innovative parameterisation-simulation-optimisation scheme is employed, based on the work of Nalbantis and Koutsoyiannis (1997), allowing a more elaborate approach on hydrosystems management. In the following thesis, this scheme is expanded to include the management of hydropower systems under a variety of different management scenarios and policies. The DSS is then employed in the case of Acheloos-Thessalia hydrosystem, which presents a challenging case, having seven hydropower plants, both serial and in parallel, with many conflicting uses and stakeholders. Firm energy potential is explored, as well as potential benefit from the combined use of hydropower generation and irrigation. A cost/benefit approach on energy production and irrigation is also employed and analysed. The optimal scenario under various prerequisites is suggested, taking into account both up-to-date environmental flow policies and irrigation demands. The stochastic nature of inflows is also taken into account: stochastic time-series are generated based on historical data, having either HK or short-term autocorrelation dynamics. The impact of the assumed stochastic dynamics on hydrosystems management is then evaluated. Finally the sensitivity of solutions against the assumptions of the stochastic simulation model is examined. Emphasis is given on the effect of long- vs. short-term persistence of the simulated inflows.

The results show that Hydronomeas is a solid Decision Support System, able to find the optimal management policy and explore a hydropower system's potential, either with firm energy policies or with cost/benefit strategies.

1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγικό σημείωμα

Η διαχείριση υδατικών πόρων είναι από τη φύση της μία κοπιώδης διαδικασία, τόσο σε επίπεδο χάραξης της γενικής πολιτικής όσο και σε επίπεδο μελέτης και εφαρμογής. Σε επίπεδο μελέτης, η προσομοίωση και βελτιστοποίηση ενός συστήματος πολλαπλών ταμειυτήρων που επιτελεί διαφορετικές λειτουργίες και καλύπτει αντιμαχόμενους στόχους (άρδευση, ύδρευση, ενεργειακή παραγωγή, περιβαλλοντική και αντιπλημμυρική προστασία), παρουσιάζει εγγενείς δυσκολίες, όπως η στοχαστική φύση των υδατικών εισροών και ο μη-γραμμικός χαρακτήρας της δυναμικής των συστημάτων μελέτης.

Σε επίπεδο γενικότερης πολιτικής πάλι, κάθε προσπάθεια ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων με μεγάλης κλίμακας έργα στην Ελλάδα έρχεται αντιμέτωπη με μία ευρεία κοινωνική και πολιτική αντίδραση, η οποία εκδηλώνεται τόσο από τις άμεσα εμπλεκόμενες κοινωνικές ομάδες όσο και από τους θεωρητικούς πολέμιους της «εκμετάλλευσης» του νερού. Η μήνις αυτή δεν είναι πάντα ορθώς δικαιολογημένη, καθώς υπόκειται σε μία σειρά από παρερμηνείες ή (σκοπίμες) παραβλέψεις της αναγκαιότητας και του χαρακτήρα των μεγάλης κλίμακας έργων διαχείρισης (Koutsoyiannis 2011), τρέφεται δε από την έλλειψη μιας συνεπούς προσπάθειας ολοκληρωμένης επιστημονικής τεκμηρίωσης που μάλιστα μέχρι πρόσφατα το σχεδιασμό έργων και τη διαχείριση των υδατικών πόρων στην Ελλάδα. Ως αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης, τα μεγάλα έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων στην ελληνική επικράτεια παρουσιάζουν μία ιδιόρρυθμη «αδράνεια» – μελετώνται αλλά αργούν να κατασκευασθούν, ενώ όταν τελικώς κατασκευάζονται, συχνά αλλάζουν χαρακτήρα και λειτουργία.

Στον Ελληνικό χώρο, ίσως δεν υπάρχει πιο λαμπρό παράδειγμα «αδράνειας» από την περίφημη εκτροπή του Αχελώου προς τη Θεσσαλία, ενός ιδιαίτερα σημαντικού για τα ελληνικά δεδομένα έργου, με εξίσου σημαντικά σχετιζόμενα μεγέθη (600 hm³ εκτρεπόμενων υδάτων, 1.7 GW συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε Αχελώο και Θεσσαλία, 4 πρόσθετα μεγάλα φράγματα με τα ανάλογα υδροηλεκτρικά έργα). Το έργο αυτό, πάνω από 50 χρόνια μετά από την αρχική του σύλληψη, εξακολουθεί να είναι ημιτελές, μετά από αλλεπάλληλες αλλαγές και δικαστικές αποφάσεις.

Η μόνη περίπτωση να αρθεί η αδράνεια αυτή και να μεταμορφωθεί σε κίνηση ιδεών, αντιλήψεων και γόνιμου διαλόγου μεταξύ πολιτικών, πολιτών και επιστημόνων είναι η επίμονη, λεπτομερής επιστημονική ανάδειξη του θέματος της διαχείρισης υδατικών πόρων,

χωρίς αφορισμούς και υπεραπλουστεύσεις. Τότε ίσως να μπορέσει επιτέλους να λυθεί μία σειρά από προβλήματα που χαρακτηρίζουν τη διαχειριστική πρακτική στην Ελλάδα, όπως η λειψυδρία, η συνεχή ποιοτική υποβάθμιση του διαθέσιμου νερού και ο χαμηλός βαθμός υδροηλεκτρικής αξιοποίησης - μόνο 31% του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροηλεκτρικού δυναμικού, σε αντίθεση με το άνω του 60% που παρουσιάζουν οι περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες (Στεφανάκος 2008).

Ως ελάχιστη συμβολή προς την κατεύθυνση αυτή, η παρούσα διπλωματική εργασία καταπιάνεται με το θέμα της διαχείρισης του υδροσυστήματος Αχελώου – Θεσσαλίας, επεκτείνοντας το φάσμα λειτουργιών ενός υπάρχοντος και δοκιμασμένου εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων, του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

1.2. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάπτυξη του γενικού πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, ο οποίος αποτελεί ένα ολοκληρωμένο λογισμικό υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση υδροσυστημάτων. Η ανάπτυξη του πλαισίου αυτού έγκειται στη σύλληψη και διερεύνηση ενός αριθμού γενικών στοχικών συναρτήσεων, οι οποίες προστίθενται στον υφιστάμενο αλγόριθμο μη-γραμμικής βελτιστοποίησης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (Ευστρατιάδης 2001) και έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Το πλαίσιο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε κάθε περίπτωση υδροσυστημάτων με κύριο στόχο την ενεργειακή παραγωγή.

Για την ανάπτυξη των συναρτήσεων αυτών χρησιμοποιείται ως βάση μελέτης το υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας, μιας και παρουσιάζει μία σειρά από ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά: αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα και πιο σημαντικά υδροσυστήματα στην Ελλάδα, συνδυάζει το στόχο ενεργειακής παραγωγής με τις μεγάλες αρδευτικές ανάγκες της Θεσσαλίας και την περιβαλλοντική διαχείριση δύο ευαίσθητων λεκανών απορροής, ενώ ο ημιτελής χαρακτήρας των έργων προσφέρεται για τη διενέργεια διερευνήσεων και την αξιολόγηση εναλλακτικών διατάξεων.

Οι συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εφαρμόζονται στα σχετικά σενάρια μελέτης που αφορούν στο υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας. Από την εφαρμογή αυτή ελέγχεται η αποτελεσματικότητα και η ευαισθησία των συναρτήσεων, ενώ προκύπτει μία σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα για τις δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης του υδροσυστήματος.

1.3. Σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος

Πέραν του κύριου στόχου ανάλυσης και ελέγχου των συναρτήσεων, η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει και ένα πλήθος εφαρμογών στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας που έχει ως

στόχο να αναδείξει διάφορα πεδία εφαρμογής του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και ποικίλες πτυχές που μπορεί να εμφανιστούν κατά την ενεργειακή διαχείριση ενός σύνθετου υδροσυστήματος. Περιλαμβάνονται εφαρμογές προσομοίωσης και βελτιστοποίησης σχετικές με μία σειρά επιμέρους προβλημάτων, όπως:

- ο αντίκτυπος που έχει η υιοθέτηση μίας σύγχρονης πολιτικής περιβαλλοντικής ροής στην ενεργειακή διαχείριση.
- η περαιτέρω εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού ενός υδροσυστήματος με διατάξεις άντλησης-ταμίευσης.
- η διατήρηση των στοχαστικών χαρακτηριστικών της υδρολογικής πληροφορίας και ο αντίκτυπος που έχει τυχόν λανθασμένη θεώρηση στην προσομοιωμένη υδροηλεκτρική παραγωγή.

Προκειμένου να διερευνηθούν οι δυνατότητες επιχειρησιακής εφαρμογής των συναρτήσεων αυτών, χρησιμοποιείται ένα φάσμα σύγχρονων μεθοδολογικών εργαλείων της Στοχαστικής Υδρολογίας. Τα σενάρια διαχείρισης επιλύονται με τη βοήθεια συνθετικών δεδομένων 1000 ετών, τα οποία προήλθαν από στοχαστική προσομοίωση βάσει της ιστορικής πληροφορίας. Γίνεται προσπάθεια ώστε να υπάρξει αξιοποίηση του προηγούμενου διαθέσιμου δυναμικού μελετών για τον Αχελώο και τη Θεσσαλία και επιχειρείται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της ιστορικής υδρολογικής πληροφορίας με λήψη και αξιολόγηση πολλών πηγών.

1.4. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από εννέα κεφάλαια και τέσσερα παραρτήματα.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας. Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται θεμελιώδεις έννοιες της διαχείρισης υδατικών πόρων που σχετίζονται άμεσα με την εργασία, ενώ αναλύονται οι τεχνικές της προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που αποτελούν τα βασικά μεθοδολογικά εργαλεία της εργασίας.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει βασικά στοιχεία της Στοχαστικής Υδρολογίας, με έμφαση στη μεθοδολογία γέννησης συνθετικών χρονοσειρών. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στη δυναμική Hurst-Kolmogorov και την ανάγκη διατήρησής της στα συνθετικά δεδομένα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται μία θεωρητική επισκόπηση των γενικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα υδροσυστήματα Αχελώου και Θεσσαλίας, καθώς και το συζευγμένο υδροσύστημα που θα προέλθει μετά την εκτροπή. Γίνεται επίσης και μία σύντομη επισκόπηση του ιστορικού αποφάσεων που οδήγησαν στην αναστολή του έργου.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα γενικά χαρακτηριστικά της τελευταίας έκδοσης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, με έμφαση στα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

Αναλύεται το σχήμα παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης που αποτελεί το μεθοδολογικό πυρήνα του προγράμματος και δίνονται τα χαρακτηριστικά του προγράμματος με τα οποία μοντελοποιείται η ενεργειακή παραγωγή.

Τα τρία επόμενα κεφάλαια αποτελούν το ερευνητικό σκέλος της διπλωματικής. Το έκτο κεφάλαιο έχει ως αντικείμενο τη μεθοδολογία δημιουργίας των σεναρίων διαχείρισης του υδροσυστήματος στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, τα οποία και χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του πλαισίου βελτιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής που δίνεται στη συνέχεια.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι στοχικές συναρτήσεις που σχετίζονται με την υδροηλεκτρική παραγωγή. Επιλέχθηκε η ομαδοποίηση σε δύο κατηγορίες συναρτήσεων, αυτές που έχουν αμιγώς ενεργειακό χαρακτήρα και αυτές που ανάγονται στη λογική κόστους/οφέλους. Επιχειρείται η διερεύνηση των καταλληλότερων εξ' αυτών καθώς και η αναζήτηση της κατάλληλης παραμετροποίησης για προβλήματα υδροηλεκτρικής παραγωγής.

Στο όγδοο κεφάλαιο οι συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν εφαρμόζονται στα σενάρια μελέτης του έκτου κεφαλαίου. Διενεργείται ένα πλήθος διαφορετικών εφαρμογών που αφορά τόσο σε υφιστάμενες διατάξεις έργων όσο και σε μελλοντικές και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για την ευρύτητα και την αποτελεσματικότητα εφαρμογής των συναρτήσεων όσο και για τη διαχείριση του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας.

Το ένατο κεφάλαιο αποτελεί σύνοψη των κυρίων συμπερασμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση, τόσο στο επίπεδο των συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν όσο και στο επίπεδο της διαχείρισης του υδροσυστήματος μελέτης. Τίθενται επίσης προβληματισμοί για την περαιτέρω αξιοποίηση των λεκανών Αχελώου και Θεσσαλίας.

Τα παραρτήματα δίνουν συμπληρωματικά δεδομένα της εργασίας, κυρίως σε επίπεδο βελτιστοποίησης. Στο πρώτο παράρτημα δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων για τα κυριότερα σενάρια εφαρμογής. Στο δεύτερο παράρτημα αναφέρονται τα τεχνικά στοιχεία των έργων ταμίευσης και μεταφοράς νερού, ενώ στο τρίτο παράρτημα δίνονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής και συνθετικής υδρολογικής πληροφορίας εισόδου. Το τελευταίο παράρτημα έχει χαρακτήρα σύντομης αναφοράς των υπολογιστικών χαρακτηριστικών της βελτιστοποίησης.

2. Θεωρητικά στοιχεία για τη διαχείριση υδατικών πόρων

Στο παρόν κεφάλαιο επεξηγούνται θεμελιώδεις έννοιες που αφορούν στη διαχείριση υδροσυστημάτων και αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης που ακολουθεί. Ειδικότερα, ορίζονται βασικές σχέσεις που διέπουν το υδατικό ισοζύγιο και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφονται οι έννοιες της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης ως μεθοδολογικά εργαλεία της διαχείρισης υδατικών πόρων, αναφέρεται η ανάγκη της παραμετροποίησης στα διαχειριστικά προβλήματα και τίθεται το γενικό πρόβλημα της διαχείρισης υδροσυστημάτων με στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή μέσα από το πρίσμα της βελτιστοποίησης. Στα πλαίσια του κεφαλαίου επίσης αναλύονται ιδιαίτερα σημαντικές έννοιες όπως η αξιοπιστία και η διάκριση της παραγόμενης ενέργειας σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα.

2.1. Θεμελιώδεις έννοιες

2.1.1. Το υδατικό ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο σε επίπεδο ταμιευτήρα αποτελεί τη βασική μαθηματική σχέση που διέπει τη δυναμική του. Προκύπτει από τη γενική έκφραση της εξίσωσης συνέχειας, δηλαδή του ισοζυγίου μάζας του νερού:

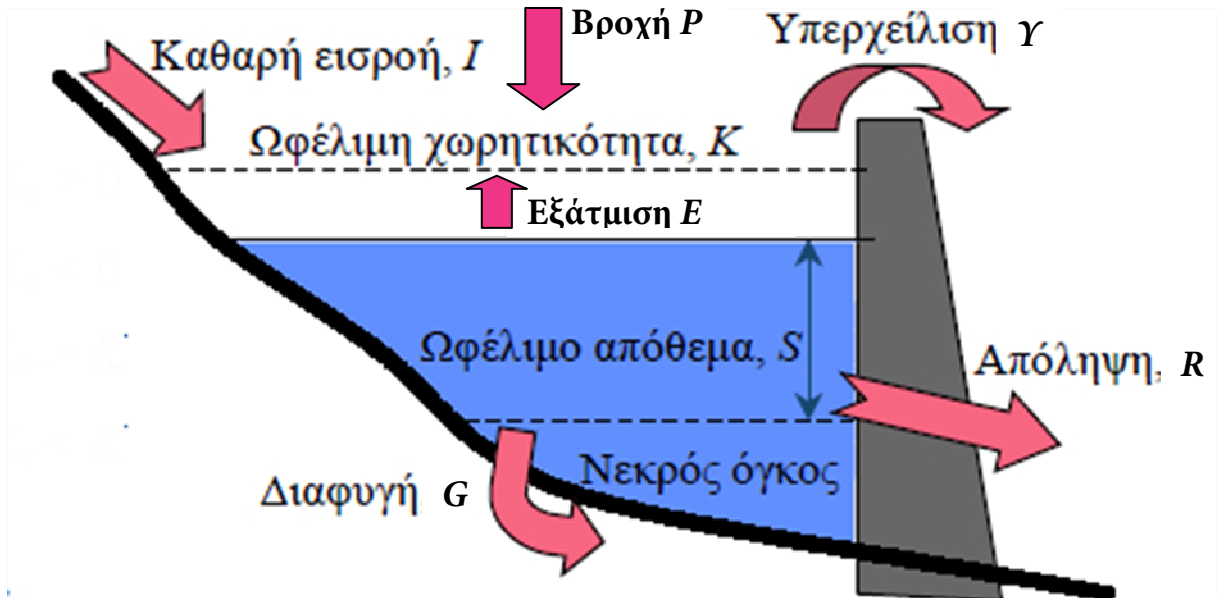
$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (2.1)$$

,όπου dS/dt ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος S του ταμιευτήρα, $I(t)$ οι συνολικές εισροές σε αυτόν (σε μονάδες παροχής) και $O(t)$ οι συνολικές εκροές. Οι εισροές συνίστανται σε:

1. Απορροές I από την ανάντη λεκάνη απορροής που αντιστοιχεί στον ταμιευτήρα. Οι απορροές αυτές διακρίνονται σε επιφανειακές (μέσω ρευμάτων και ποταμών) και υπόγειες (μέσω της εκφόρτισης υδροφορέων).
2. Όλες τις μορφές κατακρήμνισης P επί της υδάτινης επιφάνειας του ταμιευτήρα, όπως βροχόπτωση και χιονόπτωση.

Οι εκροές από τον ταμιευτήρα συνίστανται σε:

1. εξάτμιση E από την υδάτινη επιφάνεια (καθρέπτη) του ταμιευτήρα
2. υπόγειες διαφυγές G από τον ταμιευτήρα, οι οποίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές αναλόγως της γεωλογίας της περιοχής μελέτης (λ.χ. καρστικοποιημένοι γεωλογικοί σχηματισμοί)
3. απορροές O που επιτρέπονται προς τα κατόντη, όπως λ.χ. απολήψεις R ή υπερχειλίσεις Y .



Εικόνα 2-1: Διάγραμμα των συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου για ένα μεμονωμένο ταμιευτήρα (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2000, μετά από τροποποίηση).

Στην Εικόνα 2-1 αναφέρονται σχηματικά οι παραπάνω συνιστώσες. Λαμβάνοντάς τις υπόψη και μετά από διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης (2.1), σχηματίζεται η τελική εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου:

$$S_{t+1} = S_t + I_t + P_t - G_t - E_t - O_t \quad (2.2)$$

η οποία και αποτελεί τη θεμελιώδη έκφραση για τη μαθηματικοποίηση των προβλημάτων διαχείρισης ταμιευτήρων. Το απόθεμα S_{t+1} αναφέρεται στην έναρξη του χρονικού βήματος $t+1$, το απόθεμα S_t στην έναρξη του χρονικού βήματος t , ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη αναφέρονται σε όγκο νερού που διήλθε στον ταμιευτήρα κατά το χρονικό βήμα t . Σημειώνεται ότι η σχέση (2.2) συνοδεύεται από ένα πλήθος φυσικών και λειτουργικών περιορισμών, όπως τον περιορισμό χωρητικότητας του ταμιευτήρα:

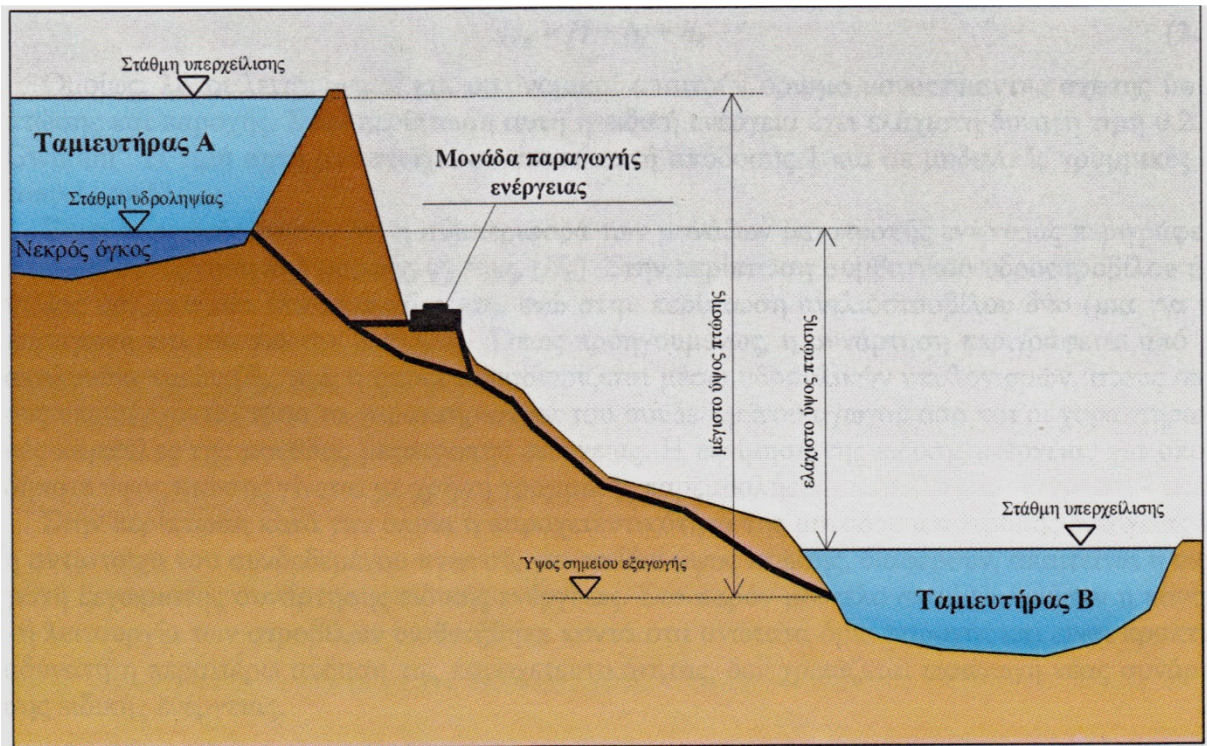
$$S_{\min} \leq S_t \leq K \quad (2.3)$$

,όπου S_{\min} ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα και K η ωφέλιμη χωρητικότητά του, καθώς και τον περιορισμό παροχευτικότητας των κατάντη αγωγών προσαγωγής:

$$0 \leq R_t \leq R_{\max} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση ενός σύνθετου υδροσυστήματος υπάρχουν πολλαπλοί ταμιευτήρες συνδεδεμένοι σε σειρά ή παράλληλα, με συνέπεια οι εκροές του ενός να αποτελούν εισροές του άλλου. Η αλληλεπίδραση αυτή ενδέχεται να είναι πολύπλοκη, αλλά πάντα δύναται να αναχθεί σε μία σειρά από εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, παρόμοιες με την έκφραση (2.2).

2.1.2. Υδροηλεκτρική παραγωγή



Εικόνα 2-2: Σχηματική απεικόνιση μίας μονάδας υδροηλεκτρικής παραγωγής. Διακρίνονται οι βασικές λειτουργικές στάθμες ταμιευτήρων και οι υδατοπτώσεις (Πηγή: Ευστρατιάδης και Ζερβός 1999).

Ο διαθέσιμος όγκος νερού σε έναν ταμιευτήρα, καθώς και το μεγάλο ύψος του νερού που αποθηκεύεται ανάντη αυτού επιτρέπουν την αξιοποίησή του για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, μέσω μιας μονάδας μετατροπής της κινητικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική η οποία καλείται υδροστρόβιλος. Κάθε τέτοια μονάδα συνδέεται με τον αντίστοιχο αγωγό προσαγωγής του νερού¹, ο οποίος εγκαθίσταται σε χαμηλή σχετικά στάθμη εντός του ταμιευτήρα (στάθμη υδροληψίας) και έχει ως σημείο εξαγωγής τα κατάντη του έργου (Εικόνα 2-2). Η βασική σχέση που διέπει την παραγόμενη ενέργεια E_t σε κάθε χρονικό βήμα t με το ολικό ύψος πτώσης H_t και το διερχόμενο από το στρόβιλο όγκο νερού V_t είναι:

$$E_t = \psi \cdot V_t \cdot H_t \quad (2.5)$$

όπου ψ η ειδική ενέργεια, δηλαδή η παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ύψους πτώσης. Οι συνήθεις μονάδες για μηνιαίο χρονικό βήμα σε μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα είναι GWh για την ενέργεια και hm, hm³ για το ύψος πτώσης και το διερχόμενο όγκο νερού, με συνέπεια η ειδική ενέργεια ψ να εκφράζεται σε GWh/hm⁴. Η σχέση (2.5) προκύπτει από τη βασική σχέση που συνδέει την ενεργειακή ισχύ I με τη διερχόμενη παροχή Q :

¹ Ακριβέστερα, σε ένα υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να εγκατασταθεί ένα πλήθος υδροστροβίλων, καθώς και πολλαπλοί αγωγοί προσαγωγής. Ωστόσο, υπολογιστικά, μία τέτοια διάταξη νοείται και μοντελοποιείται ως μία μονάδα προσαγωγής-παραγωγής ενέργειας.

$$I = (\rho \cdot g) \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad (2.6)$$

, όπου ρ η πυκνότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s²). Η ειδική ενέργεια για τους υδροστρόβιλους δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = 0.2725 \cdot \eta \cdot \frac{H_n}{H} \quad (2.7)$$

, όπου η χαρακτηριστικός αδιάστατος συντελεστής απόδοσης για τον υδροστρόβιλο (μικρότερος της μονάδας), H το ολικό (ακαθάριστο) ύψος πτώσης σε hm και H_n το καθαρό ύψος πτώσης σε hm, το οποίο προκύπτει αν από το ολικό ύψος πτώσης H αφαιρεθούν οι γραμμικές h_f και οι τοπικές h_r απώλειες ενέργειας κατά την προσαγωγή του νερού:

$$H_n = H - h_f - h_r \quad (2.8)$$

Η εξίσωση (2.5) βρίσκει εφαρμογή και στην περίπτωση άντλησης νερού, για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας E , με την ειδική ενέργεια να διαφοροποιείται σε αυτή την περίπτωση και να ισούται με:

$$\psi = \frac{0.2725}{\eta} \cdot \frac{H_n}{H} \quad (2.9)$$

όπου τώρα $H_n = H + h_f + h_r$. Με την παραδοχή μίας μονοσήμαντης σχέσης ύψους πτώσης και παροχής (η οποία γενικώς υιοθετείται για λόγους λειτουργικούς και οικονομικούς), η ειδική ενέργεια δίνεται συναρτήσει μόνο του ύψους πτώσης, δηλαδή $\psi = \psi(H)$. Μία τέτοια συνάρτηση είναι χαρακτηριστική για το σύστημα αγωγού προσαγωγής – μονάδας μετατροπής ενέργειας και εκτιμάται μέσω υδραυλικών υπολογισμών. Σημειώνεται ότι η τιμή 0.2725 που εμφανίζεται στις σχέσεις (2.7) και (2.9) αποτελεί οριακή τιμή της ειδικής ενέργειας (μέγιστη για τους στρόβιλους και ελάχιστη για τις αντλίες), η οποία προκύπτει για $\eta = 1$ και $H = H_n$, δηλαδή μέγιστη θεωρητικά απόδοση και μηδενικές απώλειες ενέργειας.

2.2. Οι έννοιες του συστήματος και της ανάλυσης συστημάτων στους υδατικούς πόρους

Σύστημα (system) καλείται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων, το οποίο χαρακτηρίζεται από: (α.) ένα σύνορο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον, (β.) αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι -inputs- και έξοδοι -outputs- του συστήματος) και (γ.) ένα σύνολο σχέσεων μεταξύ των στοιχείων του συστήματος και των εισόδων και των εξόδων (Mays and Tung 1992). Ως υδροσύστημα (hydrosystem) ή, ισοδύναμα, σύστημα υδατικών πόρων (water resources system) νοείται ένα σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα που συνεργαζόμενα

εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς, τηρώντας παράλληλα μία σειρά από περιορισμούς (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, συστήματα γεωτρήσεων, εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού κ.ο.κ.).

Η γενική μεθοδολογία μελέτης της συμπεριφοράς των συστημάτων ονομάζεται ανάλυση συστημάτων (systems analysis) και, ακριβέστερα, ορίζεται ως η επιστημονική περιοχή η οποία μελετάει τον τρόπο αλληλεπίδρασης των στοιχείων ενός συστήματος μεταξύ τους και με το περιβάλλον (Grigg 1996). Η ανάλυση συστημάτων αποτελεί μία ορθολογική διαδικασία που έχει ως στόχο την κατάλληλη διευθέτηση φυσικών πόρων και εργασιών, βασισμένη στην οργάνωση και την ανάλυση των πληροφοριών που αφορούν στο σύστημα. Οι δύο βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις της ανάλυσης συστημάτων είναι η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση.

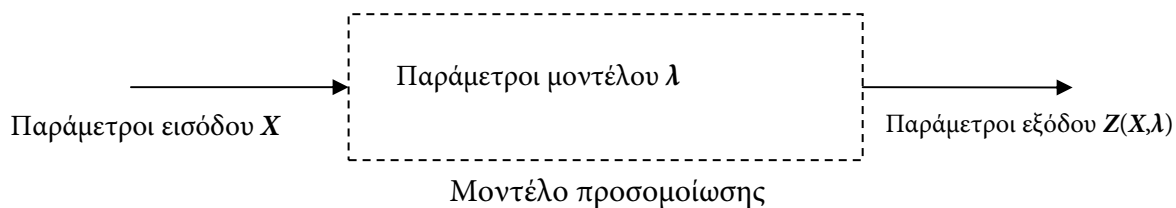
2.3. Η έννοια της προσομοίωσης

Προσομοίωση (simulation) καλείται η τεχνική μίμησης ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου (Winston 1994). Η μίμηση της συμπεριφοράς της πραγματικής κατάστασης επιτυγχάνεται μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης (simulation model), το οποίο αποτελεί μία απλοποιημένη αντιπροσώπευση του πραγματικού συστήματος, με έμφαση σε ορισμένα μόνο χαρακτηριστικά του (Εικόνα 2-3). Το μοντέλο προσομοίωσης προκύπτει, εν γένει, ως ένα σύνολο υποθέσεων για τη δυναμική λειτουργία ενός συστήματος, εκφρασμένων με τη μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων και κωδικοποιημένων, συνήθως, σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού (Κουτσογιάννης, 2000).

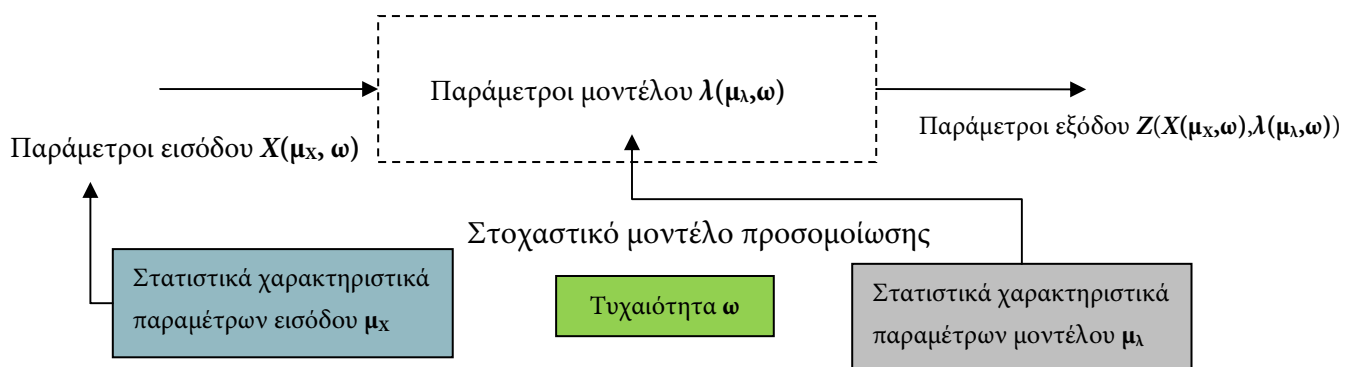
Η προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς σύνθετων συστημάτων όταν η απευθείας έκφρασή τους με αναλυτικές σχέσεις ή αριθμητικές μεθόδους είναι δυσχερής ή και αδύνατη. Στο πλαίσιο της διαχείρισης υδατικών πόρων, βρίσκει εφαρμογή στη μελέτη της απόκρισης σύνθετων υδροσυστημάτων, ως εργαλείο πρόγνωσης αλλά και ως εργαλείο διερεύνησης της δυναμικής και των δυνατοτήτων τους. Άλλη σημαντική εφαρμογή της είναι για την παραγωγή στατιστικά ισοδύναμων (συνθετικών) δεδομένων με βάση ιστορικά παρατηρημένες τιμές υδρολογικών μεταβλητών, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

Τα μοντέλα προσομοίωσης διακρίνονται σε ντετερμινιστικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic), ανάλογα με τη φύση των παραμέτρων και των δεδομένων εισόδου τους. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα έχουν ως δομικές παραμέτρους αλλά και εξωτερικές διεγέρσεις συγκεκριμένες τιμές, αυστηρά ορισμένες, και επομένως παράγουν μια και μοναδική

απόκριση για κάθε διέγερση. Αντιθέτως, στα στοχαστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές εισόδου και ως δομικές παράμετροι τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες περιγράφονται από κατανομές πιθανοτήτων (Εικόνα 2-4). Στα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, όπου σημαντικές παράμετροι διέπονται από μεγάλη αβεβαιότητα, τόσο σε επίπεδο παραμέτρων λειτουργίας (λ.χ. εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας στα προβλήματα δικτύων αγωγών) όσο (σημαντικότερα) σε επίπεδο υδρολογικών μεταβλητών εισόδου (κατακρημνίσεις, απορροές κ.α.), η χρήση στοχαστικών μοντέλων επιτρέπει την ποσοτικοποίηση και, τελικώς, τη διαχείριση της αβεβαιότητας και συνεπώς αποτελεί συγκριτικά καλύτερη λύση σε σχέση με τη ντετερμινιστική λογική. Στην περίπτωση που στη διαδικασία της προσομοίωσης συνυπολογίζεται η τυχαιότητα ή ο στοχαστικός χαρακτήρας ορισμένων μεγεθών μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου, η προσομοίωση καλείται στοχαστική (stochastic simulation). Η στοχαστική προσομοίωση συναντάται στη βιβλιογραφία και ως μέθοδος Monte Carlo, έχει δε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τον υπολογισμό πολυμεταβλητών ολοκληρωμάτων ως τη βελτιστοποίηση σύνθετων συναρτήσεων (Κουτσογιάννης, 2000).



Εικόνα 2-3: Ένα μοντέλο προσομοίωσης λαμβάνει ως εξωτερικές διεγέρσεις τις παραμέτρους εισόδου X και με τη βοήθεια των παραμέτρων λ που το δομούν παράγει ως απόκριση τις παραμέτρους εξόδου $Z(X,\lambda)$.



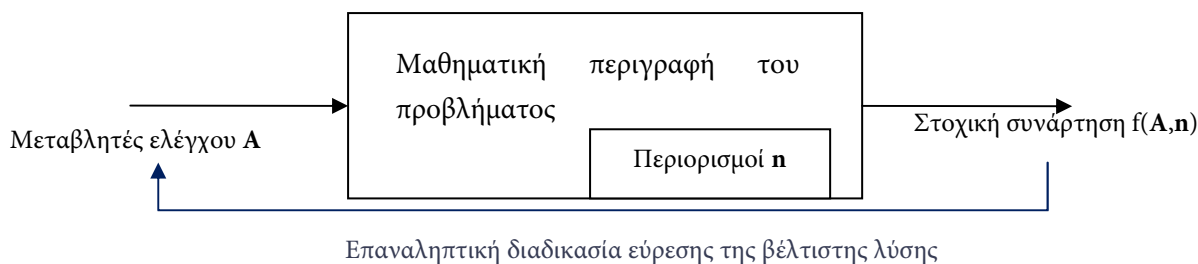
Εικόνα 2-4: Στο στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης οι παράμετροι εισόδου αλλά και οι παράμετροι του μοντέλου μπορεί να είναι τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες να ακολουθούν συγκεκριμένη κατανομή με στατιστικές παραμέτρους μ . Κατά συνέπεια, και οι παράμετροι εξόδου που προκύπτουν είναι τυχαίες μεταβλητές ως συναρτήσεις αυτών.

2.4. Η έννοια της βελτιστοποίησης

Στην πλειονότητα των προβλημάτων ανάλυσης συστημάτων υδατικών πόρων απαιτείται μία συστηματική διαδικασία αναζήτησης της καλύτερης διαχειριστικής πολιτικής, η οποία βασίζεται σε μία διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις (decisions) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεών τους στο υπό μελέτη σύστημα (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007). Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει τεχνικές αναζήτησης των καλύτερων, δηλαδή βέλτιστων (optimal) λύσεων στο πρόβλημα.

Η διαδικασία συστηματικής αναζήτησης της βέλτιστης λύσης σε ένα πρόβλημα ονομάζεται βελτιστοποίηση (optimization). Η βελτιστοποίηση αποτελεί ένα σύνολο μαθηματικών τεχνικών που προϋποθέτουν τη σαφή, αναλυτική διατύπωση της δυναμικής και των περιορισμών του προβλήματος, ενώ περιλαμβάνουν αλγόριθμους συγκριτικής αξιολόγησης και επιλογής των καλύτερων λύσεων. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος συνίσταται στην αντιστοιχία κάθε εναλλακτικής, πιθανής λύσης με ένα μέτρο επίδοσης (performance measure ή εναλλακτικά skill score), ώστε να είναι δυνατή η εύρεση της βέλτιστης λύσης που μεγιστοποιεί το εν λόγω μέτρο.

Οι μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν ως στόχο τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της τιμής μιας στοχικής συνάρτησης (objective function)² η οποία αποτελεί το μέτρο της επίδοσης του συστήματος, υπό ένα καθεστώς περιορισμών (constraints), οι οποίοι νοούνται ως το σύνολο φυσικών και λειτουργικών περιορισμών του προβλήματος. Τα μεγέθη η αλλαγή των οποίων επιφέρει αλλαγή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης καλούνται μεταβλητές ελέγχου (control variables) του προβλήματος. Η βέλτιστη λύση αναζητείται μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία επαναπροσδιορισμού των μεταβλητών ελέγχου, βάσει της επίδοσης που έχει η στοχική συνάρτηση (Εικόνα 2-5).



Εικόνα 2-5: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Σε παλαιότερα εγχειρίδια ανάλυσης συστημάτων υδατικών πόρων, η προσομοίωση και

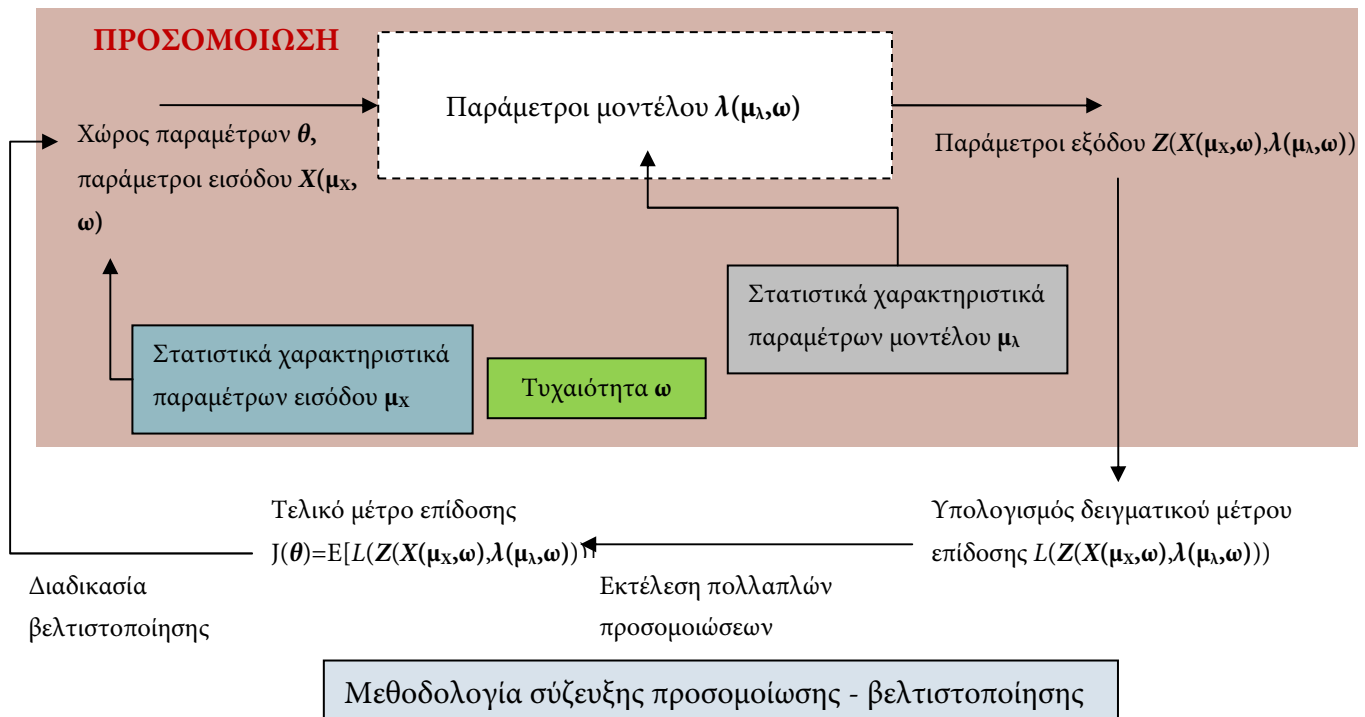
² Ο όρος 'στοχική συνάρτηση' συναντάται στη βιβλιογραφία και ως 'αντικειμενική συνάρτηση'. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο πρώτος όρος, καθώς θεωρείται ότι αποδίδει πιστότερα το νόημά της.

η βελτιστοποίηση θεωρούνται ξεχωριστές τεχνικές που παρουσιάζουν διαφορετικά συγκριτικά χαρακτηριστικά. Η προσομοίωση πλεονεκτεί στο ότι αποδίδει πιστότερα τις διεργασίες εντός του συστήματος αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα της αδυναμίας άμεσης και συστηματικής εύρεσης της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής, ενώ επιπρόσθετα απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Αντιθέτως, οι κλασικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης επιτρέπουν το γρήγορο εντοπισμό της βέλτιστης λύσης, καταφεύγοντας ωστόσο σε απλοποιημένες μαθηματικές εκφράσεις της δυναμικής του προβλήματος όπως τη γραμμικοποίησή του (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007). Στην περίπτωση δε που συνυπολογισθεί και η στοχαστική φύση των υδρολογικών μεταβλητών ή η τοπολογία του συστήματος γίνεται πολύπλοκη το πρόβλημα δεν είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί με τις κλασικές αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους βελτιστοποίησης.

Η λύση που δόθηκε για την περίπτωση αυτή είναι η ένταξη της στοχαστικής προσομοίωσης στη διαδικασία βελτιστοποίησης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μία τέτοια προσέγγιση καλείται στοχαστική βελτιστοποίηση³ (stochastic optimization). Παρόμοια, σύγχρονη προσέγγιση υιοθετεί και το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, ενώνοντας τη διαδικασία προσομοίωσης με έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την αποτίμηση της στοχαστικής συνάρτησης και ορισμένες εκ των παραμέτρων της προσομοίωσης ως μεταβλητές ελέγχου της βελτιστοποίησης.

Στην Εικόνα 2-6 δίνεται παραστατικά η μεθοδολογία σύζευξης της προσομοίωσης με τη βελτιστοποίηση. Γίνεται χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης (όπως στην Εικόνα 2-4), οι παράμετροι εξόδου του οποίου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του δειγματικού μέτρου επίδοσης L . Η εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων ή η στατιστική επεξεργασία του δειγματικού μέτρου επίδοσης στο χρόνο επιτρέπει την εξαγωγή του τελικού μέτρου επίδοσης, το οποίο συνήθως είναι η μέση τιμή του δειγματικού μεγέθους $J=E(L)$. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιτρέπει την αναδιατύπωση ορισμένων εκ των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου (χώρος παραμέτρων θ), ούτως ώστε να βρεθεί το βέλτιστο μέτρο επίδοσης.

³ Ο όρος της στοχαστικής βελτιστοποίησης αναφέρεται στην υιοθέτηση μεθόδων Monte Carlo και δεν θα πρέπει να συγχέεται με άλλες μεθοδολογίες συνυπολογισμού της τυχαιότητας των υδρολογικών μεταβλητών στη δυναμική του προβλήματος, όπως η μέθοδος περιορισμένης πιθανότητας (Μιμίκου 2006, Charnes and Cooper 1960). Σημειώνεται ότι τέτοιες μεθοδολογίες κάνουν τη φυσική παραδοχή ότι τα υδρολογικά μεγέθη παρουσιάζουν χρονική ανεξαρτησία, γεγονός ασυμβίβαστο με τη φύση των μεταβλητών (βλ. και Ενότητα 3).



Εικόνα 2-6: Η μεθοδολογία σύζευξης της προσομοίωσης με τη βελτιστοποίηση. (Πηγή διαγράμματος: (Fu and Hu 1997), μετά από τροποποίηση).

2.5. Η έννοια της αξιοπιστίας

Η αξιοπιστία (reliability) ορίζεται ως η πιθανότητα επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης⁴ σε ένα υδατικό σύστημα για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες (Chow, Maidment and Mays 1988). Αν τεθεί ως X το ποσοτικό μέτρο επίδοσης του υδросυστήματος και x η επιθυμητή τιμή-στόχος, η αξιοπιστία ορίζεται ως η πιθανότητα:

$$\alpha = P(X \geq x) \quad (2.10)$$

Συμπληρωματική αυτής είναι η πιθανότητα αστοχίας, η οποία ισούται με:

$$\beta = 1 - P(X \geq x) = P(X < x) \quad (2.11)$$

Και οι δύο έννοιες είναι πιθανοτικές, με το μέτρο επίδοσης X να αποτελεί τυχαία μεταβλητή ως συνάρτηση άλλων υδρολογικών μεγεθών που είναι και αυτές τυχαίες μεταβλητές όπως οι εισροές και οι κατακρημνίσεις. Σημειώνεται ότι η πιθανότητα αστοχίας (probability of failure)

⁴ Η επίδοση στην οποία αναφέρεται η έννοια της αξιοπιστίας αφορά στην κάλυψη ενός καθορισμένου στόχου (λ.χ. κάλυψη υδατικών ζητήσεων, αντιπλημμυρική προστασία, υδροηλεκτρική παραγωγή) από το σύστημα για δεδομένες συνθήκες (λ.χ. συγκεκριμένη ακολουθία εισροών στους ταμιευτήρες) και, συνεπώς, σχετίζεται άμεσα με την απόκριση του υδросυστήματος, η οποία υπολογίζεται μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης.

έχει στην παρούσα εργασία την έννοια της αστοχίας απόδοσης (performance failure), δηλαδή της αδυναμίας εκπλήρωσης κάποιου λειτουργικού στόχου όπως η παραγωγή ενέργειας. Γενικότερα στη διαχείριση υδατικών πόρων, εκτός της αστοχίας απόδοσης, υπάρχει και η έννοια της δομικής αστοχίας (structural failure) όπως λ.χ. η αστοχία του σώματος ενός φράγματος (Koutsoyiannis, 2005).

Μια ακόμη σημαντική έννοια που εξάγεται άμεσα από την αξιοπιστία είναι η αξιόπιστη επίδοση⁵ ενός συστήματος, η οποία εκφράζεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ορίζεται ως η τιμή-στόχος x^* που μπορεί να αποδοθεί από το σύστημα με συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας $\alpha^* = P(X \geq x^*)$. Στην πράξη τα επίπεδα αξιοπιστίας α^* που ενδιαφέρουν το διαχειριστή είναι υψηλά, με συνηθέστερες τιμές 99%, 97% και 95%, οπότε ένα τυπικό πρόβλημα διαχείρισης υδατικών πόρων είναι η εύρεση της τιμής x^* που αντιστοιχεί σε τέτοια υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας.

Βάσει των παραπάνω ορισμών, είναι εμφανές ότι ο υπολογισμός της αξιοπιστίας απαιτεί τη χρονοσειρά απόκρισης $X(t)$ του υδροσυστήματος για το χρονικό διάστημα μελέτης. Με βάση τη χρονοσειρά αυτή είναι δυνατή η εξαγωγή της αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας, ως συχνότητα ικανοποίησης του στόχου. Προϋπόθεση για την εκτίμηση της πιθανότητας ως συχνότητα εμφάνισης του μεγέθους είναι η χρονοσειρά απόκρισης να έχει αρκούντως μεγάλο μήκος ώστε το σφάλμα εκτίμησης να είναι επαρκώς μικρό. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται στην περίπτωση χρήσης χρονοσειρών εισροών μεγάλου μήκους, όπως στην περίπτωση χρήσης συνθετικών δεδομένων εισόδου. Αντιθέτως, η χρήση ιστορικών χρονοσειρών, περιορισμένου μήκους, για τις υδρολογικές μεταβλητές εισόδου του μοντέλου δεν μπορεί να οδηγήσει σε αξιόπιστες εκτιμήσεις.

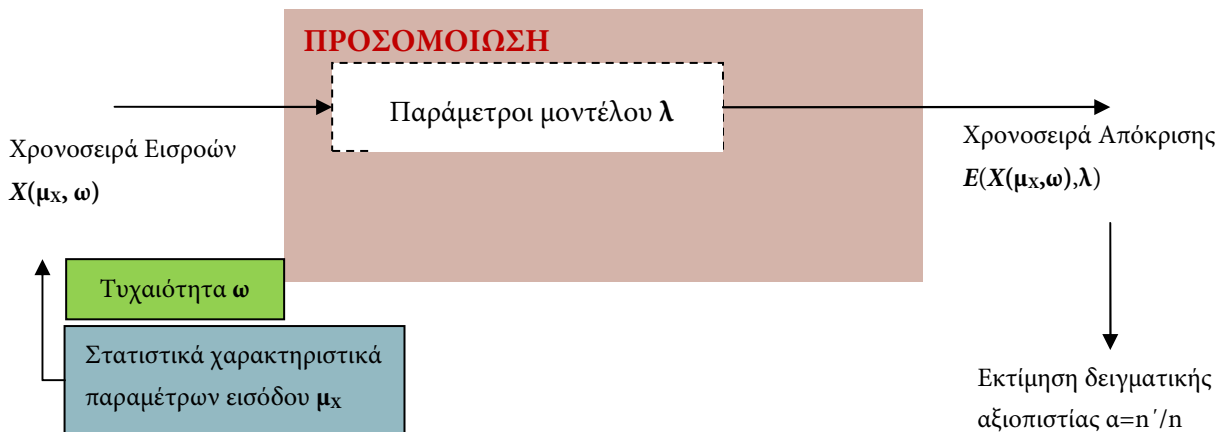
Η χρονοσειρά απόκρισης προκύπτει μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης του υδατικού συστήματος που περιγράφηκε προηγουμένως (Εικόνα 2-7). Στις περιπτώσεις αυτές, και βάσει του ορισμού της πιθανότητας ως σχετική συχνότητα, η αξιοπιστία μπορεί να υπολογιστεί ως το πηλίκο:

$$\alpha = \frac{n'}{n} \quad (2.12)$$

όπου n' το πλήθος των χρονικών βημάτων στα οποία καλύπτεται ο στόχος και n το συνολικό πλήθος των χρονικών βημάτων.

⁵ Η αξιόπιστη επίδοση συνήθως συναντάται σε όρους κάλυψης υδατικών ζητήσεων (ασφαλής απόληψη από ταμιευτήρα – safe yield). Ωστόσο στα πλαίσια της εργασίας ο όρος αυτός γενικεύεται, ούτως ώστε να περιλαμβάνει και την κάλυψη ενός ενεργειακού στόχου, όπως η μηνιαία παραγωγή ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία η έννοια της αξιοπιστίας αφορά σε στόχους μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής και συνεπώς συνδέεται άμεσα με την έννοια της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας.



Εικόνα 2-7: Η εκτίμηση της αξιοπιστίας προκύπτει βάσει της χρονοσειράς απόκρισης, η οποία με τη σειρά της αποτελεί αποτέλεσμα της διαδικασίας προσομοίωσης του συστήματος. Στην παρούσα μελέτη, η χρονοσειρά απόκρισης που μελετάται είναι η μηνιαία χρονοσειρά παραγόμενης ενέργειας $E(t)$ ανά έργο και στο σύστημα.

2.6. Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια

Ένας βασικός στόχος στη μελέτη της πολιτικής απολήψεων των υδροσυστημάτων είναι ο καθορισμός των ελάχιστων εγγυημένων μεγεθών που μπορούν να παραχθούν κάτω από τις πλέον δυσμενείς υδρολογικές συνθήκες, τα οποία χαρακτηρίζονται ως πρωτεύοντα (firm). Ως πρωτεύουσα ενέργεια ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα χωρίς διακοπή ή με πολύ μικρή διακοπή για το σύνολο της περιόδου λειτουργίας του (Mays and Tung 1992). Η διακοπή αναφέρεται στην αδυναμία κάλυψης ενεργειακών ζητήσεων που οφείλεται στη μη διαθεσιμότητα υδατικών αποθεμάτων και συνεπώς ορίζεται σε μηνιαία ή ετήσια κλίμακα. Η πρωτεύουσα ενέργεια αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της ενεργειακής παραγωγής ενός συστήματος, το οποίο εξαρτάται:

1. από τη στοχαστικότητα των εισροών
2. από τη συνολική ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος και
3. από το αποδεκτό επίπεδο διακινδύνευσης της ενεργειακής παραγωγής, δηλαδή τη 'μικρή διακοπή' που επιτρέπεται να έχει το σύστημα στην παροχή ενέργειας.

Το πλεόνασμα της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα, πέραν της πρωτεύουσας, ονομάζεται δευτερεύουσα ενέργεια. Η δευτερεύουσα ενέργεια αποτελεί ενεργειακό δυναμικό μικρής αξίας, διότι δεν είναι εγγυημένο και δύναται να παραχθεί μόνο κατά τις χρονικές περιόδους μεγάλων εισροών στους ταμιευτήρες.

Εξ' ορισμού η έννοια της πρωτεύουσας ενέργειας συνδέεται άμεσα με ένα δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, το οποίο καθορίζει πόση μπορεί να είναι η επιτρεπτή 'πολύ μικρή διακοπή' που περιγράφηκε προηγουμένως. Βάσει αυτού, είναι εμφανές ότι η πρωτεύουσα ενέργεια μπορεί να ορισθεί ως το ασφαλές μέτρο επίδοσης x^* για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας α^* , όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στην παρούσα εργασία η ανάλυση της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας γίνεται σε μηνιαίο χρονικό βήμα.

Μια ακόμη διάκριση που αφορά στην κάλυψη των ζητήσεων γίνεται ανάμεσα σε ενέργεια αιχμής και ενέργεια βάσης. Ως ενέργεια αιχμής ορίζεται αυτή η οποία ζητείται στις περιόδους υψηλών ζητήσεων (στις αιχμές του δικτύου, όπως λ.χ κατά τις ώρες αιχμής της θερινής περιόδου στην Ελλάδα), ενώ ως ενέργεια βάσης ορίζεται η ενέργεια που καλύπτει την ελάχιστη, συνεχή ζήτηση. Στον ελληνικό χώρο η ενέργεια βάσης καλύπτεται από τη λειτουργία των θερμοηλεκτρικών μονάδων (οι οποίες έχουν μεγάλους χρόνους εκκίνησης και παύσης της λειτουργίας τους και συνεπώς δεν μπορούν να λειτουργήσουν διακοπτόμενα), ενώ η ενέργεια αιχμής δύναται να καλυφθεί από τα υδροηλεκτρικά έργα. Κατά συνέπεια, όλα τα υδροηλεκτρικά έργα μελετώνται ως έργα αιχμής και η πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται θεωρείται ότι καλύπτει αιχμές της ζήτησης.

Η παραδοχή αυτή γίνεται χωρίς σφάλμα της γενικότητας, αφού η διάκριση σε ενέργεια αιχμής και βάσης γίνεται συνήθως σε μικρές χρονικές κλίμακες (ημερήσια, ωριαία), ενώ η διερεύνηση της δυνατότητας ενεργειακής παραγωγής των υδροσυστημάτων γίνεται σε ετήσιες ή μηνιαίες χρονικές κλίμακες. Κατά συνέπεια, η διάκριση σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια είναι ανεξάρτητη της πολιτικής χρήσης των υδροηλεκτρικών έργων (ως έργων αιχμής ή ως έργων βάσης) από τον πάροχο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες χώρες όπως η Νορβηγία, με ιδιαίτερα σημαντικό υδροδυναμικό και αντίστοιχο βαθμό αξιοποίησης, ορισμένα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα νοούνται και ως έργα βάσης. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην ιστοσελίδα: <http://userwikis.fu-berlin.de/pages/viewpage.action?pageId=81690714>.

2.7. Η ανάγκη και χρησιμότητα της παραμετροποίησης

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε σύνθετες περιπτώσεις βελτιστοποίησης είναι η κατάρα της διαστατικότητας (curse of dimensionality), δηλαδή η εκθετική αύξηση του χώρου αναζήτησης λύσεων του προβλήματος (άρα και της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος) καθώς αυξάνεται το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου. Αν, για παράδειγμα, υποθεθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων με δυναμικό προγραμματισμό το οποίο έχει n διαφορετικές μεταβλητές απόφασης (λ.χ. n διαφορετικά μεγέθη, όπως απόληψη νερού και παραγόμενη ενέργεια) και m διακριτές τιμές των μεταβλητών, οι συνδυασμοί που προκύπτουν για κάθε στάδιο επιλύσεως είναι m^n

(Μακρόπουλος 2011). Το πρόβλημα γίνεται εμφανές και από το παράδειγμα βελτιστοποίησης της πολιτικής απολήψεων ενός απλού ταμιευτήρα για μηνιαίο χρονικό βήμα t , ο οποίος έχει τη δυναμική που περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1, δηλαδή χαρακτηρίζεται από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου:

$$S_{t+1} = S_t + I_t + P_t - G_t - E_t - R_t - Y_t \quad (2.13)$$

μαζί με ένα σύνολο φυσικών και λειτουργικών περιορισμών (οι οποίοι δεν αναφέρονται εδώ για λόγους απλοποίησης). Έστω ότι ο χώρος των μεταβλητών απόφασης (control variables) του προβλήματος είναι η ετήσια, σταθερή ακολουθία απολήψεων $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_{12}\}$ από τον ταμιευτήρα και το κριτήριο επίδοσης είναι κάποια συνάρτησή τους $f(\mathbf{R})$ (λ.χ. όφελος από τη χρήση του νερού ή παραγόμενη ενέργεια), η οποία τίθεται προς μεγιστοποίηση. Ο χώρος αναζήτησης λύσεων της f τότε είναι ένα υποσύνολο του 12-διάστατου πραγματικού χώρου \mathcal{R}^{12} . Αν θεωρήσουμε ως σύνολο μεταβλητών απόφασης την πραγματική ακολουθία απολήψεων για το σύνολο του χρόνου μελέτης, δηλαδή για τα m χρόνια στα οποία διατίθενται δεδομένα εισροών, οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος γίνονται πλέον $12 \cdot m$ και ο χώρος αναζήτησης αποκτάει πολλαπλάσιες διαστάσεις ($\mathcal{R}^{12 \cdot m}$). Εύλογα λοιπόν συμπεραίνεται η υπολογιστική δυσκολία εκτέλεσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε ένα τέτοιο πρόβλημα, ειδικά αν η συνάρτηση f είναι έντονα μη-γραμμική (όπως στην περίπτωση υδροηλεκτρικής παραγωγής) και ο αριθμός m των ετών μελέτης γίνει πολύ μεγάλος (όπως στην περίπτωση χρήσης συνθετικών χρονοσειρών).

Τα παραπάνω απλά παραδείγματα καταδεικνύουν την απαίτηση της παραμετροποίησης του προβλήματος, δηλαδή την εκλογή ενός μικρού πλήθους μεταβλητών απόφασης προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος. Είναι φανερό ότι μία τέτοια παραδοχή απλοποιεί σημαντικά το πρόβλημα αλλά θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, διότι περιλαμβάνει τον κίνδυνο υπεραπλούστευσης της διαδικασίας, η οποία ενδέχεται να οδηγήσει σε ανακριβείς ή ιδεατές λύσεις. Στα προβλήματα της διαχείρισης ταμιευτήρων, ωστόσο, η παραμετροποίηση είναι επιθυμητή και μάλιστα αποκτάει πρακτικό νόημα, μιας και δύναται να αντιπροσωπεύσει συγκεκριμένη πολιτική λειτουργίας των ταμιευτήρων. Για παράδειγμα, στο απλοποιημένο παράδειγμα βελτιστοποίησης που αναφέρθηκε παραπάνω, μία δυνατή παραμετροποίηση μπορεί να είναι ένα ζεύγος εποχικά κυμαινόμενων απολήψεων-στόχων $\{R_{wet}, R_{dry}\}$, οι οποίοι εναλλάσσονται ανά (εξαμηνιαία) περίοδο. Αυτό αντιπροσωπεύει σταθερές εποχικές απολήψεις-στόχους από τον ταμιευτήρα που πρέπει να καλύψει ο διαχειριστής. Ο χώρος αναζήτησης λύσεων για την f τότε καθίσταται διδιάστατος, απλοποιώντας σημαντικά το πρόβλημα. Σε ρεαλιστικότερα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος παραμετροποίησης είναι η χρήση παραμετρικών κανόνων λειτουργίας για τους ταμιευτήρες (Nalbantis and Koutsoyiannis 1997), η οποία συνίσταται στην κατανομή του συνολικού αποθέματος του συστήματος ανά ταμιευτήρα μέσω

δεδομένων, παραμετρικών σχέσεων. Οι παράμετροι κατανομής του αποθέματος τότε αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης για το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Ένα εύλογο συμπέρασμα της κατάρας της διαστατικότητας είναι ότι η παραμετροποίηση οφείλει να είναι κατά το δυνατόν φειδωλή (αρχή της φειδωλής παραμετροποίησης – principle of parsimony), χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παραμέτρων. Η προσθήκη επιπλέον παραμέτρων σε πολλές περιπτώσεις προβλημάτων βελτιστοποίησης μη-γραμμικών στοχικών συναρτήσεων όχι μόνο αυξάνει εκθετικά την υπολογιστική ισχύ αλλά δεν προσθέτει ουσιαστικούς βαθμούς ελευθερίας στο μοντέλο (αυτό εμπειρικά εμφανίζεται κατά τη διαδικασία της επίλυσης, όταν η προσθήκη τους συνεπάγεται αμελητέα μόνο βελτίωση των κριτηρίων επίδοσης του προβλήματος) και καθιστά το πρόβλημα μη ευσταθές, εγκλωβίζοντας τη στοχική συνάρτηση σε τοπικά ακρότατα (Ευστρατιάδης 2008).

Αξίζει να αναφερθεί ότι η βελτίωση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και η ανάπτυξη εξελιγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης έχει καταστήσει πλέον δυνατή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων με μη-παραμετρικές λύσεις. Από μερίδα ερευνητών, συνεπώς, προκρίνεται η χρήση εξελιγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης έναντι της απλοποίησης των παραμέτρων (ενδεικτικά αναφέρεται η βελτιστοποίηση μοντέλου διαχείρισης λεκάνης απορροής με 13700 μεταβλητές απόφασης και 10000 εξισώσεις, Cai et al. 2001), η οποία ωστόσο ενέχει τους κινδύνους που προαναφέρθηκαν ενώ δεν συνοδεύεται από πρακτική υπόσταση στην εφαρμογή του προβλήματος, μιας και οι καλώς ορισμένοι παραμετρικοί κανόνες διαχείρισης αντανακλούν μία καθορισμένη επιχειρησιακή πολιτική που μπορεί να κατανοήσει ο διαχειριστής του συστήματος. Έχει αποδειχθεί, εν γένει, ότι η εφαρμογή μη-παραμετρικών μεθόδων αντί των παραμετρικών προσεγγίσεων σε προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων δεν οδηγεί σε βελτιωμένα αποτελέσματα, αντιθέτως παρουσιάζει μειονεκτήματα εφαρμογής όπως την εξάρτηση από την πρόβλεψη μελλοντικών εισροών για ένα αυθαίρετα μεγάλο διάστημα (Οικονόμου 2000).

2.8. Το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο τη μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής

2.8.1. Βιβλιογραφική επισκόπηση μεθοδολογιών βελτιστοποίησης

Παρακάτω γίνεται μία αναφορά στις κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης με τις οποίες αντιμετωπίζονται προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων, με έμφαση σε εφαρμογές υδροηλεκτρικής παραγωγής. Τίθεται ένα απλοποιημένο μαθηματικό πρόβλημα για ένα ταμιευτήρα προκειμένου να κατανοηθούν οι εγγενείς δυσκολίες που παρουσιάζουν οι

εφαρμογές υδροηλεκτρικής παραγωγής και αναφέρονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι απλοποίησης του προβλήματος.

Οι εφαρμογές βελτιστοποίησης στη διαχείριση υδροσυστημάτων παρουσιάζουν μία ενδιαφέρουσα πορεία που αντανakλά τόσο την εξέλιξη στην κατανόηση (και διαχείριση) της αβεβαιότητας στις υδρολογικές μεταβλητές όσο και την πρόοδο στη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Η παλαιότερη προσέγγιση του προβλήματος περιελάμβανε εφαρμογές γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming), οι οποίες προϋποθέτουν τη γραμμικοποίηση του προβλήματος τόσο σε επίπεδο περιορισμών (constraints) όσο και σε επίπεδο στοχικής συνάρτησης. Ακολούθησε η εφαρμογή τεχνικών δυναμικού προγραμματισμού (Dynamic Programming) καθώς και διάφορες παραλλαγές πάνω στις παραπάνω μεθοδολογίες βελτιστοποίησης (λ.χ. συνδυασμοί γραμμικού – δυναμικού προγραμματισμού – DP/LP methods, Grygier and Stedinger 1985). Όσον αφορά στον τρόπο διαχείρισης της υδρολογικής αβεβαιότητας, οι παλαιότερες προσεγγίσεις ήταν ντετερμινιστικές (π.χ. Karamouz and Houck 1982). Τα μειονεκτήματα της ντετερμινιστικής προσέγγισης έγιναν σταδιακά εμφανή (μία πιο πρόσφατη ανάλυση δίνεται στην εργασία *Limitations of Deterministic Optimization applied to Reservoir Operations*, Philbrick and Kitanidis 1999) οπότε αντικαταστάθηκαν από μεθοδολογίες οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τη στοχαστικότητα των εισροών, όπως ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός (π.χ. Archibald et al. 1997). Σημειώνεται ότι όλες οι παραπάνω κλασικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης απαιτούν αυστηρές μαθηματικές εκφράσεις, οι οποίες οδηγούν σε συγκεκριμενοποίηση του προβλήματος (με τη στοχική συνάρτηση να είναι κατασκευασμένη για τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής), ενώ συνοδεύονται από απουσία πολλαπλών στόχων και ένα πλήθος ευρετικών κανόνων.

Η ανάπτυξη της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος επέτρεψε σταδιακά την υιοθέτηση μεθοδολογιών μη-γραμμικής βελτιστοποίησης (Non-Linear Programming, NLP), όπως τη χρήση εξελικτικών γενετικών αλγορίθμων (αναφέρονται για παράδειγμα οι εργασίες των Costa and Oliveira 2001, Ευστρατιάδη 2001). Παράλληλα άρχισαν να ενσωματώνονται στη διαδικασία τεχνικές προσομοίωσης του φυσικού συστήματος οι οποίες επέτρεπαν τη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση σύνθετων υδροσυστημάτων, ενώ έγινε δημοφιλής και η χρήση σύγχρονων μαθηματικών εργαλείων όπως η θολή λογική (fuzzy logic) και τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks) (π.χ. Neelakantan και Pundarikanthan 2001, Russell and Campbell 1996), τα οποία ωστόσο βρίσκονται ακόμα υπό διερεύνηση, ενώ χαρακτηρίζονται πιο πολύ ως ένα συμπλήρωμα σε υπάρχουσες τεχνικές παρά μία καινούργια φιλοσοφία βελτιστοποίησης (Russell και Campbell 1996).⁶

⁶ Ενδεικτικά αναφέρεται αυτούσιο το κείμενο από τη σχετική δημοσίευση: “[The fuzzy logic approach] can be a useful supplement to other conventional optimization techniques, but probably not a replacement”.

2.8.2. Τα χαρακτηριστικά του προβλήματος βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων τα οποία έχουν ως κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά που το διαφοροποιούν σε σχέση με τα κλασικά προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων, όπως την κάλυψη ζήτησεων νερού. Για την κατανόηση της φύσης του χρησιμοποιείται το παράδειγμα ενός απλού ταμιευτήρα ο οποίος συνοδεύεται από υδροηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ενέργειας, η δυναμική του οποίου διέπεται από μία απλοποιημένη έκφραση του υδατικού ισοζυγίου (σχέση (2.2)):

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t \quad (2.14)$$

όπου θεωρήθηκε συντηρητικά ότι η εξάτμιση από τον ταμιευτήρα ισούται με την κατακρήμνιση στην επιφάνειά του (και συνεπώς αυτές οι δύο συνιστώσες απαλείφονται). Επίσης θεωρήθηκαν μηδενικές διαφυγές G_t . Οι συνολικές εκροές από τον ταμιευτήρα O_t σε αυτή την περίπτωση ισούνται σε κάθε χρονικό βήμα με:

$$O_t = R_t - Y_t - Q_t \quad (2.15)$$

όπου R_t η (άγνωστη) ακολουθία εκροών μέσω του αγωγού προσαγωγής για την υδροηλεκτρική παραγωγή, Q_t η ακολουθία επιφανειακών απολήψεων για άλλες χρήσεις από τον ταμιευτήρα (στο συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρείται γνωστή) και Y_t η ακολουθία υπερχειλίσεων από τον ταμιευτήρα.

Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά χωρητικότητας (S_{\min} , K) του ταμιευτήρα, το απλούστερο δυνατό, ντετερμινιστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής για το έργο έχει τη γενική μαθηματική μορφή (Revelle 2000):

$$\left. \begin{array}{l} \text{Maximize } z = d \\ \text{subject to} \\ S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - Y_t - Q_t, \quad t = 1, 2, \dots, n \\ S_{\min} \leq S_t \leq K \\ 0 \leq R_t \leq R_{\max} \\ f(R_t, S_t, S_{t+1}) \geq d \\ S_t, Y_t \geq 0 \\ d \geq 0 \\ \text{by defining } R_t \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

Στο παραπάνω πρόβλημα αναζητείται η μέγιστη εγγυημένη ενέργεια d την οποία μπορεί να αποδώσει το σύστημα για μία δεδομένη ακολουθία εισροών. Θεωρώντας μία μη παραμετρική

προσέγγιση (απλώς για λόγους διευκόλυνσης της παρουσίασης), μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος είναι η ακολουθία εκροών R_t . Η προσοχή στην επίλυση του προβλήματος θα πρέπει να εστιαστεί στον περιορισμό $f(R_t, S_t, S_{t+1}) \geq d$, ο οποίος αποτελεί τη σχέση που συνδέει την ενεργειακή παραγωγή με την ελάχιστη εγγυημένη τιμή. Η περιοριστική αυτή συνθήκη είναι μη-γραμμική και αποτελεί το κυριότερο χαρακτηριστικό που διακρίνει τα προβλήματα υδροηλεκτρικής παραγωγής από προβλήματα απολήψεων στους ταμιευτήρες (τα οποία έχουν, στις απλούστερες περιπτώσεις τους, γραμμικούς περιορισμούς και στοχαστικές συναρτήσεις). Η συνάρτηση f είναι η συνάρτηση παραγωγής ενέργειας, η οποία δίνει την παραγόμενη ενέργεια σε κάθε χρονικό βήμα t και προκύπτει από τη διακριτοποίηση της σχέσης (2.6). Πράγματι, η ολοκλήρωση της σχέσης $I = (\rho \cdot g) \cdot Q \cdot H \cdot \eta$ για την εύρεση της παραγόμενης ενέργειας εντός του διαστήματος $[t_1, t_2]$ δίνει:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I dt = (\rho g) \int_{t_1}^{t_2} \eta(Q) \cdot Q(t) \cdot H(t) dt \quad (2.17)$$

Από τη (2.17) είναι προφανές ότι η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται, εκτός από τη διερχόμενη παροχή, και από τη χρονική διακύμανση της στάθμης, εξ' ου και η γενική μορφή $f(R_t, S_t, S_{t+1})$. Για τη διακριτοποίηση της σχέσης απαιτείται μία σειρά από παραδοχές, μετά τις οποίες προκύπτει η τελική μορφή της f (Revelle 2000). Η απλοποίηση η οποία εφαρμόζεται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ θεωρεί μικρή τη διακύμανση του αποθέματος $H(t)$, η οποία μπορεί να θεωρηθεί απλοποιητικά αμελητέα, άρα ισχύει ότι το απόθεμα H είναι ανεξάρτητο του χρονικού διαστήματος $[t_1, t_2]$. Η σχέση (2.17) τότε γίνεται:

$$E = (\rho g) \int_{t_1}^{t_2} \eta \cdot Q(t) \cdot H(t) dt \approx \psi H \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \psi H V \quad (2.18)$$

όπου V ο διερχόμενος όγκος νερού στο χρονικό διάστημα αναφοράς. Το ύψος πτώσης H ταυτίζεται με αυτό στην έναρξη του χρονικού βήματος, οπότε προκύπτει η τελική σχέση (2.5). Έτσι, απαλείφεται η εξάρτηση από τη στάθμη των ταμιευτήρων στο επόμενο χρονικό βήμα, άρα η παραγόμενη ενέργεια δίνεται από μία σχέση της μορφής $f(R_t, S_t)$. Η παραδοχή αυτή θεωρείται επαρκής για περιπτώσεις ταμιευτήρων που δεν παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις αποθέματος στο χρονικό βήμα μελέτης, όπως συμβαίνει συνήθως σε έργα μεγάλης κλίμακας.

3. Στοιχεία Στοχαστικής Υδρολογίας

Στο τρίτο κεφάλαιο επιχειρείται μία σύντομη θεωρητική επισκόπηση των βασικών εννοιών Στοχαστικής Υδρολογίας που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Δίνεται έμφαση στα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των υδρολογικών μεταβλητών και τη μεθοδολογία γέννησης συνθετικών χρονοσειρών, ενώ επιπρόσθετα αναλύεται η δυναμική Hurst-Kolmogorov που διέπει τις υδρολογικές μεταβλητές.

3.1. Στοχαστικές ανελίξεις και χρονοσειρές υδρολογικών μεγεθών

Παρ' ότι τα υδρολογικά φαινόμενα διέπονται από τους νόμους της κλασικής φυσικής, παρουσιάζουν εγγενή τυχαιότητα και συνεπώς δεν μπορούν να χαρακτηρισθούν ως προσδιοριστικώς προβλέψιμα (Koutsoyiannis 2010, Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999). Η αιτιότητα και η τυχαιότητα συνυπάρχουν στις υδρολογικές διαδικασίες και επιβάλλουν τη χρήση πιθανολογικών μεθόδων για την αντιμετώπιση των περισσότερων προβλημάτων υδρολογίας. Ωστόσο, ακόμη και οι πιθανολογικές μέθοδοι είναι πολλές φορές ελλιπείς, διότι δε λαμβάνουν υπόψη τη χρονική συσχέτιση μεταξύ των τιμών των υδρολογικών μεταβλητών (Κουτσογιάννης, 2000). Προκειμένου λοιπόν να μπορεί να αναλυθεί επαρκώς η σύνθετη συμπεριφορά των υδρολογικών φαινομένων λαμβάνοντας υπόψη το στοχαστικό χαρακτήρα τους, αναπτύχθηκε ο κλάδος της Στοχαστικής Υδρολογίας, ο οποίος βασίζεται στη θεώρηση των υδρολογικών μεταβλητών ως στοχαστικών ανελίξεων.

Στοχαστική ανέλιξη X_t (ή $X(t)$) ονομάζεται ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών σε ακολουθία $\{X_1, X_2, \dots, X_t\}$, με το δείκτη t να αφορά συνήθως στο χρονικό σύνολο των βημάτων μελέτης (π.χ. το σύνολο των μηνών που μελετάται η απορροή μιας λεκάνης). Η υλοποίηση μιας στοχαστικής ανελίξης, δηλαδή ένα σύνολο παρατηρήσεων $x(t)$ της $X(t)$ ονομάζεται χρονοσειρά. Χρονοσειρά για παράδειγμα αποτελεί ένα σύνολο μετρήσεων απορροής σε μία λεκάνη ως σύνολο παρατηρημένων τιμών σε διατεταγμένη σειρά. Η στοχαστική ανέλιξη χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο στατιστικών παραμέτρων, με κυριότερα:

- τη μέση τιμή:

$$\mu(t) = E[X(t)] \quad (3.1)$$

- την τυπική απόκλιση, η οποία προκύπτει ως τετραγωνική ρίζα της διασποράς:

$$\sigma(t) = \sqrt{\text{Var}[X(t)]} = \sqrt{E[(X(t) - \mu(t))^2]} \quad (3.2)$$

καθώς και δύο μεγέθη κρίσιμα για τη μελέτη της χρονικής συσχέτισης των τιμών:

- την αυτοσυνδιασπορά της ανέλιξης (τάξης τ):

$$\gamma(t; \tau) = \text{Cov}[X(t), X(t + \tau)] = E[(X(t) - \mu(t))(X(t + \tau) - \mu(t + \tau))] \quad (3.3)$$

- το συντελεστή αυτοσυσχέτισης τάξης τ :

$$\rho(t; \tau) = \frac{\text{Cov}[X(t), X(t + \tau)]}{\sqrt{\text{Var}[X(t)] \cdot \text{Var}[X(t + \tau)]}} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης ανήκει στο διάστημα $[-1,1]$, με την τιμή 0 να υποδηλώνει ασυσχέτιστα δεδομένα (π.χ. δείγμα μίας τυχαίας μεταβλητής) και τις τιμές $\{-1,1\}$ να υποδηλώνουν απόλυτη (προσδιοριστική και ταυτόχρονα γραμμική) αρνητική ή θετική συσχέτιση, αντίστοιχα. Η τάξη τ που συνήθως μελετάται στις υδρολογικές εφαρμογές είναι μικρή, ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των τιμών από τις αμέσως προηγούμενες τους. Γενικώς, οι στοχαστικές ανελιξεις στην Υδρολογία θεωρούνται στάσιμες και εργοδικές, δηλαδή έχουν στατιστικές παραμέτρους που δε μεταβάλλονται με το χρόνο και επιτρέπουν την εκτίμησή τους από μια απλή σειρά παρατηρήσεών τους. Ουσιώδες στη μελέτη των υδρολογικών χρονοσειρών είναι και το αυτοσυσχετόγραμμα (Εικόνα 3-1), το οποίο οπτικοποιεί τη δομή της αυτοσυσχέτισης, προβάλλοντας στον οριζόντιο άξονα την τάξη τ του συντελεστή αυτοσυσχέτισης και στον κατακόρυφο την τιμή αυτού.



Πέραν της χρονικής εξάρτησης εντός μίας στοχαστικής ανέλιξης, υπάρχουν περιπτώσεις υδρολογικών μεταβλητών που είναι ετεροσυσχετισμένες, όπως λ.χ. η άμεση εξάρτηση της απορροής από

τη βροχή ή η χωρική συσχέτιση της βροχής σε διαφορετικές θέσεις της ίδιας λεκάνης. Στις παραπάνω περιπτώσεις, ιδιαίτερα σημαντικά είναι τα μεγέθη της ετεροσυνδιασποράς μεταξύ δύο διαφορετικών ανελιξεων $X(t)$ και $Y(t)$:

$$C_{XY}(\tau) = \text{Cov}[X(t), Y(t + \tau)] \quad (3.5)$$

, καθώς και του συντελεστή ετεροσυσχέτισης των δύο ανελιξεων:

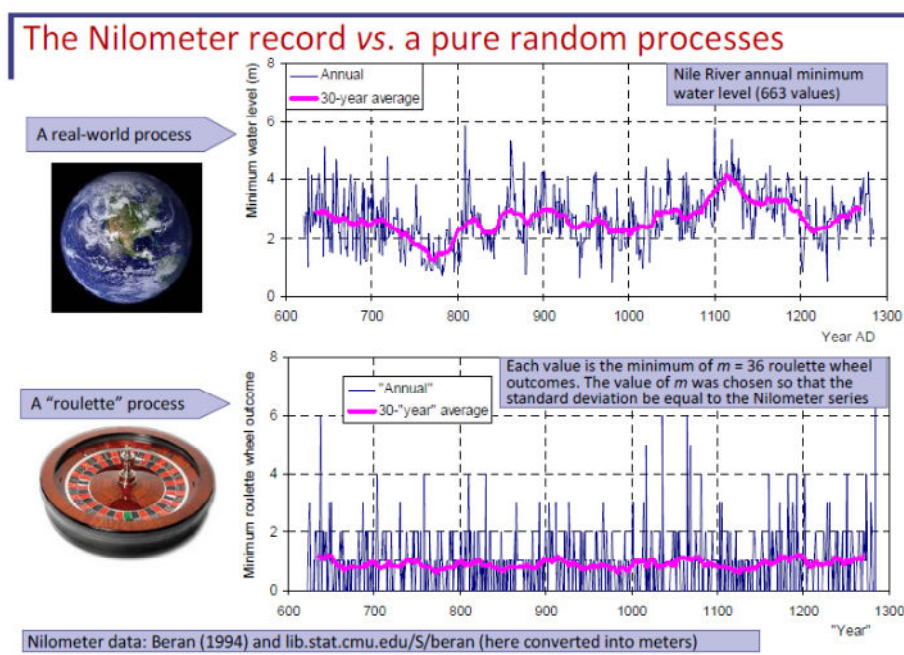
$$r_{XY}(\tau) = \frac{\text{Cov}[X(t), Y(t + \tau)]}{\sqrt{\text{Var}[X(t)] \cdot \text{Var}[Y(t + \tau)]}} \quad (3.6)$$

Συνήθως η σύγκριση των δύο ανελιξων γίνεται στο ίδιο χρονικό βήμα, οπότε ενδιαφέρει ο συντελεστής ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης $r_{XY}(0)$.

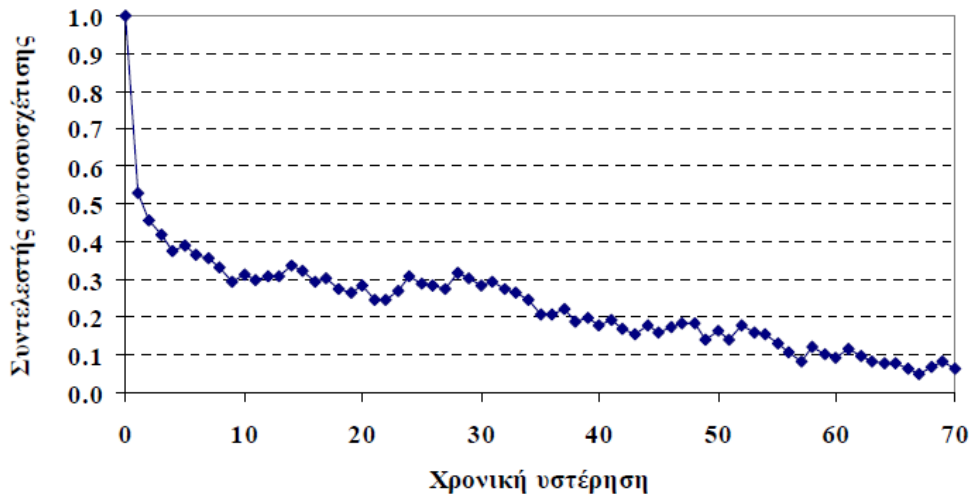
3.2. Δυναμική Hurst–Kolmogorov

Η δυναμική Hurst-Kolmogorov αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό που εμφανίζεται σε πλήθος χρονοσειρών μετεωρολογικών και γεωφυσικών φαινομένων (Κουτσογιάννης, 2000). Αρχικά παρατηρήθηκε από το Βρετανό μηχανικό Hurst, ο οποίος μελετούσε χρονοσειρές απορροών του ποταμού Νείλου με μεγάλο μήκος. Κατά τη μελέτη τους διαπιστώθηκε η τάση εμφάνισης των υγρών και των ξηρών ετών κατά ομάδες και, συνεπώς, ο σχηματισμός μακρών περιόδων με ομαδοποιημένα υγρά και ξηρά έτη, αντίστοιχα. Η ιδιότητα αυτή ονομάστηκε φαινόμενο Hurst, ενώ είχε περιγραφεί μαθηματικά αρκετά χρόνια πριν την παρατήρηση αυτή από τον Kolmogorov κατά τη μελέτη φαινομένων τύρβης, με το αντίστοιχο μοντέλο να έχει ονομασθεί στοχαστική ανέλιξη απλής ομοιοθεσίας (Simple Scaling Stochastic Process). Ορθότερος συνεπώς είναι ο χαρακτηρισμός του φαινομένου ως δυναμική Hurst-Kolmogorov, το οποίο συναντάται στη βιβλιογραφία και ως ομοιοθεσία (scaling) ή μακροπρόθεσμη εμμονή (persistence).

Η δυναμική Hurst-Kolmogorov στις χρονοσειρές οδηγεί σε διατήρηση υψηλής αυτοσυσχέτισης μεταξύ των τιμών για μεγάλες χρονικές τάξεις τ , οδηγώντας σε τάση ομαδοποίησης υψηλών και χαμηλών τιμών (Εικόνα 3-2), καθώς και στη χαρακτηριστική εικόνα αυτοσυσχετογραμμάτων με «μακρά ουρά» (Εικόνα 3-3), όπου οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης διατηρούν συνεχώς θετικές τιμές.



Εικόνα 3-2: Η εικόνα της χρονοσειράς ετήσιας ελάχιστης στάθμης του Νείλου (με 663 τιμές) σε σύγκριση με ένα πραγματικά τυχαίο γεγονός (μια διεργασία ‘ρουλέτας’) (Πηγή: Koutsoyiannis 2011).



Εικόνα 3-3: Αυτοσυσχετόγραμμα χρονοσειράς μέσω ετήσιων θερμοκρασιών για το Βόρειο Ημισφαίριο. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης διατηρεί μεγάλες τιμές για μεγάλες τιμές χρονικής υστέρησης τ (Πηγή: Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης 2004).

Μέτρο της εμμονής και ενδεικτικό μέγεθος της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς για μία χρονοσειρά είναι ο συντελεστής Hurst⁷ H , ο οποίος λαμβάνει τιμές που ανήκουν στο διάστημα $(0,1)$. Για $H = 0.5$ υπάρχει χρονική ανεξαρτησία των τιμών, ενώ για $0.5 < H < 1.0$ εμφανίζεται εμμονή, η οποία γίνεται πιο έντονη όσο μεγαλώνει η τιμή του συντελεστή. Για $0 < H < 0.5$ η χρονοσειρά εμφανίζει αντι-εμμονή (anti-persistence), δηλαδή μία μείωση στις τιμές της χρονοσειράς είναι πιθανό να ακολουθείται από μία αύξησή τους.

Στην Υδρολογία, η δυναμική Hurst-Kolmogorov αποτελεί σημαντική ιδιότητα ενός πλήθους υδρολογικών μεταβλητών με σημαντικότερη αυτή της απορροής. Είναι επιτακτική, επομένως, η διατήρησή της κατά τη δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών προκειμένου να διατηρηθεί η τάση ομαδοποίησης των ετών υψηλής και χαμηλής υδροφορίας, η οποία εν γένει οδηγεί σε πιο δυσμενείς λύσεις στη διαχείριση υδροσυστημάτων (Bras and Rodriguez-Iturbe 1993, Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης 2004). Η επιρροή της ιδιότητας στη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι εμφανής: η ομαδοποίηση των υγρών ετών οδηγεί σε επίμονα πλημμυρικά φαινόμενα (Bloschl and Montanari 2010) και αυξάνει την πιθανότητα υπερχειλίσεων από τους ταμιευτήρες, ενώ η εμφάνιση επίμονων ξηρασιών που συνεπάγονται τα ομαδοποιημένα ξηρά έτη έχει δυσμενή επίπτωση στις περιπτώσεις κάλυψης υδρευτικών και αρδευτικών ζητήσεων.

Ωστόσο, η εύρεση του συντελεστή Hurst βάσει των διαθέσιμων δεδομένων και, γενικότερα, η τεκμηρίωση εμμένουσας συμπεριφοράς μέσω της εικόνας των χρονοσειρών

⁷ Ο υπολογισμός του συντελεστή Hurst γίνεται με διάφορες εκτιμήτριες που ξεφεύγουν από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Για περισσότερες πληροφορίες, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει σε αντίστοιχες εργασίες (π.χ. Racine R., Estimating the Hurst Exponent, Bachelor Thesis, 2011, ETH Zurich).

είναι ιδιαίτερα δυσχερής, δεδομένου ότι απαιτείται ιστορικό δείγμα μεγάλου μήκους (της τάξης των μερικών εκατοντάδων ετών) ώστε να είναι δυνατή η ακριβής εκτίμηση των συντελεστών αυτοσυσχέτισης για μεγάλες τάξεις τ (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης 2004). Η διαθέσιμη υδρολογική πληροφορία σπανίως ξεπερνά το χρονικό βάθος μίας εκατονταετίας, ενώ στον Ελληνικό χώρο είναι συνήθως της τάξης των μερικών δεκάδων ετών, καθιστώντας τη δειγματική εκτίμηση της συμπεριφοράς μακράς κλίμακας ιδιαίτερα επισφαλή.

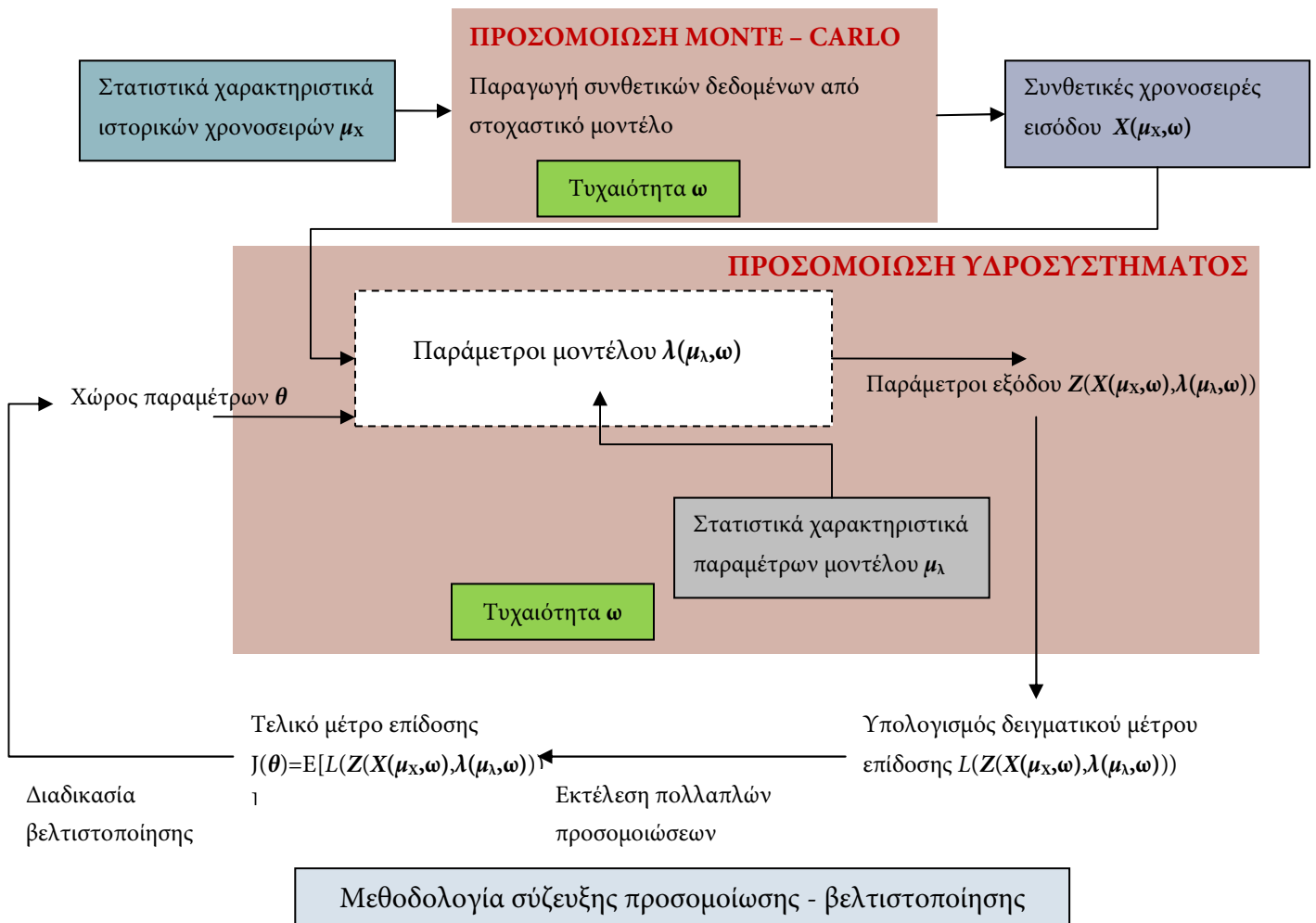
3.3. Γέννηση συνθετικών χρονοσειρών

Όπως προαναφέρθηκε (ενότητα 3.1), η στοχαστική ανάλυση παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση τόσο με την προσδιοριστική όσο και με την πιθανοτική θεώρηση στην Υδρολογία, διότι ποσοτικοποιεί την υδρολογική αβεβαιότητα, ενώ παράλληλα διατηρεί το χαρακτήρα της χρονικής συσχέτισης των υδρολογικών μεταβλητών. Στα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων η στοχαστική (Monte Carlo) προσομοίωση επιτρέπει την παραγωγή συνθετικών δεδομένων, τα οποία καθιστούν δυνατή τη διερεύνηση της απόκρισης των υδροσυστημάτων σε ένα πλήθος υποθετικών σεναρίων, στατιστικά ισοδύναμων με το ιστορικά παρατηρημένο. Γίνεται εμφανές δε ότι η γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους επιτρέπει την ανάλυση διακινδύνευσης των χρήσεων νερού στο υδροσύστημα και την εκτίμηση της αξιοπιστίας (βλ. και ενότητα 2.5). Σημειώνεται ωστόσο πως τα συνθετικά δείγματα δεν υποκαθιστούν τις ιστορικές μετρήσεις, καθώς δεν προσθέτουν πληροφορία (Κουτσογιάννης, 2000), απλώς ανεξαρτητοποιούν τα αποτελέσματα ανάλυσης του υδροσυστήματος από το μήκος της χρονοσειράς εισόδου, κάτι το οποίο είναι εμφανές στην περίπτωση χρήσης ιστορικών χρονοσειρών περιορισμένου μήκους.

Με βάση συνεπώς τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών παράγονται με τη βοήθεια κάποιου στοχαστικού μοντέλου συνθετικά δεδομένα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι συνθετικές χρονοσειρές υδρολογικών μεταβλητών (βροχών, απορροών, εξατμίσεων) που παράγονται αποτελούν στοιχείο εισόδου για το σύστημα ταμιευτήρων, προμηθεύοντάς το με μεγάλο αριθμό τιμών που διατηρούν επιλεγμένα ιστορικά στατιστικά χαρακτηριστικά. Το είδος των στατιστικών χαρακτηριστικών που διατηρούνται (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία, δομή της αυτοσυσχέτισης κ.α.) εξαρτάται από το στοχαστικό μοντέλο εισροών⁸ που επιλέγεται για την γέννηση των χρονοσειρών. Η παραγωγή συνθετικών δεδομένων συνιστά εξ' ορισμού Monte Carlo προσομοίωση που προηγείται της επίλυσης του μοντέλου των ταμιευτήρων, μιας και τροφοδοτεί το σύστημα των ταμιευτήρων με δεδομένα εισόδου. Στην περίπτωση χρήσης συνθετικών χρονοσειρών, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης, ένα για τη γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών

⁸ Ο όρος 'στοχαστικό μοντέλο εισροών' αφορά στο μοντέλο παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών και δεν θα πρέπει να συγχέεται με το μοντέλο προσομοίωσης του υδροσυστήματος.

και ένα για την αναπαράσταση της λειτουργίας του υδροσυστήματος. Κατά συνέπεια, το γράφημα σύζευξης προσομοίωσης – βελτιστοποίησης τροποποιείται όπως στην Εικόνα 3-4. Στη συνέχεια αναλύονται τα δύο βασικά στοχαστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών εισόδου του μοντέλου.



Εικόνα 3-4: Η μεθοδολογία σύζευξης της προσομοίωσης με τη βελτιστοποίηση στην περίπτωση χρήσης συνθετικών χρονοσειρών ως είσοδο για το μοντέλο προσομοίωσης του υδροσυστήματος.

3.3.1. Αλυσίδες Markov – Μοντέλα AR(1)

Ένα στοχαστικό μοντέλο με μεγάλο εύρος εφαρμογής σε πραγματικά προβλήματα είναι το λεγόμενο μοντέλο (ή αλυσίδα) Markov. Το μοντέλο αυτό, το οποίο αναπτύχθηκε θεωρητικά από το ρώσο μαθηματικό Andrey Markov στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, βασίζεται στη λογική της εκτίμησης της κατάστασης (i) μιας στοχαστικής ανέλιξης με βάση την αμέσως προηγούμενη ($i-1$). Θεωρώντας επομένως μία στάσιμη ανέλιξη X_i σε διακριτό χρόνο, το μοντέλο Markov εκφράζεται από τη σχέση:

$$X_i = a \cdot X_{i-1} + V_i \quad (3.7)$$

όπου V_i ακολουθία λευκού θορύβου (δηλαδή ασυσχέτιστων μεταξύ τους τιμών που ακολουθούν την ίδια κατανομή) σε διακριτό χρόνο. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται και μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης (autoregression) 1ης τάξης ή συμβολικά AR(1).

Με τη λογική του μοντέλου, τα μελλοντικά στάδια εξαρτώνται μόνο από την αμέσως προηγούμενη κατάσταση τους και συνεπώς δεν διατηρείται η εμμονή της χρονοσειράς. Για την εφαρμογή του, απαιτείται ο προσδιορισμός της παραμέτρου a καθώς και των στατιστικών χαρακτηριστικών $[E(V_i), \text{Var}(V_i)]$ του λευκού θορύβου. Τα μεγέθη αυτά προσδιορίζονται βάσει των στατιστικών χαρακτηριστικών του ιστορικού δείγματος, ως εξής (Κουτσογιάννης, 2000):

$$E(V_i) = (1 - a) \cdot \hat{\mu}_x \quad (3.8)$$

$$\text{Var}(V_i) = (1 - a^2) \cdot \hat{\sigma}_x^2 \quad (3.9)$$

$$\alpha = \hat{\rho}_1 \quad (3.10)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις το ζεύγος παραμέτρων $(\hat{\mu}_x, \hat{\sigma}_x^2)$ είναι η δειγματική μέση τιμή και διασπορά της ιστορικής χρονοσειράς τιμών x_t , ενώ $\hat{\rho}_1$ ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της. Εφ' όσον ο λευκός θόρυβος V_i παραχθεί από κατανομή με τρεις παραμέτρους (θέσης, σχήματος, κλίμακας), είναι δυνατή και η διατήρηση της ασυμμετρίας της ιστορικής πληροφορίας (Κουτσογιάννης 2002). Οι ανελιξείς Markov παρουσιάζουν χαρακτηριστική εικόνα αυτοσυσχέτισης, με το συντελεστή αυτοσυσχέτισης $\rho(\tau)$ να μειώνεται εκθετικά για αύξηση της τάξης (χρονικής υστέρησης) τ και, συνεπώς, να εξασθενεί γρήγορα για μεγάλες τάξεις του συντελεστή:

$$\rho(\tau) = e^{-k\tau} \quad (3.11)$$

3.3.2. Μοντέλο απλής ομοιοθεσίας

Βάσει της ανάλυσης στην παράγραφο 3.2, είναι εμφανής η απαίτηση της δημιουργίας στοχαστικών μοντέλων ικανών να αναπαράγουν την εμμονή. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η μαθηματική περιγραφή της δυναμικής Hurst-Kolmogorov, η οποία πραγματοποιείται με εξειδικευμένα στοχαστικά σχήματα, όπως το μοντέλο του κλασματικού Γκαουσιανού θορύβου (Fractional Gaussian Noise, FGN) (Mandelbrot 1965). Τα μοντέλα αυτά θεωρούν μία συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\rho_j = \rho(j)$ της μορφής:

$$\rho_j = \frac{1}{2}[(j+1)^{2H} + (j-1)^{2H}] - j^{2H} \quad (3.12)$$

όπου H ο συντελεστής Hurst. Η ακολουθία (3.12) μπορεί να προσεγγισθεί για μεγάλες τιμές j από μια εξίσωση που συνδέει την αυτοσυσχέτιση με την τάξη (χρονική υστέρηση) j με μία σχέση δύναμης:

$$\rho_j = H(2H - 1) \cdot j^{2H-2} \quad (3.13)$$

Η εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων που διατηρούν εμμονή συχνά συναντά δυσκολίες στην υδρολογική εφαρμογή, λόγω της σύνθετης μαθηματικής τους έκφρασης αλλά και προβλημάτων που οι κλασικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν, όπως η διατήρηση της δομής της αυτοσυσχέτισης, η δυσκολία διατήρησης της ασυμμετρίας και η δυσχέρεια εφαρμογής σε πολυμεταβλητά σχήματα. Υπό αυτό το πλαίσιο, ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν ορισμένοι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι του μοντέλου FGN (Koutsoyiannis 2002), οι οποίοι δύνανται να αναπαράξουν τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά μέσω στάσιμων ανελιξεων ενώ χαρακτηρίζονται από απλότητα και ευκολία εφαρμογής.

Μέσω αυτών το μοντέλο FGN μπορεί να προσεγγισθεί ως επαλληλία τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας, ως αποτέλεσμα διαδοχικών επιμερισμών ή ως σχήμα συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (symmetric moving average – SMA). Σύμφωνα με την τελευταία μέθοδο (Koutsoyiannis 2000), το σχήμα προκύπτει από το μετασχηματισμό μίας ακολουθίας λευκού θορύβου V_i σε μία ακολουθία με αυτοσυσχέτιση X_i σύμφωνα με τη σχέση:

$$X_i = \sum_{j=-q}^q a_{|j|} V_{i+j} = a_q V_{i-q} + \dots + a_1 V_{i-1} + a_0 V_i + a_1 V_{i+1} + \dots + a_q V_{i+q} \quad (3.14)$$

όπου a_j συντελεστές βάρους οι οποίοι για την περίπτωση του μοντέλου FGN δίνονται ως εξίσωση δύναμης του j :

$$a_j = \frac{\sqrt{(2-2H)\gamma_0}}{3-2H} [(j+1)^{H+0.5} + (j-1)^{H+0.5} - 2j^{H+0.5}], \quad j > 0 \quad (3.15)$$

και q το εύρος συμμετρίας το οποίο θεωρητικώς είναι άπειρο αλλά πρακτικώς εκλέγεται από το χρήστη, λαμβάνοντας τιμή:

$$q \geq \max \left[m, \left(\frac{2\beta}{H^2 - 0.25} \right)^{\frac{1}{H-1.5}} \right] \quad (3.16)$$

όπου m το πλήθος όρων αυτοσυσχέτισης που πρέπει να διατηρηθούν και β συντελεστής ακριβείας.

4. Το υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας

Μία απλή εφαρμογή των διαχειριστικών εργαλείων που αναπτύσσονται στην παρούσα διπλωματική εργασία χωρίς να σκιαγραφηθούν τα γενικά χαρακτηριστικά ενός τόσο σημαντικού υδροσυστήματος όπως αυτό του Αχελώου-Θεσσαλίας θα ήταν λειψή. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών των επιμέρους λεκανών αλλά και του συνολικού συστήματος, ενώ αναλύεται το ενδιαφέρον ιστορικό του έργου εκτροπής, το οποίο αντανακλά την έλλειψη ολοκληρωμένης διαχειριστικής πολιτικής με την οποία αντιμετωπίζονταν μέχρι πρόσφατα οι ελληνικοί υδατικοί πόροι.

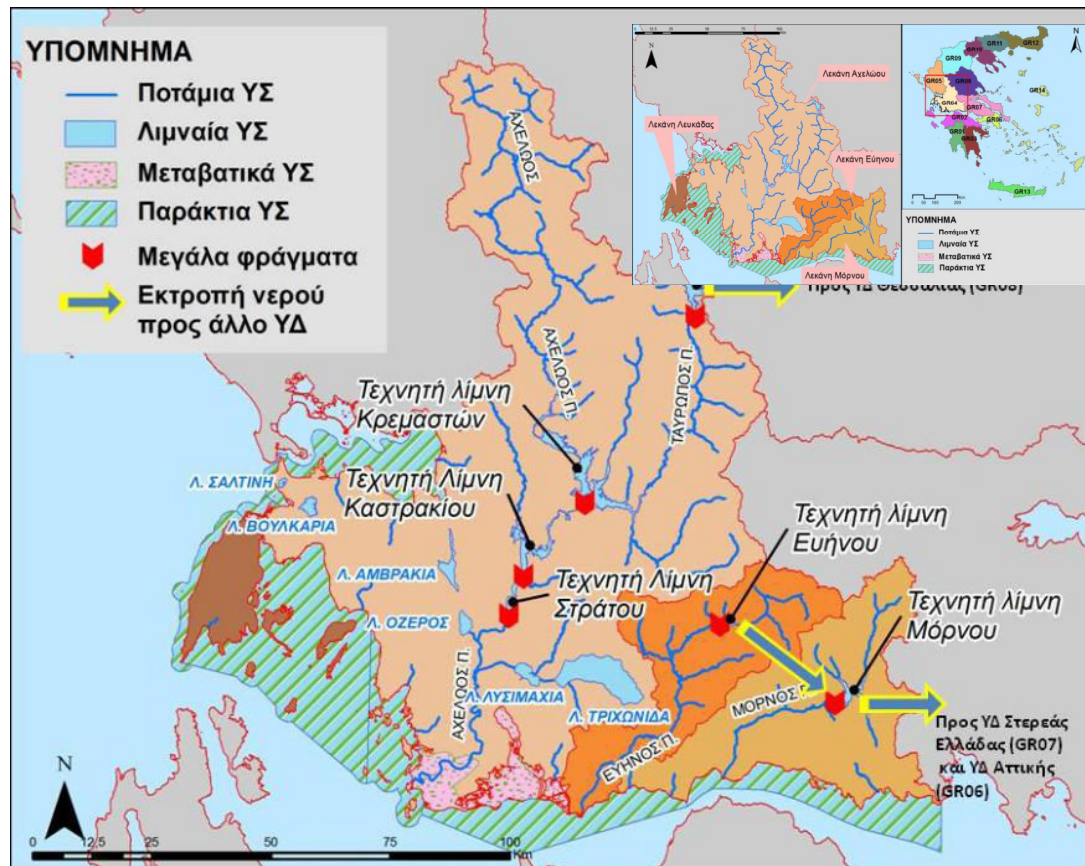
4.1. Η περιοχή του Αχελώου

Ο Αχελώος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ποτάμια της Ελλάδας, όντας ο πλουσιότερος σε παροχή ποταμός που βρίσκεται εξ ολοκλήρου σε ελληνικό έδαφος. Πηγάζει από την οροσειρά της Νότιας Πίνδου και ξεκινώντας από τα ορεινά του νομού Τρικάλων διασχίζει τους νομούς Άρτας, Ευρυτανίας και Αιτωλοακαρνανίας, εκβάλλοντας τελικώς στο Ιόνιο Πέλαγος απέναντι από τις νήσους Εχινάδες που έχουν σχηματιστεί με τις προσχώσεις του. Αποτελεί το κυριότερο ποτάμιο σύστημα του Υδατικού Διαμερίσματος της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας με συνολικό μήκος περί τα 220 km.

Σε αντίθεση με τον άνω Αχελώο, ο ρους του κάτω Αχελώου έχει αξιοποιηθεί εδώ και αρκετά χρόνια για την υδροηλεκτρική παραγωγή. Διαθέτει τρία σημαντικά Υδροηλεκτρικά Έργα, το μεγαλύτερο εκ των οποίων είναι το ΥΗΕ Κρεμαστών κατασκευασμένο το 1966. Τα άλλα δύο είναι το ΥΗΕ Καστρακίου, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 1969, καθώς και το ΥΗΕ Στράτου το οποίο ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1989. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο συγκρότημα έργων του κάτω Αχελώου (μαζί με τα μικρά ΥΗΕ Γλαύκου και Γκιώνας) είναι 925,6 MW (Αργυράκης 2009).

Όσον αφορά στις ανάγκες της ευρύτερης περιοχής το υδατικό δυναμικό της δυτικής Στερεάς Ελλάδας είναι πλούσιο, οπότε δεν υπάρχουν ιδιαίτερες ελλείψεις στην κάλυψη των ζητήσεων. Οι αιχμές των κύριων ζητήσεων (ενεργειακές και άρδευσης) εμφανίζονται τους θερινούς μήνες με τα μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα στον κάτω Αχελώο, λόγω της δυνατότητας υπερετήσιας ρύθμισης, να τις καλύπτουν επαρκώς. Η σημαντικότερη ζήτηση στη λεκάνη του Αχελώου είναι οι αρδευτικές ζήτησεις, οι οποίες κυμαίνονται στα 544 hm³ ετησίως, ενώ για ύδρευση διατίθενται 9 hm³ ετησίως (Στεφανάκος 2008). Επίσης δεν αναφέρονται ιδιαίτερες ανθρωπογενείς πιέσεις οι οποίες να έχουν αντίκτυπο στις ποιοτικές παραμέτρους των υδάτων του Αχελώου (Κουτσογιάννης κ.α. 2008).

Στην Εικόνα 4-1 διακρίνεται η λεκάνη του Αχελώου και η θέση της στο Υδατικό Διαμέρισμα ΥΔ04 στο οποίο υπάγεται, σύμφωνα με τα Σχέδια Διαχείρισης που καταρτίζονται βάσει της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60). Αξίζει να αναφερθεί ότι με τον ταμιευτήρα του Ταυρωπού εκτρέπεται ένα τμήμα των υδάτων του παραπόταμου του Αχελώου προς το αντίστοιχο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, ενώ από τις λεκάνες απορροής του Μόρνου και του Ευήνου εκτρέπεται σημαντικό τμήμα των υδάτων για την ύδρευση της Αττικής.



Εικόνα 4-1: Στοιχεία του Υδατικού Διαμερίσματος ΥΔ04 (Πηγή: Κ/Ξια Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας 2011)

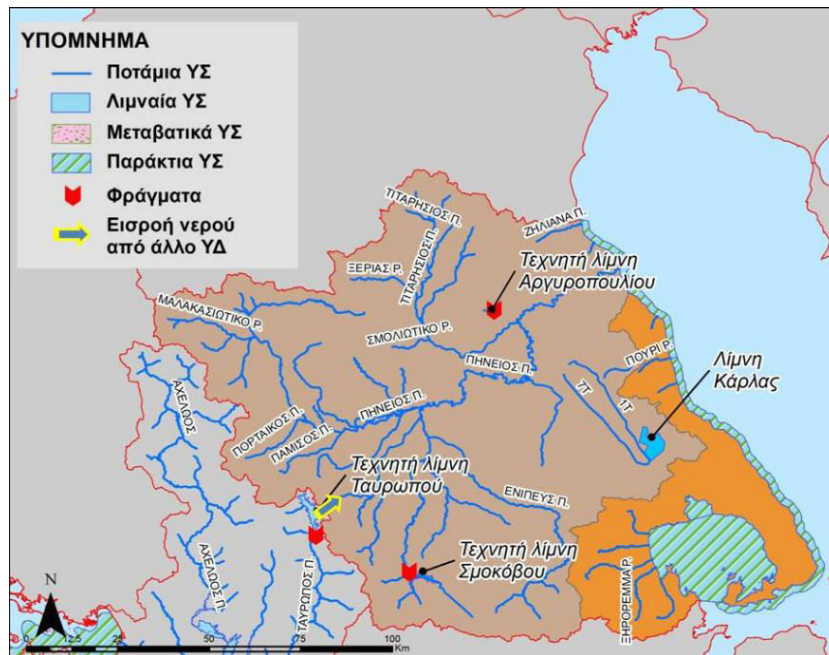
4.2. Η περιοχή της Θεσσαλίας



Εικόνα 4-2: Άποψη της Θεσσαλικής πεδιάδας (Πηγή: <http://www.greekscapes.gr/>)

Η κοιλάδα της Θεσσαλίας (Εικόνα 4-2) αποτελεί μείζονα αγροτική περιοχή, ιδιαίτερα σημαντική για την πρωτογενή παραγωγή της χώρας, με αρδευόμενες εκτάσεις που ανέρχονται προσεγγιστικά στα 1,5 εκατομμύριο στρέμματα και δυνατότητα αύξησης αυτών στα 3,5 εκατομμύρια στρέμματα (Επιστημονική Επιτροπή Υδραυλικών Έργων Τ.Ε.Ε. 1979). Κατά συνέπεια, έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό συγκριτικά με κάθε άλλη περιοχή της χώρας, που φτάνει το 21,7% της συνολικής υδατικής κατανάλωσης στην Ελλάδα, ήτοι 1,171 hm³ ετησίως, εκ των οποίων 1,060 hm³ για αγροτική χρήση.

Παράλληλα, ως περιοχή της ανατολικής Ελλάδας έχει σαφώς μικρότερο υδατικό δυναμικό σε σχέση με τη λεκάνη του Αχελώου, με μόνο σημαντικής ροής ποταμό τον Πηνειό (μαζί με τους παραποτάμους του), ο οποίος έχει μέση ετήσια απορροή 3325 hm³. Κατά συνέπεια, οι μεγάλες αρδευτικές απαιτήσεις δεν μπορούν σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες να καλυφθούν από ίδιους πόρους (Λαζαρίδης 2010, ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995). Η κάλυψη του υδατικού ισοζυγίου τους θερινούς μήνες είναι ήδη οριακή, εκτιμάται δε ότι περαιτέρω αξιοποίηση της περιοχής, με την ίδια πολιτική καλλιεργειών και ανάλογα αυξημένες αρδευτικές ανάγκες, θα επέφερε ένα σημαντικό υδατικό έλλειμμα της τάξεως των 500-1000 hm³ ετησίως.



Εικόνα 4-3: Τα κυριότερα υδάτινα σώματα του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: Κ/Ξια Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας 2011)

Οι θεσσαλικοί υδατικοί πόροι (Εικόνα 4-3) αποτελούνται από τις υδρολογικές λεκάνες του Πηνειού, της Κάρλας και του Αλμυρού. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-1, οι αρδευτικές ζητήσεις καλύπτονται κατά 26% περίπου από επιφανειακούς υδατικούς πόρους και κατά 74% από ένα εκτεταμένο δίκτυο 30,000 γεωτρήσεων, με τα 2/3 αυτών να είναι γεωτρήσεις ιδιωτών (Margaris N. 2006). Στα έργα που αποσκοπούν στην κάλυψη των αρδευτικών ζητήσεων συμπεριλαμβάνονται τα αρδευτικά φράγματα Σμοκόβου και Κρύας Βρύσης, ενώ σε αυτά προστίθεται και η εκτροπή των υδάτων του Ταυρωπού, παραποτάμου του Αχελώου, μέσω του φράγματος Πλαστήρα.

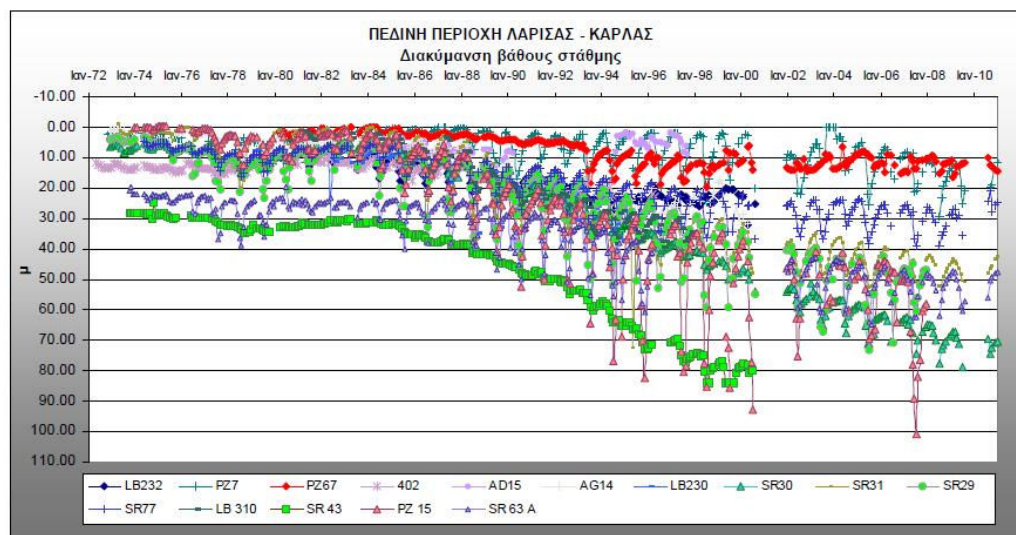
Πίνακας 4-1: Στοιχεία της ετήσιας υδατικής ζήτησης (1200 hm^3) σε αντιπαραβολή με την πραγματική ετήσια κάλυψη των αναγκών (750 hm^3) (Πηγή: Margaris N., 2006).

| | |
|--------------------------|--|
| Water Demand in Thessaly | 1.2 billion m^3 |
| | 136 million m^3 household needs |
| | 100 million m^3 environmental needs |
| | 1600 million m^3 irrigation |
| Real Situation | 750 million m^3 |
| | 200 million m^3 surface water (lake Plastiras, Piniós river etc) |
| | 500 million m^3 underground water (30 000 drillings) |
| | (400 million m^3 recharge + 100 million m^3 subtract) |

Ιστορικά, ο τρόπος διαχείρισης των υδατικών πόρων της Θεσσαλίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αρχικά, κατά την πρώτη περίοδο της αγροτικής ανάπτυξης (1920-60)

οι παρεμβάσεις εστιάστηκαν στις έγγειες βελτιώσεις και ιδιαίτερα στην αποξήρανση λιμναίων σωμάτων όπως οι Νεζερός, Ξυνιάς, Νεσσωνίδα, καθώς και η ιδιαίτερα σημαντική λίμνη Κάρλα, τόσο για λόγους εξασφάλισης γεωργικών εκτάσεων όσο και για την αντιμετώπιση ασθενειών. Αυτό οδήγησε στην εξαφάνιση ενός σημαντικού μέρους επιφανειακών υδατικών πόρων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τόσο για απευθείας άρδευση όσο και για εμπλουτισμό των υπογείων υδάτων. Σταδιακά, η έλλειψη ορθολογικής διαχείρισης και η εντατικοποίηση των συμβατικών καλλιεργειών οδήγησαν σε σημαντικά ποιοτικά προβλήματα για τους θεσσαλικούς υδατικούς πόρους, όπως:

- Τη μόλυνση επιφανειακών υδατικών πόρων από τα κατάλοιπα φυτοφαρμάκων.
- Υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών υδατινών σωμάτων, ιδιαίτερα του ποταμού Πηνειού (Κουτσογιάννης κ.α. 2008), λόγω της χρήσης λιπασμάτων που περιέχουν νιτρικά και φώσφορο.
- Την υφαλμύριση υδροφορέων σε μεγάλο βάθος από την παράκτια ζώνη.
- Την ταπείνωση της στάθμης των υδροφορέων λόγω υπερεκμετάλλευσης των αποθεμάτων, σε βαθμό που σε ορισμένες περιοχές τα βάθη στα οποία εμφανίζεται νερό να είναι 25 m χαμηλότερα της αρχικά παρατηρημένης τιμής (Εικόνα 4-4). Είναι ενδεικτικό ότι οι μετρήσεις σταθμών του υπόγειου υδροφορέα στη Θεσσαλία κατά τα έτη 1993-1994 έδειξαν ότι αντλούνται 550 hm³ υπογείου νερού ετησίως, δηλαδή πάνω από 100 hm³ υπογείου νερού από τα μη ανανεώσιμα αποθέματα του υδροφορέα (Margaris N. 2006).



Εικόνα 4-4: Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης υπόγειων υδροφορέων από σειρά γεωτρήσεων, το οποίο αναφέρεται στην πεδινή περιοχή της Λάρισας-Κάρλας (Πηγή:Κ/Ξια Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας 2011).

Στο πρόβλημα της εσφαλμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων έρχεται να προστεθεί και η ιδιαίτερα υψηλή ζήτηση για νερό, η οποία οφείλεται κυρίως στη στρατηγική γεωργικής

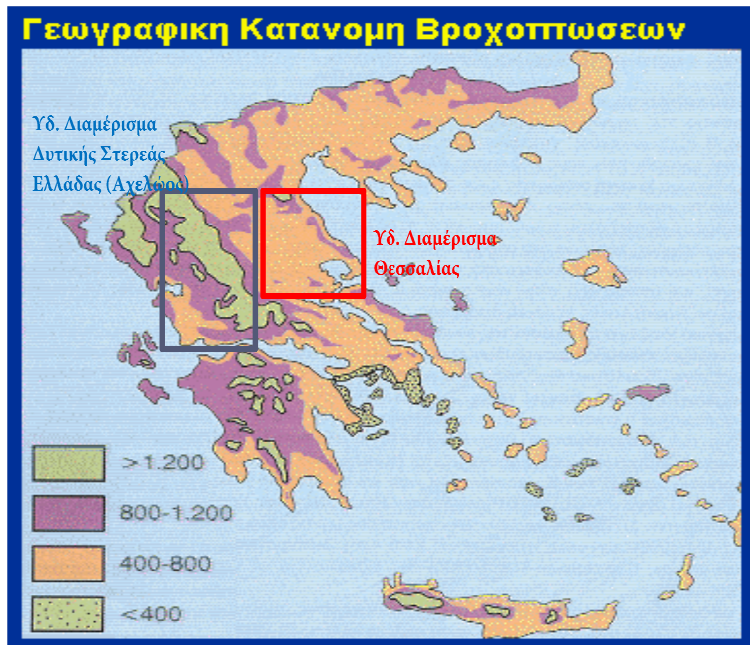
ανάπτυξης: το μεγαλύτερο ποσοστό των καλλιεργειών αφιερώθηκε σε ιδιαίτερα υδροβόρες καλλιέργειες όπως το βαμβάκι (το οποίο απορροφά κατά μέσο όρο το 1/5 των συνολικών ελληνικών υδατικών αναγκών) λόγω της πολιτικής επιδοτήσεων της Ε.Ε. , ενώ σημαντικές είναι και οι απώλειες σε νερό λόγω υιοθέτησης πεπαλαιωμένων μεθόδων άρδευσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ελλείψεις σε νερό που εμφανίζονται αφορούν στην υφιστάμενη καλλιεργήσιμη έκταση και δεν έχει γίνει εκτεταμένη μελέτη σκοπιμότητας για να διαπιστωθεί η δυνατότητα μείωσης των αναγκών σε νερό, με χρήση λ.χ. πιο εξελιγμένων μεθόδων άρδευσης (Σαμαράς 2010) ή αλλαγή της πολιτικής των καλλιεργήσιμων εκτάσεων.

Τα τελευταία χρόνια διαφαίνεται μια προσπάθεια αλλαγής πολιτικής στο θέμα της διαχείρισης των υδατικών πόρων με την εφαρμογή ορθότερων πρακτικών και την προσπάθεια εισαγωγής στοιχείων βιώσιμης ανάπτυξης. Ιδιαίτερη σημασία έχει το σχέδιο της αναγέννησης της λίμνης Κάρλας, η οποία προ της αποξήρανσης το 1962 αποτελούσε έναν εκ των σημαντικότερων επιφανειακών υδατικών πόρων με μέγιστη επιφάνεια 20 km². Το σχέδιο ξεκίνησε να υλοποιείται το 2010. Τα αποτελέσματα μέχρι στιγμής δυσχεραίνονται από το γεγονός ότι ο Πηνειός, ο οποίος τροφοδοτεί τη λίμνη, παρουσιάζει ιδιαίτερα δυσμενή ποιοτικά χαρακτηριστικά καθώς και από τη χημική σύσταση του πυθμένα της λίμνης που προσδίδει στο νερό μεγάλη αλατότητα. Παράλληλα, η κοινή αγροτική πολιτική (Common Agricultural Policy – CAP) της Ε.Ε. σταδιακά αναδιαμορφώνεται, μειώνοντας τις επιδοτήσεις για καλλιέργειες, ενώ διαφαίνεται και μια πολιτική περιορισμού της παραγωγής βαμβακιού, κάτι που ενδεχομένως να αλλάξει άρδην τη γεωργική πολιτική στη θεσσαλική γη με συνέπεια την αλλαγή των αρδευτικών ζητήσεων.

Η υδροηλεκτρική παραγωγή στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας είναι περιορισμένη, με κυριότερο τροφοδότη το ΥΗΕ Πλαστήρα (εγκατεστημένης ισχύος 141 MW και μέσης ετήσιας παραγωγής 250 GWh), ενώ υπάρχει και μία σειρά ΜΥΗΕ, με κυριότερο το ταμιευτήρα Σμοκόβου, ισχύος $2,9 + 6,8 = 9,7$ MW (Θανόπουλος 2007).

4.3. Η εκτροπή του Αχελώου – Το υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας

Η σύγκριση του υδατικού δυναμικού της περιοχής της Θεσσαλίας με την περιοχή του Αχελώου καταδεικνύει το κυριότερο υδρολογικό χαρακτηριστικό της κεντρικής Ελλάδας, το οποίο είναι η μεγάλη χωρική ανομοιογένεια στη βροχόπτωση (Εικόνα 4-5) και, επομένως, στην επάρκεια νερού μεταξύ δυτικής και ανατολικής Ελλάδας. Σε αντίθεση με την πλούσια σε κατακρημνίσματα δυτική Ελλάδα, η ανατολική Ελλάδα παρουσιάζει εκτεταμένη ανομβρία, ειδικά κατά τις ξηρές περιόδους. Ειδικότερα η περιοχή της Θεσσαλίας η οποία, όπως προαναφέρθηκε, απαιτεί σημαντικές ποσότητες υδάτων λόγω αγροτικής παραγωγής, παρουσιάζει συχνά αδυναμία κάλυψης των υδατικών αναγκών.



Εικόνα 4-5: Η χωρική ανομοιογένεια στη βροχόπτωση μεταξύ των δύο περιοχών είναι εμφανής από την παραπάνω εικόνα, στην οποία διακρίνονται το υδατικό διαμέρισμα δυτικής Στερεάς Ελλάδας καθώς και το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας (Πηγή: Στεφανάκος 2008, μετά από τροποποίηση).

Το μείζον και διαχρονικό αυτό ζήτημα οδήγησε στην εξαγγελία και την προσπάθεια υλοποίησης της εκτροπής ενός τμήματος του υδατικού δυναμικού του Αχελώου προς τις θεσσαλικές περιοχές. Η εκτροπή αρχικά αφορούσε στην ποσότητα της τάξης των 1200 hm³ ετησίως (δηλαδή το 30% του συνολικού υδατικού δυναμικού του Αχελώου), ενώ στη συνέχεια και μετά τη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995) περιορίστηκε στα 600 hm³ ετησίως, τα οποία αποδίδονται στο ρου του Πηνειού μέσω σήραγγας εκτροπής μήκους 17.4 km. Το τελικό σχέδιο για την εκτροπή του Αχελώου περιελάμβανε μία σειρά από ταμιευτήρες τόσο στον άνω Αχελώο όσο και στην περιοχή της Θεσσαλίας. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-6, τα σχετικά έργα ταμίευσης στον Άνω Αχελώο είναι οι ταμιευτήρες Μεσοχώρας (1) και Συκιάς (2), ενώ τα θεσσαλικά έργα είναι το Μουζάκι (4) και η Πύλη (5). Τα έργα προσαγωγής είναι η σήραγγα Γλύστρας που συνδέει τη Μεσοχώρα με τη Συκιά, η σήραγγα εκτροπής του Αχελώου (3) καθώς και η συνδετήρια σήραγγα Πύλης-Μουζακίου. Η προσπάθεια υλοποίησης του έργου της εκτροπής συνάντησε αρκετές δυσκολίες και αντιδράσεις (ιδίως σε δικαστικό επίπεδο) και παραμένει μέχρι και σήμερα ημιτελής. Σύντομο χρονικό των αποφάσεων που σχετίζονται με το έργο της εκτροπής παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.5.



Εικόνα 4-6: Γενική εικόνα των έργων εκτροπής του Αχελώου (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης 2003).

4.4. Περί του έργου εκτροπής

Το πρόβλημα της εκτροπής του Αχελώου παρουσιάζει πολλές προεκτάσεις και ενδιαασμούς τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο. Ενδιαφέρει παρουσιάζει η διαφορά στις κοινωνικές αντιδράσεις που δημιουργείται μεταξύ δυτικής και ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Οι μεν επηρεαζόμενοι κάτοικοι των περιοχών του άνω Αχελώου, αλλά και γενικότερα οι κάτοικοι της δυτικής Στερεάς Ελλάδας αντιτίθενται σφόδρα στο έργο και προβάλλουν ιδιαίτερα τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ως ανασταλτικό παράγοντα. Μαζί με αυτούς προστίθενται οικολογικές αλλά και πολιτικές οργανώσεις. Οι δε κάτοικοι των θεσσαλικών περιοχών εμφανίζονται θετικά κείμενοι στο έργο της εκτροπής και εμμένουν στην επιχειρηματολογία τους ως προς το πρόβλημα της έλλειψης υδατικών πόρων και τη συνεπαγόμενη μειωμένη γεωργική εκμετάλλευση της Θεσσαλίας, αναδεικνύοντας παράλληλα τα περιβαλλοντικά προβλήματα που εμφανίζει η θεσσαλική ζώνη και οι αντίστοιχοι υδατικοί πόροι.

Η επιχειρηματολογία των επικριτών του έργου της εκτροπής εστιάζεται σε οικολογικές και περιβαλλοντικές ανησυχίες δίχως ωστόσο μια ολοκληρωμένη, ορθότερη προσέγγιση, με αναφορά κατά το δυνατόν στις ποιοτικές και ποσοτικές επιπτώσεις της εκτροπής. Αντιθέτως, έχει δειχθεί επίμονα από τμήμα του επιστημονικού κόσμου στην Ελλάδα ότι η εκτροπή:

- αφορά σε ένα μικρό μόνο τμήμα των υδάτων του Αχελώου, περί το 14% της μέσης ετήσιας απορροής του ποταμού (Κουτσογιάννης κ.α. 2008).
- δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στην περιβαλλοντική διατήρηση του ευαίσθητου δέλτα του Αχελώου, καθώς η εκτροπή μειώνει κατά 20% την τροφοδοσία της λιμνοθάλασσας, με κατά μέσο όρο 1976 hm³ (3.2 φορές η εκτρεπόμενη ποσότητα) να συνεχίζουν να την τροφοδοτούν (Τέγος, 2009).
- αναμένεται να έχει πολλαπλά οφέλη, τόσο σε επίπεδο αναβάθμισης των ποιοτικών παραμέτρων των θεσσαλικών υδάτων όσο (κυρίως) στην υδροηλεκτρική παραγωγή της χώρας (Στεφανάκος 2009, Κουτσογιάννης κ.α. 2008).

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες εμφανίζονται εστιασμένες στο έργο της εκτροπής σε σημείο που να παραβλέπονται σημαντικοί παράγοντες υποβάθμισης του δέλτα του Αχελώου, όπως οι αυθαίρετες παραβιάσεις χρήσεων γης κατάντη του Στράτου, οι οποίες έγιναν δυνατές χάριν στην αναρρύθμιση της ροής και στην αντιπλημμυρική προστασία που παρέχουν τα έργα του κάτω Αχελώου (Κουτσογιάννης 2006). Παράλληλα, η φιλοσοφία της χωρικής διαχείρισης υδατικών πόρων μέσω εκτροπών βάλλεται ως καταστρεπτική για το περιβάλλον, αγνοώντας ότι, λόγω του έντονου προβλήματος χωρικής ανομοιογένειας που έχει η Ελλάδα, οι εκτροπές είναι ένα απαραίτητο μέτρο ώστε να καλύπτονται με ασφάλεια και αξιοπιστία οι ζητήσεις υδάτων. Άξιο αναφοράς είναι και το γεγονός ότι η ίδια επιχειρηματολογία έλειπε σε παλαιότερες περιπτώσεις σημαντικών εκτροπών (Πίνακας 4-2), πολλές φορές πλήρους εκμετάλλευσης του υδατικού δυναμικού γειτονικών λεκανών (όπως στην περίπτωση του Μόρνου για την υδροδότηση των Αθηνών ή του Ταυρωπού προς τη Θεσσαλία).

Πίνακας 4-2: Στοιχεία για τις κυριότερες εκτροπές στον ελληνικό χώρο (Πηγή: Μαμάσης 2011)

| Έργο Εκτροπής | | Ποσότητα | Μήκος έργου εκτροπής | Έτος έναρξης |
|---------------|-------------|--------------------|----------------------|--------------|
| Από | Προς | [hm ³] | [km] | |
| Εύηνο | Μόρνο | 70-430 | 29 | 1995 |
| Μόρνο | Αθήνα | 50-450 | 188 | 1979 |
| Υλίκη | Αθήνα | 3-200 | 38 | 1958 |
| Αλιάκμονα | Θεσσαλονίκη | 55-220 | 60 | 2009 |
| Ταυρωπό | Θεσσαλία | 150 | 2.7 | 1961 |
| Αώο | Άραχθο | 100 | 3.8 | 1991 |
| Αχελώο | Θεσσαλία | 600 | 17.4 | |

4.5. Σύντομη επισκόπηση των αποφάσεων που σχετίζονται με τα έργα εκτροπής του Αχελώου

Το ιστορικό των αποφάσεων που σχετίζονται με τα έργα εκτροπής του Αχελώου παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω των αλληπάληλων νομοθετικών πράξεων, ακυρωτικών αποφάσεων, αναστολών και αλλαγών της φύσης των συμβάσεων που οδήγησαν τα έργα σε μεγάλη καθυστέρηση. Σημαντικό επίσης είναι και το γεγονός ότι αρκετά έργα παραμένουν ημιτελή ή δε λειτουργούν λόγω των δικαστικών αποφάσεων αναστολής των εργασιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο ταμιευτήρας της Μεσοχώρας ο οποίος, παρά την ολοκλήρωση των εργασιών, δεν έχει πληρωθεί από το 1996. Κατά την επισκόπηση των αποφάσεων στις επόμενες σελίδες, αριστερά των οροσήμων παρατίθενται:

1. με μπλε χρώμα το χρονικό πλαίσιο εργασιών που σχετίζεται με τον ταμιευτήρα Μεσοχώρας.
2. με γκρι χρώμα το χρονικό πλαίσιο εργασιών που σχετίζεται με τον ταμιευτήρα Συκιάς και τη σήραγγα εκτροπής.

1953 Παράλληλα με την εκτροπή του Μέγδοβα για τη δημιουργία του έργου Ν. Πλαστήρα ο καθηγητής Ε.Μ.Π. Κουτσοκώστας θέτει την ιδέα της εκτροπής του Αχελώου προς εφαρμογή. Ο Κουτσοκώστας είχε αναλύσει πρώτος την ιδέα της εκτροπής του Αχελώου από το 1925.

1966 Η Ελβετική εταιρία Electrowatt προτείνει τη συμπληρωματική εκμετάλλευση επιφανειακών υδάτων για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας στο θεσσαλικό κάμπο με την κατασκευή των ταμιευτήρων της Κρύας Βρύσης, της Πύλης, του Μουζακίου, του Σμοκόβου, του Παλιοδερλί, του Νεοχωρίου, της Θεόπετρας, του Παλαιομονάστηρου και της Καλούδας. Παράλληλα, γνωματεύει ότι η εκτροπή του Αχελώου αποτελεί αντιοικονομική λύση.

1972 Εκπονείται μελέτη από την канаδική SNC σχετικά με την εκτροπή του Αχελώου και ειδικότερα για τους ταμιευτήρες του άνω ρου του Αχελώου. Η εκτροπή του Αχελώου κρίνεται και πάλι αντιοικονομική.

1976 Η επιστημονική επιτροπή Υδραυλικών Έργων του ΤΕΕ προτείνει την εκτροπή 600 hm³ από τον άνω ρου του Αχελώου προς τη Θεσσαλία.

1981 Προκηρύσσεται διεθνής διαγωνισμός υπ' ευθύνη του υπουργείου Συντονισμού για τη μελέτη σκοπιμότητας των έργων εκτροπής του Αχελώου. Στην διακήρυξη αυτή αντιτίθεται το ΤΕΕ και ο σύλλογος διπλωματούχων μηχανικών της ΔΕΗ, αναφερόμενοι στην αρνητική εμπειρία από τις δύο προηγούμενες μελέτες ΕW και

SNC. Η προκήρυξη αυτή σύντομα ακυρώνεται, με σκοπό το έργο να ενταχθεί στο πενταετές πρόγραμμα ανάπτυξης 1983-1987.

1984 Η ΔΕΗ αναλαμβάνει την εκπόνηση των μελετών και συντάσσονται προμελέτες από τη ΔΑΥΕ με στόχο την ένταξη στο πενταετές πρόγραμμα ανάπτυξης.

1985 Ξεκινούν προκαταρκτικές εργασίες στα φράγματα Μεσοχώρας, Συκιάς, Πύλης, Μουζακίου.

1986-1987 Αρχίζουν οι διαδικασίες (και οι εμπλοκές) των διεθνών διαγωνισμών για τα μεγάλα έργα. Για την εκτροπή Αχελώου προεπιλέγονται έξι όμιλοι, αλλά τελικώς θα υποβληθεί μόνον μία προσφορά, της βρετανικής Tayeuro με τίμημα 591 δις. δραχμές (244 για φράγματα-σήραγγες, 347 δις. για αρδευτικά-εγχειοβελτιωτικά έργα).

1991 Εκδίδεται η πρώτη κοινή υπουργική απόφαση που εγκρίνει τους περιβαλλοντικούς όρους για έργα της εκτροπής Αχελώου.

1994 Εκδίδονται οι πρώτες αποφάσεις του Συμβουλίου Επικρατείας (2759, 2760) που κρίνουν παράνομες τις υπουργικές αποφάσεις έγκρισης των περιβαλλοντικών όρων του 1991. Κεντρική αιτία είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει συνολική μελέτη θεώρησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το υπουργείο ΠΕΧΩΔΕ παραγγέλλει νέα συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που συντάσσεται σε χρόνο τριών μηνών.

1995 Εκδίδεται η κοινή υπουργική απόφαση (24552) που ορίζει ότι μειώνεται ο όγκος των εκτρεπόμενων υδάτων σε 600 εκατ. κυβικά μέτρα, μετά και τη συνολική ΜΠΕ, χωρίς να αναφέρονται οι προηγούμενοι στόχοι εκτροπής της τάξης των 1200 hm³.

2000 Εκδίδεται η δεύτερη ακυρωτική απόφαση του ΣτΕ επί των υπουργικών αποφάσεων του 1995, με το σκεπτικό ότι δεν εξαντλήθηκε η διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων για την εκτροπή και ότι καταστρέφονται πολιτιστικά μνημεία που θα κατακλυστούν κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα (Μονή Αγ. Γεωργίου Μυροφύλλου).

2001 Το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. συμμορφώθηκε πλήρως και με τη νέα απόφαση του ΣτΕ και εκπόνησε «Συμπληρωματική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων», αφού τηρήθηκαν πλήρως οι διαδικασίες δημοσιοποίησης και διαβούλευσης που προβλέπονται από τις εθνικές και Κοινοτικές διατάξεις.

2005 Η Ολομέλεια του ΣτΕ με επίκληση για πρώτη φορά του νόμου 1739/1987 για εκπόνηση και έγκριση σχεδίων διαχείρισης νερών (τον οποίο δεν επικαλούνται οι

1996

Ολοκλήρωση εργασιών ταμιευτήρα Μεσοχώρας

1996

Έναρξη εργασιών ταμιευτήρα Συκιάς.

2001

Ο ταμιευτήρας Μεσοχώρας είναι έτοιμος για λειτουργία.

2002

Ολοκλήρωση
του ΥΗΣ
Γλύστρας.

προηγούμενες αποφάσεις του 1994 και 2000 του ΣτΕ) ακύρωσε την Κ.Υ.Α. έγκρισης περιβαλλοντικών όρων των έργων.

2006 Ψηφίσθηκαν από την Ολομέλεια της Βουλής δύο τροπολογίες οι οποίες αποσκοπούσαν στο να παρακάμψουν τις ακυρωτικές αποφάσεις του ΣτΕ, με στόχο τη δρομολόγηση των έργων της εκτροπής του Αχελώου.

2009 Αποστολή από το ΣτΕ σειράς προδικαστικών ερωτημάτων προς το ευρωπαϊκό δικαστήριο προκειμένου να κριθεί εάν ο νόμος Σουφλιά (3481/2006), που ενέκρινε περιβαλλοντικούς όρους, παραβιάζει τις διατάξεις της κοινοτικής οδηγίας-πλαίσιο για τα νερά (2000/60). Παράλληλα διατάσσεται αναστολή των εργασιών μέχρι να αποφανθεί το ευρωπαϊκό δικαστήριο.

2009 Ανάθεση
των έργων
ολοκλήρωσης
της σήραγγας
εκτροπής, η
οποία ως
ημιτελής
απειλείται με
κατάρρευση.

2011/06 Το υπουργείο Υποδομών αιτήθηκε από το Τμήμα Αναστολών του ΣτΕ της μερικής ανάκλησης της απόφασης 141/2010 με την οποία σταμάτησαν όλα τα έργα της εκτροπής, εν όψει της εξέτασης της υπόθεσης από το Ευρωπαϊκό δικαστήριο, με την αιτιολογία του κινδύνου αστοχίας των ημιτελών έργων (στη σήραγγα εκτροπής και στο φράγμα Συκιάς) λόγω διάβρωσης.

2011/10 Το εισηγητικό κείμενο της αρμόδιας εισαγγελέως του Ευρωπαϊκού Δικαστηρίου εμμένει στη διατάραξη του φυσικού περιβάλλοντος και του οικοσυστήματος που ενδέχεται να προκληθεί από τα έργα εκτροπής του ποταμού. Επισημαίνει πως «πρέπει να δοθεί απάντηση ότι μπορεί να εγκριθεί σχέδιο για την εκτροπή υδάτων εντός περιοχής NATURA 2000, το οποίο θα μετέτρεπε φυσικό ποτάμιο οικοσύστημα σε ανθρωπογενές ποτάμιο και λιμναίο οικοσύστημα». Επίσης υπερτονίζεται ότι μόνο η υδροδότηση -και όχι οι αρδευτικές δραστηριότητες- μπορεί να θεωρηθεί επιτακτικός λόγος δημοσίου συμφέροντος για σχέδιο εκτροπής υδάτων, εάν θίγονται τύποι οικοτόπων ή είδη προτεραιότητας.

2012

Ο ταμιευτήρας
Μεσοχώρας δεν
έχει ακόμα
πληρωθεί.

2011/12 Ένα από τα σενάρια που εξετάζεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος περιλαμβάνει τη μείωση της εκτρεπόμενης ποσότητας νερού στα 110 hm³.

2012/09 Το Ευρωπαϊκό Δικαστήριο απάντησε στα 14 προδικαστικά ερωτήματα που τέθηκαν από το ΣτΕ, γνωμοδοτώντας ότι οι τροπολογίες που εγκρίθηκαν το 2006 από τη Βουλή παραβιάζουν την ευρωπαϊκή περιβαλλοντική νομοθεσία.

5. Γενικά στοιχεία για τον Υδρονομέα

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της τελευταίας έκδοσης (4.3) του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, και δίνονται εποπτικά στοιχεία του περιβάλλοντος χρήσης (interface) του. Επίσης, δίνονται αναλυτικά τα στοιχεία τα οποία ενσωματώνονται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και αφορούν στην υδροηλεκτρική παραγωγή, καθώς αυτά αποτελούν τη βάση της ανάλυσης που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργίες του λογισμικού, ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην επίσημη βιβλιογραφία του προγράμματος (<https://itia.ntua.gr/el/softinfo/4/>), η οποία αποτελεί και την κυριότερη βιβλιογραφική πηγή του παρόντος κεφαλαίου.

5.1. Εισαγωγή

Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποτελεί ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα για την διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων σύνθετης τοπολογίας και πολλαπλών, διαφορετικών στόχων. Συνιστά ένα ισχυρό Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (Σ.Υ.Α.)⁹ που μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα εύρος υδροσυστημάτων, που μπορεί να περιέχουν διαφορετικούς υδατικούς πόρους (ταμιευτήρες, ποτάμια, συστήματα γεωτρήσεων υδροφορέων), καθώς και τις υποδομές για την αξιοποίηση αυτών (δίκτυα αγωγών, αντλιοστάσια, σταθμούς παραγωγής ενέργειας, κόμβους όπου ζητείται ή εισρέει νερό κ.ο.κ.). Στα πλαίσια της ανάπτυξής του, εφαρμόστηκε με επιτυχία για τη βέλτιστη διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος των Αθηνών (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Μαμάσης 2009), ενός ιδιαίτερα σύνθετου προβλήματος που απαιτεί την κάλυψη, με υψηλή αξιοπιστία, μεγάλων ζητήσεων από ένα συνδυασμό επιφανειακών υδατικών πόρων (ταμιευτήρας Μόρνου και Ευήνου, λίμνη Μαραθώνα) και γεωτρήσεων.

Η χρήση του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ βοηθάει στην απάντηση βασικών ζητημάτων διαχείρισης (Ευστρατιάδης, Μαμάσης και Κουτσογιάννης 2007), όπως:

- Την εύρεση της αξιοπιστίας με την οποία καλύπτονται οι ζητήσεις νερού (απολήψεις, ενεργειακή παραγωγή κ.α.), καθώς και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί.
- Τις επιπτώσεις από αλλαγές ή έκτακτα γεγονότα (λ.χ. βλάβες) στο δίκτυο.
- Την επιρροή υδροκλιματικών αλλαγών στη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των υδροσυστημάτων.

⁹ Ως Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων ορίζονται τα είδη λογισμικού που υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, βοηθώντας στην κατανόηση των επιπτώσεων των αποφάσεων (French 2000). Στη διαχείριση υδατικών πόρων, τέτοια εργαλεία εφαρμόζονται ιδιαίτερα συχνά με στόχο την εύρεση της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής αλλά και την κατανόηση των επιπτώσεων από μία δεδομένη απόφαση του διαχειριστή. Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται με τον όρο Decision Support Systems (D.S.S.).

- Το οικονομικό όφελος από την ενεργειακή παραγωγή, καθώς και το κόστος από τις αντλήσεις νερού.

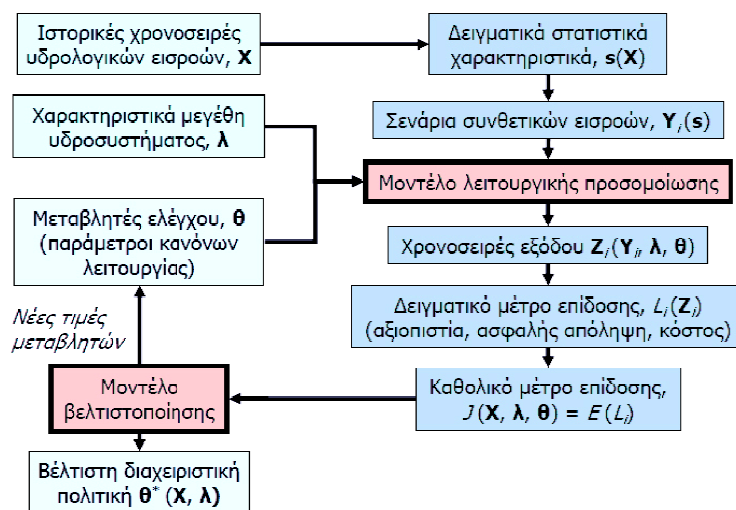
5.2. Το σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση και η εφαρμογή του στον Υδρονομέα

5.2.1. Γενικά στοιχεία

Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ υλοποιεί το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Nalbantis και Koutsoyiannis 1997, διερευνήθηκε ενδελεχώς από τους Koutsoyiannis and Economou 2003 και δοκιμάστηκε εκτεταμένα στην περίπτωση του συστήματος υδροδότησης των Αθηνών (βλ. Efstratiadis et al. 2004 και Efstratiadis 2010). Το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο (Εικόνα 5-1) αποτελεί μία ολιστική θεώρηση αντιμετώπισης προβλημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων, η οποία συνίσταται στους εξής άξονες:

1. Παραμετροποίηση του προβλήματος διαχείρισης, με στόχο τη δραστική μείωση των βαθμών ελευθερίας του μαθηματικού μοντέλου (βλ. και Ενότητα 2.7) και κατά συνέπεια την ελάττωση του υπολογιστικού φόρτου. Η παραμετροποίηση έχει επίσης πρακτική σημασία καθώς διατυπώνει πολιτικές διαχείρισης στα υδραυλικά έργα του συστήματος (πολιτικές απόληψης ταμιευτήρων, γεωτρήσεων κ.ο.κ.), με τη μορφή κανόνων λειτουργίας.
2. Επίλυση του μαθηματικού μοντέλου μέσω της διαδικασίας της προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις παραμέτρους λειτουργίας όσο και τους φυσικούς περιορισμούς του προβλήματος. Η προσομοίωση γίνεται βάσει του απλοποιημένου μοντέλου, το οποίο έχει σχηματοποιηθεί και εισαχθεί από το χρήστη με τη βοήθεια του εύχρηστου περιβάλλοντος αλληλεπίδρασης (interface) και των διάφορων στοιχείων-συνιστωσών δικτύου (network components) που αυτό περιέχει. Με τη λήξη της διαδικασίας της προσομοίωσης, είναι δυνατή η μελέτη της απόκρισης του υδροσυστήματος, καθώς και ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών (μέτρων επίδοσης) αυτού (λ.χ. μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια ή συνολικό ποσοστό αστοχίας ενός στόχου).
3. Ο εντοπισμός της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός μη-γραμμικού εξελικτικού αλγορίθμου (Efstratiadis and Koutsoyiannis 2002), ο οποίος αναζητεί τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του προβλήματος για τις οποίες ελαχιστοποιείται ή μεγιστοποιείται ένα δεδομένο μέτρο επίδοσης του συστήματος. Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος ορίζονται από την οικογένεια παραμέτρων του βήματος 1, ενώ το μέτρο επίδοσης αποτιμάται μέσω της προσομοίωσης (βλ. βήμα 2). Με αυτό τον τρόπο, η βελτιστοποίηση συνδέεται με τις διαδικασίες της παραμετροποίησης

και της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, οι παράμετροι του προβλήματος μπορεί να είναι οι πολιτικές απόληψης των ταμιευτήρων, ενώ το μέτρο επίδοσης η μέση ετήσια ποσότητα-στόχος προς απόληψη από το σύστημα.



Εικόνα 5-1: Η λογική του πλαισίου παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (Πηγή: Ευστρατιάδης, Μαμάσης και Κουτσογιάννης 2007).

Με τη λογική που περιγράφηκε παραπάνω, επιτυγχάνεται η σύζευξη της μεθοδολογίας παραμετροποίησης-βελτιστοποίησης με την προσομοίωση (βλ. και Εικόνα 3-4), η οποία επιτρέπει την ορθότερη αναπαράσταση σύνθετων αλληλεπιδράσεων εντός του υδροσυστήματος, καθώς και την εποπτεία της απόκρισης του μοντέλου.

5.2.2. Η σχηματοποίηση του δικτύου στον Υδρονομέα

Προκειμένου να διερευνηθεί ένα πρόβλημα διαχείρισης απαιτείται η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου που να αποτελεί απλούστευση του φυσικού συστήματος, η οποία ωστόσο να μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια τις διεργασίες του υδροσυστήματος που πρόκειται να μελετηθούν. Μία τέτοια διαδικασία διακριτοποίησης των κύριων συνιστωσών του δικτύου και μετατροπής τους σε συνιστώσες του μαθηματικού μοντέλου καλείται σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, και αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία που γίνεται υπ' ευθύνη του μηχανικού (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007). Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ οι κύριες συνιστώσες-στοιχεία του δικτύου που αποτελούν το μοντέλο του φυσικού συστήματος εισάγονται μέσω της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος και προβάλλονται στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου, όπως φαίνεται στις

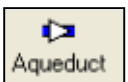
Εικόνες 5-3 (α.) και (β.) Στην παρούσα εργασία, οι συνιστώσες του δικτύου που ενδιαφέρουν για το υδrosύστημα του Αχελώου είναι:



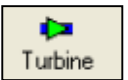
Ταμιευτήρες (reservoirs): Οι ταμιευτήρες αποτελούν τα επιφανειακά έργα τα οποία προσδίδουν τη δυνατότητα χρονικής ρύθμισης της ροής στο σύστημα. Η προσθήκη ενός ταμιευτήρα στο δίκτυο συνοδεύεται από την εισαγωγή ενός αριθμού σημαντικών ιδιοτήτων, όπως οι καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφάνειας και η κατανομή των υπόγειων διαφυγών. Επίσης εισάγονται οι χρονοσειρές απορροής της αντίστοιχης λεκάνης, όπως και της βροχής και εξάτμισης επί της επιφάνειας του ταμιευτήρα.



Υδατορεύματα (rivers): τμήματα των ποταμών της περιοχής μελέτης (Αχελώου και Πηνειού), τα οποία νοούνται μαθηματικά ως αγωγοί μεταφοράς ύδατος χωρίς περιορισμούς παροχευτικότητας.



Υδραγωγεία (aqueducts): τμήματα του δικτύου τα οποία έχουν περιορισμούς παροχευτικότητας, όπως η συνδετήρια σήραγγα Πύλης-Μουζακίου.



Στρόβιλοι (turbines): αγωγοί μεταφοράς νερού με περιορισμένη παροχευτικότητας που έχουν τη δυνατότητα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Οι στρόβιλοι ως στοιχεία αναπαριστούν τα ΥΗΕ που είναι εγκατεστημένα στο σύστημα.



Αντλιοστάσια (pumps): στοιχεία περιορισμένης παροχευτικότητας που έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς νερού καταναλώνοντας παράλληλα ενέργεια. Στην περίπτωση του υδrosυστήματος Αχελώου χρησιμοποιούνται για τα σενάρια χρήσης συστημάτων άντλησης-ταμίευσης.

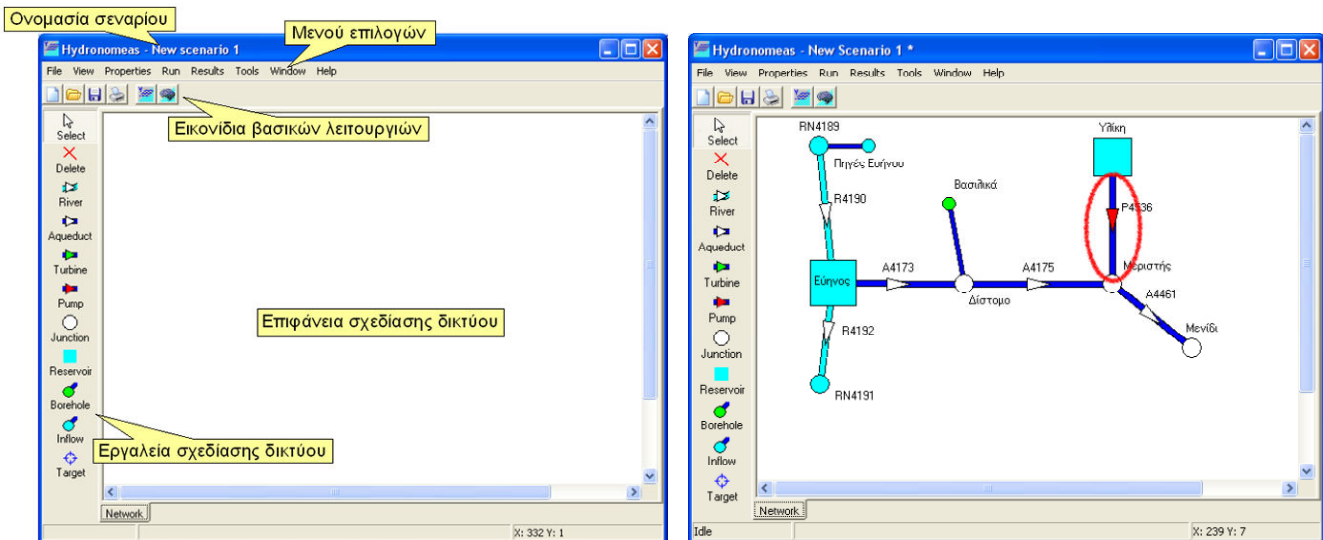


Εκτός των στοιχείων αποθήκευσης και μεταφοράς του νερού, σημαντικοί για το μαθηματικό μοντέλο είναι οι κόμβοι (junctions) του δικτύου, οι οποίοι αποτελούν σημεία εισροής ή εκροής νερού στο σύστημα. Επίσης, ορίζουν την αρχή και το πέρας του δικτύου. Τέλος, ιδιαίτερης σημασίας είναι οι στόχοι (targets), οι οποίοι αντιπροσωπεύουν διάφορα είδη ζητήσεων νερού (ύδρευση, άρδευση, ενεργειακοί στόχοι, περιβαλλοντική παροχή κ.α.). Οι στόχοι γενικώς στο σύστημα μπορεί να είναι πολλαπλοί, σταθεροί στο χρόνο ή μεταβλητοί και, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2, μπορεί να αφορούν διαφορετικές συνιστώσες του δικτύου (λ.χ. ο στόχος ενεργειακής παραγωγής αντιστοιχεί στο στοιχείο-στρόβιλο, ενώ ο στόχος ζήτησης σε ταμιευτήρα ή στοιχείο-κόμβο του δικτύου). Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αναλαμβάνει μέσω ενός αλγόριθμου δικτυακής γραμμικής βελτιστοποίησης να καταναείμει σε κάθε χρονικό βήμα τις απαιτούμενες ποσότητες νερού, βάσει της σειράς προτεραιότητας των στόχων η οποία ορίζεται από το

χρήστη. Αδυναμία κάλυψης ενός στόχου νοείται ως αστοχία για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα.



Εικόνα 5-2: Στόχοι που αφορούν διαφορετικές συνιστώσες του δικτύου. Πάνω αριστερά, ένας στόχος ενεργειακής παραγωγής σε στρόβιλο, ενώ κάτω δεξιά στόχος άρδευσης-απόληψης από ταμειυτήρα.



Εικόνες 5-3 (α.) και (β.): Αριστερά διακρίνεται η επιφάνεια εργασίας στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και τα διάφορα τμήματά της. Δεξιά φαίνεται ένα σχηματοποιημένο δίκτυο στην επιφάνεια σχεδίασης του δικτύου.

5.2.3. Το σκέλος της παραμετροποίησης

Το επόμενο βήμα μετά τη σχηματοποίηση του δικτύου είναι η εισαγωγή των παραμέτρων λειτουργίας (ή κανόνων λειτουργίας), οι οποίες εκφράζονται από ένα σύνολο παραμέτρων θ . Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν το βαθμό ελευθερίας του συστήματος, με ένα τμήμα ή και το σύνολό τους να αποτελεί τις μεταβλητές ελέγχου για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Για λόγους υπολογιστικού φόρτου οφείλουν να είναι κατά το δυνατόν λιγότερες, ενώ επιπροσθέτως οφείλουν να έχουν πρακτική χρησιμότητα ώστε να είναι κατανοητές από το διαχειριστή του δικτύου και να επιτρέπουν την προσαρμογή επιχειρησιακών πολιτικών βάσει αυτών. Οι εν λόγω παράμετροι είναι συνήθως σταθερές στο χρόνο αλλά κατά περίπτωση μπορεί να έχουν εποχική διακύμανση, ώστε να ανταποκρίνονται στην ανάγκη εποχικής

αναπροσαρμογής της διαχειριστικής πολιτικής, ή και μηνιαία κατανομή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνώνται μόνο οι σταθεροί χρονικά στόχοι.

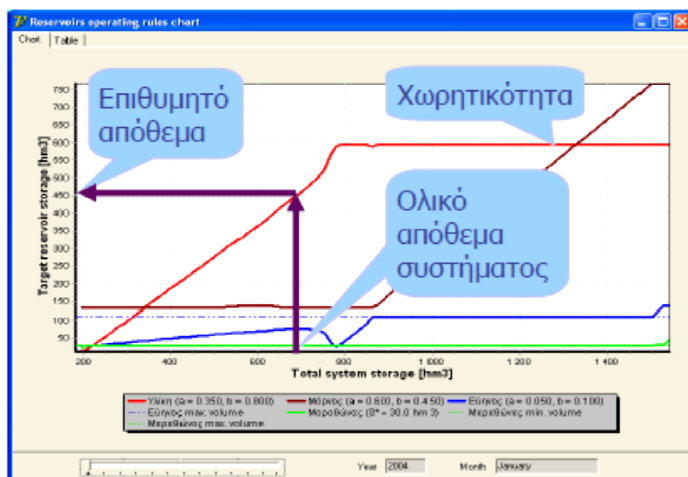
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τέσσερα είδη παραμέτρων λειτουργίας:

1. Οι παράμετροι που αφορούν σε στόχο παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.
2. Οι παράμετροι που αφορούν σε στόχους μεταφοράς νερού σε κλάδους σύνδεσης μεταξύ ταμιευτήρων (συνδετήριοι αγωγοί, σήραγγες εκτροπής).
3. Οι παράμετροι που αφορούν σε διατήρηση ελάχιστης ή μέγιστης στάθμης στους ταμιευτήρες.
4. Οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων, οι οποίοι περιέχονται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

Η τελευταία κατηγορία αποτελεί ένα είδος παραμετροποίησης που υπολογίζει την κατανομή των αποθεμάτων των ταμιευτήρων ως συνάρτηση του συνολικού διαθέσιμου αποθέματος στο πέρας κάθε χρονικού βήματος. Αυτή η μεθοδολογία παραμετροποίησης αναπτύχθηκε από τους Nalbantis and Koutsoyiannis 1997 και συνδέει τα αποθέματα και τις απολήψεις από τους ταμιευτήρες συναρτήσει της συνολικής κατάστασης του συστήματος. Ειδικότερα, στο τέλος κάθε χρονικού βήματος υπολογίζεται το συνολικό απόθεμα του συστήματος s και το επιθυμητό απόθεμα-στόχος κάθε ταμιευτήρα s_i^* συναρτάται βάσει αυτού από τη διπαραμετρική σχέση:

$$s_i^* = k_i - a_i \cdot k + b_i \cdot s \quad (5.1)$$

Στη σχέση (5.1) ο δείκτης i αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό του ταμιευτήρα, το k είναι η ολική ωφέλιμη χωρητικότητα του συστήματος, ενώ το k_i είναι η αντίστοιχη ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα. Βάσει αυτής της σχέσης, σε κάθε ταμιευτήρα i αντιστοιχούν δύο παράμετροι a_i και b_i , οι οποίες είναι χρονικά σταθερές ή εποχικά μεταβαλλόμενες και αντανακλούν την αποθεματική διαχειριστική πολιτική. Η εισαγωγή τέτοιων παραμέτρων επιτρέπει την κατάρτιση αντίστοιχων γραφημάτων για τους κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων (Εικόνα 5-4), στους οποίους φαίνεται η κατανομή αποθεμάτων-στόχων στους ταμιευτήρες ως συνάρτηση του συνολικού διαθέσιμου αποθέματος.



Εικόνα 5-4: Γραφική παράσταση των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων (Πηγή: Ευστρατιάδης, Μαμάσης και Κουτσογιάννης 2007).

Η απλοποιημένη μονοπαραμετρική έκφραση του κανόνα (5.1) έχει τη μορφή:

$$s_i^* = b_i \cdot s \quad (5.2)$$

και συνιστά το λεγόμενο ομογενή κανόνα, ο οποίος προκύπτει με θεώρηση σταθερών τιμών των παραμέτρων a_i ίσων με:

$$a_i = \frac{k_i}{k} \quad (5.3)$$

Στη συνέχεια της ανάλυσης για λόγους απλοποίησης του προβλήματος θα χρησιμοποιηθεί μόνο ο ομογενής κανόνας, με κάθε ταμιευτήρα να χαρακτηρίζεται από μία παράμετρο b_i . Σημειώνεται ότι η τελική μορφή των καμπυλών λειτουργίας είναι σύνθετη, καθώς εξαρτάται από μία σειρά φυσικών και λειτουργικών περιορισμών (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007, 46-48).

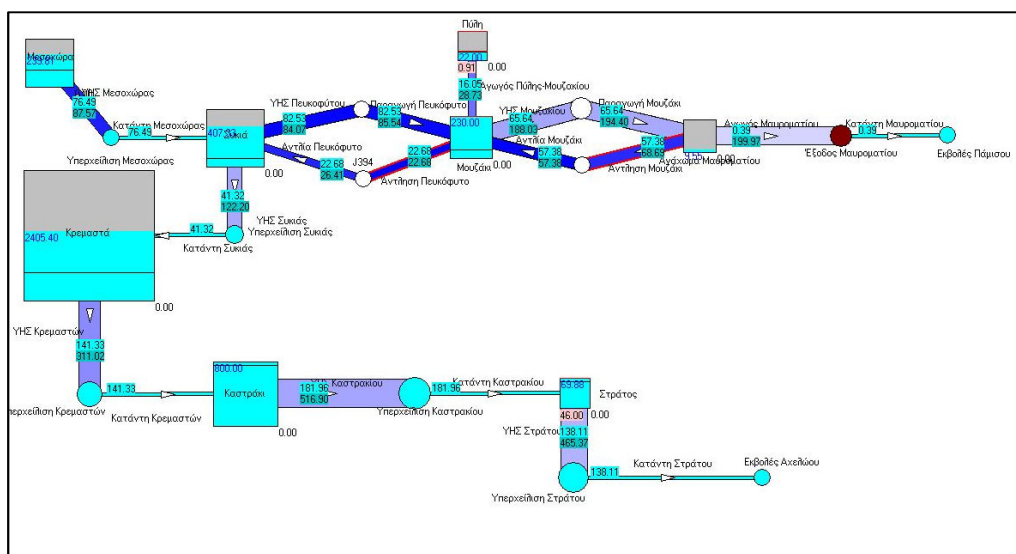
5.2.4. Το σκέλος της προσομοίωσης

Μετά την κατάστρωση του μοντέλου και την εισαγωγή των παραμέτρων διαχείρισης ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ δίνει τη δυνατότητα της προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών του υδροσυστήματος, μέσω της εφαρμογής της σχέσης του υδατικού ισοζυγίου για μηνιαίο χρονικό βήμα. Η διαδικασία της προσομοίωσης είναι απαραίτητη για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης των στοιχείων του μοντέλου αλλά και τον καθορισμό του μέτρου επίδοσης, το οποίο αποτιμά το κατά πόσο ήταν αποτελεσματικές οι παράμετροι διαχείρισης που επιλέχθηκαν. Βασικό στοιχείο για την προσομοίωση είναι η εισαγωγή των χρονοσειρών υδρολογικών μεγεθών για κάθε ταμιευτήρα. Στην περίπτωση που οι χρονοσειρές αυτές προέκυψαν από ένα στοχαστικό μοντέλο το οποίο βασίστηκε στη διαθέσιμη πρωτογενή υδρολογική πληροφορία, η προσομοίωση καλείται στοχαστική και αυτή είναι η περίπτωση που μελετάται στην παρούσα εργασία. Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής δύο ειδών προσομοίωσης:

1. Της καταληκτικής προσομοίωσης (steady-state simulation), η οποία απαιτεί σταθερά δεδομένα εισόδου για το σύστημα και μεμονωμένες χρονοσειρές εισόδου μεγάλου μήκους. Αυτό το είδος προσομοίωσης επιτρέπει τη μακροχρόνια εποπτεία και μελέτη της επίδοσης του υδροσυστήματος ανεξάρτητα από τις συνθήκες εκκίνησης της προσομοίωσης και βρίσκει εφαρμογή στα προβλήματα σχεδιασμού και χάραξης μακροπρόθεσμης στρατηγικής διαχείρισης του υδροσυστήματος, όπως στην περίπτωση που μελετάται εδώ.

2. Της καταληκτικής προσομοίωσης (terminating simulation), η οποία εφαρμόζεται για τη διερεύνηση επιχειρησιακών σεναρίων σε πραγματικό χρόνο. Κατά την καταληκτική προσομοίωση χρησιμοποιούνται πολλαπλές, βραχυχρόνιες χρονοσειρές εισόδου και συνεπώς η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες, ενώ οι παράμετροι ενδέχεται να είναι χρονικά μεταβαλλόμενες. Αυτό το είδος στοχαστικής προσομοίωσης δε χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Η διαδικασία της προσομοίωσης οπτικοποιείται στο αντίστοιχο φύλλο προσομοίωσης (animation tab), δίνοντας τη δυνατότητα εποπτείας της λειτουργίας του υδροσυστήματος σε κάθε χρονικό βήμα από το χρήστη (Εικόνα 5-5). Μετά το πέρας της διαδικασίας ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ υπολογίζει μία σειρά από μεγέθη, τα οποία αποτελούν μέτρα επίδοσης του υδροσυστήματος και αναφέρονται σε υδρολογικές και οικονομικές παραμέτρους καθώς και σε πιθανότητες αστοχίας των στόχων. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίνονται ως ετήσια μεγέθη (μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις), ενώ είναι διαθέσιμες στο χρήστη και οι πλήρεις χρονοσειρές απόκρισης (χρονοσειρές εξόδου) των μεγεθών που προκύπτουν από την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου και των εξισώσεων ενεργειακής παραγωγής-κατανάλωσης.



Εικόνα 5-5: Οπτικοποίηση της εικόνας της προσομοίωσης για ένα από τα σεναρία μελέτης.

5.2.5. Το σκέλος της βελτιστοποίησης

Ο καθορισμός των παραμέτρων λειτουργίας θ του υδροσυστήματος καθώς και η εφαρμογή της διαδικασίας της προσομοίωσης επιτρέπουν, όπως προαναφέρθηκε, τον υπολογισμό των μέτρων επίδοσης J του υδροσυστήματος, τα οποία αποτιμούν την αποτελεσματικότητα της διαχειριστικής πολιτικής. Στα προβλήματα που η διαχειριστική πολιτική θ του υδροσυστήματος είναι καθορισμένη η μελέτη της απόκρισης του συστήματος είναι απλή και απαιτεί την εκτέλεση μίας απλής προσομοίωσης. Ωστόσο, στην πλειονότητα των προβλημάτων διαχείρισης αναζητείται η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης θ^* για την οποία

ελαχιστοποιείται η αστοχία κάλυψης των ζητήσεων ή, στην περίπτωση υδροσυστημάτων με στόχο την παραγωγή ενέργειας, μεγιστοποιείται η ενεργειακή παραγωγή και το συνεπαγόμενο κέρδος από αυτή. Γενικότερα, η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλά (συχνά αντικρουόμενα) κριτήρια όπως τη μέγιστη δυνατή κάλυψη αρδευτικών ζητήσεων μαζί με τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής. Με όρους βελτιστοποίησης αναζητείται συνεπώς η βέλτιστη λύση της στοχικής συνάρτησης (objective function) $f(\mathbf{J})$ ¹⁰ με μεταβλητές ελέγχου (control variables) τις παραμέτρους διαχείρισης θ και περιορισμούς (constraints) τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του υδροσυστήματος που εισάγονται από το χρήστη.

Το πρόβλημα αυτό επιδέχεται μίας εξωτερικής διαδικασίας βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται με ένα μη-γραμμικό αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος ανήκει στις στοχαστικές εξελικτικές μεθόδους, εξετάζει δηλαδή οικογένειες λύσεων (πληθυσμούς) οι οποίοι σταδιακά βελτιώνονται καθώς οδηγούνται σε στατιστικά ισχυρότερες γενιές (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007). Κατά τη διαδικασία γίνονται συνεχώς δοκιμές νέων οικογενειών παραμέτρων θ και αποτιμάται συνεχώς η στοχική συνάρτηση, με τη διαδικασία να σταματά όταν επέλθει σύγκλιση στο ολικό βέλτιστο ή τελειώσει ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης οπτικοποιείται μέσω του αντίστοιχου παραθύρου βελτιστοποίησης (Εικόνα 5-6), το οποίο δίνει την εξέλιξη των τιμών της στοχικής συνάρτησης σε πραγματικό χρόνο. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας αντανakλούν τη βέλτιστη διαχειριστική πολιτική και συνεπώς δύνανται να αξιοποιηθούν σε στρατηγικό ή επιχειρησιακό επίπεδο.

Είναι φανερό ότι οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος καθορίζονται άμεσα από την παραμετροποίηση που έχει διαλέξει ο χρήστης. Όσον αφορά στη στοχική συνάρτηση, στην περίπτωση που εισάγονται n μέτρα επίδοσης J_i , αυτή προκύπτει ως ο γραμμικός συνδυασμός αυτών:

$$f(\mathbf{J}) = \sum_{i=1}^n w_i J_i \quad (5.4)$$

Οι w_i είναι συντελεστές βαρύτητας οι οποίοι εκφράζουν τη βαρύτητα κάθε κριτηρίου αλλά και την κλίμακα του μεγέθους μεταξύ δύο διαφορετικών κριτηρίων όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Η ομάδα των μεταβλητών ελέγχου ορίζεται από το αντίστοιχο παράθυρο και στη γενική περίπτωση είναι το σύνολο (ή ένα υποσύνολο) των παραμέτρων διαχείρισης θ . Τα διάφορα

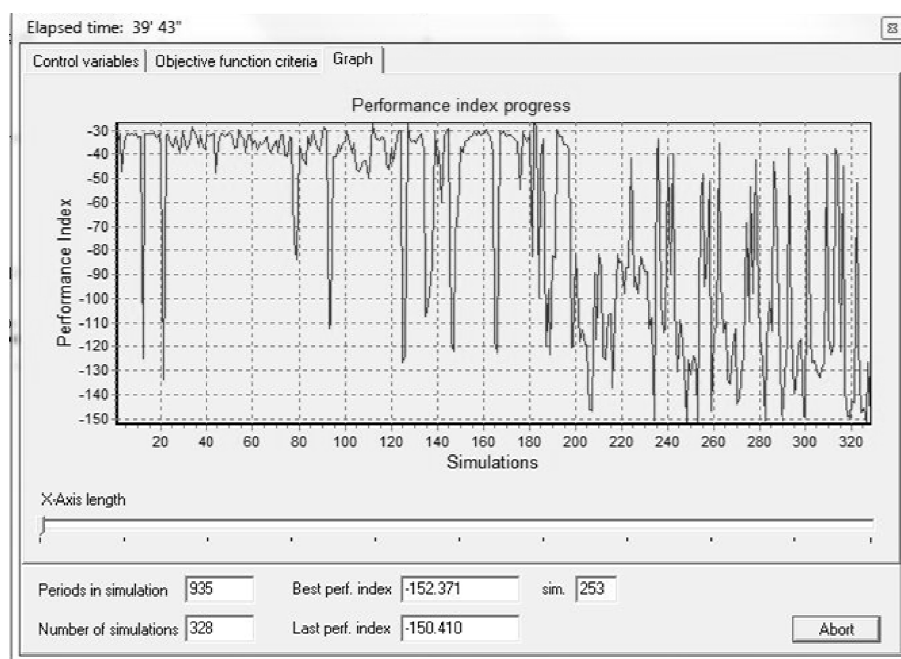
¹⁰ Στις πιο απλές περιπτώσεις η στοχική συνάρτηση μπορεί να ταυτίζεται με το μέτρο επίδοσης. Ωστόσο, σε πιο σύνθετα προβλήματα συνυπολογίζονται πολλά επιμέρους μέτρα επίδοσης J_i (πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση), δηλαδή η στοχική συνάρτηση είναι μια γενική συνάρτηση πολλών μέτρων επίδοσης. Το σύνολο των μέτρων επίδοσης που ενδιαφέρουν το διαχειριστή είναι το διανυσματικό μέγεθος \mathbf{J} .

μέτρα επίδοσης επιλέγονται μέσα από ένα εύρος κριτηρίων που αναφέρονται σε μεμονωμένα ή συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης και διατίθενται στο χρήστη από την αντίστοιχη φόρμα. Τα κριτήρια περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες:

1. Συνολικές μέσες ετήσιες απώλειες λόγω υπερχείλισης (Total Water Losses).
2. Μέση ή μέγιστη ετήσια πιθανότητα αστοχίας (Annual Failure Probability) σε επιλεγμένο στόχο ή περιορισμό.
3. Μέσο ή μέγιστο ετήσιο έλλειμμα (Annual Deficit) σε επιλεγμένο στόχο ή περιορισμό.
4. Συνολικό κόστος μεταφοράς νερού (Transportation Cost) και συνολικό κόστος αντλήσεων (Pumping Cost).

Τα βάρη w_i και οι συνδυασμοί των παραπάνω μέτρων επίδοσης J_i καθορίζονται κατά περίπτωση από το χρήστη. Πέραν αυτών ο χρήστης καθορίζει και άλλες παραμέτρους της βελτιστοποίησης, όπως το μέγεθος του πληθυσμού και τον αριθμό επαναλήψεων μέσω των αντίστοιχων παραθύρων.

Από τις παραγράφους 5.2.2 και 5.2.5 γίνεται φανερό ότι ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ διαθέτει δύο τμήματα στα οποία εφαρμόζει τεχνικές βελτιστοποίησης: το μοντέλο δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού (ειδική εκδοχή μεθόδου SIMPLEX – μοντέλο διγράφου) που εφαρμόζεται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης με στόχο την ισόρροπη κατανομή νερού για την κάλυψη των ζητήσεων, καθώς και τον εξελικτικό αλγόριθμο μη-γραμμικής βελτιστοποίησης που αναζητά τις βέλτιστες διαχειριστικές πολιτικές. Οι διερευνήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνονται στη δεύτερη περίπτωση.



Εικόνα 5-6: Η εικόνα της εξέλιξης της βελτιστοποίησης για ένα από τα σενάρια μελέτης.

5.3. Το σκέλος της ενεργειακής παραγωγής στον Υδρονομέα

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2.2, οι μονάδες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας αναπαρίστανται στο μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ μέσω των στοιχείων μεταφοράς νερού που αποκαλούνται στρόβιλοι. Ο στρόβιλος αποτελεί μία εξαρτημένη συνιστώσα δικτύου, η οποία ορίζεται βάσει των ανάντη και κατάντη συνιστωσών που μπορεί να είναι ταμιευτήρες (reservoirs) ή κόμβοι (junctions). Στη συνήθη περίπτωση υδροηλεκτρικής παραγωγής ο κόμβος είναι συνδεδεμένος με ταμιευτήρα στα ανάντη, οπότε η στάθμη τροφοδοσίας του (inlet level) εξαρτάται από την εκάστοτε στάθμη του ταμιευτήρα. Η στάθμη εξαγωγής (outlet level) είναι κατά κανόνα σταθερή και δεδομένη (σημείο εξαγωγής από τον αγωγό) αλλά μπορεί να είναι και μεταβλητή αν το κατάντη στοιχείο στο οποίο συνδέεται ο στρόβιλος είναι ταμιευτήρας (βλ. και Εικόνα 2-2). Οι δύο αυτές στάθμες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του ύψους πτώσης (Head) H , το οποίο ορίζεται ως:

$$H = \text{Inlet Level} - \text{Outlet Level} \quad (5.5)$$

Η βασική ενεργειακή σχέση στο μοντέλο για κάθε στρόβιλο i , όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 2.1.2, είναι:

$$E_i = \psi(H_i) \cdot V_i \cdot H_i \quad (5.6)$$

όπου E_i η παραγόμενη ενέργεια σε GWh/μήνα, V_i ο μεταφερόμενος όγκος νερού σε hm³/μήνα και ψ_i η ειδική ενέργεια σε GWh/hm⁴, η οποία δίνεται συναρτήσει του ύψους πτώσης H_i (βλ. και σχέση (2.7)). Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ κάθε τέτοια συνάρτηση προκύπτει ως λογαριθμική παρεμβολή μιας δεδομένης ακολουθίας τιμών (ψ_i, H_i), η οποία είναι χαρακτηριστική του ενεργειακού έργου (δηλαδή του ζεύγους αγωγός-προσαγωγής-στρόβιλος). Αντίστοιχα είναι και τα σχετικά μεγέθη στην περίπτωση αντλιοστασίων.

Στην περίπτωση που τουλάχιστον το ανάντη στοιχείο από το οποίο εξαρτάται ο στρόβιλος είναι ταμιευτήρας, το ύψος πτώσης H είναι χρονικά μεταβλητό. Το γεγονός αυτό καθιστά υπολογιστικά δυσχερή την εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας διότι αυτή πλέον εξαρτάται από τη μεταβολή της στάθμης ανάντη και κατάντη σε συνεχή χρόνο, απαιτώντας μία προσεγγιστική λύση (βλ. και παράγραφο 2.8.2). Στην περίπτωση του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό της ενέργειας E_i λαμβάνεται υπόψη μόνο η αρχική τιμή της στάθμης $E(t)$ σε κάθε χρονικό βήμα.

Η παραγωγή ενέργειας υπόκειται σε μία σειρά από λειτουργικούς περιορισμούς, οι οποίοι καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του αγωγού μεταφοράς και των στρόβιλων αλλά και από τις διακυμάνσεις σταθμών που χαρακτηρίζουν τους ταμιευτήρες του συστήματος. Ο μεταφερόμενος όγκος νερού V_i σε κάθε χρονικό βήμα δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από την παροχευτικότητα του αγωγού Q_i :

$$0 \leq V_i \leq Q_i(H_i) \quad (5.7)$$

με την παροχετευτικότητα να μεταβάλλεται γενικώς συναρτήσει του ύψους πτώσης H_i . Η συνάρτηση αυτή προκύπτει επίσης βάσει μιας δεδομένης ακολουθίας τιμών (H_i, Q_i) , χαρακτηριστικής του συστήματος. Όσον αφορά στην παραγόμενη ενέργεια, αυτή δεν μπορεί να ξεπερνά την τιμή:

$$E_i = \min\{E_{i\max}, \lambda \cdot PI_i\} \quad (5.8)$$

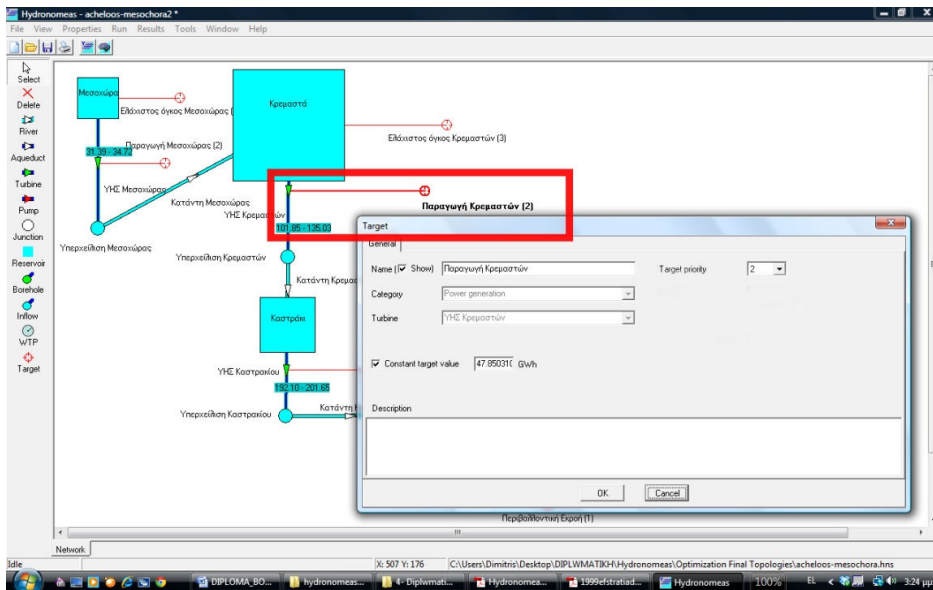
όπου $E_{i\max}$ ο περιορισμός που προκύπτει όταν ο ανάντη ταμιευτήρας έχει την ανώτατη στάθμη λειτουργίας και ο κατάντη την κατώτατη (δηλαδή όταν το ύψος πτώσης H_i για το δεδομένο στοιχείο i λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή) και $\lambda \cdot PI_i$ το θεωρητικό άνω όριο της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί βάσει της εγκατεστημένης ισχύος PI_i . Ο συντελεστής λ καλείται συντελεστής αναγωγής και αναφέρεται στη χρονική κλίμακα αναφοράς της παραγόμενης ενέργειας (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007).

Το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός υδροσυστήματος με κύριο στόχο την ενεργειακή παραγωγή απαιτεί την εισαγωγή παραμέτρων που να σχετίζονται άμεσα με τους στρόβιλους. Αυτή η ενεργειακή παραμετροποίηση στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ επιτυγχάνεται με δύο εναλλακτικούς τρόπους:

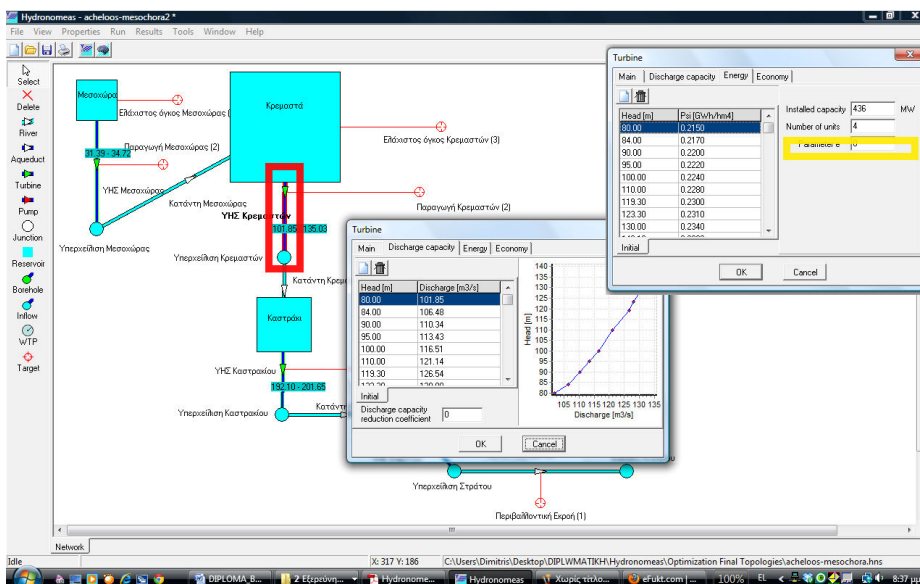
1. με την εισαγωγή ενός σταθερού χρονικά στόχου (target) m_i για κάθε στρόβιλο i σε GWh/μήνα
2. με την εισαγωγή της παραμέτρου e_i για κάθε στρόβιλο i , η οποία εκφράζει το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος που αξιοποιεί ο στρόβιλος κάθε μήνα. Η παράμετρος είναι χρονικά σταθερή, ανήκει εξ' ορισμού στο διάστημα $[0,1]$ και υπόκειται σε περιορισμούς ελάχιστης και μέγιστης ενεργειακής απόδοσης στο σύστημα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η παραμετροποίηση που σχετίζεται με τους ενεργειακούς στόχους γίνεται μόνο με τον πρώτο τρόπο εισάγοντας κατάλληλους στόχους.

Στα παρακάτω στιγμιότυπα (screenshots) του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (Εικόνα 5-7 και Εικόνα 5-8) εμφανίζονται οι προαναφερθείσες επιλογές και τα χαρακτηριστικά των στρόβιλων. Ο αναγνώστης μπορεί να βρει περισσότερες πληροφορίες για το μαθηματικό πλαίσιο των στρόβιλων και γενικά όλων των στοιχείων του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ στο Τεύχος Θεωρητικής Τεκμηρίωσης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης 2007).



Εικόνα 5-7: Ο ενεργειακός στόχος παραγωγής για το στρόβιλο των Κρεμαστών και το παράθυρο όπου διακρίνονται τα χαρακτηριστικά του, όπως η σειρά προτεραιότητας και η τιμή του στόχου σε GWh.



Εικόνα 5-8: Σενάριο λειτουργίας το οποίο περιλαμβάνει το στρόβιλο των Κρεμαστών (σε κόκκινο πλαίσιο), συνδεδεμένο στα ανάντη με τον αντίστοιχο ταμιευτήρα και στα κατόντη με κόμβο, μεταβλητού ύψους πτώσεως. Διακρίνονται οι πίνακες τιμών (H_i, Q_i) και (H_i, ψ_i) καθώς και η επιλογή στην οποία εισέρχεται η παράμετρος e_i (σε κίτρινο πλαίσιο). Θέτοντας την τιμή $e_i = 0$ η παράμετρος αυτή αγνοείται από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

6. Κατάσθρωση των σεναρίων διαχείρισης

Τα τρία επόμενα κεφάλαια αποτελούν το ερευνητικό σκέλος της διπλωματικής εργασίας. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία κατάσθρωσης των σεναρίων διαχείρισης των υδροσυστημάτων στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, πάνω στα οποία θα αναπτυχθεί το πλαίσιο βελτιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής που δίνεται στη συνέχεια.

6.1. Η περιοχή μελέτης

Όπως προαναφέρθηκε, οι υδατικοί πόροι του Αχελώου αξιοποιούνται για την κάλυψη πολλαπλών στόχων με κύριες συνιστώσες την υδροηλεκτρική παραγωγή, την άρδευση περιοχών της δυτικής Ελλάδας και την αντιπλημμυρική προστασία. Αν στους παραπάνω στόχους προστεθεί και η κάλυψη των σημαντικών αρδευτικών αναγκών της Θεσσαλίας, μετά τη σύλληψη της ιδέας της εκτροπής του Αχελώου, δημιουργείται ένα σύνολο το οποίο αποτελείται από δύο συζευγμένα ποτάμια συστήματα και τις αντίστοιχες λεκάνες απορροής, τα ανάλογα έργα ταμίευσης και μεταφοράς του νερού, καθώς και δύο περιοχές εκβολής ποταμών με διαφορετικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Αυτή η ιδιαίτερα σύνθετη τοπολογία καθώς και οι πολλαπλοί αντικρουόμενοι στόχοι που καλείται να καλύψει αποτελούν το αντικείμενο εφαρμογής της παρούσας διπλωματικής σε διαχειριστικό επίπεδο.

6.1.1. Γενικά στοιχεία

Οι λόγοι για την επιλογή του υδροσυστήματος Αχελώου - Θεσσαλίας ως πεδίου ανάπτυξης και ελέγχου των δυνατοτήτων διαχείρισης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ είναι οι εξής:

- Αποτελεί ένα εκ των κυριότερων συστημάτων ταμιευτήρων που έχουν ως κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή στην Ελλάδα. Επισημαίνεται ότι η συνολική ισχύς του υφιστάμενου συστήματος ΥΗΕ του κάτω Αχελώου είναι 925.6 MW, ενώ μαζί με τα έργα της εκτροπής αναμένεται να ανέλθει σε πάνω από 1.7 GW.
- Αποτελεί ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό στοιχείων και σύνθετη τοπολογία, με ταμιευτήρες συνδεδεμένους τόσο σε σειρά (έργα Αχελώου) όσο και παράλληλα (σήραγγα εκτροπής).
- Χαρακτηρίζεται από πολλαπλούς, αντικρουόμενους στόχους διαχείρισης (υδροηλεκτρική παραγωγή, κάλυψη αρδευτικών αναγκών Θεσσαλίας και Αιτωλοακαρνανίας, περιβαλλοντική προστασία Αχελώου και Θεσσαλικών ποταμών, αντιπλημμυρική προστασία), οι οποίοι καθιστούν το πρόβλημα ιδιαίτερα σύνθετο.
- Το τμήμα των έργων που σχετίζεται με την εκτροπή δεν έχει ακόμα κατασκευασθεί ή είναι υπό μελέτη, ενώ έχει προταθεί μία σειρά εναλλακτικών διατάξεων. Συνεπώς η μελέτη ενός

τέτοιου μοντέλου με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ προσφέρεται για τη συγκριτική αξιολόγηση των λύσεων.

- Υπάρχει διαθεσιμότητα αποτελεσμάτων από προηγούμενες μελέτες (Γεωργακάκος και συν. 1995, Κουτσογιάννης, 1996, Ευστρατιάδης και Ζερβός 1999), καθώς και η ενεργειακή εικόνα από τη λειτουργία των έργων του κάτω Αχελώου από τη Δ.Ε.Η., με συνέπεια να μπορεί να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
- Η διαθεσιμότητα πρωτογενούς υδρολογικής πληροφορίας για την ευρύτερη περιοχή από παλαιότερες υδρολογικές μελέτες επιτρέπει την εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων και, κατ' επέκταση, συνθετικών χρονοσειρών στο μοντέλο, επιτρέποντας την αξιολόγηση των δυνατοτήτων του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ σε επίπεδο στοχαστικής προσομοίωσης.

6.1.2. Τα σχετικά έργα

Τα έργα του συστήματος Αχελώου – Θεσσαλίας βρίσκονται επί των ποταμών Αχελώου, Πορταϊκού και Πάμισου. Τα υφιστάμενα έργα του κάτω Αχελώου τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο είναι:

1. *Φράγμα Κρεμαστών*: Λιθόρριπτο φράγμα με αργιλικό πυρήνα, ύψους 165 m, με συνολική χωρητικότητα ταμιευτήρα 4495 hm³ (Αργυράκης 2009). Το αντίστοιχο ΥΗΕ έχει εγκατεστημένη ισχύ 437.2 MW (4 x 109.3 MW). Το έργο άρχισε να λειτουργεί το 1966 και έχει ως κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή και την αντιπλημμυρική προστασία. Η ανάντη λεκάνη απορροής έχει επιφάνεια 3570 km², χωρίς να προσμετράται η λεκάνη Ταυρωπού, έκτασης 167 km², το υδατικό δυναμικό της οποίας εκτρέπεται προς τη Θεσσαλία.
2. *Φράγμα Καστρακίου*: Λιθόρριπτο φράγμα με αργιλικό πυρήνα, ύψους 96 m, συνολικής χωρητικότητας 950 hm³. Η έκταση της αντίστοιχης υπολεκάνης είναι 548 km². Η αντίστοιχη υδροηλεκτρική μονάδα έχει εγκατεστημένη ισχύ 320 MW (4 x 80 MW). Το έργο λειτουργεί από το 1969.
3. *Φράγμα Στράτου*: Χωμάτινο φράγμα με κεντρικό αργιλικό πυρήνα, ύψους 26 m, με συνολική χωρητικότητα ταμιευτήρα 80 hm³. Η έκταση της αντίστοιχης υπολεκάνης είναι 202 km². Το υδροηλεκτρικό έργο περιλαμβάνει δύο μονάδες (ΥΗΣ Στράτος Ι και μικρός ΥΗΣ Στράτος ΙΙ), εγκατεστημένης ισχύος 150 MW (2 x 75 MW) και 6.2 MW (2 x 3.1 MW). Η λειτουργία του έργου άρχισε το 1989.

Τα έργα του άνω Αχελώου τα οποία συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη είναι:

4. *Φράγμα Μεσοχώρας*: Λιθόρριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (τύπου Concrete Face Rock Filled - CFRD), ύψους 135 m, συνολικής χωρητικότητας 358 hm³. Κατάντη του φράγματος υπάρχει σήραγγα μήκους 7.5 km και διαμέτρου 5.0 m, καθώς και υδροηλεκτρικός σταθμός στη θέση Γλύστρα, εγκατεστημένης ισχύος 160 MW (2 x

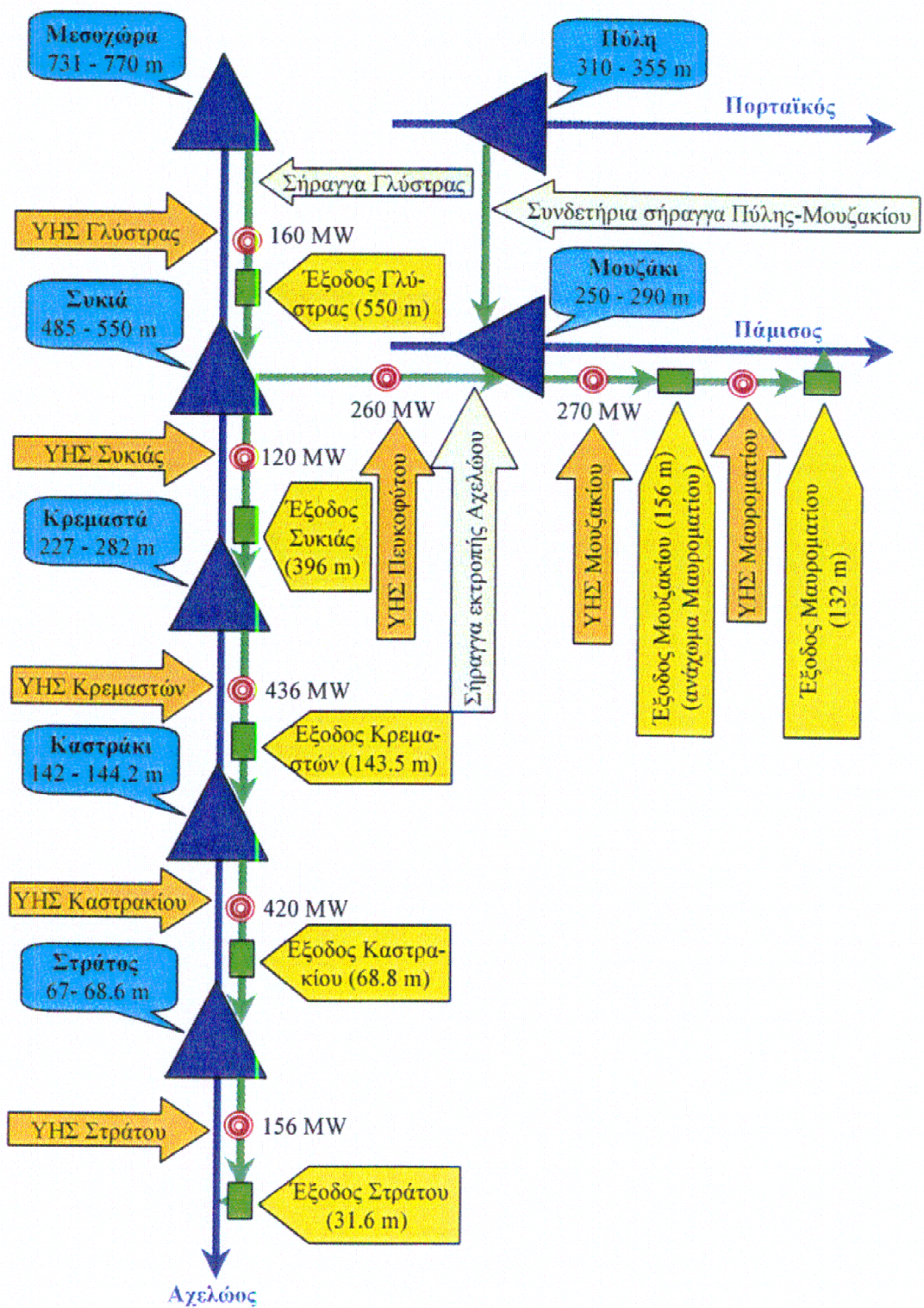
80 MW). Η κατασκευή του φράγματος έχει ολοκληρωθεί αλλά το έργο δεν βρίσκεται σε λειτουργία (βλ. και παράγραφο 4.5). Η ανάντη υπολεκάνη του Αχελώου έχει έκταση 633 km².

5. *Φράγμα Συκιάς*: Φράγμα από αμμοχάλικο κοίτης με κεντρικό αργιλικό πυρήνα, ύψους 150 m, συνολικής χωρητικότητας 590.8 hm³. Όσον αφορά στο υδροηλεκτρικό έργο επί της υδροληψίας, η αρχική μελέτη της ΔΕΗ/ΔΑΥΕ 1987 θεωρεί ισχύ 220 MW (2 x 110 MW) αν δεν προβλεφθεί εκτροπή. Βάσει αυτής, μεταγενέστερη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΕ (Κουτσογιάννης 1996) προβλέπει ισχύ 120 MW (2 x 60 MW) ως προσεγγιστικό μέγεθος, συμπληρωματικά με το έργο εκτροπής. Η αντίστοιχη υπολεκάνη στα ανάντη έχει έκταση 540 km². Το φράγμα δεν έχει κατασκευασθεί ακόμη.

Τέλος, οι διατάξεις της εκτροπής και τα Θεσσαλικά έργα που σχετίζονται με αυτή είναι:

6. *Σήραγγα εκτροπής Αχελώου – Θεσσαλίας και υδροηλεκτρικός σταθμός Πευκοφύτου*: Η σήραγγα εκτροπής έχει μήκος 17.4 km και διάμετρο 6.0 m, με υδροληψία στον ταμιευτήρα Συκιάς και κατάληξη στον ταμιευτήρα Μουζακίου. Η εγκατεστημένη ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού είναι 260 MW (2 x 130 MW).
7. *Φράγμα Πύλης στον Πορταϊκό*: Φράγμα ύψους 90 m, με ταμιευτήρα συνολικού όγκου 68.7 hm³, με ανάντη λεκάνη απορροής 132 km² (ΔΕΗ/ΔΑΥΕ 1987). Το έργο είναι μικρής χωρητικότητας και λειτουργεί σε συνδυασμό με τον ταμιευτήρα Μουζακίου, προς τον οποίο εκτρέπει τα αποθέματά του μέσω συνδετήριας σήραγγας, μήκους 8.0 km και διαμέτρου 3.0 m, χωρίς υδροηλεκτρικό έργο.
8. *Φράγμα Μουζακίου στον Πάμισο*: Φράγμα συνολικής χωρητικότητας 237.2 hm³, με ωφέλιμη χωρητικότητα 182.8 hm³ (Κουτσογιάννης 1996). Η σήραγγα προσαγωγής του έργου έχει εξαγωγή στη θέση Μαυρομάτι, με υδροηλεκτρικό σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 270 MW (2 x 135 MW).
9. *Έργα Μαυροματίου*: Κατάντη της εξόδου του υδροηλεκτρικού σταθμού Μουζακίου τοποθετούνται το ανάχωμα και ο υδροηλεκτρικός σταθμός Μαυροματίου, τα οποία έχουν ως στόχο την περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση των εξερχόμενων από τον ταμιευτήρα Μουζακίου παροχών.

Το πλήρες σύστημα δίνεται εποπτικά στην Εικόνα 6-1. Τα αναλυτικά στοιχεία για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και των υδροηλεκτρικών μονάδων του συστήματος ελήφθησαν από παλαιότερη μελέτη (Κουτσογιάννης, 1996) και δίνονται στο Παράρτημα Β.



Εικόνα 6-1: Η πλήρης διάταξη των έργων Αχελώου – Θεσσαλίας (Πηγή: Ευστρατιάδης και Ζερβός 1999)

6.2. Η ενεργειακή συνιστώσα του υδροσυστήματος και οι διατάξεις άντλησης - ταμίευσης

Μία από τις πιο σημαντικές συνιστώσες της διαχείρισης του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας είναι η ενεργειακή: το σύστημα περιλαμβάνει ένα πλήθος από υδροηλεκτρικά έργα, τα οποία λειτουργούν είτε αυτόνομα (έργα Αχελώου) είτε ως συμπλήρωμα των έργων που καλούνται να καλύψουν τις αρδευτικές ανάγκες της Θεσσαλίας (ΥΗΣ Πευκοφύτου και ΥΗΣ Μουζακίου). Λόγω της μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος και της σημασίας της στην εθνική ενεργειακή παραγωγή κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη της ενεργειακής διαχείρισης υπό το καθεστώς του αντικρουόμενου στη σταθερή ενεργειακή παραγωγή στόχου της αρδευτικής ζήτησης, αλλά και των επιπτώσεων που θα έχει η εξέλιξη των προτεινόμενων έργων εκτροπής στην υφιστάμενη ενεργειακή παραγωγή των έργων του κάτω Αχελώου.

Από τις πιο ενδιαφέρουσες πτυχές που παρουσιάζει η ενεργειακή διαχείριση του Αχελώου είναι η δυνατότητα προσαρμογής της διάταξης της εκτροπής ώστε να λειτουργεί με μονάδες άντλησης - ταμίευσης. Η διάταξη αυτή δεν προβλέφθηκε εξ' αρχής αλλά προτάθηκε στη συνέχεια από σειρά μελετητών (Κουτσογιάννης 1996, Υδροεξυγιαντική - Λαζαρίδης Λ.Σ. & ΣΙΑ Ε.Ε - Καλαούζης 1995) ώστε να γίνει εκμετάλλευση των ιδιαίτερα ευνοϊκών τοπογραφικών παραγόντων (μεγάλα ύψη πτώσης, μικρές αποστάσεις γειτονικών έργων), καθώς και των υδραυλικών χαρακτηριστικών της σήραγγας εκτροπής (μεγάλη παροχετευτικότητα που περιορίζει τις υδραυλικές απώλειες) (Κουτσογιάννης κ.α. 2008).

Ήδη στον ελληνικό χώρο λειτουργούν δύο μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί άντλησης-ταμίευσης (ΥΗΣ Σφηκιάς στον ποταμό Αλιάκμονα ισχύος 315 MW, ΥΗΣ Θησαυρού στον ποταμό Νέστο ισχύος 384 MW). Η αντιστροφή της λειτουργίας των στροβίλων παρουσιάζει ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα στη διαχείριση των ενεργειακών συστημάτων, τα οποία είναι:

1. Η δυνατότητα άντλησης νερού από τα κατάντη προς τα ανάντη κατά τη διάρκεια της νύχτας, τις ώρες που υπάρχει περίσσεια ενέργειας στο ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, λόγω των χαμηλών ζητήσεων και της μη δυνατότητας διακοπής λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Με αυτό τον τρόπο αυξάνονται τα αποθέματα στους ανάντη ταμιευτήρες και μπορούν να αποδοθούν τις ημερήσιες ώρες αιχμής, παράγοντας πλεόνασμα πρωτεύουσας ενέργειας.
2. Η δυνατότητα χρήσης αιολικής ή ηλιακής ενέργειας ως καταναλισκόμενη ενέργεια άντλησης. Οι δύο αυτές μορφές ενέργειας χαρακτηρίζονται από έντονη αβεβαιότητα και διακύμανση στην παραγωγή (λόγω της άμεσης εξάρτησής τους από τις κλιματικές συνθήκες) και επομένως είναι ιδιαίτερα δυσχερής η ένταξή τους στο σύστημα πάνω από

ορισμένο ποσοστό, διότι διαταράσσεται η ευστάθειά του. Με την αντιστρεπτή λειτουργία των μονάδων ωστόσο, οι ενεργειακές αιχμές στην αιολική ή την ηλιακή ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν τα αποθέματα των ανάντη ταμιευτήρων, αξιοποιώντας την ιδιότητα των μεγάλων ταμιευτήρων να δρουν ως φυσικές μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας (Koutsoyiannis 2011).

Από τους παραπάνω λόγους, γίνεται φανερό ότι η προσθήκη μονάδων άντλησης-ταμίευσης στο δίκτυο καθιστά το σύστημα πιο ευέλικτο, ενώ αυξάνει το βαθμό εκμετάλλευσης της ισχύος του. Τα πλεονεκτήματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή στην περίπτωση του υδροσυστήματος Αχελώου – Θεσσαλίας, μετατρέποντάς το σε μία ανανεώσιμη αποθήκη ενέργειας μεγάλης κλίμακας για τη χώρα (Κουτσογιάννης 2006), καθιστώντας βέβαια τη διαχείρισή του ακόμη πιο σύνθετη.

Αναφορικά με τις μελέτες οι οποίες ανέλυσαν τις διατάξεις άντλησης – ταμίευσης για την περίπτωση του υδροσυστήματος Αχελώου - Θεσσαλίας, στην αρχική μελέτη διερευνήθηκε η εκμετάλλευση της αναρρυθμιστικής ικανότητας του ταμιευτήρα Μουζακίου με μία διάταξη άντλησης – ταμίευσης στον ΥΗΣ Πευκοφύτου. Εν συνεχεία, προστέθηκε σε μεταγενέστερη μελέτη και ένα θεσσαλικό σχήμα άντλησης – ταμίευσης, μεταξύ Μουζακίου και Μαυροματίου, με το τελευταίο να αποκτάει αναρρυθμιστικό χαρακτήρα. Το φράγμα Μουζακίου εξετάστηκε αρχικώς με στάθμη +253 m, με μεταγενέστερη εκτίμηση να μελετάει παράλληλα την ανύψωσή του στα +290 m σε δεύτερη φάση (που είναι και το σενάριο που αφορά την παρούσα μελέτη). Και οι δύο παραπάνω προτεινόμενες διατάξεις θα διερευνηθούν στην παρούσα εργασία, μέσω των αντίστοιχων σεναρίων.

Τέλος, αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω αξιοποίησης των διατάξεων άντλησης – ταμίευσης μέσω παρεμβάσεων στα υπάρχοντα έργα του κάτω Αχελώου, με εγκατάσταση ξεχωριστών διατάξεων άντλησης, τόσο μεταξύ Στράτου – Καστρακίου όσο και μεταξύ Καστρακίου – Κρεμαστών (Στεφανάκος και Ράμπιας 2010), η οποία θα οδηγούσε σε περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής παραγωγής. Μία τέτοια παρέμβαση στα υφιστάμενα έργα του κάτω Αχελώου δεν διερευνάται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς τα σενάρια μελέτης επικεντρώνονται στη διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης των έργων εκτροπής.

6.3. Υδρολογικά Δεδομένα

Οι σχετικές με τα έργα υπολεκάνες είναι το σύνολο των υπολεκανών του Αχελώου ανάντη του φράγματος Στράτου, καθώς και ορισμένες υπολεκάνες του Πηνειού. Πιο συγκεκριμένα, ενδιαφέρουν οι υπολεκάνες του Αχελώου ανάντη των φραγμάτων Μεσοχώρας και Συκιάς, η υπολεκάνη ανάντη των Κρεμαστών (που αποτελείται από τις υπολεκάνες Συκιάς – Αυλακίου και Αυλακίου – Κρεμαστών), η υπολεκάνη μεταξύ των Κρεμαστών και του Καστρακίου και

τέλος η υπολεκάνη μεταξύ Καστρακίου και Στράτου. Από την περιοχή της Θεσσαλίας, ενδιαφέρουν οι υπολεκάνες των παραποτάμων του Πηνειού Πορταϊκού ανάντη της θέσης φράγματος Πύλης και Πάμισου ανάντη της θέσης φράγματος Μουζακίου. Ο Πίνακας 6-1 και η Εικόνα 6-2 συνοψίζουν τα βασικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά των λεκανών.

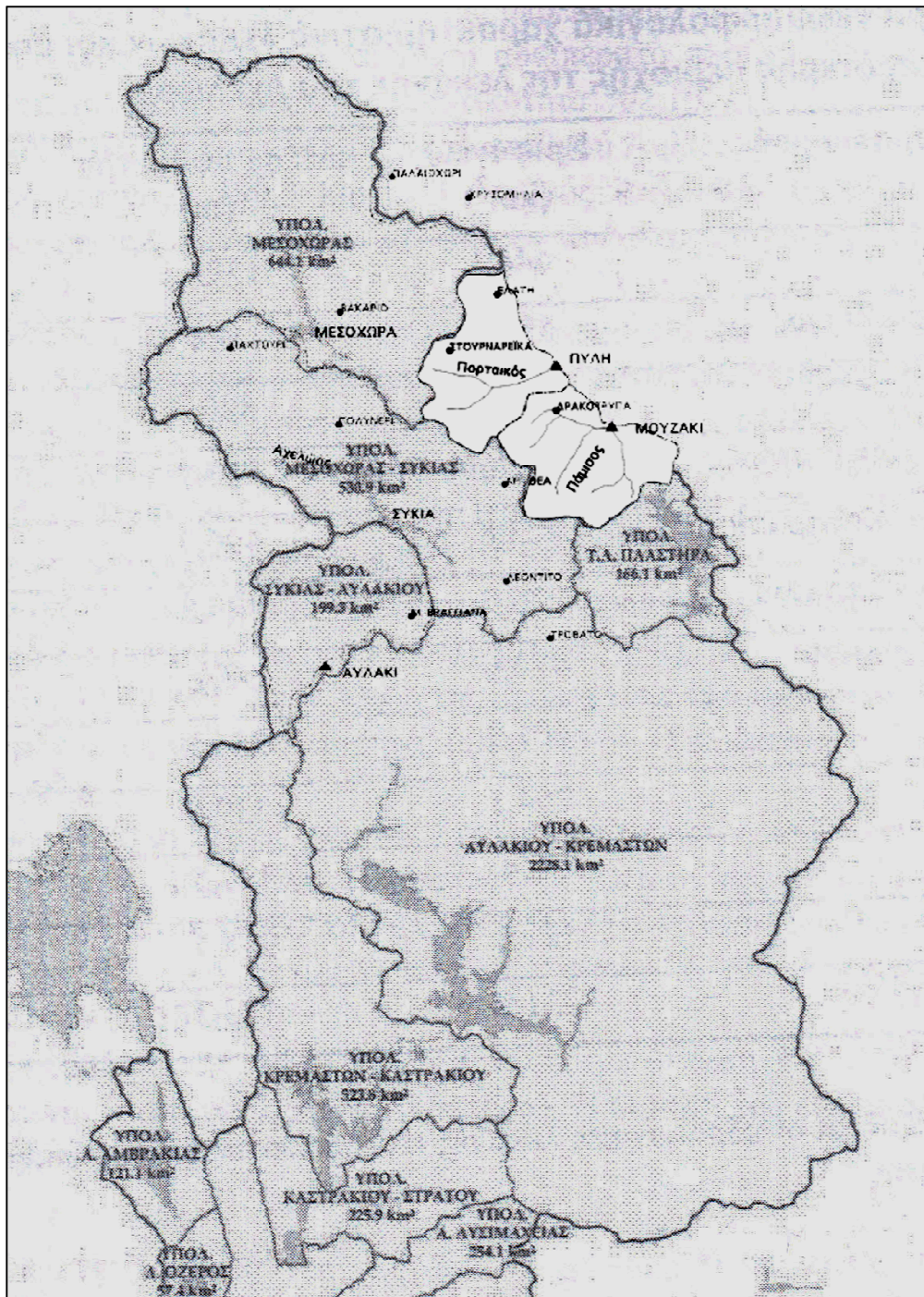
Πίνακας 6-1: Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των σχετικών υπολεκανών απορροής (Πηγή: Αντωναρόπουλος 2006, Κουτσογιάννης 1996).

| α/α | Λεκάνη Απορροής | Έκταση [km^2] | Μέσο Υψόμετρο [m] |
|-----|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 1 | Ανάντη φράγματος Μεσοχώρας | 644.1 | 1396.5 |
| 2 | Μεταξύ Μεσοχώρας και Συκιάς | 530.9 | 1164.7 |
| 3 | Μεταξύ Συκιάς και Αυλακίου | 199.3 | 820.3 |
| 4 | Μεταξύ Αυλακίου και Κρεμαστών | 2228.1 | 951.2 |
| 5 | Μεταξύ Κρεμαστών και Καστρακίου | 523.8 | 496.7 |
| 6 | Μεταξύ Καστρακίου και Στράτου | 225.9 | 409.8 |
| 7 | Ανάντη φράγματος Πύλης | 128.5 | 866.0 |
| 8 | Ανάντη φράγματος Μουζακίου | 140.6 | 652.0 |

Για τη λειτουργία του μαθηματικού μοντέλου είναι απαραίτητες οι χρονοσειρές απορροών για τις αντίστοιχες υπολεκάνες των έργων, καθώς και οι χρονοσειρές βροχών και εξατμίσεων επί των επιφανειών των ταμιευτήρων σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Τα δεδομένα αυτά διατίθενται από τις εξής υδρολογικές μελέτες:

1. *Assessment of Environmental Flows of Acheloos Delta* (Varveris, et al. 2010), η οποία διαθέτει χρονοσειρές απορροών για όλες τις υπολεκάνες των έργων του κάτω Αχελώου (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος) για το διάστημα ετών 1966-2008. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν για το σενάριο του κάτω Αχελώου.
2. *Μελέτη Διαχείρισης των Υδάτων Λεκάνης Απορροής Αχελώου Ποταμού* (Αντωναρόπουλος 2006), η οποία διαθέτει χρονοσειρές απορροών για όλες τις υπολεκάνες του Αχελώου (Μεσοχώρα, Συκιά, Αυλάκι, Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος, Εκβολές) για το διάστημα ετών 1966-2005. Τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν για το σενάριο του συνόλου των έργων του Αχελώου και για το σενάριο της εκτροπής. Σημειώνεται ότι οι χρονοσειρές βροχόπτωσης που διατίθενται από τη μελέτη είναι ανηγμένες στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης και όχι στο εύρος υψομέτρων του ταμιευτήρα, με συνέπεια να μην είναι κατάλληλες για την παρούσα μελέτη.
3. *Γενική Διάταξη Έργων Εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία: Υδρολογική Διερεύνηση* (Κουτσογιάννης 1996), η οποία περιέχει χρονοσειρές απορροών για όλες τις υπολεκάνες του Αχελώου, καθώς και για τις υπολεκάνες των θεσσαλικών έργων, για το διάστημα ετών 1966-1994. Επίσης διατίθενται χρονοσειρές βροχόπτωσης και εξατμίσης επί των

επιφανειών των ταμιευτήρων για το ίδιο διάστημα ετών. Τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν για το σύνολο των σεναρίων.



Εικόνα 6-2: Η τοπογραφία της περιοχής μελέτης (Πηγή: Αντωναρόπουλος 2006, Κουτσογιάννης 1996, μετά από τροποποίηση). Με πιο καθαρό περίγραμμα διακρίνονται οι θεσσαλικές υπολεκάνες μελέτης.

Οι κύριες πηγές των δεδομένων απορροής για όλες τις παραπάνω μελέτες είναι τα υδατικά ισοζύγια των ταμιευτήρων Κρεμαστών και Καστρακίου για το διάστημα λειτουργίας τους καθώς και οι μετρήσεις του σημαντικότερου υδρομετρικού σταθμού της περιοχής στο Αυλάκι. Για τον ταμιευτήρα Στράτου δεν επαρκεί το μήκος της ιστορικής χρονοσειράς (τέθηκε σε λειτουργία το 1989-1990) και επομένως τα δεδομένα προκύπτουν με αναγωγή των μετρήσεων την ανάντη θέση Καστρακίου (Αντωναρόπουλος 2006, Κουτσογιάννης 1996). Η εκτίμηση των χρονοσειρών απορροών των υπολεκανών Μεσοχώρας και Συκιάς γίνεται βάσει των μετρήσεων στον υδρομετρικό σταθμό Αυλακίου. Τέλος, όσον αφορά στα θεσσαλικά έργα, οι απορροές στις θέσεις Πύλη και Μουζάκι εκτιμήθηκαν με επεξεργασία των δειγμάτων των ομώνυμων υδρομετρικών σταθμών πλησίον της θέσης των φραγμάτων, ενώ έγινε επέκταση των δειγμάτων προς τα πίσω με χρήση στοχαστικού μοντέλου, με αναγωγή μετρήσεων από το Αυλάκι (Κουτσογιάννης, 1996). Αναφορικά με τις βροχοπτώσεις, η σχετική μελέτη του Κουτσογιάννη (1996) η οποία χρησιμοποιήθηκε αξιοποιεί το σύνολο μετρήσεων 14 βροχομετρικών σταθμών της περιοχής.

Οι διαθέσιμες χρονοσειρές αξιοποιήθηκαν με κύριο κριτήριο την ποσότητα της υδρολογικής πληροφορίας (προτιμήθηκαν επικαιροποιημένες χρονοσειρές έναντι παλαιότερων), αφού ελέγχθηκε ότι η μεθοδολογία εξαγωγής τους ήταν η ίδια και η εικόνα των χρονοσειρών ήταν παραπλήσια. Στην Εικόνα 6-3 φαίνεται ένα παράδειγμα ελέγχου για την ετήσια απορροή της Μεσοχώρας. Η βάση της σύγκρισης είναι πάντα η (πληρέστερη από μεθοδολογική άποψη) υδρολογική μελέτη (3) (Κουτσογιάννης 1996).



Εικόνα 6-3: Εικόνα της σύγκρισης των χρονοσειρών απορροής Μεσοχώρας για δύο διαφορετικές μελέτες.

Για τις εξατμίσεις επί των επιφανειών των ταμιευτήρων του Αχελώου εφαρμόστηκε η μέθοδος Penman, η οποία βασίστηκε σε διαθέσιμα δεδομένα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου στο έδαφος και ωρών ηλιοφάνειας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας από το μετεωρολογικό σταθμό Αγρινίου. Για τα θεσσαλικά έργα, χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό Λαρίσης, τα οποία ελήφθησαν από σχετική μελέτη (Tegos, Efstratiadis and Koutsoyiannis 2012). Σχετικά με τις θερμοκρασίες, έγινε αναγωγή των μηνιαίων τιμών από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό στις εν λόγω θέσεις των ταμιευτήρων, χρησιμοποιώντας κατάλληλες θερμοβαθμίδες.

Όσον αφορά στις υπόγειες διαφυγές από τους ταμιευτήρες, ελήφθησαν σταθερές τιμές μηνιαίως, ίσες με $6 \text{ m}^3/\text{s}$ για τα Κρεμαστά και $4 \text{ m}^3/\text{s}$ για το Στράτο (Γεωργακάκος και συν. 1995).

6.4. Γέννηση συνθετικών χρονοσειρών

Για τις ανάγκες της μελέτης, παράγονται συνθετικές μηνιαίες χρονοσειρές βροχής και απορροής διάρκειας 1000 ετών με χρήση του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ (έκδοση 6.1, 2008). Η ΚΑΣΤΑΛΙΑ (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης 2004) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πακέτο στοχαστικής προσομοίωσης, το οποίο επιτρέπει τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μηνιαίου χρονικού βήματος μεγάλου μήκους διατηρώντας τις ουσιώδεις στατιστικές παραμέτρους της ιστορικής πληροφορίας (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία, δομή της αυτοσυσχέτισης). Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ είναι ότι επιτρέπει την πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση, δηλαδή την παράλληλη προσομοίωση πολλών υδρολογικών μεταβλητών οι οποίες συσχετίζονται, όπως οι απορροές σε γειτονικές υπολεκάνες απορροής (λ.χ. απορροές στα Κρεμαστά με τις απορροές στο Καστράκι) και η απορροή με τη βροχή (ίδιας θέσης) για ένα ταμιευτήρα (λ.χ. απορροή με βροχή στον ταμιευτήρα Κρεμαστών). Η πολυμεταβλητή προσομοίωση είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι επιτρέπει τη διατήρηση της κοινής υδρολογικής δίαιτας των μεταβλητών, αναπαράγοντας την ετεροσυσχέτισή τους στις συνθετικές χρονοσειρές.

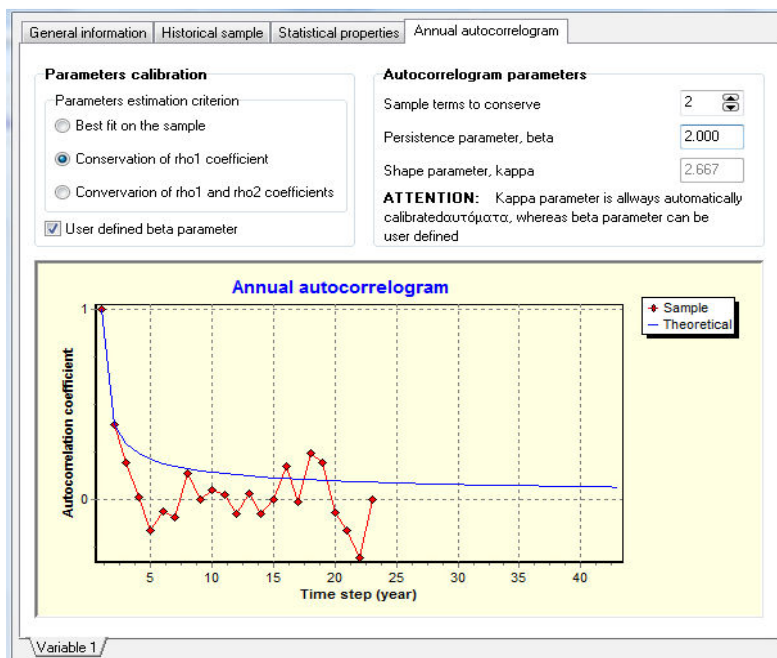
Στην περίπτωση της μελέτης του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας, για κάθε ένα από τα σενάρια λειτουργίας εισάγεται ταυτόχρονα το σύνολο των ιστορικών χρονοσειρών βροχής και απορροής για όλους τους ταμιευτήρες, προκειμένου να διατηρηθεί η ετεροσυσχέτιση των μεταβλητών (τόσο για τη σχέση βροχής-απορροής στην ίδια θέση όσο και για τις απορροές ή βροχές σε διαφορετικές θέσεις). Στη συνέχεια, γίνονται οι εξής ενέργειες:

1.) Επιλέγεται το είδος του στοχαστικού μοντέλου (AR(1) ή SMA, με το δεύτερο να δύναται να διατηρήσει την εμμονή της χρονοσειράς).

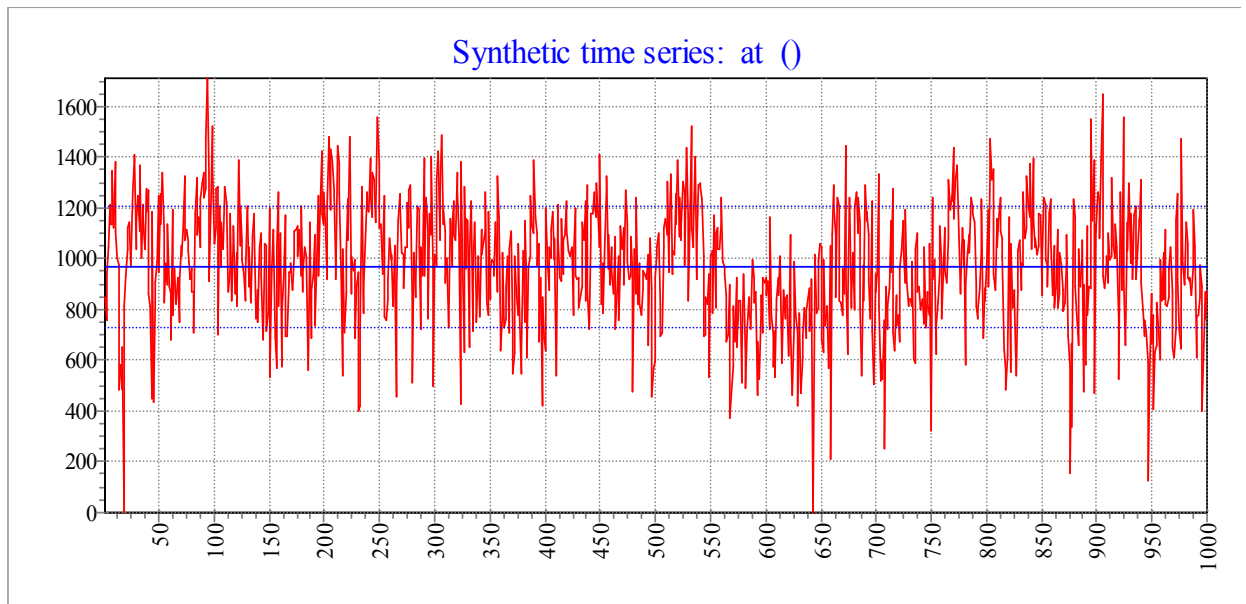
2.) Επιλέγεται η μορφή του ετήσιου θεωρητικού αυτοσυσχετογράμματος, καθώς και ο τρόπος προσαρμογής του στο δειγματικό αυτοσυσχετόγραμμα. Η ΚΑΣΤΑΛΙΑ επιτρέπει τις εξής επιλογές: (α.) την καλύτερη προσαρμογή του θεωρητικού αυτοσυσχετογράμματος στο δειγματικό (best fit to sample), (β.) τη διατήρηση του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης του δείγματος $\hat{\rho}_1$ και (γ.) τη διατήρηση των συντελεστών $\hat{\rho}_1$ και $\hat{\rho}_2$. Εκτός αυτού, για το μοντέλο SMA είναι δυνατός ο περαιτέρω προσδιορισμός του θεωρητικού αυτοσυσχετογράμματος μέσω της γενικευμένης συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς (Koutsoyiannis 2000):

$$\rho_j = (1 + \kappa \cdot \beta \cdot j)^{-1/\beta} \quad (6.1)$$

η οποία είναι γενικότερη μορφή της αυτοσυσχέτισης τόσο των μοντέλων ARMA όσο και των μοντέλων FGN (σχέση (3.13)). Η παράμετρος κ (παράμετρος κλίμακας) υπολογίζεται αυτόματα ενώ η παράμετρος β (παράμετρος σχήματος) σχετίζεται άμεσα με την εμμογή (το συντελεστή Hurst). Για $\beta = 0$ η στοχαστική ανέλιξη είναι τύπου ARMA, ενώ για $\beta > 0$ παρουσιάζει εμμογή. Η ΚΑΣΤΑΛΙΑ δίνει την επιλογή μεταξύ της εκτίμησης του β απ' ευθείας από το δείγμα ή της εισαγωγής της από το χρήστη. Στην περίπτωση της μελέτης, η ιστορική πληροφορία είναι μικρού χρονικού εύρους (της τάξης της πεντηκονταετίας) και δεν επαρκεί για την ορθή εκτίμηση της εμμογής (βλ. και παράγραφο 3.2), οπότε τελικώς τέθηκε η τιμή $\beta = 2.0$ (Εικόνα 6-4), η οποία είναι συνήθης για υδρολογικές μεταβλητές και συνεπώς συστήνεται για σχετικές εφαρμογές (Ευστρατιάδης 2011).



Εικόνα 6-4: Οι επιλογές του ετήσιου αυτοσυσχετογράμματος για την απορροή στα Κρεμαστά, στο σενάριο του κάτω Αχελώου. Διακρίνεται το δειγματικό αυτοσυσχετόγραμμα, καθώς και το θεωρητικό αυτοσυσχετόγραμμα (με μπλε χρώμα), το οποίο διατηρεί την αυτοσυσχέτιση πρώτης τάξης, έχοντας παράλληλα ορισμένη από το χρήστη παράμετρο $\beta=2.0$ ώστε να διατηρηθεί η εμμογή.



Εικόνα 6-5: Η συνθετική χρονοσειρά της απορροής στα Κρεμαστά. Είναι εμφανής η διατήρηση της εμμονής.

3.) Με βάση τα παραπάνω, παράγονται οι ετήσιες συνθετικές χρονοσειρές, οι οποίες εν συνεχεία επιμερίζονται σε μηνιαίο χρονικό βήμα με τη βοήθεια ενός πολυμεταβλητού μοντέλου PAR(1), μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την αποκατάσταση της συνέπειας των μηνιαίων χρονοσειρών (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης 2004). Ένα παράδειγμα γέννησης συνθετικής χρονοσειράς φαίνεται στην Εικόνα 6-5.

Στα πλαίσια της διπλωματικής, πρωτίστως ενδιαφέρει η διατήρηση της εμμονής οπότε για όλες τις επιλύσεις χρησιμοποιείται το σχήμα γέννησης κινούμενων μέσων όρων (SMA). Ωστόσο, παράγονται κατά περίπτωση και συνθετικές χρονοσειρές με χρήση του μοντέλου AR(1) για το σενάριο σύγκρισης των διαφορετικών μοντέλων (παράγραφος 8.7). Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε διαφορετικό σενάριο βάσει της εκάστοτε ιστορικής πληροφορίας, καθώς μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά των ανάντη λεκανών απορροής λόγω της προσθήκης έργων.

Όσον αφορά στις χρονοσειρές εξάτμισης, μετά τη λήψη των ιστορικών δεδομένων από τους σταθμούς ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα (για τη λεκάνη του Αχελώου και τη λεκάνη Θεσσαλίας, αντίστοιχα):

1. Παραγωγή συνθετικών μηνιαίων χρονοσειρών (1000 ετών) μηνιαίας θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου, ωρών ηλιοφάνειας με χρήση του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ.
2. Υψομετρική αναγωγή των θερμοκρασιακών δεδομένων με κατάλληλες θερμοβαθμίδες στο υψόμετρο κάθε ταμιευτήρα.
3. Εφαρμογή Penman επί των συνθετικών χρονοσειρών σε κάθε ταμιευτήρα ώστε να υπολογισθούν τα μηνιαία ύψη εξάτμισης.

Για την εφαρμογή του Renman χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ (έκδοση 4.0). Μιας και οι εξατμίσεις αποτελούν ήσσονος σημασίας συνιστώσα για το υδατικό ισοζύγιο των ταμιευτήρων, ακολουθήθηκε λογική προσαρμογής των στατιστικών δεικτών στο δείγμα (fit to sample), επιτρέποντας τη διατήρηση του Hurst σε όσες χρονοσειρές το εμφάνισαν μέσω του δειγματικού τους αυτοσυσχετογράμματος. Παρατηρήθηκε ότι εμμονή εμφανίστηκε μόνο στη χρονοσειρά θερμοκρασιών, η οποία άλλωστε είχε και τα περισσότερα διαθέσιμα έτη δεδομένων. Στα υπόλοιπα μεγέθη, το ιδιαίτερα μικρό ιστορικό δείγμα δεν επέτρεψε διατήρηση εμμένουσας συμπεριφοράς.

Το σύνολο των ιστορικών χρονοσειρών, καθώς και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συνθετικών χρονοσειρών που παρήχθησαν δίνονται στο Παράρτημα Γ.

6.5. Ζητήσεις νερού και περιορισμοί

6.5.1. Οι στόχοι που καλείται να καλύψει το μοντέλο

Το μοντέλο καλείται να κατανείμει επαρκή ποσότητα υδάτων ανάμεσα στις εξής κατηγορίες αντικρουόμενων στόχων:

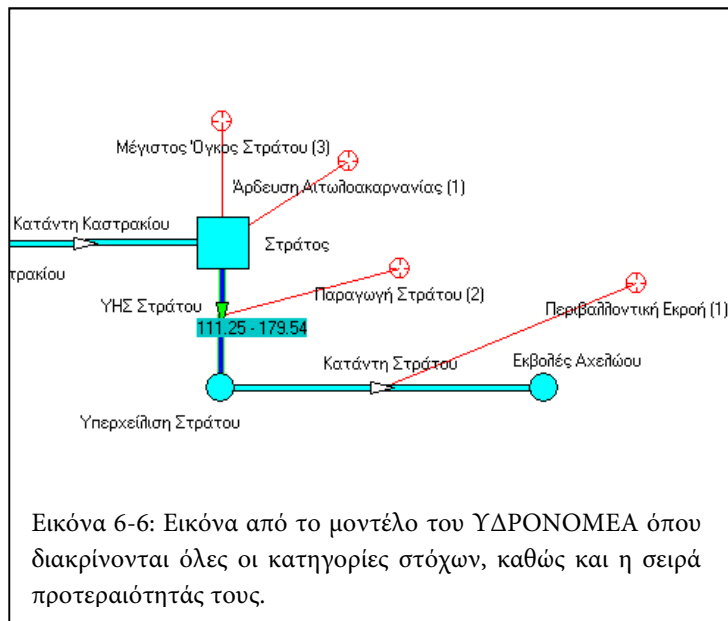
- Υδροηλεκτρική παραγωγή (στόχος η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ή του κέρδους που αυτή συνεπάγεται).
- Κάλυψη αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών, τόσο της Αιτωλοακαρνανίας όσο και της Θεσσαλίας.
- Διατήρηση επαρκούς ροής στους ποταμούς για περιβαλλοντικούς λόγους.

Όλες οι παραπάνω κατηγορίες ζητήσεων εξυπηρετούνται μέσω των αντίστοιχων στοιχείων-στόχων (targets) στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Για την κάλυψη των χρήσεων, ακολουθείται η εξής πολιτική προτεραιοτήτων (Εικόνα 6-6):

1. Πρωτίστως εξυπηρετούνται περιβαλλοντικοί περιορισμοί και αρδευτικές/υδρευτικές χρήσεις, με σειρά προτεραιότητας (1). Οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί μπαίνουν επί των κλάδων του δικτύου που είναι ποτάμια (rivers), ενώ οι αρδευτικές/υδρευτικές ζητήσεις μπαίνουν είτε σε ταμιευτήρες (reservoirs) είτε σε κόμβους (junctions) του δικτύου.
2. Ακολουθούν οι ενεργειακοί στόχοι, με σειρά προτεραιότητας (2), οι οποίοι μπαίνουν πάνω στα στοιχεία μεταφοράς νερού που ονομάζονται στρόβιλοι (turbines).
3. Στις περιπτώσεις που εισήχθησαν περιορισμοί ελαχίστων σταθμών (ως παράμετροι που υποβοηθούν την ενεργειακή βελτιστοποίηση), αυτοί είχαν την τελευταία προτεραιότητα (3) καθώς αποτελούσαν βοηθητικά στοιχεία για τη διαχειριστική πολιτική. Οι στόχοι διατήρησης σταθμών μπαίνουν επί των ταμιευτήρων.

Υπενθυμίζεται ότι στο σκέλος της διανομής νερού σε κάθε χρονικό βήμα, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ κάνει μερισμό των ποσοτήτων νερού με βάση τη βαρύτητα κάθε στόχου, δηλαδή τη σειρά

προτεραιότητάς του (βλ. και ενότητα 5.2.5). Κατά συνέπεια, στην περίπτωση που τα αποθέματα είναι ανεπαρκή, τείνει να καλύψει πρωτίστως περιβαλλοντικούς και αρδευτικούς στόχους και δευτερευόντως ενεργειακές απαιτήσεις.



6.5.2. Άρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες

Οι κύριοι κόμβοι του συστήματος που καλύπτουν τις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες της Αιτωλοακαρνανίας και της Θεσσαλίας τοποθετούνται στον ταμιευτήρα Στράτου και στον κόμβο Μαυροματίου, αντίστοιχα. Όσον αφορά στην Αιτωλοακαρνανία, οι αρδευτικές ανάγκες είναι περίπου 544 hm³/year, ενώ οι υδρευτικές μόλις 6 hm³/year (Στεφανάκος 2008). Λόγω του μικρού μεγέθους των υδρευτικών ζητήσεων οι δύο ανάγκες ομαδοποιούνται σε ένα στόχο, με τις υδρευτικές να είναι ισόποσα κατανεμημένες στο έτος και τις αρδευτικές να ακολουθούν την κατανομή που περιγράφεται παρακάτω.

Οι ετήσιες ανάγκες της Θεσσαλίας είναι 600 hm³, με τη μεγαλύτερη ποσότητα να καλύπτεται από την εκτροπή του Αχελώου. Οι ανάγκες αυτές σε ορισμένες διερευνήσεις στη συνέχεια μεταβάλλονται, και παίρνουν τιμές από 200 – 1200 hm³/year. Τέλος, η αρδευτική ζήτηση στην Πύλη είναι της τάξης των 4 hm³/year, έχει τοπικό χαρακτήρα και αφορά σε άμεσες απολήψεις νερού από αυτόν. Όλες οι αρδευτικές ζητήσεις ακολουθούν τη μηνιαία κατανομή που έχει ο Πίνακας 6-2 (ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995):

Πίνακας 6-2: Μηνιαία κατανομή αρδευτικών απολήψεων (Πηγή: ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995)

| | Απρίλιος | Μάιος | Ιούνιος | Ιούλιος | Αύγουστος | Σεπτέμβριος |
|---------------------|----------|-------|---------|---------|-----------|-------------|
| Ποσοστό ζήτησης (%) | 5.0 | 11.0 | 23.6 | 30.2 | 26.4 | 3.8 |

6.5.3. Περιβαλλοντικοί περιορισμοί

Η διατήρηση των ευαίσθητων οικοσυστημάτων που υπάρχουν στα κατάντη των ποταμών επιβάλλει την εξασφάλιση ελάχιστης ροής στους ποταμούς κατάντη των φραγμάτων. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η διατήρηση περιβαλλοντικής παροχής κατάντη του Στράτου, ώστε να διαφυλαχθεί ο περιβαλλοντικός πλούτος στο δέλτα του Αχελώου (περιοχή που προστατεύεται από τη συνθήκη Ramsar). Παλαιότερες μελέτες υποδεικνύουν τη διατήρηση ελάχιστης συνεχούς περιβαλλοντικής παροχής της τάξης των 21 m³/s (ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995), ωστόσο πιο σύγχρονες προσεγγίσεις δείχνουν ότι τέτοιες πολιτικές σταθερής παροχής (steady-discharge approach) δεν διατηρούν χαρακτηριστικά της ροής τα οποία έχουν σημαντικό οικολογικό αντίκτυπο, όπως την εποχικότητα και τα πλημμυρικά επεισόδια (Poff and Zimmerman 2010). Για την καλύτερη αναπαράσταση των χαρακτηριστικών αυτών μπορεί να εφαρμοσθεί μία πληθώρα μεθόδων και τεχνικών τα οποία ονομάζονται Μοντέλα Περιβαλλοντικής Ροής (Environmental Flow Models – EFM). Για την περίπτωση του δέλτα του Αχελώου, έχει εκπονηθεί σχετική έρευνα από τους Varveris et al. (2010). Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, ακολουθήθηκαν τα συμπεράσματα της μεθόδου Basic Maintenance Flow (BMF) της παραπάνω εργασίας, τα οποία συνίστανται σε μία μηνιαία κατανομή για την περιβαλλοντική παροχή στο δέλτα του Αχελώου που ακολουθεί τις μεταβολές της φυσικοποιημένης ροής κατάντη του Στράτου.

Πίνακας 6-3: Μηνιαία διακύμανση της περιβαλλοντικής παροχής κατάντη του Στράτου (Πηγή: Varveris et al. 2010)

| Μήνας | Παροχή Διατήρησης στις Εκβολές [m ³ /s] |
|-------------|--|
| Οκτώβριος | 27.78 |
| Νοέμβριος | 27.77 |
| Δεκέμβριος | 31.31 |
| Ιανουάριος | 34.35 |
| Φεβρουάριος | 33.55 |
| Μάρτιος | 29.04 |
| Απρίλιος | 21.92 |
| Μάιος | 22.82 |
| Ιούνιος | 18.49 |
| Ιούλιος | 17.70 |
| Αύγουστος | 17.93 |
| Σεπτέμβριος | 21.44 |

Όσον αφορά στα έργα του άνω Αχελώου, λόγω έλλειψης εκτενέστερων μελετών ακολουθούνται οι παλαιότεροι περιορισμοί σταθερής ροής 1.5 m³/s μεταξύ Μεσοχώρας και Συκιάς και 5 m³/s κατάντη της Συκιάς (ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995). Στα θεσσαλικά

έργα λαμβάνεται περιβαλλοντική παροχή 0.15 m³/s στους ποταμούς Πορταϊκό και Πάμισο, κατάντη των ταμιευτήρων Πύλης και Μουζακίου αντίστοιχα (Κουτσογιάννης, 1996).

Επίσης προβλέπεται η διατήρηση συνεχούς εκροής από τον ταμιευτήρα Πύλης, ίσης με 0.35 m³/s, ήτοι 11 hm³/year, με στόχο τον εμπλουτισμό του υδροφορέα της κατάντη περιοχής (Κουτσογιάννης, 1996). Ο στόχος αυτός είναι μικρός και κατά συνέπεια προστίθεται στις άμεσες απολήψεις των 4 hm³/year επί του ταμιευτήρα της Πύλης.

6.5.4. Άλλες παραδοχές

Η αρχική πλήρωση των ταμιευτήρων αποτελεί παραδοχή που, λόγω του μεγάλου μήκους των χρονοσειρών εισόδου, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ επιτρέπει τον καθορισμό αρχικών σταθμών σε κάθε ταμιευτήρα και την εκτίμηση του αρχικού όγκου και του ποσοστού πλήρωσης βάσει αυτών. Τέθηκαν συντηρητικά ως ορίσματα χαμηλές αρχικές στάθμες, ίσες με το 20-40% της χωρητικότητας κάθε ταμιευτήρα, όπως φαίνεται και από τον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6-4: Αρχικές στάθμες και ποσοστά πλήρωσης των ταμιευτήρων.

| | Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας [m] | Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας [m] | Αρχική στάθμη [m] | Χωρητικότητα [hm ³] | Αρχικός όγκος νερού [hm ³] | Αρχικό ποσοστό πλήρωσης |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------------------------|---|----------------------------|
| Μεσοχώρα | 731 | 770 | 750 | 225.2 | 92.0 | 41% |
| Συκιά | 485 | 550 | 520 | 496.8 | 195.5 | 39% |
| Κρεμαστά | 227 | 282 | 245 | 3501.0 | 1015.3 | 29% |
| Καστράκι | 142 | 144.3 | 143 | 50.0 | 15.0 | 30% |
| Στράτος | 67 | 68.6 | 67.5 | 10.2 | 2.1 | 21% |
| Πύλη | 310 | 335 | 318 | 46.0 | 11.1 | 24% |
| Μουζάκι | 250 | 290 | 260 | 183.3 | 33.2 | 18% |

6.6. Αναλύσεις – Σενάρια

Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκαν σπονδυλωτά έξι σχήματα έργων στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές εκδοχές έργων πριν και μετά την εκτροπή. Τα ονόματα των σεναρίων περιλαμβάνουν τα γράμματα Α (για σενάρια που αφορούν μόνο στα έργα του Αχελώου) και Ε (για σενάρια που αφορούν στην εκτροπή, άρα στο συνδυασμένο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας), ακολουθούμενα από αύξοντες αριθμούς. Πιο αναλυτικά, τα σενάρια αυτά είναι τα εξής:

1. Σενάρια υδροσυστήματος Αχελώου:

Σενάριο Α1 (Σενάριο κάτω Αχελώου): Είναι το σενάριο των υφιστάμενων έργων (κάτω Αχελώου). Χρησιμεύει για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης με πραγματικά μεγέθη που προέκυψαν από τη λειτουργία του συστήματος από τη Δ.Ε.Η.

Σενάριο A2 (Σενάριο Μεσοχώρας): Είναι το σενάριο των έργων του κάτω Αχελώου, μαζί με την προσθήκη του ταμιευτήρα Μεσοχώρας. Το σενάριο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία διότι η Μεσοχώρα είναι έργο που έχει περατωθεί αλλά, όπως προαναφέρθηκε, δε λειτουργεί. Η ανάλυση καταδεικνύει το ενεργειακό και οικονομικό κέρδος που θα αποκομιστεί από το έργο. Το σενάριο επίσης χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση των αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς και για τη διερεύνηση του αντίκτυπου που έχει η διαφορετική θεώρηση της στοχαστικότητας των δεδομένων στα αποτελέσματα της διαχείρισης.

Σενάριο A3 (Σενάριο Συκιάς): Είναι το σενάριο των έργων του κάτω Αχελώου, μαζί με την προσθήκη της Μεσοχώρας και της Συκιάς. Στη διάταξη προστίθεται και ένας απλός στόχος εκτροπής με προτεραιότητα (1), ως στόχος άρδευσης από τη Συκιά, χωρίς τα σχετικά θεσσαλικά έργα. Η χρησιμότητα αυτού του σεναρίου είναι η ανάλυση της επίπτωσης της εκτροπής στην ενεργειακή παραγωγή των έργων του Αχελώου.

2. Σενάρια υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας

Σενάριο E1 (Σενάριο εκτροπής - συμβατικό): Είναι το πλήρες σχήμα έργων της εκτροπής, το οποίο περιλαμβάνει τόσο τα θεσσαλικά έργα όσο και τα έργα του Αχελώου. Αποτελεί την ολοκληρωμένη διάταξη σύζευξης των δύο λεκανών, χωρίς ωστόσο χρήση διατάξεων άντλησης-ταμίευσης.

Σενάριο E2 (Σενάριο εκτροπής - άντληση Πευκοφύτου): Το πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, στο οποίο περιλαμβάνεται διάταξη άντλησης/ταμίευσης για τον ταμιευτήρα Πευκοφύτου.

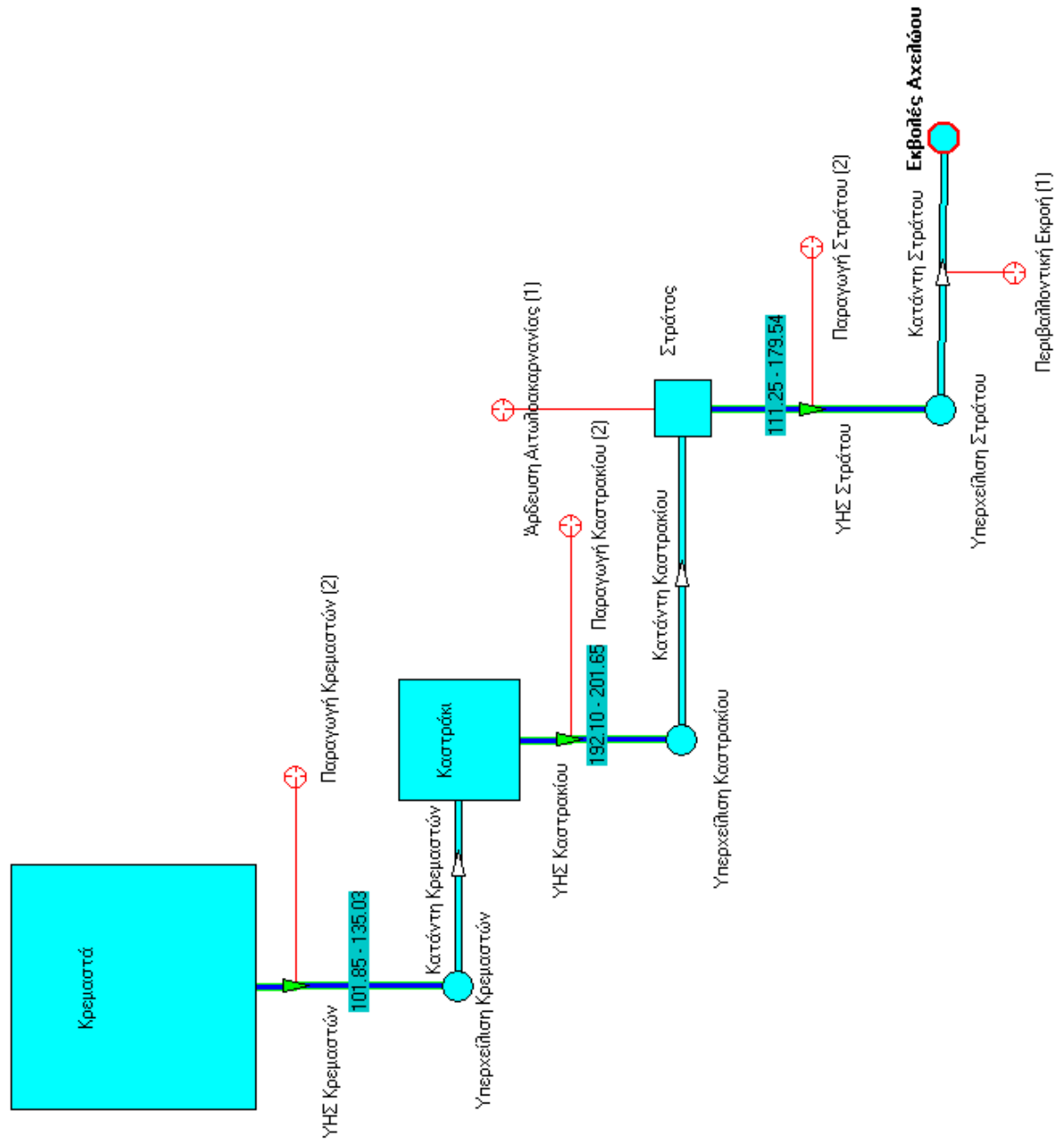
Σενάριο E3 (Σενάριο εκτροπής - άντληση): Το πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, με πλήρη αξιοποίηση των διατάξεων άντλησης/ταμίευσης. Περιλαμβάνονται αντλιοστρόβιλοι τόσο στη θέση Πευκοφύτου όσο και στη θέση Μουζακίου. Στην περίπτωση αυτή, η έξοδος Μαυροματίου φέρει ανάχωμα ώστε να είναι δυνατή η άντληση, αποκτώντας συνεπώς αναρρυθμιστική ικανότητα. Για τις ανάγκες της επίλυσης, το Μαυρομάτι θεωρήθηκε ως ταμιευτήρας εικονικού αναρρυθμιστικού όγκου 100 hm³, ο οποίος αντιστοιχεί στο ήμισυ της αρδευτικής ζήτησης κατά το μήνα αιχμής. Ο ταμιευτήρας αυτός δε συμμετέχει στη βελτιστοποίηση και δε συνοδεύεται από χρονοσειρές εισόδου, ενώ η παραδοχή του αναρρυθμιστικού όγκου δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, μιας και το βήμα προσομοίωσης είναι πολύ μεγαλύτερο του ημερησίου.

Τα σενάρια δημιουργήθηκαν σπονδυλωτά, με τη σειρά που προαναφέρθηκε. Οι διατάξεις A1, A2, E1 και E3 αποτελούν τις πιο σημαντικές περιπτώσεις, καθώς αντιπροσωπεύουν τις πιθανότερες εκβάσεις της διάταξης των έργων του υδροσυστήματος. Ειδικότερα, το A2 αντιπροσωπεύει την άμεση προσθήκη της Μεσοχώρας στο υφιστάμενο σύστημα, το E1 τη λειτουργία των έργων εκτροπής χωρίς άντληση (συμβατική διάταξη) και

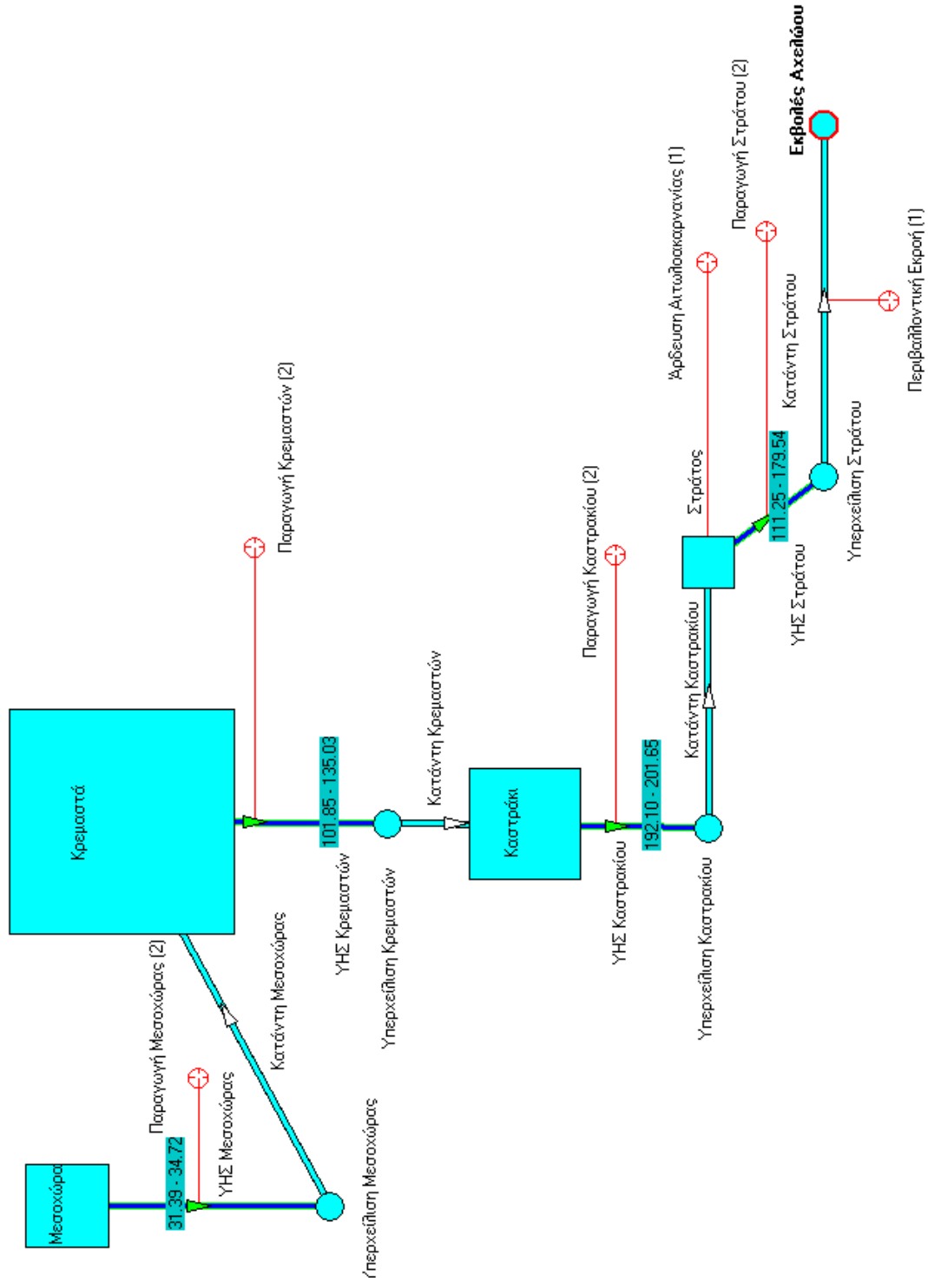
το Ε3 τη λειτουργία των έργων εκτροπής με το πλήρες σχήμα έργων άντλησης – ταμίευσης. Κατά συνέπεια, αναλυτικά αποτελέσματα (Παράρτημα Α) δίνονται για αυτά τα σενάρια μόνο. Τα σενάρια Α3 και Ε2 αποτελούν ενδιάμεσα σενάρια μελέτης, με το Α3 να χρησιμοποιείται μόνο στην παράγραφο 8.3 και το Ε2 στην παράγραφο 8.4.

Οι εικόνες από τη σχηματοποίηση των σεναρίων φαίνονται στις σελίδες που ακολουθούν (Εικόνα 6-7).

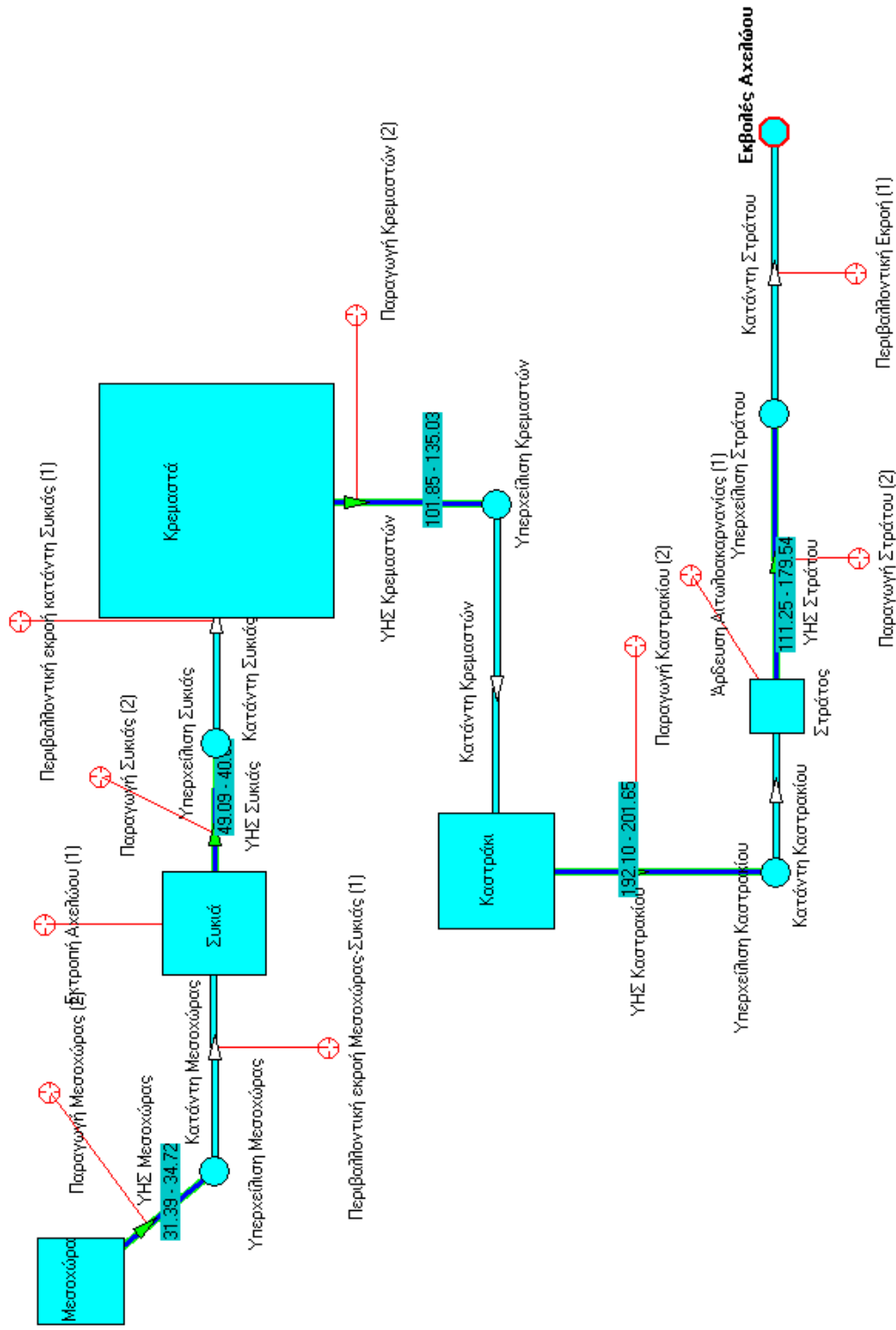
Σενάριο Α1 (Κάτω Αχελώος)



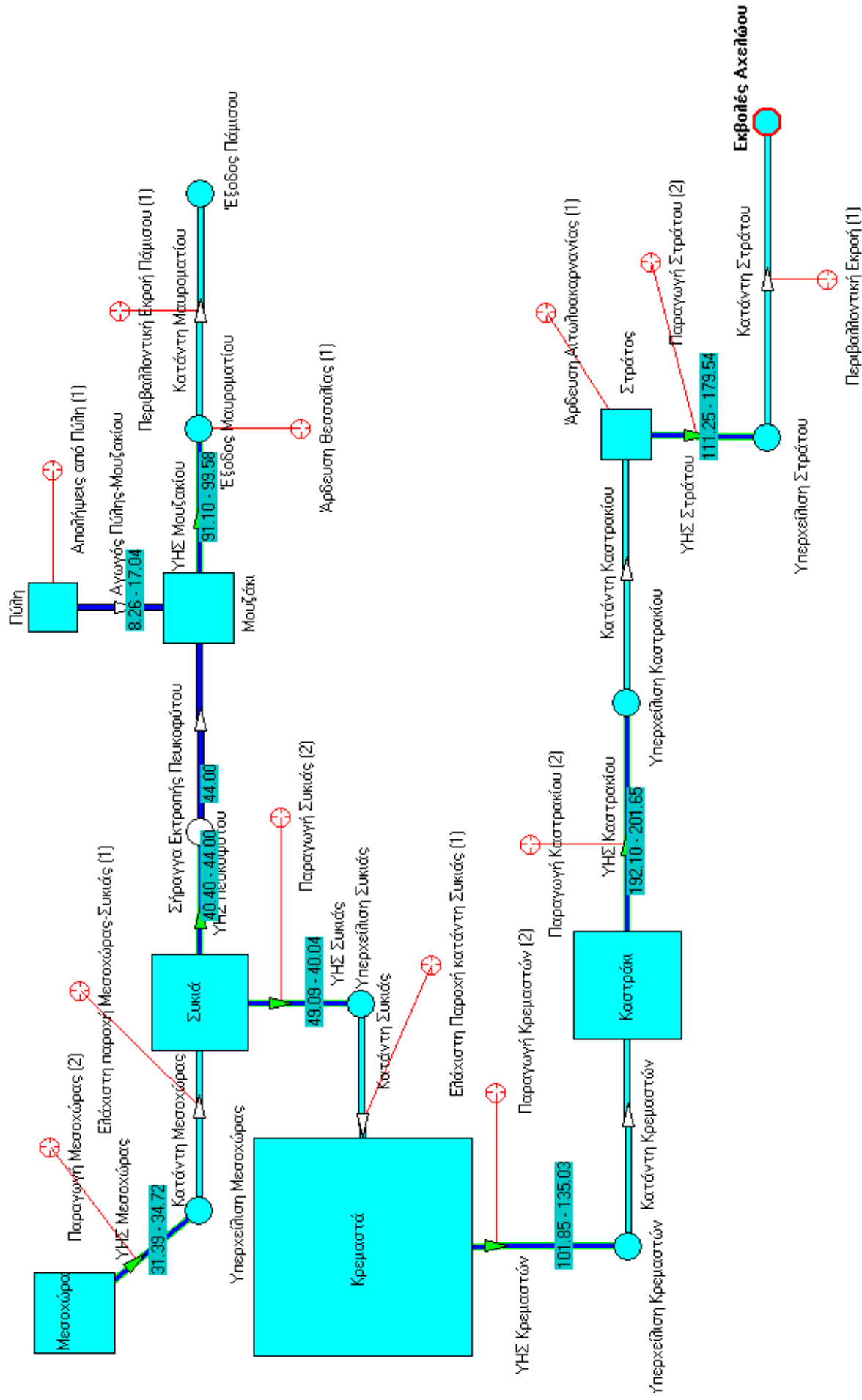
Σενάριο Α2 (Κάτω Αχελώος και Μεσοχώρα)



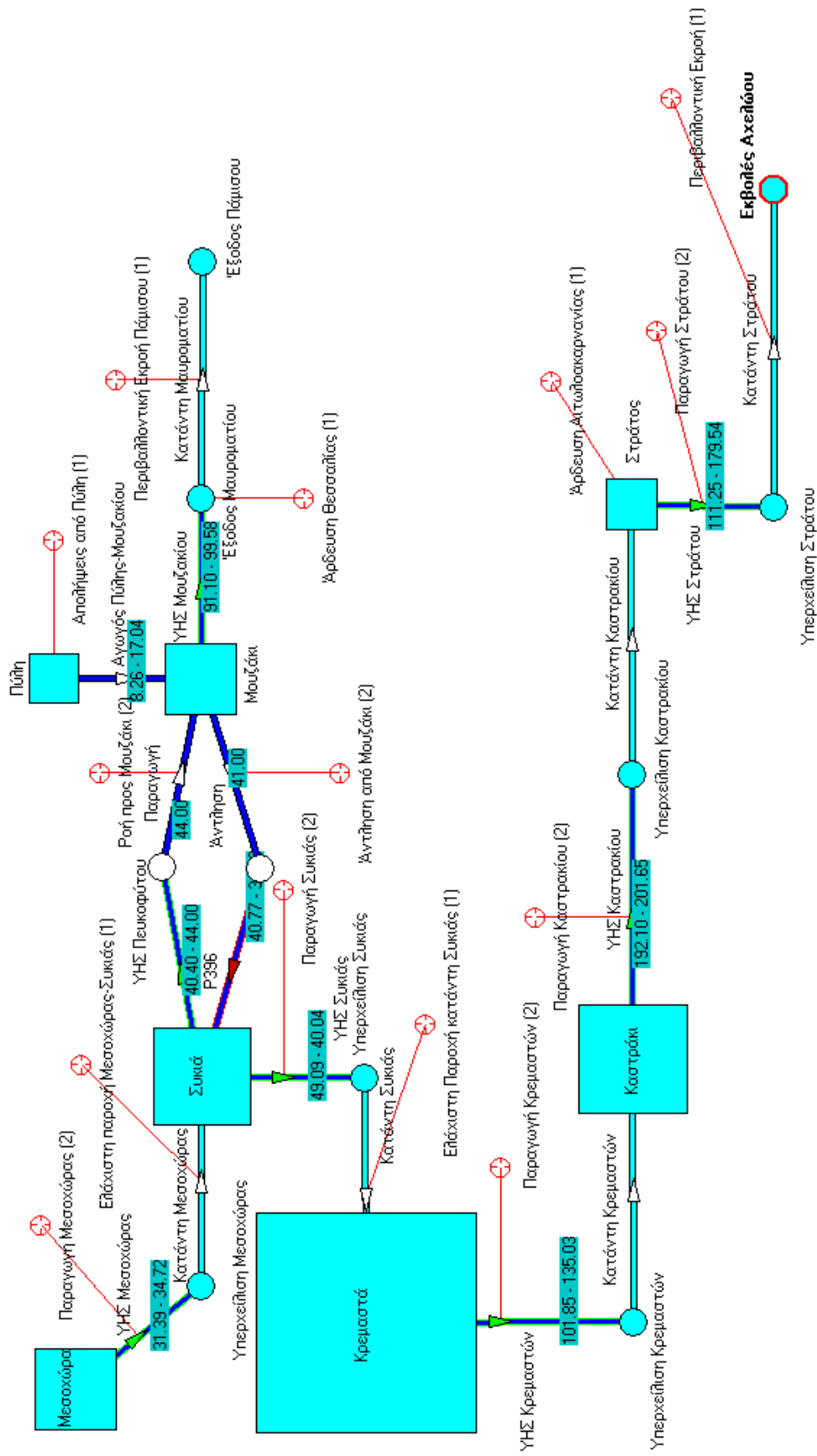
Σενάριο Α3 (Κάτω Αχελώος με Μεσοχώρα και Συκιά)



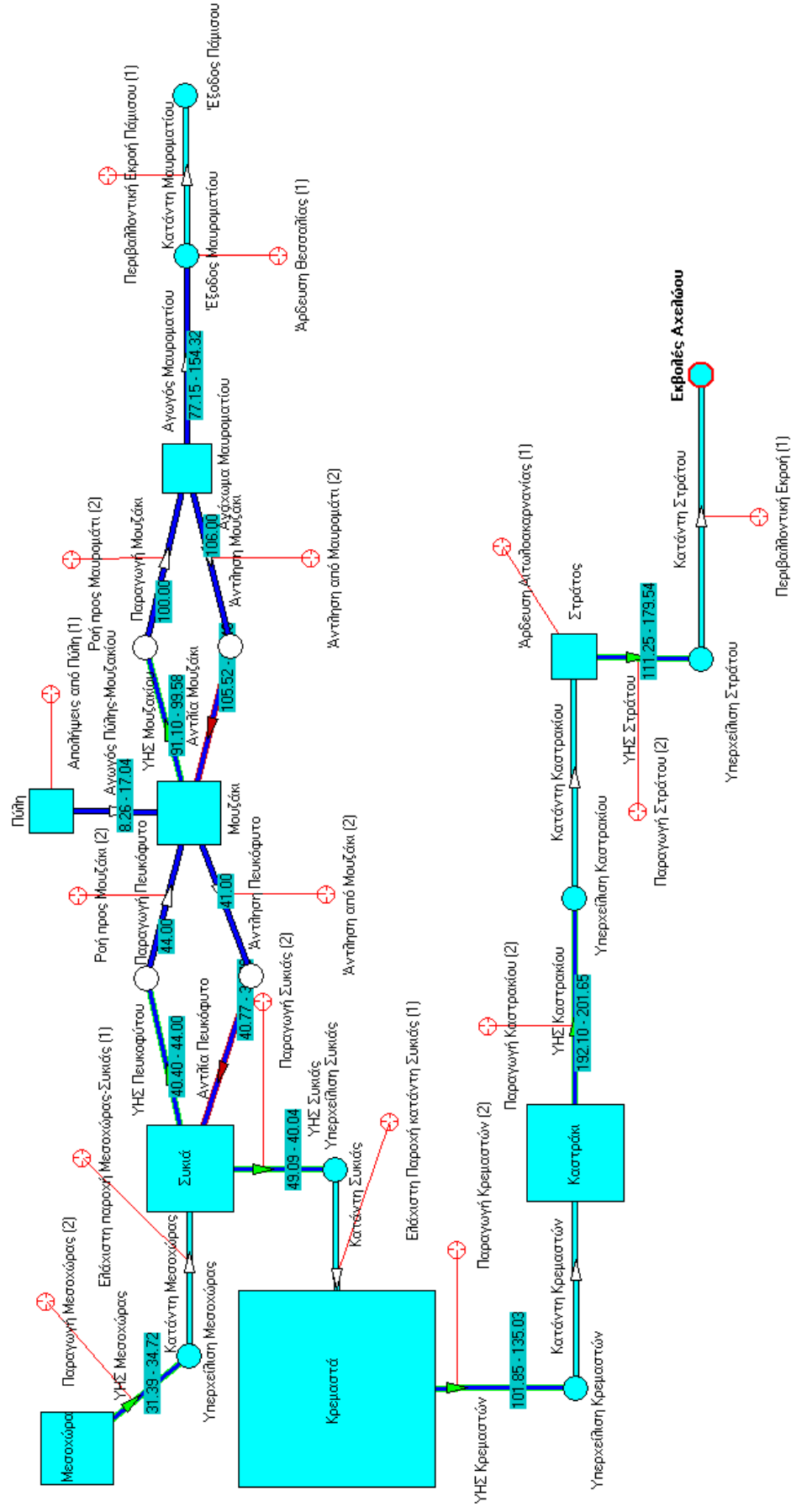
Σενάριο E1 (Εκτροπή – συμβατική διάταξη)



Σενάριο E2 (Εκτροπή – άντληση/ταμίευση στον ΥΗΣ Πευκοφύτου μόνο)



Σενάριο Ε3 (Εκτροπή – πλήρες σχήμα άντλησης/ταμείωσης)



Εικόνα 6-7: Σχηματοποίηση του δικτύου για κάθε ένα από τα σενάρια λειτουργίας.

6.7. Παραδοχές αντλητικής διάταξης

Όσον αφορά στις διατάξεις άντλησης – ταμίευσης, υπάρχουν δύο κατηγορίες επιχειρησιακής λειτουργίας του συστήματος:

α.) Η λειτουργία των μονάδων άντλησης-ταμίευσης κατά τις νυχτερινές ώρες κάθε μήνα, ώστε να γίνει εκμετάλλευση της φθηνής νυχτερινής ενέργειας από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες.

β.) Η λειτουργία των μονάδων άντλησης – ταμίευσης κατά προτεραιότητα τους χειμερινούς μήνες, οπότε και δε θα πραγματοποιούνται εκροές προς την πλευρά της Θεσσαλίας.

Οι δύο αυτές πολιτικές καθορίζονται σε επίπεδο λειτουργίας του συστήματος, επηρεάζουν ωστόσο και τις προκαταρκτικές διερευνήσεις, ειδικά ως προς την ενεργειακή βελτιστοποίηση του συστήματος. Η περίπτωση (β.) προϋποθέτει την εποχική αναπροσαρμογή του συστήματος, με έμφαση στην ενεργειακή παραγωγή και την κάλυψη των αρδευτικών ζητήσεων το καλοκαίρι και την αύξηση των αποθεμάτων το χειμώνα. Μιας και οι ενεργειακοί στόχοι που έχουν τεθεί στην παρούσα διπλωματική είναι σταθεροί χρονικά, μελετάται τελικώς η πρώτη περίπτωση, στην οποία ένα σταθερό ποσοστό του χρόνου ημερησίως δεσμεύεται για άντληση (με την πραγματική απόκριση και τις χρονοσειρές άντλησης του συστήματος, προφανώς, να κυμαίνονται χρονικά ως εξαρτημένες από την κάλυψη του αρδευτικού στόχου).

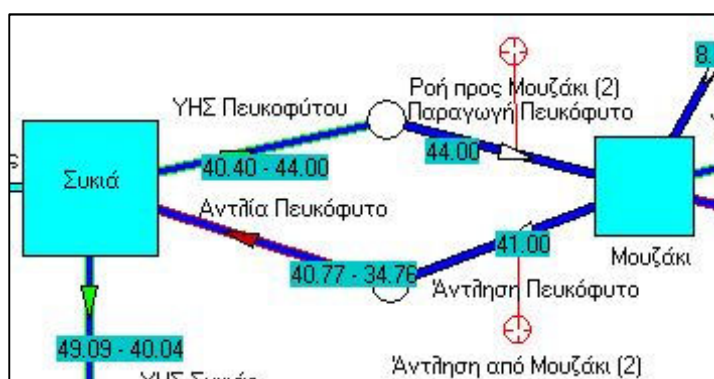
Με βάση τα παραπάνω, γίνεται η παραδοχή αντλητικής λειτουργίας 6 h ημερησίως. Επομένως, η μέγιστη δυνατή λειτουργία άντλησης είναι στο 25% του μηνιαίου χρονικού βήματος μελέτης. Για τη μοντελοποίηση του αντλιοστρόβιλου λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

1. Για κάθε αντλιοστρόβιλο υπάρχουν δύο ξεχωριστά ζεύγη καμπυλών Ύψους πτώσης – Παροχетеυτικότητας (H, Q) και Ύψους πτώσης – Ειδικής ενέργειας (H, ψ), με το πρώτο να ισχύει για την παραγωγή ενέργειας και το δεύτερο για την άντληση.
2. Η αντλητική λειτουργία στο 25% του χρόνου περιορίζει τη λειτουργία της διάταξης ως στρόβιλο στο υπόλοιπο 75% του χρονικού βήματος (κατά μέγιστο). Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη μείωση της ονομαστικής (μηνιαίας) παροχетеυτικότητας κάθε στοιχείου, ώστε να υπάρχει στην προσομοίωση ο περιορισμός λειτουργίας των στοιχείων σε ένα τμήμα του χρόνου κάθε μήνα.

Η μοντελοποίηση των υδροστροβίλων στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ έγινε με δύο παράλληλους κλάδους, με τον πρώτο να περιέχει στρόβιλο (turbine) και το δεύτερο αντλία (pump) (Εικόνα 6-8). Για τη μείωση της παροχетеυτικότητας, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ επιτρέπει τη χρήση συντελεστών μείωσης (reduction factors) σε κάθε στοιχείο, με συντελεστές μείωσης $\psi_1=0.75$ και $\psi_2=0.25$ αντίστοιχα, για τους οποίους προφανώς ισχύει:

$$\psi_1 + \psi_2 = 1.0 \quad (6.2)$$

Η περιοριστική συνθήκη (6.2) είναι γενική και ισχύει πάντα, διότι εξασφαλίζει ότι δεν θα γίνεται ταυτόχρονη χρήση των δύο κλάδων εντός του ίδιου χρονικού βήματος. Αν, για παράδειγμα, απαιτηθεί να αλλάξει η ημερήσια άντληση σε 8 h ημερησίως, ο συντελεστής μείωσης της παροχетеυτικότητας της αντλίας θα γίνει $\psi_2=0.33$ και για το στρόβιλο θα γίνει $\psi_1=0.67$.



Εικόνα 6-8: Μοντελοποίηση του αντλιοστρόβιλου στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

Συμπληρωματικά των στοιχείων τοποθετούνται δύο ενδιάμεσοι κόμβοι και δύο υδραγωγεία (aqueducts) μεγαλύτερης παροχетеυτικότητας, τα οποία είναι εικονικά στοιχεία που δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς και απαιτούνται προκειμένου να αποτυπωθεί ορθά η αμφίδρομη ροή μεταξύ δύο ταμιευτήρων.

6.8. Οικονομικά στοιχεία

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι και οι οικονομικές παραδοχές του συστήματος, στις οποίες βασίζεται ένας αριθμός βελτιστοποιήσεων, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια (βλ. παράγραφο 7.3). Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγιναν παραδοχές στις τιμές μονάδας τόσο σχετικά με την ενέργεια όσο και με τη διάθεση νερού για άρδευση. Λεπτομερή οικονομικά στοιχεία δίνονται από τον Κουτσογιάννη (1996, μετά από επικαιροποίηση), με μία αναπροσαρμογή των τιμών μονάδος για την πρωτεύουσα ενέργεια να δίνεται και στην έκθεση Λαζαρίδη (2010) στα 45€/MWh. Λαμβάνονται επίσης υπόψη πρόσφατα στοιχεία τιμολόγησης της Δ.Ε.Η. για την πώληση ενέργειας στη χαμηλότερη ζώνη πώλησης. Όσον αφορά στην τιμή οικονομικού οφέλους από την άρδευση, λαμβάνονται υπόψη και στοιχεία τιμολόγησης νερού (irrigation pricing) από τη διεθνή βιβλιογραφία, σε μεσογειακές χώρες με παρόμοιες κλιματικές συνθήκες και τύπους καλλιεργειών (Albiac and Murua 2009, Lamaddalena, et al. 2001). Σημειώνεται ότι προφανώς υπάρχει διαφορά ανάμεσα στο αναμενόμενο όφελος από το αρδευτικό προϊόν και στην τιμή πώλησης του νερού προς τους καλλιεργητές και η αναφορά σε τιμές κοστολόγησης νερού γίνεται απλώς για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης. Στην Ελλάδα η πολιτική κοστολόγησης του αρδευτικού νερού δε συναντάται συχνά, αποτελεί

ωστόσο δημοφιλή πρακτική σε πληθώρα εφαρμογών διαχείρισης υδροσυστημάτων στο εξωτερικό. Σε επιχειρησιακό επίπεδο, θεωρώντας ενιαίο φορέα διαχείρισης του υδροσυστήματος με στόχο την αξιόπιστη κάλυψη τόσο της ενέργειας όσο και των αρδευτικών ζητήσεων, η κοστολόγηση του νερού αποτελεί επιθυμητή διαχειριστική πρακτική.

Ο Πίνακας 6-5 που ακολουθεί περιλαμβάνει τα στοιχεία που λήφθηκαν υπόψη από τις παραπάνω μελέτες, καθώς και τις τελικές τιμές μονάδας που επιλέχθηκαν για την πρωτεύουσα ενέργεια, τη δευτερεύουσα ενέργεια, το κόστος άντλησης καθώς και το αρδευτικό όφελος. Οι τιμές μονάδας για την ενέργεια δίνονται σε €/kWh ενώ το αρδευτικό όφελος δίνεται σε €/m³. Τελικώς θεωρούνται οι τιμές 0.045 €/kWh για την πρωτεύουσα ενέργεια, 0.023 €/kWh για τη δευτερεύουσα ενέργεια, 0.022 €/kWh για το κόστος άντλησης και 0.06 €/m³ για το αρδευτικό όφελος.

Πίνακας 6-5: Οικονομικά στοιχεία για τα σενάρια μελέτης

| Οικονομικά Στοιχεία για την Ενέργεια - Τελικές Τιμές για τις Βελτιστοποιήσεις | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------|--|----------------------------|
| | Πρωτεύουσα [€/kWh] | Δευτερεύουσα [€/kWh] | Αρδευτικό Όφελος [€/m ³] | Κόστος Άντλησης [€/kWh] |
| | 0.045 | 0.023 | 0.060 | 0.022 |
| Οικονομικά Στοιχεία - Βιβλιογραφικές Πηγές | | | | |
| Κουτσογιάννης, 1996 | Πρωτεύουσα | Δευτερεύουσα | Αρδευτικό Όφελος | Κόστος Άντλησης |
| | [δρχ/kWh] | [δρχ/kWh] | [δρχ/m ³] | [δρχ/kWh] |
| | 11.5 | 6.5 | 20 | 6.5 |
| | [€/kWh] | [€/kWh] | [€/m ³] | [€/kWh] |
| | 0.034 | 0.019 | 0.059 | 0.019 |
| Λαζαρίδης, 2012 | Πρωτεύουσα | | | Κόστος Άντλησης |
| | [€/kWh] | | | [€/kWh] |
| | 0.045 | | | 0.022 |
| Τιμολόγιο ΔΕΗ | Πρωτεύουσα | Δευτερεύουσα | | |
| | [€/kWh] | [€/kWh] | | |
| | 0.048 | 0.028 | | |
| Irrigation Pricing - Spain (Albiac and Murua 2009) | | | Πώληση Νερού | |
| | | | Dams - Fields of low profitability | |
| | | | [€/m ³] | 0.060 |
| | | | Aquifer pumping - High-profit crops | |
| | | [€/m ³] | 0.090-0.210 | |
| Water pricing - Italy (Lamaddalena et al. 2001) | | | Πώληση Νερού | |
| | | | Lowest irrigation price for mild uses [up to 2,000 m ³ /ha] | |
| | | | [€/m ³] | |
| | | | | 0.088 |

Στα πλαίσια της οικονομικής διερεύνησης ένα ακόμη απαραίτητο μέγεθος είναι η ποινική ρήτρα μη εκπλήρωσης ενός στόχου (βλ. και Παράγραφο 7.3), η οποία αντιπροσωπεύει το μοναδιαίο οικονομικό μέγεθος (ζημία) που καλείται να πληρώσει ο διαχειριστής στην

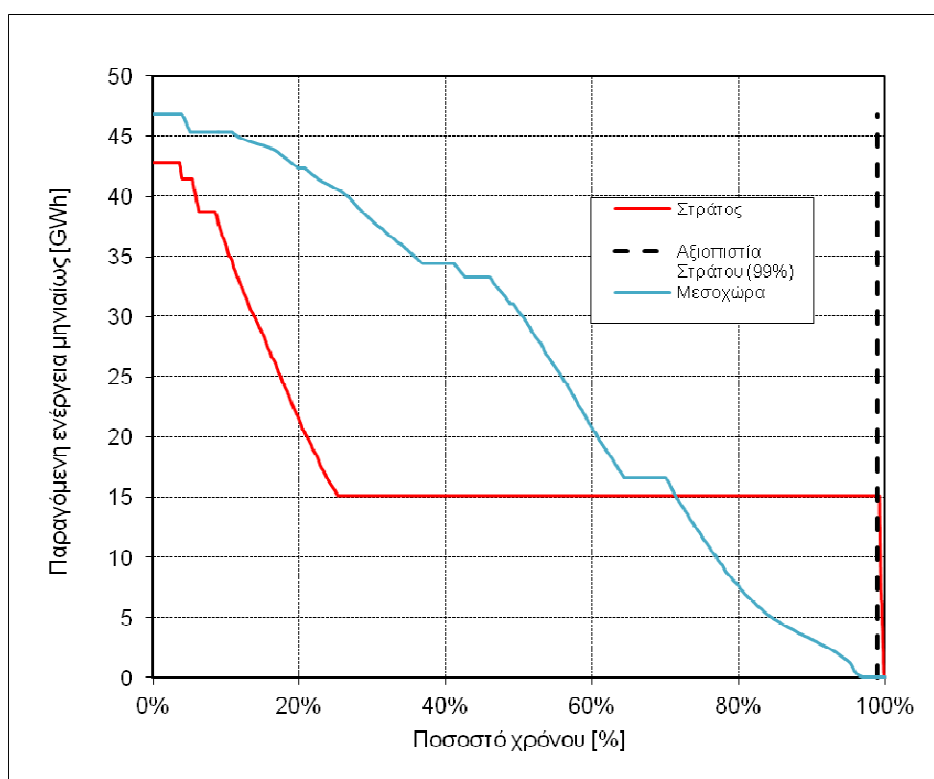
περίπτωση που δεν μπορεί να καλύψει το στόχο (ενεργειακό ή αρδευτικό) που εγγυήθηκε. Το μέγεθος αυτό εύλογα είναι πολλαπλάσιο του οφέλους που προκύπτει από την κάλυψη του στόχου. Για την ενεργειακή παραγωγή, έγινε η παραδοχή τετραπλάσιου κόστους ποινής (δηλαδή 0.18 €/kWh), ενώ για την κάλυψη των αρδευτικών ζητήσεων οι οποίες έχουν και άμεσο αντίκτυπο στην αγροτική παραγωγή έγινε η παραδοχή δεκαπλάσιου κόστους ποινής, ήτοι 0.60 €/m³.

6.9. Σύνοψη της μεθοδολογίας ανάλυσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων

Μετά την κατάστρωση των σεναρίων, ακολουθεί η ανάλυσή τους (προσομοίωση και βελτιστοποίηση) μέσω του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Η διαδικασία που εφαρμόζεται για κάθε εξεταζόμενο σενάριο συγκεντρωτικά είναι η ακόλουθη:

- i. Εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο σενάριο (χρονοσειρές απορροών, βροχών και εξατμίσεων στους ταμιευτήρες, καμπύλες ύψους πτώσης – παροχετευτικότητας και ύψος πτώσης – ειδικής ενέργειας σε στροβίλους και αντλίες, περιορισμοί ύδρευσης, άρδευσης και περιβαλλοντικής ροής).
- ii. Επιλογή των μεταβλητών ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης μέσα από το σύνολο παραμέτρων του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (λ.χ. επιλογή των ενεργειακών στόχων ως ομάδα μεταβλητών ελέγχου).
- iii. Εκτέλεση βελτιστοποίησης, με επιλογή των καταλλήλων μέτρων επίδοσης του συστήματος και χρήση της εξίσωσης (5.4). Τα μέτρα επίδοσης σχετίζονται με το όφελος από την εκπλήρωση των (ενεργειακών και αρδευτικών) στόχων ή την παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας (βλ. Κεφάλαιο 7). Σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτήθηκαν πολλαπλά μέτρα επίδοσης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί και η πιθανότητα αστοχίας του στόχου άρδευσης της Θεσσαλίας. Σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης, εκτελείται προσομοίωση στο μοντέλο προκειμένου να αποτιμηθούν τα μέτρα επίδοσης.
- iv. Μετά το πέρας της βελτιστοποίησης, καταγράφονται τα βέλτιστα μεγέθη που προέκυψαν (βέλτιστο μέτρο επίδοσης και μεταβλητές ελέγχου) και εκτελείται μία τελική προσομοίωση για να προκύψουν αναλυτικά τα μεγέθη απόκρισης του συστήματος, τα οποία είναι: (α.) οι χρονοσειρές παραγόμενης ενέργειας, (β.) το πλήρες υδατικό ισοζύγιο (εισροές, απολήψεις, υπερχειλίσεις), (γ.) στατιστικά στοιχεία για την αστοχία των περιορισμών και των στόχων και (δ.) καμπύλες αποθέματος ταμιευτήρων, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται παράμετροι b_i .
- v. Από τη χρονοσειρά παραγόμενης ενέργειας (για το σύστημα και για τα επιμέρους έργα) εξάγονται στατιστικοί δείκτες και οι καμπύλες διάρκειας ενέργειας. Στις καμπύλες διάρκειας ενέργειας, η παραγόμενη ενέργεια μηνιαίως δίνεται συναρτήσει

του χρονικού ποσοστού στο οποίο αυτή εμφανίζεται. Στον οριζόντιο άξονα αναγράφεται το ποσοστό του χρόνου t στο οποίο η παραγόμενη ενέργεια είναι τουλάχιστον ίση ή υπερβαίνει την τιμή E του οριζόντιου άξονα. Καμπύλες διάρκειας με χαρακτηριστικό πλατό (plateau) παραγωγής ενέργειας για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου είναι ενδεικτικές ομαλής ενεργειακής παραγωγής για το έργο ή για το σύστημα. Σε τέτοιες μορφές διαγραμμάτων, το ποσοστό του χρόνου στο οποίο σταθεροποιείται η παραγωγή ενέργειας είναι εξ' ορισμού η αξιοπιστία ενεργειακής παραγωγής του έργου. Ένα παράδειγμα καμπύλης διάρκειας όπως προέκυψε από τις επιλύσεις δίνεται στην Εικόνα 6-9. Σε αυτή διακρίνεται η ομαλή ενεργειακή παραγωγή του Στράτου (μαζί με το ποσοστό αξιοπιστίας της), σε αντιπαραβολή με την ενεργειακή παραγωγή της Μεσοχώρας η οποία δεν έχει σταθερή μορφή.



Εικόνα 6-9: Παράδειγμα καμπύλης διάρκειας που προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης για το σύστημα του κάτω Αχελώου (Σενάριο A1).

7. Ανάπτυξη των δυνατοτήτων διαχείρισης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στον Υδρονομέα

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη γενικών κριτηρίων βελτιστοποίησης στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ για τα υδροσυστήματα που έχουν ως κύριο στόχο την παραγωγή ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται ένα φάσμα σχετικών κριτηρίων και επιλέγονται οι καταλληλότερες για προσαρμογή στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και, εν τέλει, εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας. Οι συναρτήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση αποτελούν γενικά εργαλεία, εφαρμόσιμα σε κάθε περίπτωση υδροσυστημάτων όπου περιλαμβάνεται η υδροηλεκτρική παραγωγή. Επίσης, στο πλαίσιο της διερεύνησης, δοκιμάζεται η αποτελεσματικότητα διαφορετικών στρατηγικών παραμετροποίησης.

7.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Για την ορθή και αποτελεσματική χρήση του σκέλους της βελτιστοποίησης στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ απαιτείται ένα κατάλληλο φάσμα στοχικών συναρτήσεων (ή αλλιώς δεικτών επίδοσης), οι οποίες πρέπει να αποτελούν εύχρηστα διερευνητικά εργαλεία με στόχο την εύκολη λήψη αποφάσεων. Σύνθετες μορφές στοχικών συναρτήσεων μπορούν να αποδειχθούν πιο αποτελεσματικές για πιο δύσκολα προβλήματα, χάνουν όμως το χαρακτήρα της γενικότητας και το πρακτικό νόημα που αυτές πρέπει να έχουν στο διαχειριστή του συστήματος. Απαιτείται, επομένως, η ανάπτυξη σχέσεων που να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

1. απλοποιημένη κατά το δυνατόν μορφή, εύληπτη σε συνθήκες διαχειριστικών εφαρμογών που ξεφεύγουν από ερευνητικούς στόχους.
2. φυσική υπόσταση, ώστε να αντιπροσωπεύουν απτές έννοιες, δίχως να αποτελούν σύνθετες μαθηματικές εκφράσεις που μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές κατά περίπτωση αλλά στερούνται φυσικού νοήματος.
3. γενικότητα χρήσης, ώστε να είναι εφαρμόσιμες σε μεγάλο εύρος προβλημάτων χωρίς να απαιτείται τροποποίηση ή αλλαγή της δομής και των στοιχείων τους αναλόγως της φύσης του προβλήματος.

7.2. Ανάπτυξη συναρτήσεων ενέργειας

Όπως αναλύθηκε και στις παραγράφους 2.4 και 5.2.5, η στοχική συνάρτηση υπολογίζεται βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Στην περίπτωση της υδροηλεκτρικής παραγωγής, τα αποτελέσματα πάνω στα οποία βασίζεται η συνάρτηση είναι η χρονοσειρά

μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής $E_i(t)$ για κάθε στρόβιλο i του συστήματος. Η στοχαστική συνάρτηση τότε αποτελεί ένα μετασχηματισμό της μορφής:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \hat{T}(E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t)) \quad (7.1)$$

για τους n στρόβιλους του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε (βλ. παράγραφο 2.4), ένας από τους κύριους στόχους μελέτης υδροσυστημάτων είναι η ανάλυση διακινδύνευσης της ενεργειακής παραγωγής η οποία συνδέεται με την έννοια της αξιοπιστίας. Ορίζοντας επομένως ως $\hat{\alpha}$ τη σχέση υπολογισμού της αξιοπιστίας από μία δεδομένη χρονοσειρά (μέσω της σχέσης (2.12), αλλά και γενικότερα μέσω άλλων σχέσεων¹¹), μελετώνται οι στοχαστικές συναρτήσεις μορφής:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \hat{\alpha}(E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t)) \quad (7.2)$$

Σε επίπεδο καθαρής υδροηλεκτρικής παραγωγής αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν οι εξής συναρτήσεις:

1. Total Generated Firm Power (Συνολική παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια), η οποία ορίζεται ως η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το σύστημα για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας α^* . Σε αυτή την περίπτωση, η αξιοπιστία υπολογίζεται βάσει της χρονοσειράς συνολικής μηνιαίας παραγόμενης ενέργειας από το σύστημα, ως εξής: (α.) Αθροίζεται η παραγόμενη ενέργεια κάθε ΥΗΕ σε κάθε χρονικό βήμα και προκύπτει η συνολική χρονοσειρά και (β.) Υπολογίζεται η αξιοπιστία βάσει της συνολικής χρονοσειράς. Η συνάρτηση συνεπώς έχει τη μορφή:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \hat{\alpha}\left(\sum_{i=1}^n E_i(t)\right) \quad (7.3)$$

2. Sum of Generated Firm Power (Άθροισμα παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας), η οποία ορίζεται ως το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να αποδώσει κάθε έργο με αξιοπιστία α^* . Εκτιμάται με τα εξής βήματα: (α.) υπολογισμός της πρωτεύουσας ενέργειας που δίνει κάθε έργο από την αντίστοιχη χρονοσειρά επιμέρους παραγόμενης ενέργειας, (β.) υπολογισμός του αθροίσματος των επιμέρους πρωτευουσών ενεργειών. Στη συνάρτηση αυτή δε χρησιμοποιείται η συνολική παραγόμενη μηνιαία ενέργεια του συστήματος:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^n \hat{\alpha}(E_i(t)) \quad (7.4)$$

¹¹ Ενδεικτικά αναφέρεται η ογκομετρική έκφραση της αξιοπιστίας, η οποία ισούται με το λόγο της αναμενόμενης τιμής της πραγματικής απόληψης προς τη ζήτηση στην ίδια περίοδο μελέτης. Εμπειρικά υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των πραγματικών απολήψεων στο συνολικό αριθμό των ετήσιων περιόδων προσομοίωσης (Κουτσογιάννης, 2000).

Και στις δύο περιπτώσεις η δεδομένη αξιοπιστία α^* αποτελεί όρισμα του χρήστη και εισάγεται μέσω της επιλογής Options (καρτέλα Energy) στο μενού επιλογών. Οι συναρτήσεις αυτές τίθενται προς μεγιστοποίηση¹² στο σκέλος της βελτιστοποίησης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και δίνουν τιμές πρωτεύουσας ενέργειας χαρακτηριστικές του συστήματος.

7.3. Ανάπτυξη γενικών συναρτήσεων κόστους-οφέλους

Οι προηγούμενες συναρτήσεις είναι επαρκείς στην περίπτωση που ενδιαφέρει πρωτίστως η ενεργειακή παραγωγή, με συνέπεια να μπορούν όλοι οι υπόλοιποι στόχοι (αρδευτικές ζητήσεις, αντιπλημμυρική προστασία κ.α.) να εισαχθούν ως απλές περιοριστικές συνθήκες. Ωστόσο, υπάρχουν προβλήματα στα οποία η ενεργειακή παραγωγή συνδυάζεται με άλλες εξίσου σημαντικές χρήσεις, όπως στην περίπτωση του σεναρίου εκτροπής, όπου απαιτείται, εκτός της μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής, η βέλτιστη δυνατή κάλυψη των άλλων ζητήσεων (λ.χ. άρδευση). Οι υπόλοιπες χρήσεις τότε συνιστούν πρόσθετα κριτήρια βελτιστοποίησης και δεν μπορούν να τεθούν ως δεδομένα μεγέθη.

Ένα τέτοιο πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά αν σε κάθε κατηγορία στόχου (υδρευτική ή αρδευτική ζήτηση, ενεργειακή παραγωγή, περιβαλλοντική ροή) αντιστοιχισθεί ένα οικονομικό όφελος που αποδίδεται στο σύστημα από την εκπλήρωσή του. Δημιουργείται έτσι μία συνολική συνάρτηση του οφέλους από κάθε στόχο i :

$$P_i = c_i^B \cdot S_i + c_i^E \cdot (D_i - S_i) - c_i^D \cdot (S_i - D_i) \quad (7.5)$$

όπου S_i ο σταθερός χρονικά στόχος που τίθεται, D_i η ποσότητα που τον καλύπτει (και η οποία προκύπτει βάσει της προσομοίωσης) και c^B, c^E, c^D το μοναδιαίο βασικό όφελος (Basic Profit), πρόσθετο όφελος (Excess Profit) και κόστος ποινής από τη μη-κάλυψη του στόχου (Deficit) αντίστοιχα. Στη σχέση (7.5) ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στο βασικό όφελος που παράγεται από την κάλυψη του στόχου, ο δεύτερος όρος αποτελεί το πρόσθετο όφελος που δίνει το πλεόνασμα της παραγόμενης ποσότητας ($D_i - S_i$) όταν η παραγωγή ξεπεράσει τις απαιτήσεις του στόχου και ο τρίτος όρος αποτελεί τη ρήτρα αδυναμίας κάλυψης του στόχου, που είναι ανάλογη του ελλείμματος ($S_i - D_i$) που παράγεται όταν δεν μπορεί να καλυφθεί ο στόχος S_i από την παραγόμενη ποσότητα D_i . Προφανώς οι δύο τελευταίοι όροι ενεργοποιούνται μόνο στην περίπτωση πλεονάσματος και ελλείμματος αντίστοιχα, όπου οι αντίστοιχες ποσότητες είναι θετικές, άρα η σχέση λαμβάνει τη μορφή:

¹² Ακριβέστερα, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ ταυτίζει θετικές τιμές με κόστη (π.χ. οικονομικό κόστος, κόστος ενέργειας) και αρνητικές τιμές με ενεργειακά ή οικονομικά οφέλη, ώστε να προκύπτει πάντα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της στοχικής συνάρτησης. Κατά συνέπεια το μέτρο επίδοσης ενεργειακού οφέλους όπως η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια είναι αρνητικό και οι συναρτήσεις τίθενται προς ελαχιστοποίηση.

$$P_i = c_i^B \cdot S_i + c_i^E \cdot \max\{(D_i - S_i), 0\} - c_i^D \cdot \max\{(S_i - D_i), 0\} \quad (7.6)$$

Η σχέση (7.6) εφαρμόζεται για κάθε στόχο i και κάθε χρονικό βήμα t (ο δείκτης t παραλείφθηκε για λόγους απλοποίησης της παρουσίασης), οπότε προκύπτει το όφελος ανά στόχο και ανά χρονικό βήμα P_i^t . Το συνολικό μηνιαίο όφελος για τους m στόχους είναι:

$$P_{tot}^t = \sum_{i=1}^m P_i^t \quad (7.7)$$

, ενώ το ετήσιο όφελος είναι:

$$P_{tot}^{year} = \sum_{t=1}^{12} P_{tot}^t = \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^m P_i^t \quad (7.8)$$

Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η χρονοσειρά ετήσιου οφέλους για το σύνολο των στόχων $P_{tot}^{year}(t)$, όπου το χρονικό βήμα t πλέον είναι ετήσιο και αναφέρεται στο πλήθος των ετών προσομοίωσης. Το τελικό μέτρο επίδοσης είναι η μέση τιμή αυτού του μεγέθους:

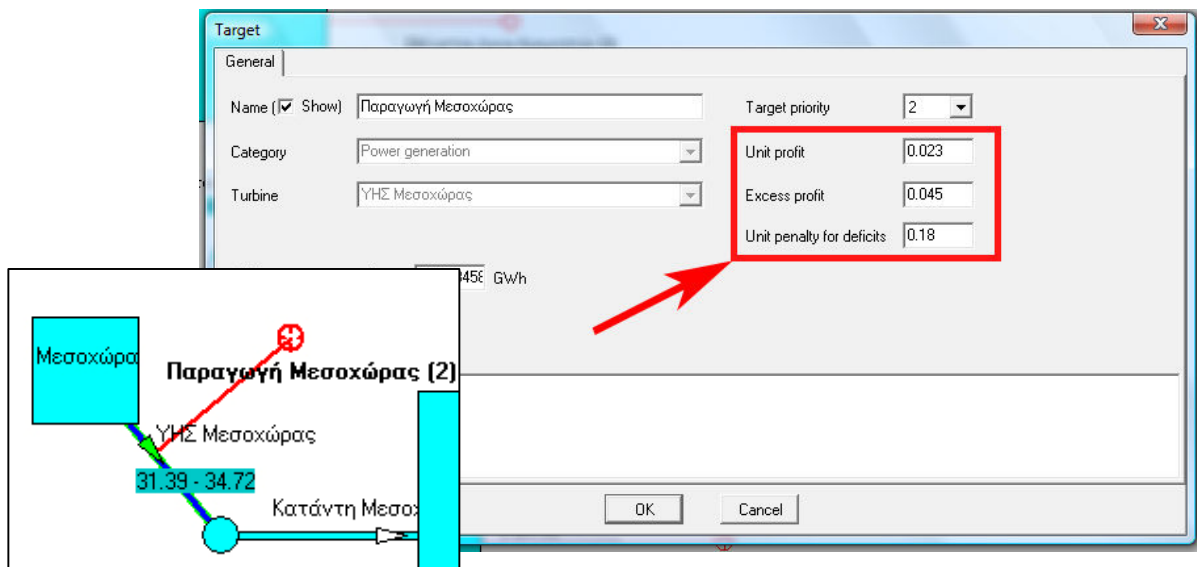
$$J(\theta) = E\{P_{tot}^{year}(t)\} \quad (7.9)$$

Η στοχική αυτή συνάρτηση ονομάστηκε Total Benefit for Fulfilling Targets (Συνολικό όφελος από εκπλήρωση στόχων) και ποσοτικοποιεί το μέσο ετήσιο όφελος από την κάλυψη των ζητήσεων κάθε στόχου.

Σημειώνεται ότι οι στόχοι S_i μπορεί να αποτελούν μεταβλητές ελέγχου οπότε αλλάζουν κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, διερευνώντας έτσι τις δυνατότητες αξιοποίησης του υδροσυστήματος, ή μπορεί να παραμένουν σταθεροί και ανεξάρτητοι της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οπότε το σύστημα προσαρμόζει την παραγόμενη ποσότητα D_i για την βέλτιστη κάλυψη της συγκεκριμένης ζήτησης. Είναι φανερό ότι η φύση της συνάρτησης είναι γενική και μπορεί να συμπεριλάβει ποικίλες ζητήσεις νερού, εφ' όσον σε κάθε κατηγορία στόχων αποτυπωθεί και ένα όφελος ή/και κόστος ποινής από τη μη εκπλήρωσή του. Η ορθή αποτίμηση των τιμών κόστους και οφέλους κάθε διαφορετικής κατηγορίας στόχου (ύδρευση, άρδευση, περιβαλλοντική ροή, ενεργειακή παραγωγή) είναι μία διαδικασία που προϋποθέτει εξειδικευμένες οικονομικές μελέτες, ωστόσο είναι δυνατή και επιθυμητή σε επιχειρησιακό επίπεδο.

Τα μοναδιαία οφέλη και κόστη c^B, c^E, c^D εξ' ορισμού μπορεί να είναι διαφορετικά σε κάθε στόχο, αλλά συνήθως έχουν ίδιες τιμές για την ίδια ομάδα στόχων (όπως την υδροηλεκτρική παραγωγή). Για την εισαγωγή τους από το χρήστη στο λογισμικό αναπτύχθηκε ξεχωριστή φόρμα εισαγωγής στο παράθυρο των ιδιοτήτων κάθε στόχου (Εικόνα 7-1). Η πρακτική τους υπόσταση είναι εμφανής: το c^B αντιπροσωπεύει το βασικό κέρδος από την κάλυψη της ζήτησης, το c^E αντιπροσωπεύει πρόσθετα οφέλη (αν υπάρχουν) από πλεονάσματα προσφοράς

νερού ενώ το c^D είναι το κόστος (αποζημιώσεις, ισοδύναμα μέτρα κ.α.) που καλείται να πληρώσει ο διαχειριστής προς τους καταναλωτές στην περίπτωση που δεν μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη ποσότητα.



Εικόνα 7-1: Το παράθυρο ιδιοτήτων της ενεργειακής παραγωγής από το ΥΗΕ κατάντη της Μεσοχώρας, όπου διακρίνονται τα ορίσματα που δίνει ο χρήστης για το βασικό όφελος (Unit Profit), το πρόσθετο όφελος (Excess Profit) και την ποινή για μη-εκπλήρωση του στόχου (Unit Penalty for Deficits) αντίστοιχα. Αντίστοιχες τιμές υπάρχουν σε κάθε στόχο, όλων των κατηγοριών.

Πολλές φορές στη διαχείριση σύνθετων υδροσυστημάτων υπεισέρχονται οικονομικά μεγέθη τα οποία δε σχετίζονται με χωριστούς στόχους αλλά με ομάδες έργων, όπως αντλιοστάσια, στρόβιλοι κ.ο.κ. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε ακόμα μία συνάρτηση γενικότερης μορφής η οποία ονομάστηκε Total Cost/Benefit of the System (Συνολικό κόστος/όφελος του συστήματος) και λαμβάνει υπόψη τα κόστη και οφέλη όλων των ομάδων που θεωρεί ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, όπως:

1. Το συνολικό κόστος των αντλιοστασίων (Pumping Cost)
2. Το συνολικό όφελος από τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων (Energy Benefit)
3. Το συνολικό όφελος από την εκπλήρωση των στόχων (Target Benefit)

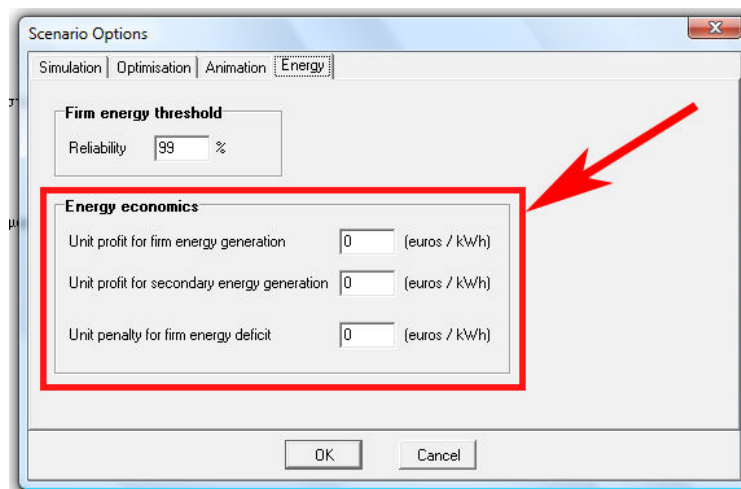
Οι ομάδες αυτές επιτρέπουν την ομαδοποίηση των οικονομικών μεγεθών, αλλά και την προσαρμογή πιο σύνθετων οικονομικών πολιτικών ανά κατηγορία, όπως στην περίπτωση του υδροσυστήματος των Αθηνών (Efstratiadis, Koutsoyiannis και Xenos 2004). Κατά συνέπεια, η στοχική αυτή συνάρτηση αποτελεί γενίκευση της συνάρτησης Total Benefit for Fulfilling Targets, προσθέτοντας τις μέσες ετήσιες τιμές κόστους και οφέλους των επιμέρους δραστηριοτήτων:

$$J(\theta) = E\{P_{target.benefit}^{year}(t)\} + E\{P_{pump.cost}^{year}(t)\} + E\{P_{energy.benefit}^{year}(t)\} \quad (7.10)$$

όπου πλέον οι στόχοι ομαδοποιούνται και το κόστος/όφελος ανά ομάδα n κοινών στόχων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_i = c_i^B \cdot \sum_{i=1}^n S_i + c_i^E \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n D_i - \sum_{i=1}^n S_i\right), 0\right\} - c_i^D \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n D_i\right), 0\right\} \quad (7.11)$$

Σε αυτή την περίπτωση, οι οικονομικές μονάδες της υδροηλεκτρικής παραγωγής δεν τίθενται ανά στόχο στροβίλου αλλά εισάγονται κεντρικά στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (Εικόνα 7-2). Κατόπιν υπολογίζεται το όφελος από την ενεργειακή παραγωγή για το σύνολο της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος.



Εικόνα 7-2: Για τη συνάρτηση Total Cost/Benefit of the System, οι οικονομικές παράμετροι της υδροηλεκτρικής παραγωγής εισάγονται στο σύστημα μέσω των κεντρικών επιλογών του σεναρίου (Επιλογές Options, καρτέλα Energy). Οι αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής δεδομένων φαίνονται κάτω από τη φόρμα εισαγωγής της αξιοπιστίας.

Προφανώς, εφ' όσον τεθούν κεντρικά οι τιμές υδροηλεκτρικής παραγωγής, δεν πρέπει να εισαχθούν τιμές και στους αντίστοιχους ενεργειακούς στόχους, καθώς αυτές προστίθενται. Η προσθήκη του όρου οφέλους από τους στόχους $E\{P_{t \text{ arg et .benefit}}^{year}(t)\}$ γίνεται για να συμπεριληφθούν κατηγορίες στόχων εκτός της άντλησης και της υδροηλεκτρικής παραγωγής, όπως αρδευτικοί στόχοι.

Σημειώνεται ότι λογική αναγωγής των ζητήσεων σε κόστος και όφελος έχει αναπτυχθεί και σε άλλα προγράμματα διαχείρισης υδροσυστημάτων (λ.χ. AQUARIUS, Diaz,, Brown, and Sveinsson 2000), καθώς και σε πληθώρα εργασιών. Σε ορισμένες από αυτές η συνάρτηση εμφανίζεται συνδεδεμένη με την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα ενέργεια (Κουτσογιάννης, 1996, Koutsoyiannis and Economou 2003). Στην παρούσα εργασία, οι έννοιες του βασικού και πρόσθετου οφέλους από την κάλυψη του στόχου υποδεικνύουν μία παρόμοια διάκριση σε «βασική» και «επιπλέον» ενέργεια για τους ενεργειακούς στόχους, όμοια με αυτή της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, δεν αποτελούν όμως ταυτόσημες έννοιες καθώς δεν τίθενται πιθανοτικά.

Το προαναφερθέν ζεύγος συναρτήσεων κόστους-οφέλους αποτελεί συμπλήρωμα που γενικεύει την ενεργειακή παραγωγή ως ένα από τα πολλά κριτήρια βελτιστοποίησης, ενώ δίνει το μέσο ετήσιο όφελος από τη λειτουργία του υδροσυστήματος, το οποίο αποτελεί σαφώς πιο εύληπτη έννοια για τα ενδιαφερόμενα μέρη¹³ από τον πιθανοτικό ορισμό της πρωτεύουσας ενέργειας.

7.4. Αποτελέσματα διερεύνησης συναρτήσεων

Για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας των στοχικών συναρτήσεων επιλέχθηκε τελικά το Σενάριο A2 (σενάριο Μεσοχώρας), ως παράδειγμα απλής τοπολογίας με δυνατότητα άμεσης εποπτείας των αποτελεσμάτων αλλά και με αρκούντως μεγάλο πλήθος ταμιευτήρων.

Η αρχική διερεύνηση γίνεται βάσει μίας φειδωλής παραμετροποίησης, που περιλαμβάνει ένα ενεργειακό στόχο σε κάθε στρόβιλο. Το πλήθος, συνεπώς, των παραμέτρων θ για το σενάριο της Μεσοχώρας είναι $n=4$, όσο και των στροβίλων του συστήματος. Αυτός ο τύπος παραμετροποίησης είναι επαρκής και δεν οδηγεί σε σφάλμα της γενικότητας της διερευνητικής διαδικασίας, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

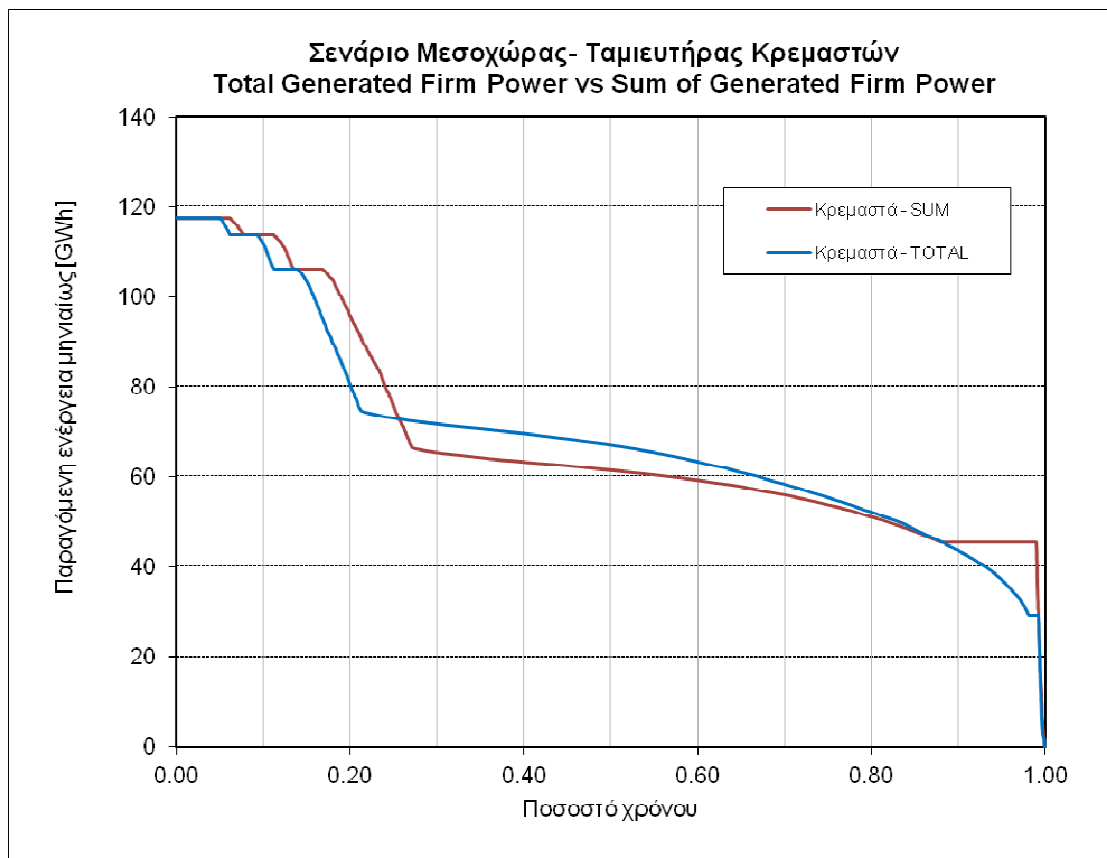
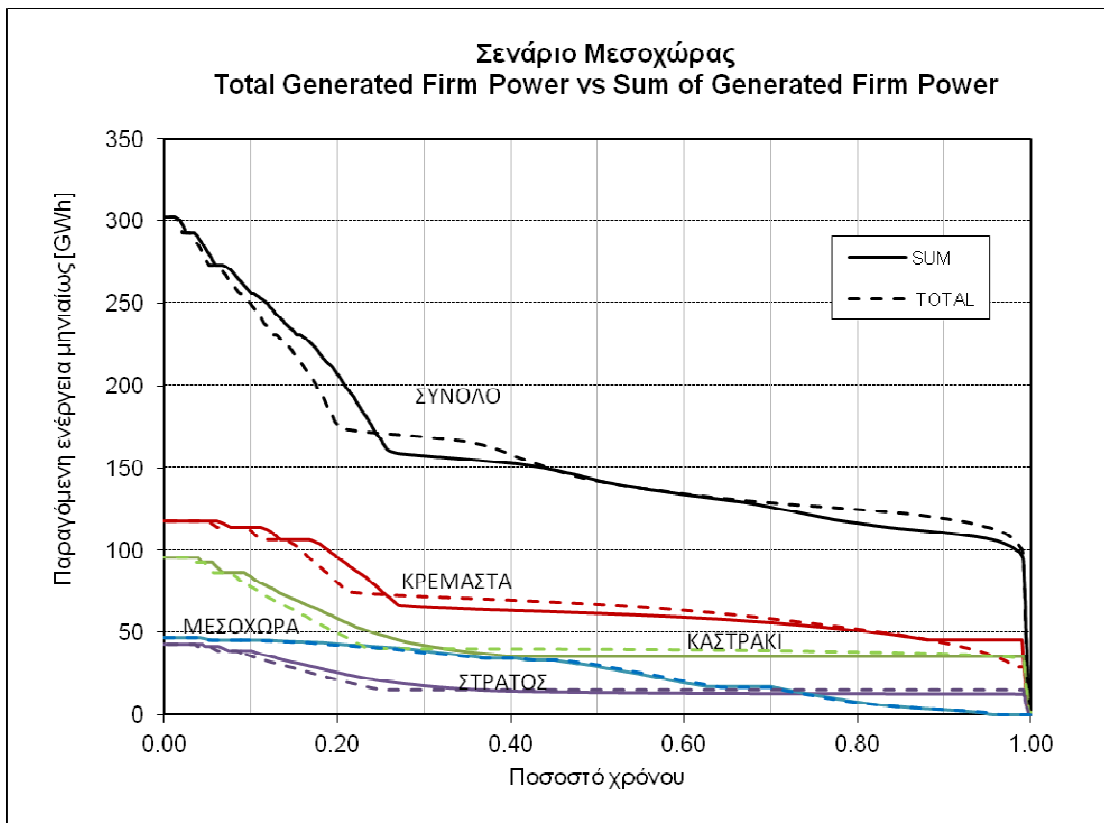
7.4.1. *Total Generated Firm Power / Sum of Generated Firm Power*

Ο διαφορετικός ορισμός των δύο συναρτήσεων υδροηλεκτρικής παραγωγής αντανακλά δύο διαφορετικές προσεγγίσεις μεγιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής: η Total Generated Firm Power δίνει έμφαση στη συνολική λειτουργία του συστήματος ενώ η Sum of Generated Firm Power μεγιστοποιεί την παραγωγή κάθε επιμέρους έργου. Κατά συνέπεια, η πρώτη βρίσκει εφαρμογή στην περίπτωση ενιαίου διαχειριστή του συστήματος, ενώ η δεύτερη μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις ανεξάρτητης διαχείρισης κάθε έργου, όπως λ.χ. σε ταμιευτήρες που ανήκουν σε διαφορετικές χώρες κατά μήκος ενός ποταμού ή σε περιπτώσεις πολλών υδροηλεκτρικών έργων με διαφορετικούς διαχειριστές. Το τελευταίο σενάριο εμφανίζεται συχνά και στον ελληνικό χώρο, μιας και τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται ένα καθεστώς πολυδιάσπασης της κυριότητας των φραγμάτων μεταξύ της Δ.Ε.Η., του Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε., δημοτικών οργανισμών αλλά και ιδιωτών, ιδίως στα μικρότερα έργα.

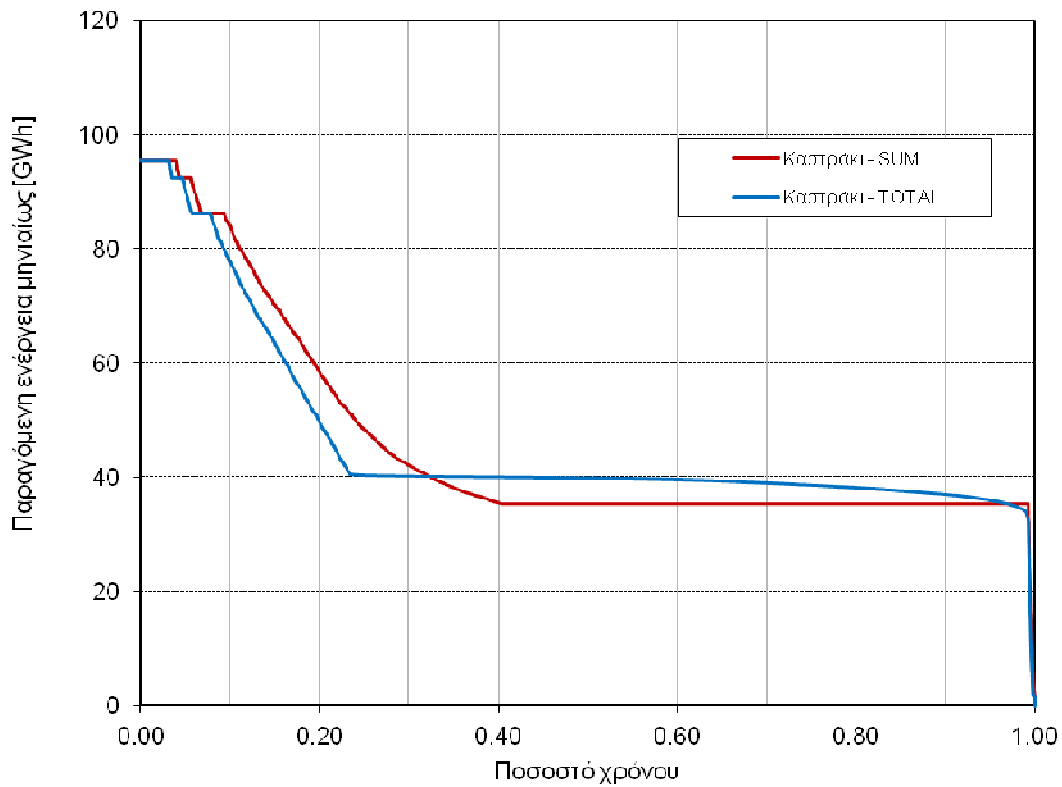
Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο συναρτήσεων, πραγματοποιούνται δύο βελτιστοποιήσεις 1000 επαναλήψεων με αξιοπιστία $\alpha^* = 99\%$. Η ομάδα παραμέτρων είναι οι ενεργειακοί στόχοι στους στροβίλους. Τα αποτελέσματα δίνονται

¹³ Ο όρος 'ενδιαφερόμενα μέρη' συνιστά μετάφραση του αγγλικού όρου 'stakeholders', και σημαίνει το σύνολο των ατόμων, οργανισμών και γενικά ομάδων πίεσης των οποίων τα συμφέροντα σχετίζονται άμεσα με το έργο (π.χ. καταναλωτές, επενδυτές κ.α.).

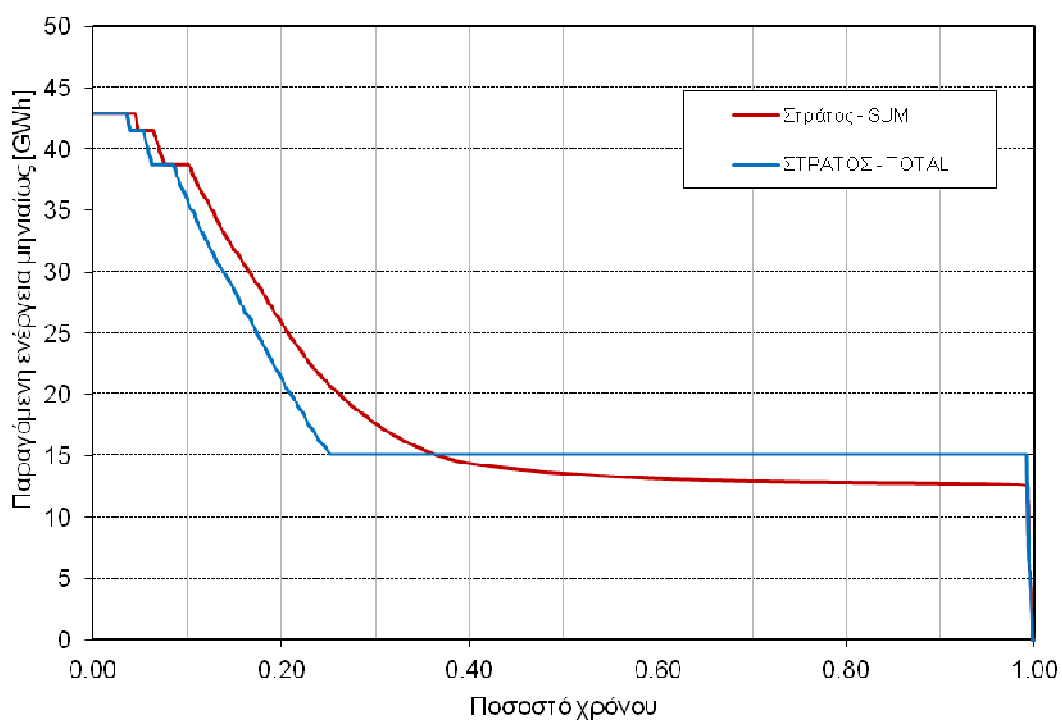
με τη μορφή καμπυλών διαρκείας για την μηνιαία παραγόμενη ενέργεια και φαίνονται στις σελίδες που ακολουθούν.

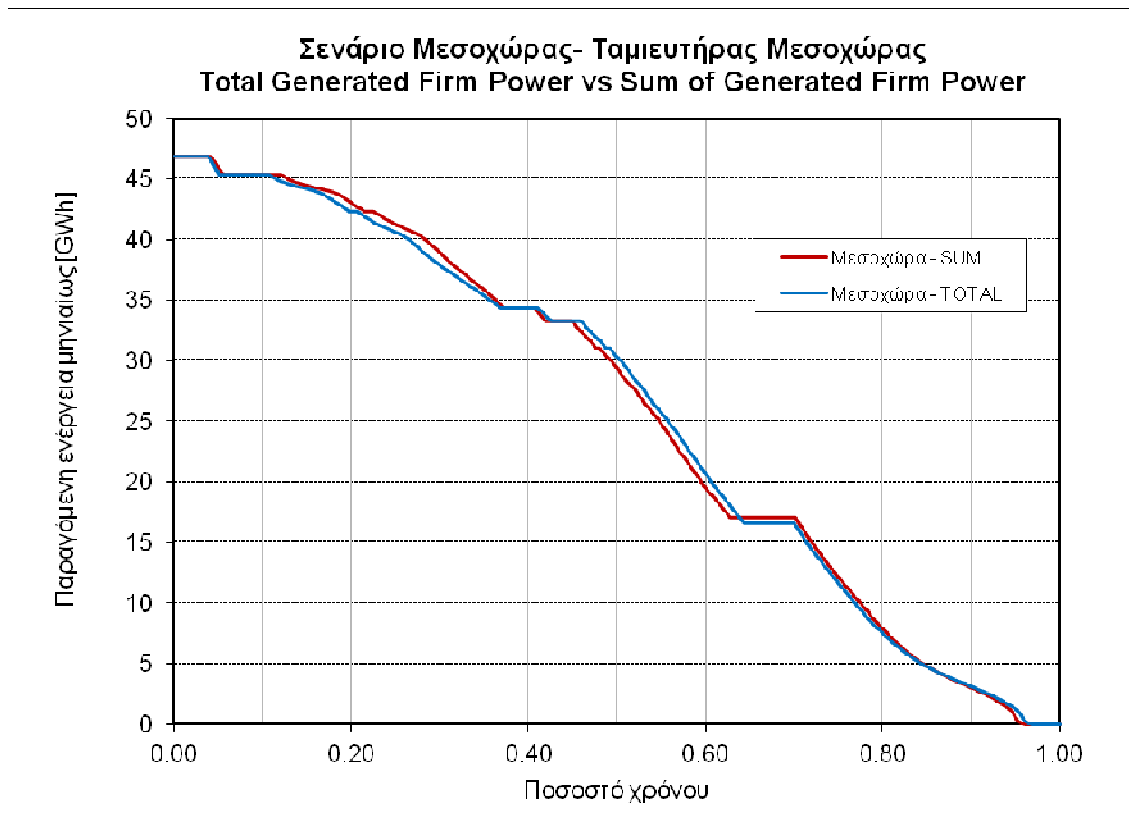


Σενάριο Μεσοχώρας- Ταμιευτήρας Καστρακίου
 Total Generated Firm Power vs Sum of Generated Firm Power



Σενάριο Μεσοχώρας- Ταμιευτήρας Στράτου
 Total Generated Firm Power vs Sum of Generated Firm Power



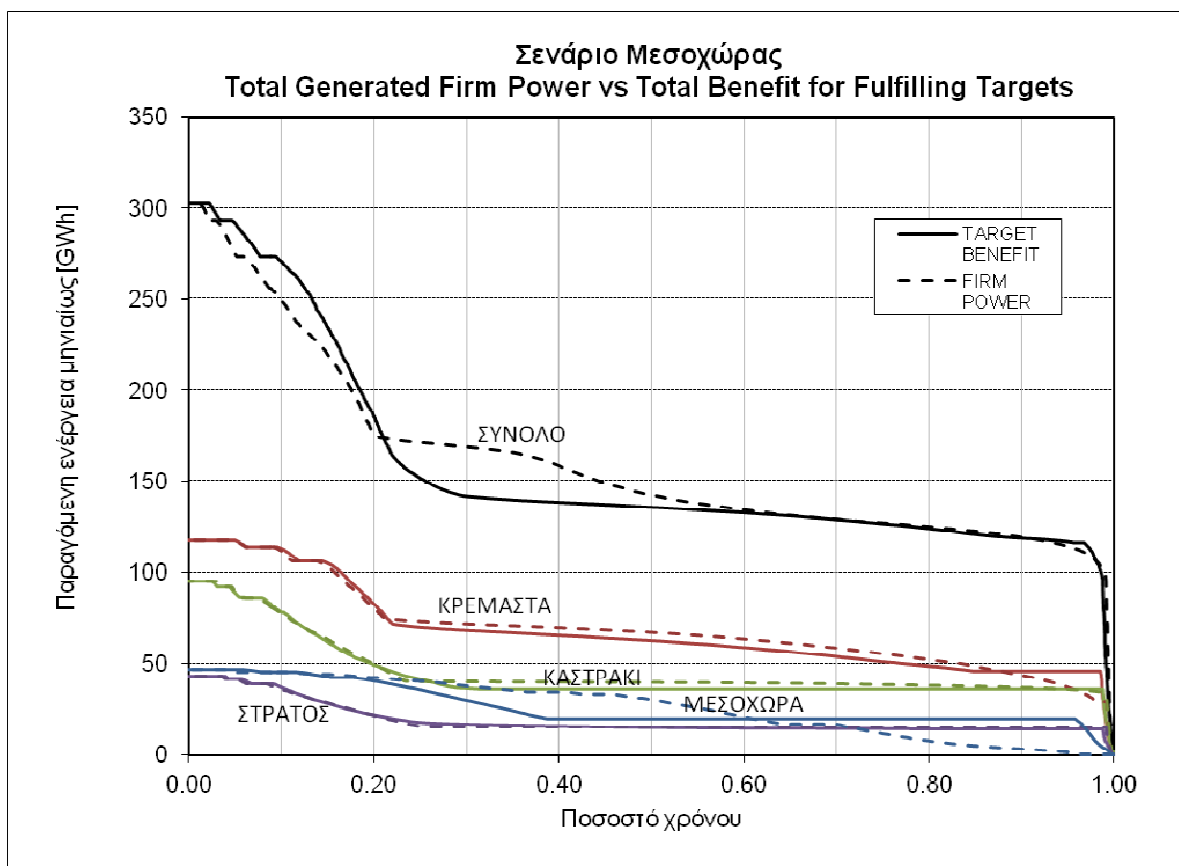


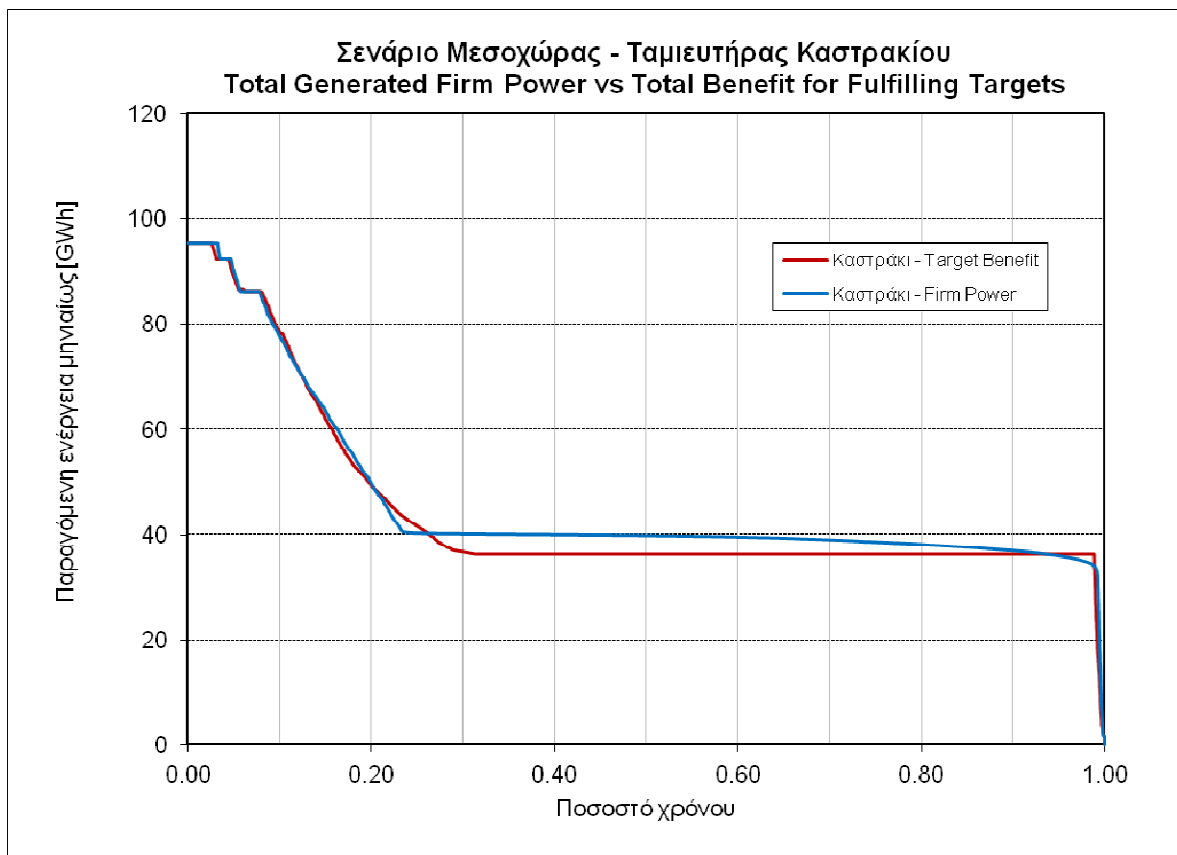
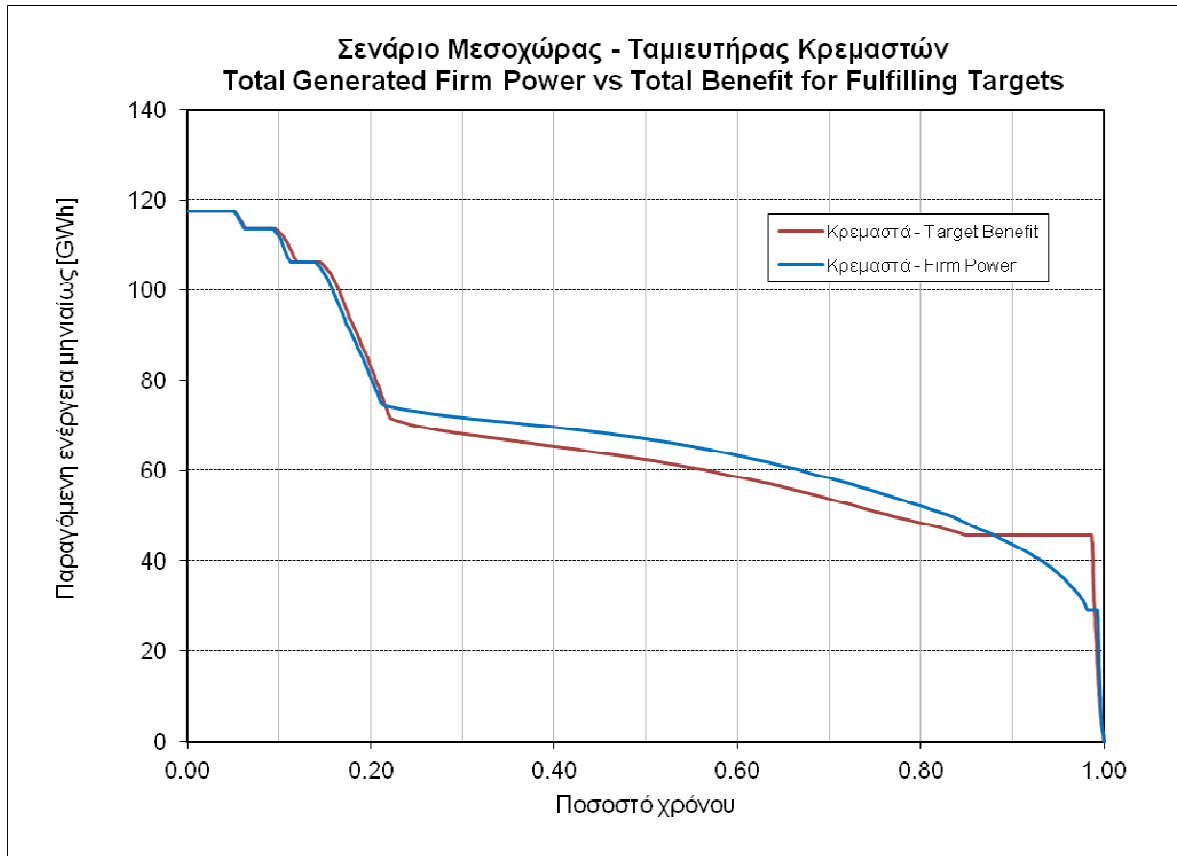
Παρατηρείται ότι η συνάρτηση Total Generated Firm Power οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, που άλλωστε έχουν πρακτική χρησιμότητα, εμφανίζοντας παράλληλα υψηλότερη πρωτεύουσα ενέργεια. Η συνάρτηση Sum of Generated Firm Power οδηγεί σε υψηλότερη πρωτεύουσα ενέργεια για τα επιμέρους έργα (με την εξαίρεση του ταμιευτήρα Στράτου, ο οποίος είναι σαφώς μικρότερης δυναμικότητας), οδηγώντας όμως σε ελαφρώς χειρότερη λύση για το σύνολο του συστήματος. Επ' αυτού μπορεί να σχολιασθεί η ένδειξη ότι η πολυδιάσπαση της διαχείρισης στο χώρο της υδροηλεκτρικής παραγωγής και η κατάτμηση της παραγωγής ενέργειας από μία συνολική προσέγγιση σε επιμέρους παραγωγή ανά έργο δεν αξιοποιεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο τη δυναμικότητα του συστήματος.

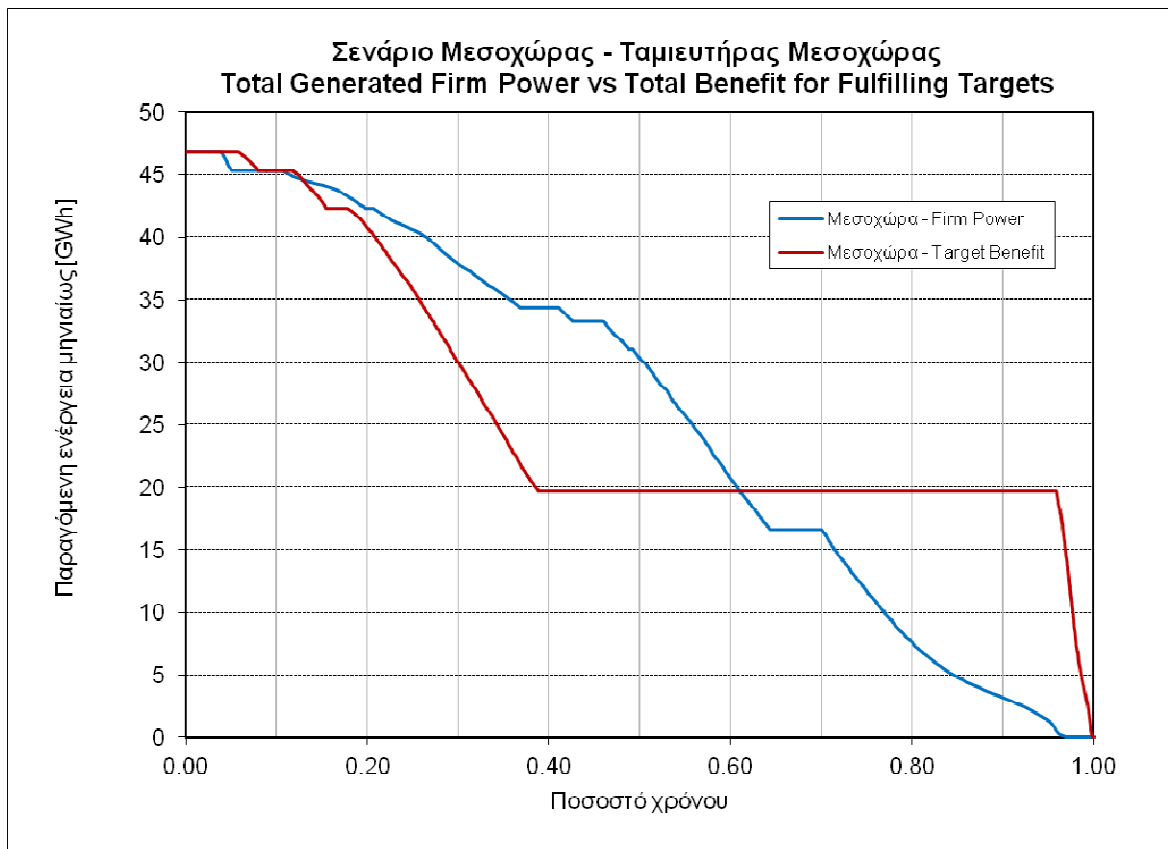
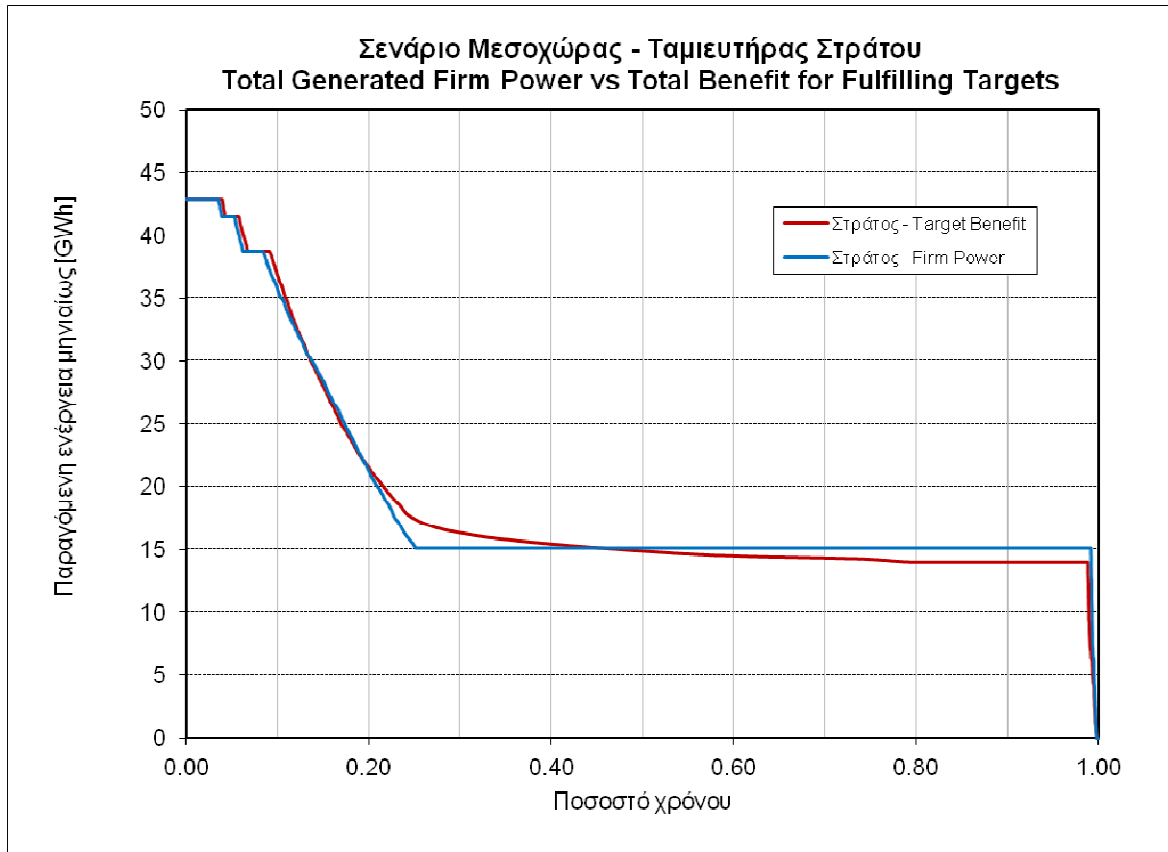
Επίσης παρατηρείται ότι η λειτουργία του ταμιευτήρα Μεσοχώρας και στις δύο περιπτώσεις δεν αποκτάει μορφή σταθερής υδροηλεκτρικής παραγωγής (με πλατό (plateau) λειτουργίας για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου), αδυνατώντας να λειτουργήσει με αξιοπιστία 99%. Τελικώς, στην περίπτωση του Αχελώου θα εφαρμοσθεί η συνάρτηση Total Generated Firm Power, μιας και ενδιαφέρει η διαχείριση του συνόλου του συστήματος.

7.4.2. Total Generated Firm Power / Total Benefit for Fulfilling Targets

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της απόδοσης των συναρτήσεων κόστους/οφέλους σε σχέση με την ενεργειακή παραγωγή. Παρ' ότι οι συναρτήσεις δεν έχουν τεθεί σε πιθανοτική βάση, η προσομοίωση του συστήματος από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και η εξαγωγή των χρονοσειρών παραγόμενης ενέργειας επιτρέπει την ανάλυση διακινδύνευσης της ενεργειακής παραγωγής. Στα πλαίσια της διερεύνησης μελετάται η συνάρτηση Total Benefit for Fulfilling Targets, με μοναδιαίες τιμές οφέλους ενεργειακών στόχων: 0.045 (Βασικό όφελος), 0.023 (Όφελος Πλεονάσματος), 0.18 (Ποινή μη εκπλήρωσης του στόχου). Η αιτιολόγηση για αυτές τις τιμές δίνεται στην παράγραφο 6.8. Εκτελείται βελτιστοποίηση της συνάρτησης για 1000 επαναλήψεις με παραμέτρους τους ενεργειακούς στόχους στους στροβίλους και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μαζί με αυτά της συνάρτησης Total Generated Firm Power για λόγους σύγκρισης.







Σε αυτό το σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ο επιχειρησιακός χαρακτήρας της παραπάνω στοχικής συνάρτησης Total Benefit for Fulfilling Targets και η διαφορά του από την αντίστοιχη συνάρτηση ενέργειας Total Generated Firm Power. Σε σχέση με τη συνάρτηση ενέργειας που προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την ενεργειακή παραγωγή βάσει δεδομένης αξιοπιστίας, η συνάρτηση κόστους/οφέλους ψάχνει να βρει τη λύση που θα δώσει το μέγιστο κέρδος βάσει της αναλογίας βασικού κέρδους προς το πρόσθετο κέρδος πλεονάσματος και της αναλογίας βασικού κέρδους προς την ποινή ελλείμματος. Επομένως, οι στόχοι σε αυτή την περίπτωση δεν τίθενται πιθανοτικά (όπως π.χ. οι στόχοι παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας) αλλά αντιπροσωπεύουν τις σταθερές μηνιαίες ποσότητες που μπορεί να αποδώσει κάθε έργο (λ.χ. στρόβιλος), ώστε να αποδοθεί το μέγιστο δυνατό κέρδος, πάντα βάσει των δεδομένων αναλογιών. Οποιαδήποτε ποσότητα αποδοθεί πέραν αυτού του στόχου έχει πρόσθετο (δευτερεύον) όφελος, ενώ οποιαδήποτε αδυναμία κάλυψης του στόχου σε κάποιο χρονικό βήμα ενέχει οικονομική ζημία. Η στοχική συνάρτηση που προκύπτει είναι το αντίστοιχο όφελος που αποδίδει το σύστημα για το σύνολο των στόχων.

Υπό αυτή τη λογική, η στοχική συνάρτηση κόστους/οφέλους προσφέρει μια διαφορετική επιχειρησιακή λογική από την αξιοπιστία. Απαντάει στα διαχειριστικά ερωτήματα «ποια είναι η μέγιστη, σταθερή ποσότητα νερού που μπορεί να δώσει το έργο, ώστε να μεγιστοποιηθεί το αντίστοιχο κέρδος; Και ποιο το κέρδος αυτό;». Το ερώτημα αυτό δεν τίθεται πιθανοτικά, σε αντίθεση με το ερώτημα «ποια είναι η μέγιστη, σταθερή ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παράγει το έργο στο 99% του χρόνου λειτουργίας του;», που καλύπτεται από τις συναρτήσεις ενέργειας. Εν γένει, η πρώτη ερώτηση είναι πιο εύληπτη σε διαχειριστικό επίπεδο, αφού τα αποτελέσματα δεν συναρτώνται με ανάλυση διακινδύνευσης αλλά δίνονται μόνο συναρτήσει οικονομικών παραμέτρων, όπως η ικανότητα πληρωμής της οικονομικής ζημίας από τη μη κάλυψη του στόχου.

Ωστόσο η λειτουργία αυτής της συνάρτησης κρύβει μέσα της την έννοια της αξιοπιστίας. Στις περιπτώσεις που το πρωτεύον κέρδος είναι σημαντικά μεγαλύτερο, η έννοια της «σταθερής ποσότητας νερού που αποδίδει το έργο» προϋποθέτει τη σταθερότητα απόδοσής της στο χρόνο, ώστε αυτό το κέρδος να αποδίδεται αδιάκοπα. Από την ανάλυση διακινδύνευσης της ενεργειακής παραγωγής για τη συνάρτηση κόστους/οφέλους πράγματι βλέπουμε ότι δημιουργείται μία τέτοια εικόνα σταθερής παραγωγής ενέργειας, ταυτόσημη με την εικόνα που δίνει η συνάρτηση ενέργειας, αλλά με διαφορετική, μη προκαθορισμένη αξιοπιστία. Παρ' ότι λοιπόν η συνάρτηση δεν ορίστηκε πιθανοτικά, παρατηρείται ότι η βελτιστοποίηση οδηγεί στην εύρεση μίας «χαρακτηριστικής αξιοπιστίας» α^*_{xi} , διαφορετικής για κάθε επιμέρους έργο i αλλά και για το σύστημα, η οποία αντανάκλα την προσφορότερη εικόνα σταθερής παραγωγής ενέργειας. Η αξιοπιστία αυτή εξαρτάται από τα ορίσματα της

στοχικής συνάρτησης κόστους/οφέλους, δηλαδή την αναλογία βασικού οφέλους προς πλεονασματικό όφελος και βασικού οφέλους προς ποινή ελλείμματος:

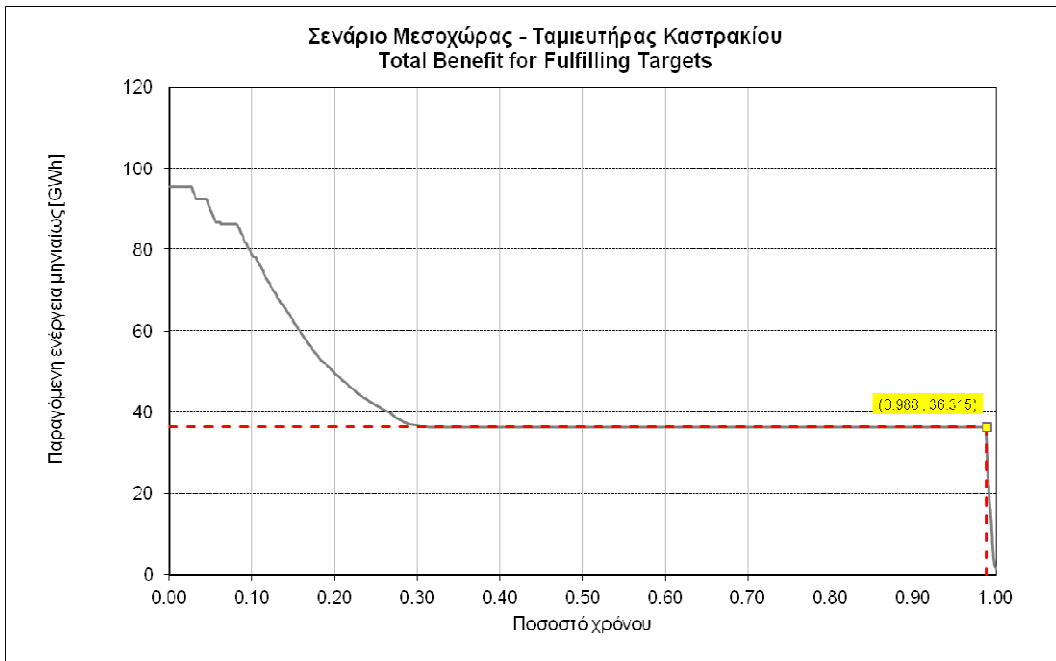
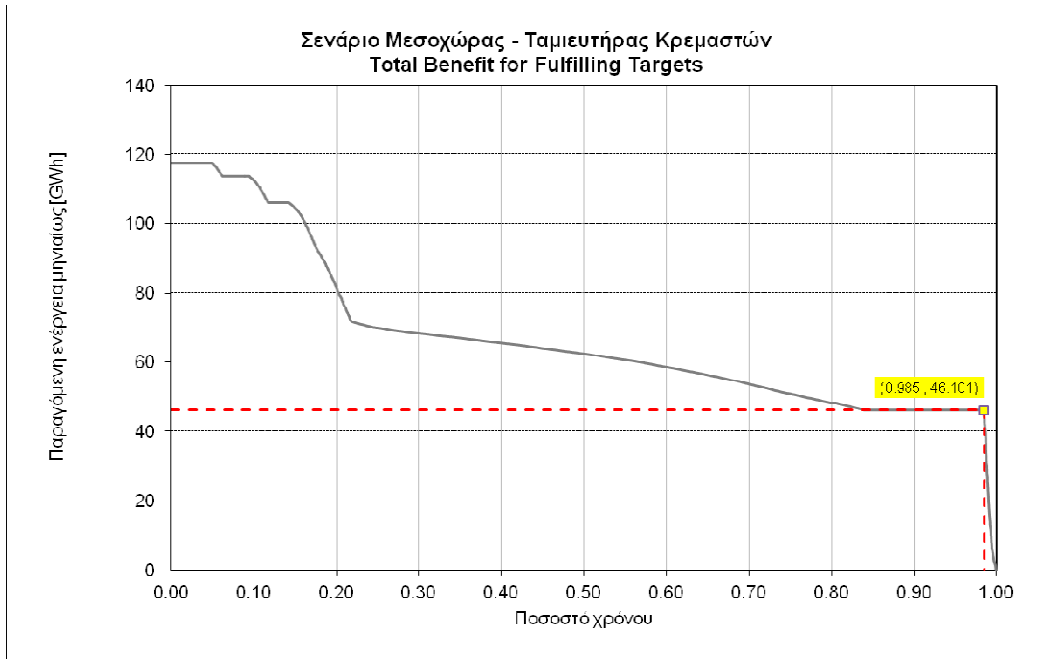
$$a^*_{xi} = f\left(\frac{c_i^B}{c_i^E}, \frac{c_i^B}{c_i^D}\right) \quad (7.12)$$

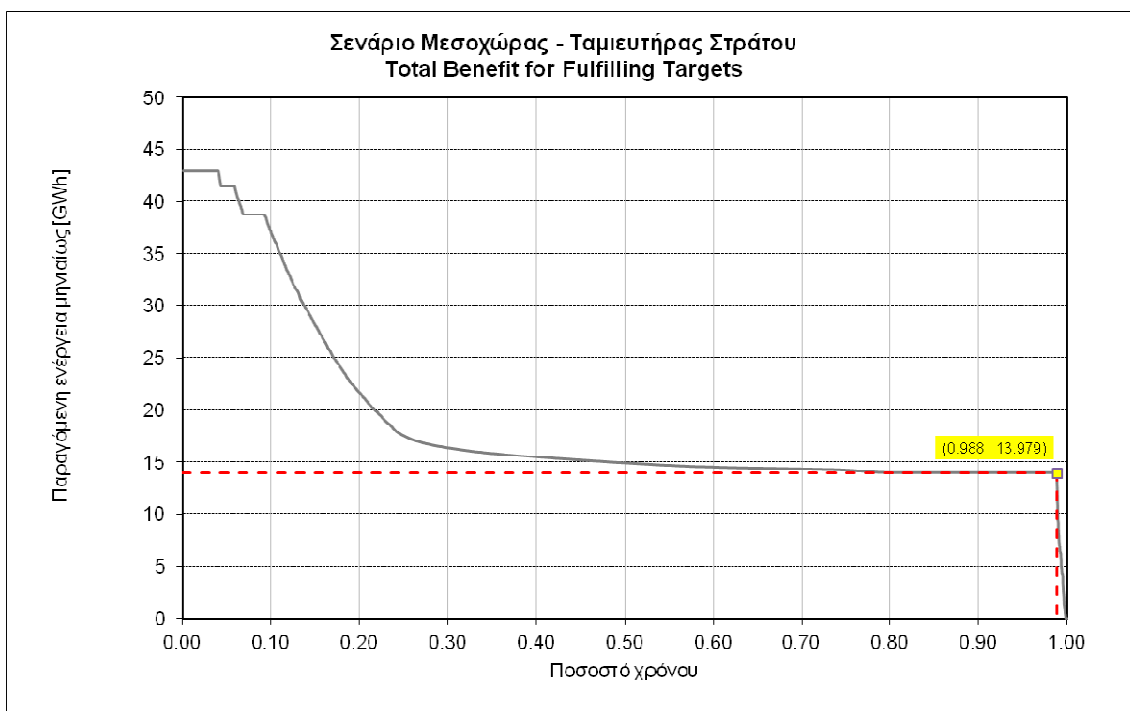
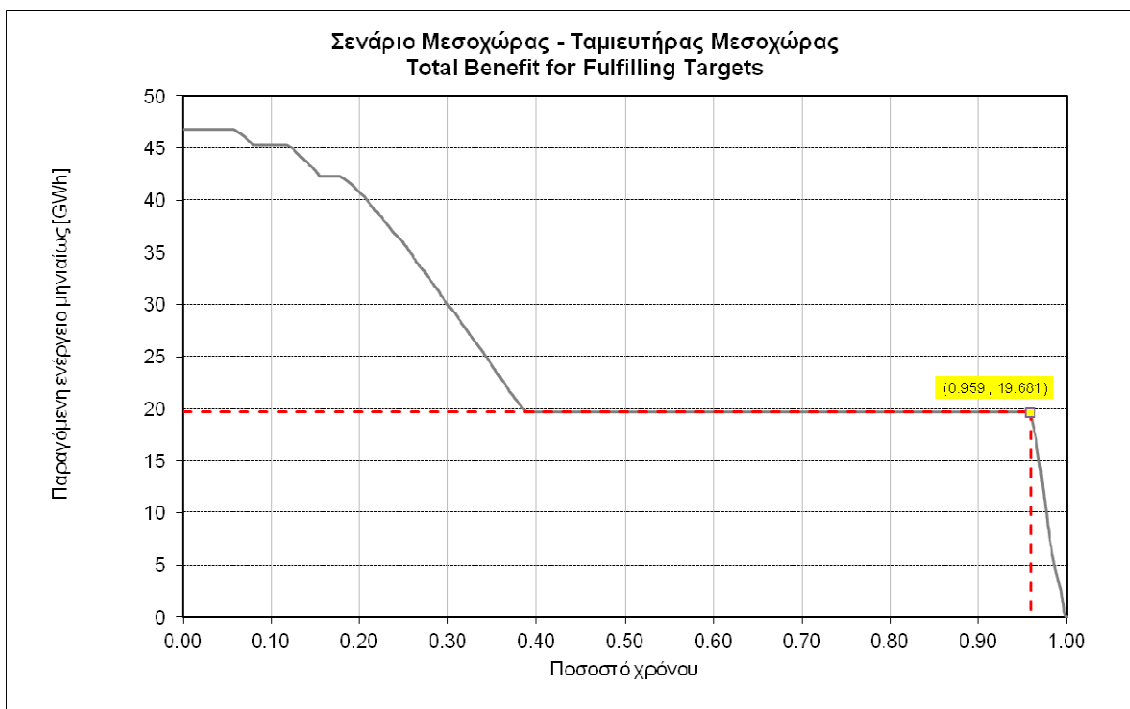
Η ευαισθησία της συνάρτησης αυτής, καθώς και των γενικότερων αποτελεσμάτων της συνάρτησης κόστους/οφέλους στις μεταβολές αυτών των αναλογιών θα διερευνηθεί στην ενότητα 8.6.

Στις παρακάτω Εικόνες (Εικόνες 7-3 έως 7-6) φαίνεται η εκτίμηση της αξιοπιστίας σε κάθε έργο βάσει των καμπυλών διάρκειας. Αν σχεδιασθεί οριζόντια ευθεία στο διάγραμμα της καμπύλης, με τεταγμένη ίση με την τιμή του αντίστοιχου στόχου (λ.χ. για τα Κρεμαστά είναι 46.10 GWh/μήνα), τότε αυτή τέμνει την καμπύλη στο πρώτο σημείο που αρχίζει η ομαλοποιημένη μηνιαία ενεργειακή παραγωγή. Η τετμημένη του σημείου τομής είναι η χαρακτηριστική αξιοπιστία a^* του έργου. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, οι στόχοι S_i (Πίνακας 7-1) έχουν φυσική υπόσταση, διότι ταυτίζονται με την πρωτεύουσα ενέργεια κάθε έργου και βάσει της τιμής τους είναι δυνατή η εκτίμηση της αξιοπιστίας.

Πίνακας 7-1: Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (τελικές τιμές μεταβλητών ελέγχου και στοχικής συνάρτησης) για τη συνάρτηση Total Benefit for Fulfilling Targets.

| Τιμές ενεργειακών στόχων [GWh/μήνα] | | | | Τιμή στοχικής συνάρτησης [10 ⁶ νομ. μονάδες] |
|--|----------|----------|---------|--|
| Μεσοχώρα | Κρεμαστά | Καστράκι | Στράτος | |
| 19.68 | 46.10 | 36.32 | 13.98 | 71.011 |





Εικόνες 7-3, 7-4, 7-5 και 7-6: Η εύρεση της χαρακτηριστικής αξιοπιστίας για τα έργα του συστήματος. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της Μεσοχώρας η αξιοπιστία είναι αρκετά πιο κάτω από τα υπόλοιπα έργα (96% αντί του 98,5%).

Προκύπτει επομένως ως συμπέρασμα ότι η συνάρτηση κόστους/οφέλους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η κατάλληλη αξιοπιστία βελτιστοποίησης της ενεργειακής πολιτικής, βάσει οικονομικών (μη πιθανοτικών) κριτηρίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα

αυτής της ιδιότητας είναι ο ταμιευτήρας Μεσοχώρας, ο οποίος από τη βελτιστοποίηση με τις συναρτήσεις ενέργειας δεν έχει σταθερή εικόνα ενεργειακής παραγωγής για μεγάλη αξιοπιστία ($\alpha=99\%$), αποκτάει όμως ένα πλατό (plateau) παραγωγής με τη συνάρτηση κόστους/οφέλους για μικρότερη αξιοπιστία, περίπου ίση με 96%. Για τους υπόλοιπους ταμιευτήρες, η χαρακτηριστική αξιοπιστία βρέθηκε ίση με περίπου 98.5%.

7.5. Διερεύνηση της κατάλληλης παραμετροποίησης

7.5.1. Επιλογή ομάδων παραμέτρων

Εκτός της αντικειμενικής συνάρτησης, ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα είναι η κατάλληλη εκλογή των μεταβλητών ελέγχου της βελτιστοποίησης, δηλαδή των παραμέτρων θ του προβλήματος (βλ. και ενότητα 5.2.3). Όπως προαναφέρθηκε, η παραμετροποίηση απλοποιεί σημαντικά το πρόβλημα περιορίζοντας τον υπολογιστικό φόρτο κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ενώ εισάγει πρακτική χρησιμότητα στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Πρέπει να είναι κατά το δυνατόν φειδωλή, χωρίς ωστόσο να αγνοεί κρίσιμες συνιστώσες παραμέτρων που μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνώνται διαφορετικές προσεγγίσεις παραμετροποίησης, ούτως ώστε να αποφασισθεί ποια είναι η πλέον αποτελεσματική εκλογή παραμέτρων για επιχειρησιακές εφαρμογές υδροηλεκτρικής παραγωγής με χρήση του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Με διερεύνηση στο σενάριο Μεσοχώρας, δοκιμάζονται τρεις ομάδες παραμετροποίησης και εκτελούνται οι αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις για τις συναρτήσεις Total Generated Firm Power (με αξιοπιστία 99%) και Total Benefit for Fulfilling Targets.

Όσον αφορά στην οικογένεια παραμέτρων θ , μπορεί να γίνει διαχωρισμός σε δύο είδη παραμέτρων, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνιστώσες (στοιχεία) του δικτύου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ:

1. Παράμετροι που αφορούν σε στοιχεία μεταφοράς νερού (κλάδοι μεταφοράς, στρόβιλοι, ανλιοστάσια). Χωρίζονται σε ενεργειακούς στόχους TE και στόχους μεταφοράς νερού (ελάχιστης ή μέγιστης ποσότητας μηνιαίως) TD.
2. Παράμετροι που σχετίζονται με τους ταμιευτήρες, οι οποίοι μπορεί να είναι παράμετροι ελάχιστης και μέγιστης στάθμης ή οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων, που καθορίζονται από τις παραμέτρους a_i και b_i (βλ. σχέση (5.1)).

Μιας και ενδιαφέρει η υδροηλεκτρική παραγωγή, οι τελικές παράμετροι οφείλουν να είναι τουλάχιστον οι άμεσα σχετιζόμενες με τα στοιχεία παραγωγής ενέργειας, δηλαδή να περιλαμβάνουν τουλάχιστον τις τιμές των ενεργειακών στόχων TE_i σε κάθε στρόβιλο i . Γενικότερα, ο ελάχιστος αναγκαίος αριθμός παραμέτρων συμπληρώνεται και από

παραμέτρους σε κλάδους μεταφοράς νερού TD οι οποίοι δεν περιέχουν στρόβιλους ή δεν περιέχουν ενεργειακό στόχο στο στρόβιλό τους. Στην περίπτωση μας, τέτοιοι στόχοι υπάρχουν μόνο στα σενάρια εκτροπής, μιας και στα απλούστερα σενάρια όλες οι δυνατές διαδρομές μεταφοράς νερού διέρχονται μέσα από στρόβιλους.

Η παραμετρική διερεύνηση επικεντρώνεται στο κατά πόσον απαιτούνται, εκτός των παραπάνω αναγκαίων στόχων μεταφοράς νερού, στόχοι που να αφορούν στους ταμιευτήρες και να σχετίζονται με την πολιτική εξισορρόπησης σταθμών ή του αποθέματός τους. Η λογική πίσω από μία τέτοια προσθήκη παραμέτρων προκύπτει από την άμεση σύνδεση της παραγόμενης ενέργειας τόσο από τη μεταφερόμενη ποσότητα νερού όσο και από τη στάθμη στους ταμιευτήρες (κάτι που γίνεται εμφανές από τη σχέση (5.6)). Η ενέργεια, συνεπώς, συναρτάται τόσο με τις ποσότητες που διέρχονται από τους στρόβιλους όσο και με την πολιτικής εξισορρόπησης του αποθέματος ή διατήρησης των σταθμών των ταμιευτήρων σε υψηλά επίπεδα. Βάσει του παραπάνω συλλογισμού, μελετήθηκαν οι εξής ομάδες παραμέτρων:

1. Μόνο ενεργειακοί (σταθεροί χρονικά) στόχοι TE_i για κάθε στρόβιλο i , καθώς και πρόσθετοι (σταθεροί χρονικά) στόχοι μεταφοράς νερού TD_j σε κρίσιμους για το σύστημα κλάδους μεταφοράς νερού j , οι οποίοι δεν περιέχουν στρόβιλο ή ο στρόβιλός τους δε συνοδεύεται από ενεργειακό στόχο. Στα απλά σενάρια (λ.χ. σειριακή σύνδεση ταμιευτήρων πάνω στον ίδιο ποταμό), ο αριθμός των παραμέτρων είναι n , όσοι και οι στρόβιλοι του προβλήματος. Σε πιο σύνθετες τοπολογίες (λ.χ. σενάρια εκτροπής, ταυτόχρονη παράλληλη και σε σειρά σύνδεση ταμιευτήρων), ο αριθμός των παραμέτρων είναι $n + n_j$, όπου n_j κλάδοι μεταφοράς νερού, όπως συνδετήριες σήραγγες ή σήραγγες εκτροπής.
2. Η παραπάνω ομάδα στόχων TE και TD , καθώς και σταθεροί χρονικά στόχοι διατήρησης ελάχιστου όγκου MV_j σε ταμιευτήρες. Για λόγους ελαχιστοποίησης των παραμέτρων λειτουργίας τέθηκαν στόχοι μόνο στους κύριους ρυθμιστές του συστήματος των ταμιευτήρων, οι οποίοι και καθορίζουν τα κατάντη μικρότερα έργα. Οι ταμιευτήρες αυτοί στο υπό διερεύνηση σενάριο είναι οι ταμιευτήρες Κρεμαστών και Μεσοχώρας. Με αυτή την πολιτική παραμετροποίησης, ο αριθμός των παραμέτρων είναι $n + n_j + k$, όπου n οι στρόβιλοι και $1 \leq k \leq m$, όπου m το σύνολο των ταμιευτήρων του συστήματος.
3. Η παραπάνω ομάδα στόχων TE και TD , μαζί με κανόνες λειτουργίας b_j για κάθε ταμιευτήρα, όπως ορίστηκαν από τη σχέση (5.2) (βλ. και παράγραφο 5.2.3). Ο αριθμός των παραμέτρων είναι $n + n_j + m$, όπου n το πλήθος των στρόβιλων και m το πλήθος των ταμιευτήρων στο σύστημα.

Όλοι οι στόχοι υποτέθηκαν χρονικά σταθεροί, μιας και η υιοθέτηση σταθερών χρονικά στόχων προκύπτει εύλογα από τον ορισμό της πρωτεύουσας ενέργειας και οδηγεί σε

σημαντική απλοποίηση της παραμετροποίησης (Κουτσογιάννης, 1996). Η προτεραιότητα που τέθηκε για τις διαφορετικές κατηγορίες στόχων αναλύεται στην ενότητα 6.5.1.

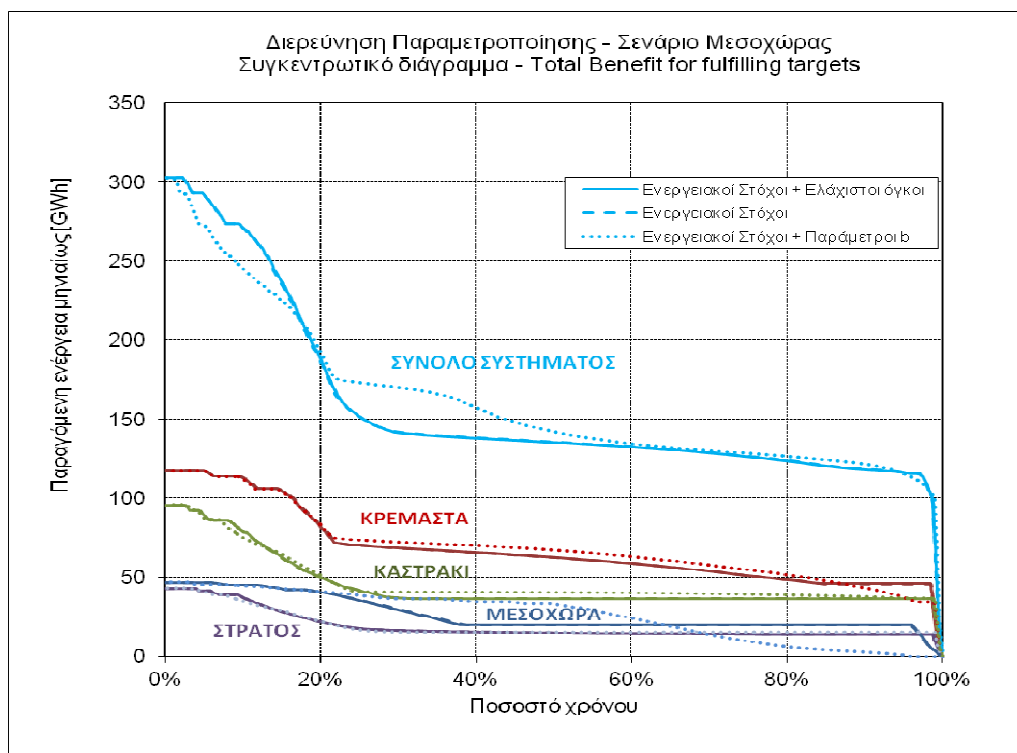
7.5.2. Αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης

Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή πίνακα ο οποίος συμπεριλαμβάνει τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου και τις τιμές των μέτρων επίδοσης μετά τη διενέργεια της βελτιστοποίησης (1000 επαναλήψεων). Επίσης γίνεται σύγκριση βάσει της εικόνας της ενεργειακής παραγωγής για το σύνολο του συστήματος αλλά και για τα επιμέρους έργα.

Η αρχική διαπίστωση, όπως βρέθηκε και σε προηγούμενη μελέτη για την εκτροπή (Κουτσογιάννης, 1996), είναι ότι η ακριβής τιμή του ακροτάτου που προσδιορίζεται επηρεάζεται από το είδος της παραμετροποίησης. Εύλογα αναμένεται να οδηγείται ο δείκτης επίδοσης σε μεγαλύτερες τιμές καθώς αυξάνονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος. Το ουσιώδες ωστόσο είναι να μην οδηγηθεί η παραμετροποίηση νομοτελειακά σε λύσεις με πολλές παραμέτρους αλλά να κριθεί κατά πόσον η αύξηση του δείκτη επίδοσης είναι σημαντική ώστε να δικαιολογεί την προσθήκη αγνώστων.

Επ' αυτού, παρατηρείται ότι η μεταβολή του μέτρου επίδοσης με την προσθήκη παραμέτρων (στα είδη παραμετροποίησης 2 και 3, σε σχέση με το 1) δεν οδηγεί σε δραστικά βελτιωμένες λύσεις. Για την περίπτωση των παραμέτρων b_i το τελικό μέτρο επίδοσης είναι ελαφρώς αυξημένο, χωρίς όμως σημαντική διαφοροποίηση. Αξιοσημείωτο, ωστόσο, είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση 2 που εισήχθησαν και περιορισμοί στον ελάχιστο όγκο το μέτρο επίδοσης ήταν πρακτικώς αμετάβλητο (ακόμα και ελαφρώς μειωμένο για την περίπτωση της συνάρτησης πρωτεύουσας ενέργειας). Η αδυναμία αυτού του είδους παραμετροποίησης να βελτιώσει την εικόνα της ενεργειακής παραγωγής είναι εμφανής και στις καμπύλες διάρκειας, οι οποίες είναι ταυτόσημες με αυτές των ενεργειακών στόχων για τη συνάρτηση κόστους/οφέλους, ενώ δίνουν ελαφρώς χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας στην περίπτωση της συνάρτησης ενέργειας.

Αντιθέτως, η προσθήκη των παραμέτρων b_i προσφέρει πλεονεκτήματα, καθώς αυξάνει το μέτρο επίδοσης του συστήματος και, στην περίπτωση της συνάρτησης κόστους/οφέλους, επιδρά στην εικόνα ενεργειακής παραγωγής, όπως φαίνεται στα διαγράμματα. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα που δίνει είναι ότι καθιστά τη διαδικασία αναζήτησης λύσεων πιο ευέλικτη και οδηγεί ταχύτερα στη βέλτιστη λύση. Ωστόσο, συνεπάγεται μεγάλη αύξηση των παραμέτρων και δε μεταβάλλει δραστικά τις τιμές των στοχικών συναρτήσεων.



Εικόνα 7-7: Οι καμπύλες διάρκειας για το σύνολο του συστήματος και τα επιμέρους έργα, για τη συνάρτηση κόστους /οφέλους. Όταν χρησιμοποιούνται και ελάχιστοι όγκοι, οι εικόνες είναι ταυτόσημες με τη χρήση μόνο ενεργειακών στόχων.

Πίνακες 7-2 και 7-3: Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για κάθε είδος παραμετροποίησης και για τα δύο μέτρα επίδοσης, για το υπό μελέτη σενάριο της Μεσοχώρας.

| Είδος παραμετροποίησης | Τιμές Παραμέτρων μετά τη βελτιστοποίηση | | | | | Τιμή Συνάρτησης |
|------------------------|---|----------|----------|----------|---------|--------------------------|
| | | Μεσοχώρα | Κρεμαστά | Καστράκι | Στράτος | Firm Power [GWh/μήνα] |
| 1 | Ενεργειακοί Στόχοι | 16.62 | 29.06 | 10.79 | 15.13 | 100.846 |
| | Στάθμες | | | | | |
| | Παράμετροι β | | | | | |
| 2 | Ενεργειακοί Στόχοι | 17.41 | 42.15 | 36.12 | 13.80 | 100.268 |
| | Ελάχιστοι Όγκοι | 215 | 1613 | | | |
| | Παράμετροι β | | | | | |
| 3 | Ενεργειακοί Στόχοι | 21.20 | 18.45 | 33.89 | 15.09 | 100.89 |
| | Στάθμες | | | | | |
| | Παράμετροι β | 0.55 | 0.10 | 0.15 | 0.48 | |

| Είδος παραμετροποίησης | Τιμές Παραμέτρων μετά τη βελτιστοποίηση | | | | | Τιμή Συνάρτησης |
|------------------------|---|----------|----------|----------|---------|---|
| | | Μεσοχώρα | Κρεμαστά | Καστράκι | Στράτος | Target Benefit [10 ⁶ νομ.μονάδες] |
| 1 | Ενεργειακοί Στόχοι | 19.68 | 46.10 | 36.32 | 13.98 | 71.011 |
| | Στάθμες | | | | | |
| | Παράμετροι β | | | | | |
| 2 | Ενεργειακοί Στόχοι | 19.84 | 45.71 | 36.17 | 13.93 | 71.056 |
| | Ελάχιστοι Όγκοι | 187 | 1535 | | | |
| | Παράμετροι β | | | | | |
| 3 | Ενεργειακοί Στόχοι | 36.34 | 34.50 | 36.61 | 15.34 | 73.948 |
| | Στάθμες | | | | | |
| | Παράμετροι β | 0.23 | 0.21 | 0.02 | 0.49 | |

7.5.3. Σύνοψη των αποτελεσμάτων παραμετρικής διερεύνησης

Τα συμπεράσματα της διαδικασίας παραμετρικής διερεύνησης συγκεντρωτικά είναι τα εξής:

1. Η βελτιστοποίηση είναι δυνατή μόνο με τους στόχους TE + TD (υπολογισμός με χρήση των ελάχιστων δυνατών παραμέτρων).
2. Η προσθήκη στόχων ελαχίστων όγκων MV στους ταμειυτήρες οδηγεί σε ταυτόσημα αποτελέσματα και συνεπώς δεν έχει νόημα.
3. Η προσθήκη παραμέτρων b_i αυξάνει ελαφρά την τιμή του μέτρου επίδοσης, πρακτικώς διπλασιάζοντας όμως τις παραμέτρους. Η αύξηση δεν κρίνεται σημαντική, καθώς είναι πάντα μικρότερη του 5%. Κατά συνέπεια, είναι μία πολιτική παραμετροποίησης που έχει οφέλη και είναι χρήσιμη για τη μελέτη της λεπτομερούς απόκρισης συστημάτων και μόνον, εφ' όσον η υπολογιστική ισχύς επιτρέπει την αύξηση των παραμέτρων. Επίσης, είναι αναγκαία στην περίπτωση που χρειάζεται να καταρτισθούν καμπύλες λειτουργίας για τους ταμειυτήρες του συστήματος.

Κρίνεται, συνεπώς, ότι είναι επαρκής η βελτιστοποίηση με παραμέτρους μόνο τους στόχους παραγωγής ενέργειας και μεταφοράς νερού (πολιτική παραμέτρων (1)). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα και με τις παραμετρικές προσεγγίσεις παλαιότερης μελέτης (Κουτσογιάννης, 1996). Τελικώς, για την εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην πολιτική παραμέτρων (1) (ενεργειακοί στόχοι και στόχοι μεταφοράς νερού).

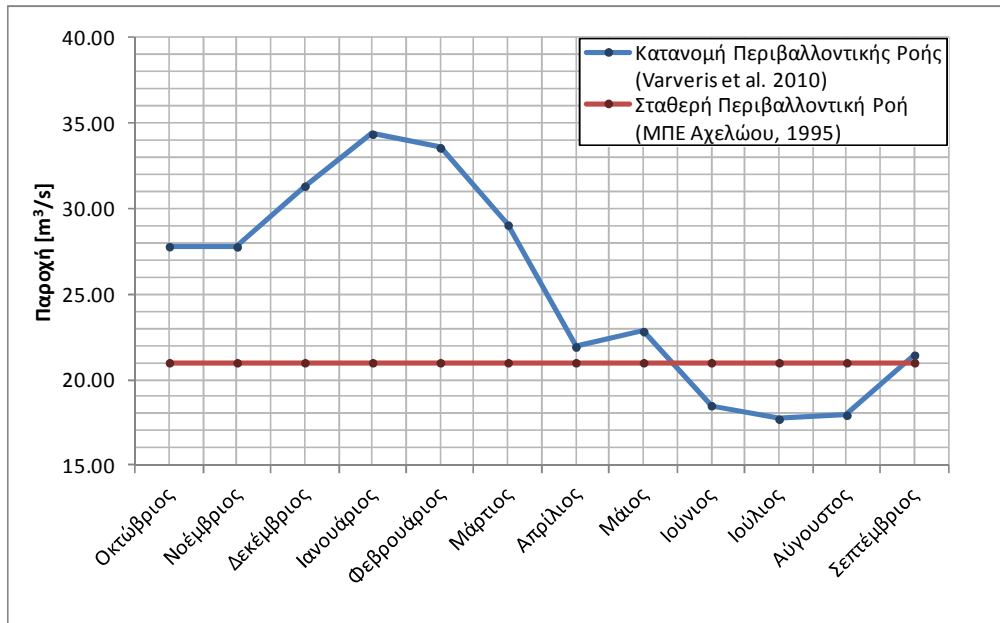
8. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης διερεύνησης εφαρμόζονται στα σενάρια του συστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Στο πλαίσιο της διπλωματικής, διερευνάται το αντίκτυπο που έχουν διαφορετικές πολιτικές λειτουργίας και επιπλέον αντικρουόμενοι στόχοι στην ενεργειακή παραγωγή, ενώ εξάγονται τα γενικά ενεργειακά και οικονομικά στοιχεία για όλα τα σενάρια μελέτης και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα προηγούμενων μετρήσεων.

8.1. Το αντίκτυπο της πολιτικής περιβαλλοντικής εκροής κατάντη του Στράτου στην ενεργειακή παραγωγή των έργων του κάτω Αχελώου

Ένα θέμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον και αφορά στην υφιστάμενη διάταξη έργων του κάτω Αχελώου είναι το αντίκτυπο που θα έχει η αλλαγή της πολιτικής περιβαλλοντικής εκροής κατάντη του Στράτου στην παραγωγή ενέργειας. Όπως προαναφέρθηκε (παράγραφος 6.5.3), για το σύνολο των επιλύσεων υιοθετήθηκε μία πιο σύγχρονη προσέγγιση μηνιαίας διακύμανσης της περιβαλλοντικής παροχής κατάντη του Στράτου, η οποία ακολουθεί τις μεταβολές της φυσικοποιημένης ροής. Στην παλαιότερη ωστόσο Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων προτάθηκε η διατήρηση σταθερής ελάχιστης οικολογικής παροχής, ίσης με 21 m³/s (ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995).

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας γίνεται σύγκριση των δύο πολιτικών περιβαλλοντικής διατήρησης και ειδικότερα του αντίκτυπου που αυτές έχουν στην ενεργειακή παραγωγή για τα έργα του κάτω Αχελώου. Η χρησιμότητα μίας τέτοιας σύγκρισης είναι εμφανής, καθώς μία τέτοια αλλαγή της περιβαλλοντικής ροής γίνεται πολύ εύκολα από το διαχειριστή και αφορά στη λειτουργία του υφιστάμενου συστήματος. Με βάση το Σενάριο A1 (Σενάριο κάτω Αχελώου) διενεργούνται δύο βελτιστοποιήσεις 1000 επαναλήψεων, μόνο με ενεργειακούς στόχους (πολιτική παραμέτρων 1), με την πρώτη να αφορά στη μηνιαία διακύμανση της ροής (Varveris, et al. 2010) και τη δεύτερη σε σταθερή ροή 21 m³/s (ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO 1995). Οι διαφορές στις τιμές των παροχών για τις δύο μεθοδολογίες φαίνονται στην Εικόνα 8-1.



Εικόνα 8-1: Διάγραμμα της μηνιαίας διακύμανσης των παροχών για τις δύο προτεινόμενες πολιτικές.

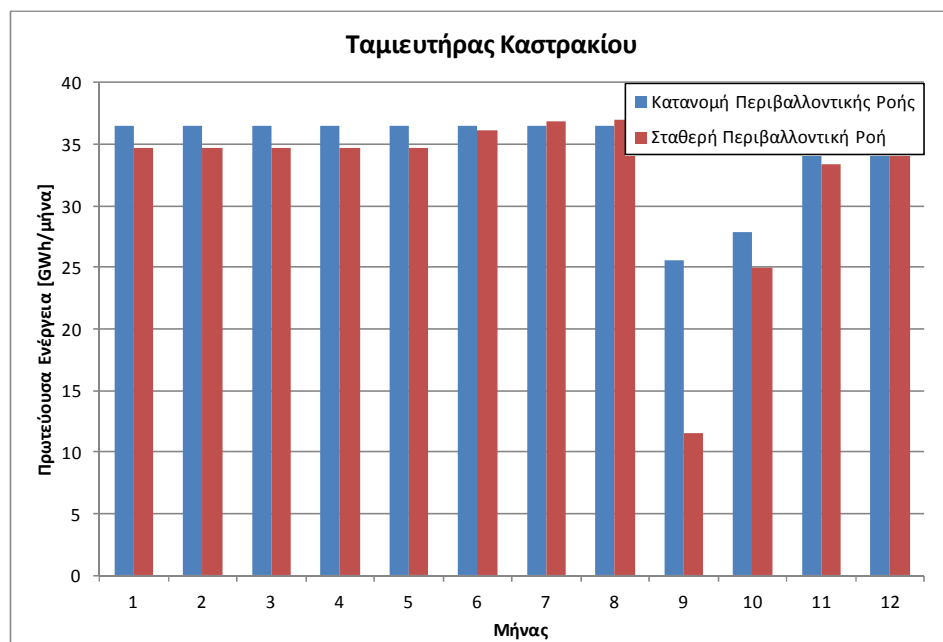
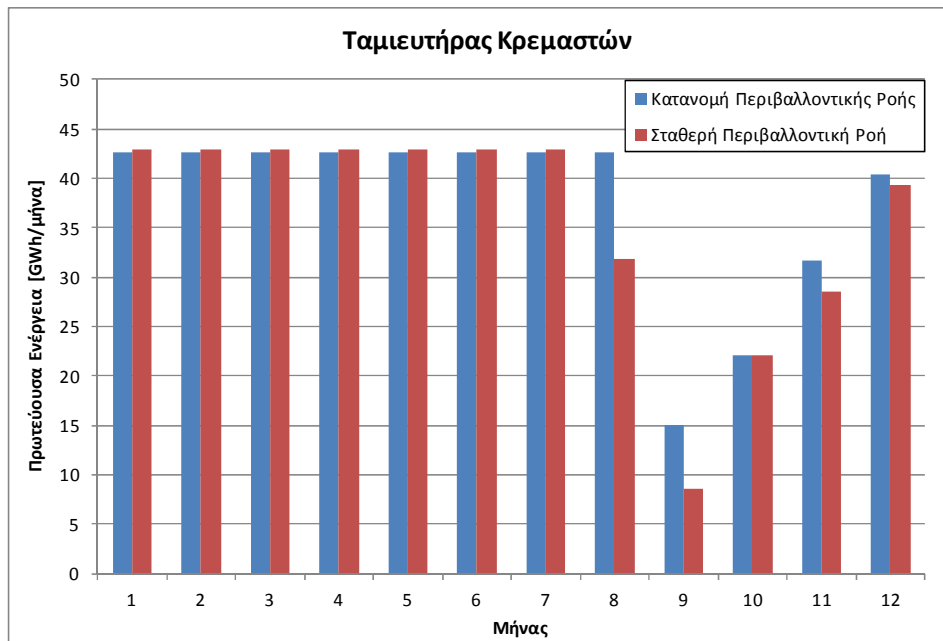
Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση ήταν η Total Generated Firm Power με αξιοπιστία 99%. Παρ' ότι οι περιορισμοί περιβαλλοντικής ροής καλύπτονται γενικώς σε όλες τις επιλύσεις χωρίς σημαντική αστοχία, στη συγκεκριμένη περίπτωση, προκειμένου να δοθεί έμφαση στην κάλυψη των περιβαλλοντικών αναγκών, το κριτήριο ενεργειακής παραγωγής συνοδεύτηκε και από ένα κριτήριο ελαχιστοποίησης της μέσης ετήσιας πιθανότητας αστοχίας για το στόχο της περιβαλλοντικής ροής (Average Annual Failure Probability). Η αναλογία βαρύτητας των κριτηρίων ήταν 1:2, δίνοντας περισσότερη έμφαση στην κάλυψη του περιβαλλοντικού στόχου. Οι συγκρίσεις γίνονται επί της εγγυημένης, πρωτεύουσας ενέργειας.

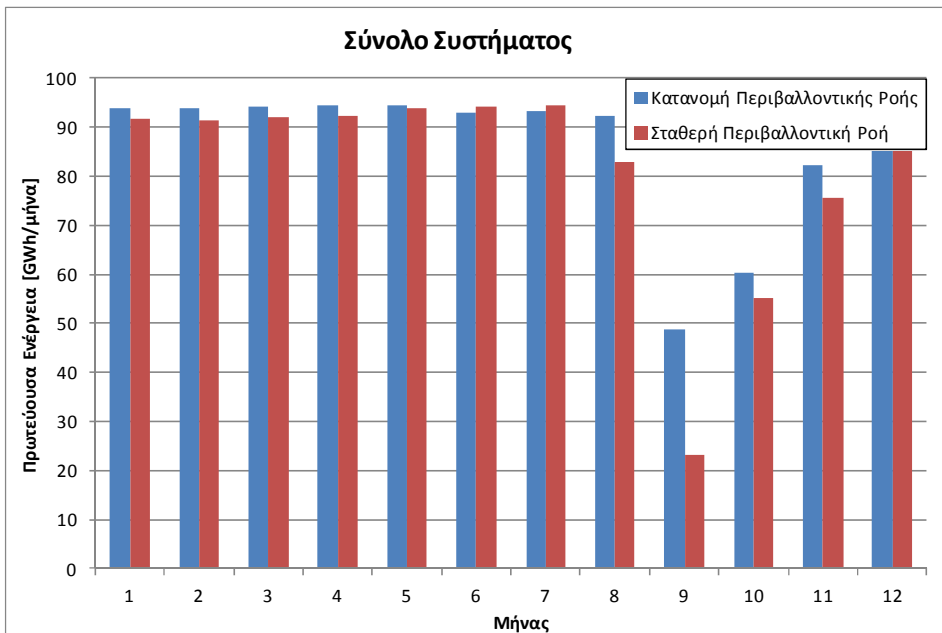
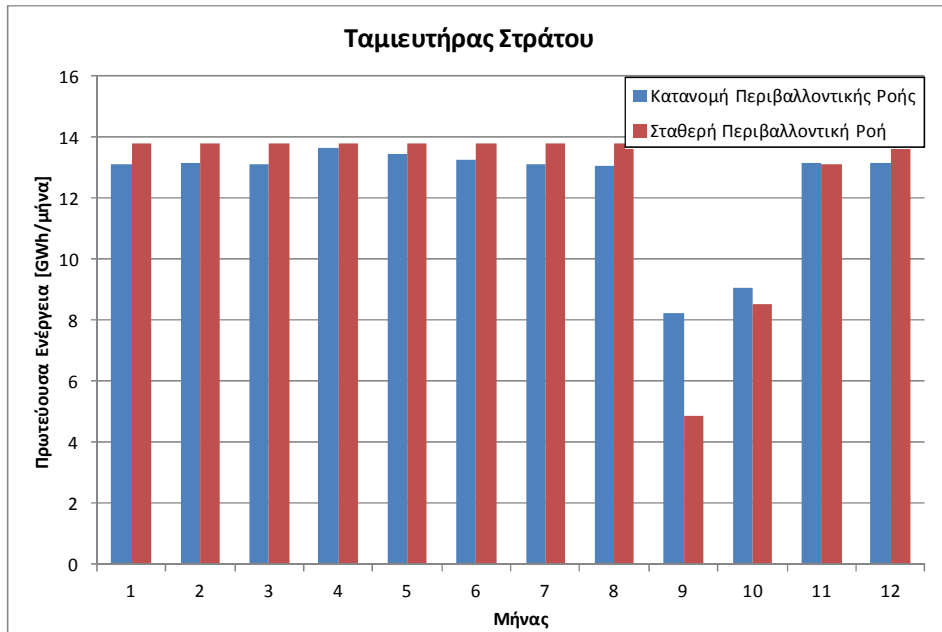
Πίνακας 8-1: Αποτελέσματα συνολικής μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής

| Πρωτεύουσα Ενέργεια [GWh/μήνα] | Κρεμαστά | Καστράκι | Στράτος | Σύνολο Συστήματος |
|--------------------------------|----------|----------|---------|-------------------|
| Μηνιαία Κατανομή Περ. Ροής | 42.57 | 36.45 | 13.13 | 92.96 |
| Σταθερή Περ. Ροή | 42.89 | 34.65 | 13.78 | 91.72 |
| Ποσοστό Μεταβολής | 0.75% | -4.94% | 4.95% | -1.33% |

Από την εικόνα της συνολικής μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής δεν παρατηρούνται αξιόλογες μεταβολές (Πίνακας 8-1) καθώς όλες είναι μικρότερες του 5%. Ωστόσο, δεδομένου ότι η διαφοροποίηση της περιβαλλοντικής ροής γίνεται στη μηνιαία διακύμανση και όχι τόσο στα ετήσια μεγέθη ροής (για τα οποία η πιο σύγχρονη μελέτη κατανομής της περιβαλλοντικής ροής είναι ελαφρώς πιο δυσμενής), πραγματοποιείται ανάλυση των αποτελεσμάτων σε επίπεδο επιμέρους μηνιαίας παραγωγής. Η συνολική μηνιαία χρονοσειρά ενέργειας διαχωρίζεται στις επιμέρους μηνιαίες για κάθε έργο και εν συνεχεία υπολογίζεται η εγγυημένη

ενέργεια κάθε μήνα (με αξιοπιστία 99%) βάσει των επιμέρους μηνιαίων χρονοσειρών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 8-2).





Εικόνα 8-2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επιμέρους μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής για όλα τα έργα του κάτω Αχελώου και για το σύστημα, για τις δύο διαφορετικές πολιτικές περιβαλλοντικής ροής.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παλαιότερη σύσταση για σταθερή περιβαλλοντική ροή είναι εν γένει πιο δυσμενής για τη μηνιαία ενεργειακή παραγωγή, ειδικά τους κρίσιμους μήνες του Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου που τα αποθέματα των ταμειυτήρων έχουν εξαντληθεί και η ενεργειακή παραγωγή μειώνεται. Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση μίας πιο σύγχρονης πολιτικής διατήρησης οικολογικής παροχής ενδέχεται να έχει θετικό ενεργειακό αντίκτυπο, ακόμα και με διπλασιασμό της παραγόμενης ενέργειας τους κρίσιμους μήνες (όπως φαίνεται για το Σεπτέμβρη στα παραπάνω διαγράμματα).

8.2. Η προσθήκη της Μεσοχώρας στο υφιστάμενο σύστημα έργων του Αχελώου

Το σενάριο αυτό έχει βαρύνουσα σημασία στην ενεργειακή διαχείριση του Αχελώου μιας και ο ταμιευτήρας της Μεσοχώρας αποτελεί ένα ολοκληρωμένο έργο το οποίο απλώς δεν έχει πληρωθεί, καθώς αποτελεί τμήμα των έργων της εκτροπής και συνεπώς είναι όμηρος των αλληπάλληλων δικαστικών προσφυγών και αποφάσεων (βλ. και παράγραφο 4.5). Η αποδέσμευσή του ωστόσο από τα έργα της εκτροπής και η αυτόνομη λειτουργία του ως ένα ακόμη υδροηλεκτρικό έργο επί του ρου του Αχελώου προσφέρει μία σειρά από πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα:

1. Αποτελεί ένα έργο που δε σχετίζεται άμεσα με την εκτροπή (μιας και η σήραγγα εκτροπής ανήκει στα έργα του ταμιευτήρα Συκιάς και τα ύδατα μετά τον υδροηλεκτρικό σταθμό απελευθερώνονται εντός του ρου του Αχελώου). Κατά συνέπεια μπορεί να αποσυνδεθεί από τη συζήτηση για την πραγματοποίηση της εκτροπής και να λειτουργήσει ως αυτόνομο υδροηλεκτρικό έργο.
2. Καθιστά τον ταμιευτήρα από ένα ζημιογόνο ημιτελές έργο (μιας και απαιτούνται συνεχή έξοδα συντήρησης) σε ένα κερδοφόρο λειτουργικό υδροηλεκτρικό έργο που αυξάνει την υδροηλεκτρική παραγωγή της χώρας. Ο περιορισμός της οικονομικής ζημίας είναι ένας επιτακτικός λόγος λειτουργίας του έργου, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η δεινή οικονομική κατάσταση της χώρας την τελευταία περίοδο.
3. Αυξάνει την ισχύ και την ευελιξία λειτουργίας του υφιστάμενου συστήματος έργων του Αχελώου.
4. Δεν συνοδεύεται από περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην οικολογική παροχή των εκβολών ή στη στερεοπαροχή, μιας και κατάντη υπάρχει μία σειρά από λειτουργικά έργα και η περιβαλλοντική παροχή ρυθμίζεται από τον ταμιευτήρα του Στράτου.

Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η διερεύνησή του στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, τόσο σε επίπεδο προστιθέμενης πρωτεύουσας ενέργειας στο σύστημα του Αχελώου όσο και σε επίπεδο οικονομικού οφέλους.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.4.2, από τη βελτιστοποίηση του σεναρίου A2 προέκυψε ότι ο ταμιευτήρας Μεσοχώρας δεν αποκτάει σταθερή εικόνα ενεργειακής παραγωγής αν απαιτηθεί να λειτουργήσει με πολύ υψηλή αξιοπιστία. Κατά συνέπεια η βελτιστοποίηση με τη συνάρτηση ενέργειας Total Generated Firm Power για αξιοπιστία $\alpha=99\%$ δεν οδηγεί στα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα ως προς την ενεργειακή παραγωγή. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων με τη συνάρτηση κόστους/οφέλους Total Benefit for Fulfilling Targets, τα οποία επιτρέπουν την άμεση εκτίμηση του οικονομικού οφέλους (μέσω του αποτελέσματος του κριτηρίου επίδοσης, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία), ενώ παρουσιάζουν ενδιαφέρον τόσο ως προς την ενεργειακή

εικόνα όσο και ως προς την ιδιότητα εύρεσης της χαρακτηριστικής αξιοπιστίας για κάθε έργο και για το σύστημα.

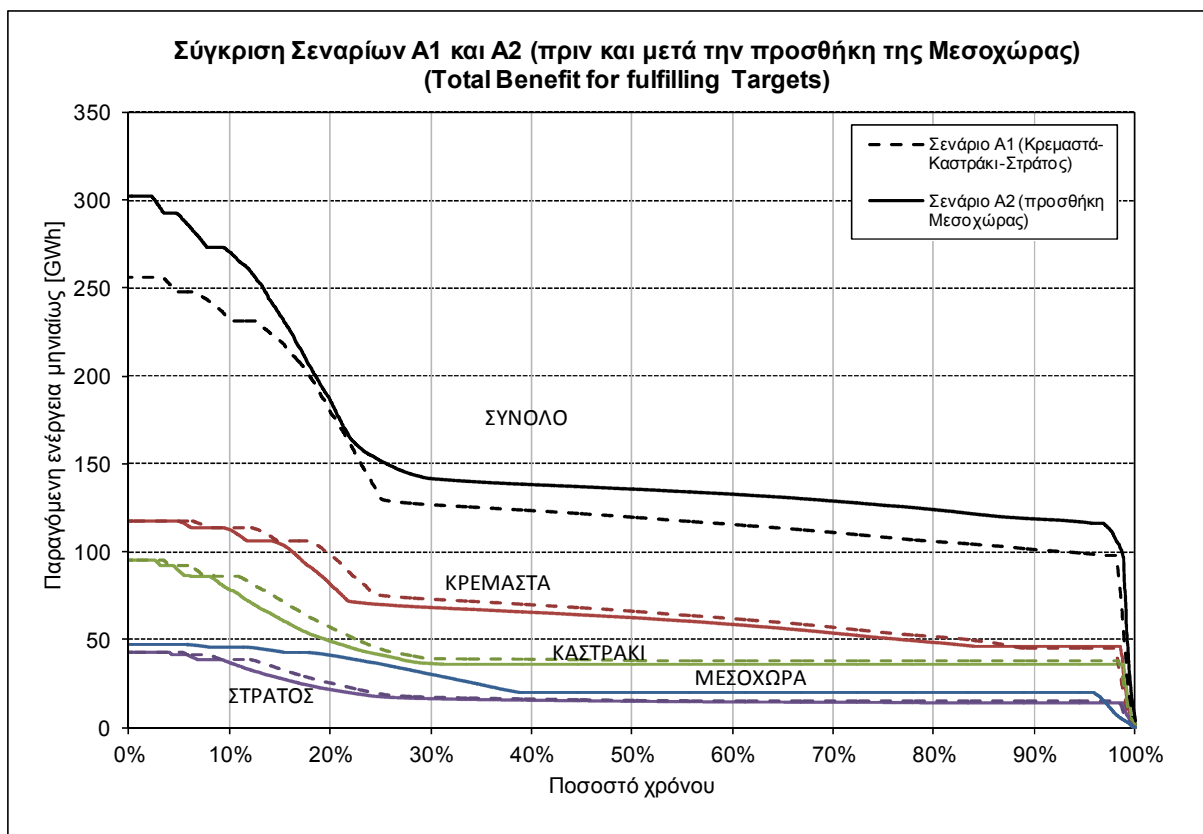
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δύο βελτιστοποιήσεων (1000 επαναλήψεων, μόνο με ενεργειακούς στόχους) παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Από τις επιλύσεις προκύπτει ότι η προσθήκη του ταμιευτήρα της Μεσοχώρας αυξάνει την πρωτεύουσα ενέργεια του συστήματος κατά 9.3 GWh/μήνα (από τις 97.9 GWh στις 107.2 GWh μηνιαίως), ενώ προσθέτει κατά μέσο όρο 225 GWh στην παραγωγή του υδροσυστήματος. Ο ίδιος ο ταμιευτήρας Μεσοχώρας παρέχει εγγυημένη ενέργεια 19.68 GWh/μήνα με αξιοπιστία 95.9%, ενώ η μέση ετήσια παραγωγή του είναι 316 GWh.

Όσον αφορά στο οικονομικό όφελος από την ενεργειακή παραγωγή, δεδομένων των οικονομικών παραδοχών για την ενέργεια της ενότητας 6.8, αυτό ανέρχεται από τα 61.5 εκατ. € ετησίως πριν την ένταξη της Μεσοχώρας στα 71 εκατ. € μετά την ένταξή της (Πίνακας 8-2). Η λειτουργία του ταμιευτήρα Μεσοχώρας, επομένως, οδηγεί σε κέρδος από παραγωγή ενέργειας 9.5 εκατ. € ετησίως. Το τελευταίο συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι η συνολική επένδυση του φράγματος ανέρχεται σε 500 εκατ. € σε σημερινά μεγέθη (Στεφανάκος 2010).

Πίνακας 8-2: Συγκεντρωτικός πίνακας για την ενεργειακή παραγωγή και το όφελος από τα Σενάρια A1 (υφιστάμενη διάταξη) και A2 (προσθήκη Μεσοχώρας στην υφιστάμενη διάταξη).

| | | Κρεμαστά | Καστράκι | Στράτος | Μεσοχώρα | Σύνολο Συστήματος | Οικονομικό Όφελος Ενεργειακής Παραγωγής Συστήματος (10 ⁶ €/έτος) |
|--|------------------------------------|----------|----------|---------|----------|----------------------|--|
| Σενάριο A1 (κάτω Αχελώος) | Πρωτεύουσα ενέργεια [GWh/μήνα] | 45.11 | 37.83 | 15.00 | | 97.94 | 61.509 |
| | Αξιοπιστία πρωτεύουσας | 98.06% | 98.35% | 98.34% | | 98.13% | |
| | Μέση ετήσια ενέργεια [GWh/έτος] | 852 | 568 | 241 | | 1661 | |
| Σενάριο A2 (Κάτω Αχελώος + Μεσοχώρα) | Πρωτεύουσα ενέργεια [GWh/μήνα] | 46.10 | 36.32 | 13.98 | 19.68 | 107.23 | 71.011 |
| | Αξιοπιστία πρωτεύουσας | 98.50% | 98.83% | 98.85% | 95.85% | 98.15% | |
| | Μέση ετήσια ενέργεια [GWh/έτος] | 809 | 535 | 226 | 316 | 1886 | |

Η προσθήκη της Μεσοχώρας στο σύστημα έχει έντονα θετική επίδραση και στη συνολική ενεργειακή εικόνα, όπως φαίνεται και στις καμπύλες διάρκειας στην Εικόνα 8-3, αυξάνοντας σημαντικά τόσο την πρωτεύουσα όσο και τις αιχμές δευτερεύουσας ενέργειας.



Εικόνα 8-3: Η εικόνα της ενεργειακής παραγωγής πριν και μετά την προσθήκη της Μεσοχώρας για τα επιμέρους έργα και για το σύστημα.

8.3. Η επίπτωση της εκτροπής στην ενεργειακή παραγωγή των έργων του Αχελώου

Ένα βασικό ερώτημα που εγείρεται σχετικά με το έργο της εκτροπής είναι η επίπτωση που αυτή θα έχει στην ενεργειακή παραγωγή των έργων του κάτω Αχελώου. Το ερώτημα αυτό είναι κρίσιμο, διότι τα έργα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς έχουν εξέχοντα ρόλο στην υδροηλεκτρική παραγωγή της χώρας συμμετέχοντας κατά 30% περίπου στο σύνολο της ελληνικής υδροηλεκτρικής παραγωγής ετησίως (Αργυράκης 2009).

Προκειμένου να μελετηθεί αυτή η επίπτωση πραγματοποιήθηκε μία σειρά βελτιστοποιήσεων με βάση το Σενάριο A3 (Σενάριο Συκιάς), 1000 επαναλήψεων η κάθε μία, με παραμέτρους μόνο τους ενεργειακούς στόχους, η οποία αφορούσε σε ένα εύρος ποσοτήτων εκτροπής (0, 200, 400, 600, 800 και 1200 hm³ ετησίως, όλες με τη μηνιαία κατανομή της ενότητας 6.5.2). Η σκοπιμότητα μελέτης ενός εύρους διαφορετικών ποσοτήτων εκτροπής έγκειται στο γεγονός ότι ενδέχεται να υπάρξει η ανάγκη αναπροσαρμογής της ποσότητας εκτροπής κατά τα διάρκειά λειτουργίας του έργου ή ακόμα και πριν την ολοκλήρωσή του, όπως φάνηκε στην ενότητα 4.5. Η τελευταία ποσότητα των 1200 hm³ δεν αντιστοιχεί στη δυναμικότητα των έργων (που άλλωστε έχουν τεχνικά χαρακτηριστικά μελετημένα για

μικρότερη απόληψη) και δίνεται απλώς ως ‘άνω όριο’ αναφοράς της εκτρεπόμενης ποσότητας, όντας η τιμή που είχε αρχικώς προταθεί για την εκτροπή του Αχελώου.

Η συνάρτηση βελτιστοποίησης σε όλες τις περιπτώσεις είναι η Total Generated Firm Power με αξιοπιστία 99%. Ακολούθως, μετά από κάθε βελτιστοποίηση εξήχθησαν οι χρονοσειρές μηνιαίας παραγόμενης ενέργειας ανά έργο και υπολογίστηκαν οι καμπύλες διάρκειας: (α.) για το σύνολο των έργων του Αχελώου, (β.) για τα έργα του κάτω Αχελώου μόνο (Κρεμαστά, Καστράκι και Στράτος), (γ.) για τα έργα του άνω Αχελώου μόνο (Μεσοχώρα και Συκιά). Για τις περιπτώσεις (β.) και (γ.), αθροίστηκαν οι μηνιαίες ενέργειες των έργων που ανήκουν στα αντίστοιχα υποσυστήματα και υπολογίστηκε η καμπύλη διάρκειας βάσει της χρονοσειράς του αθροίσματος.

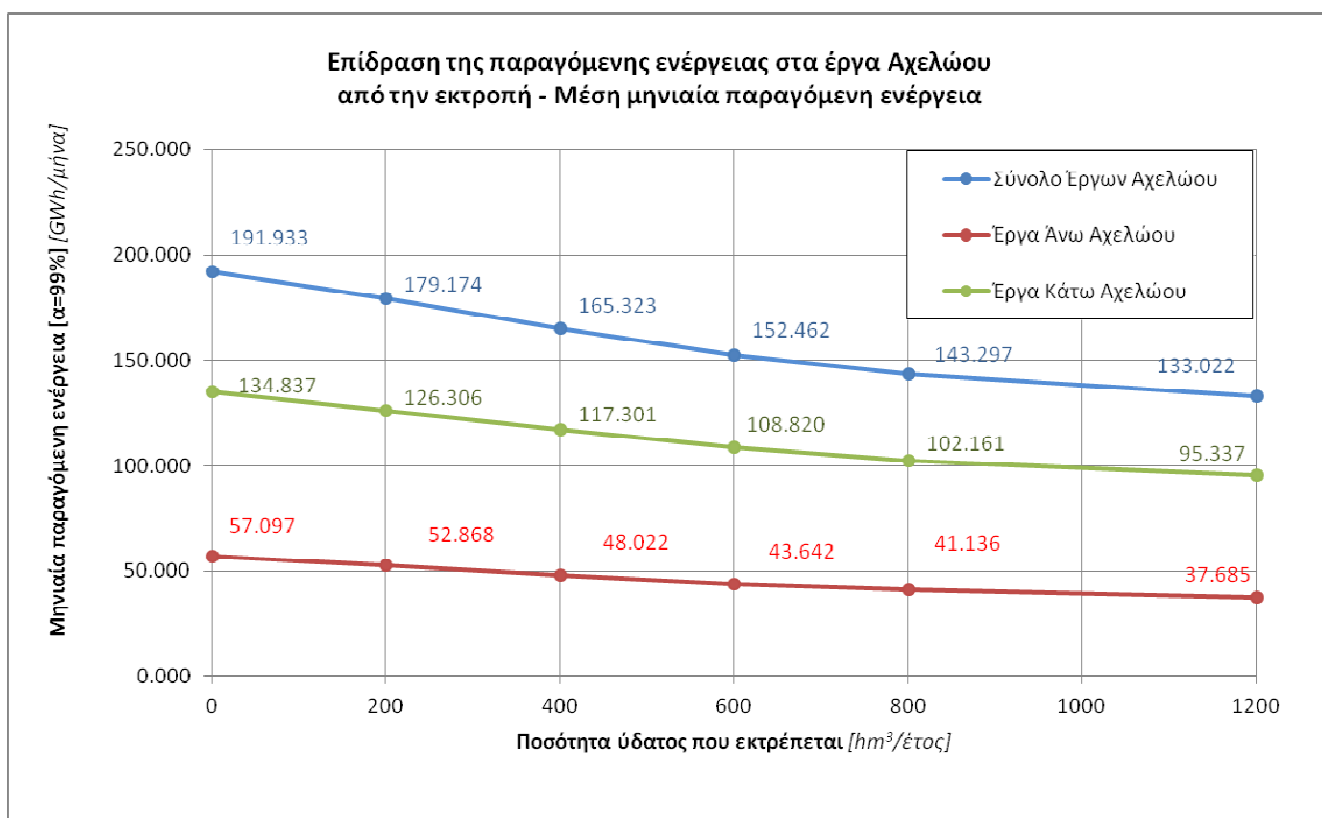
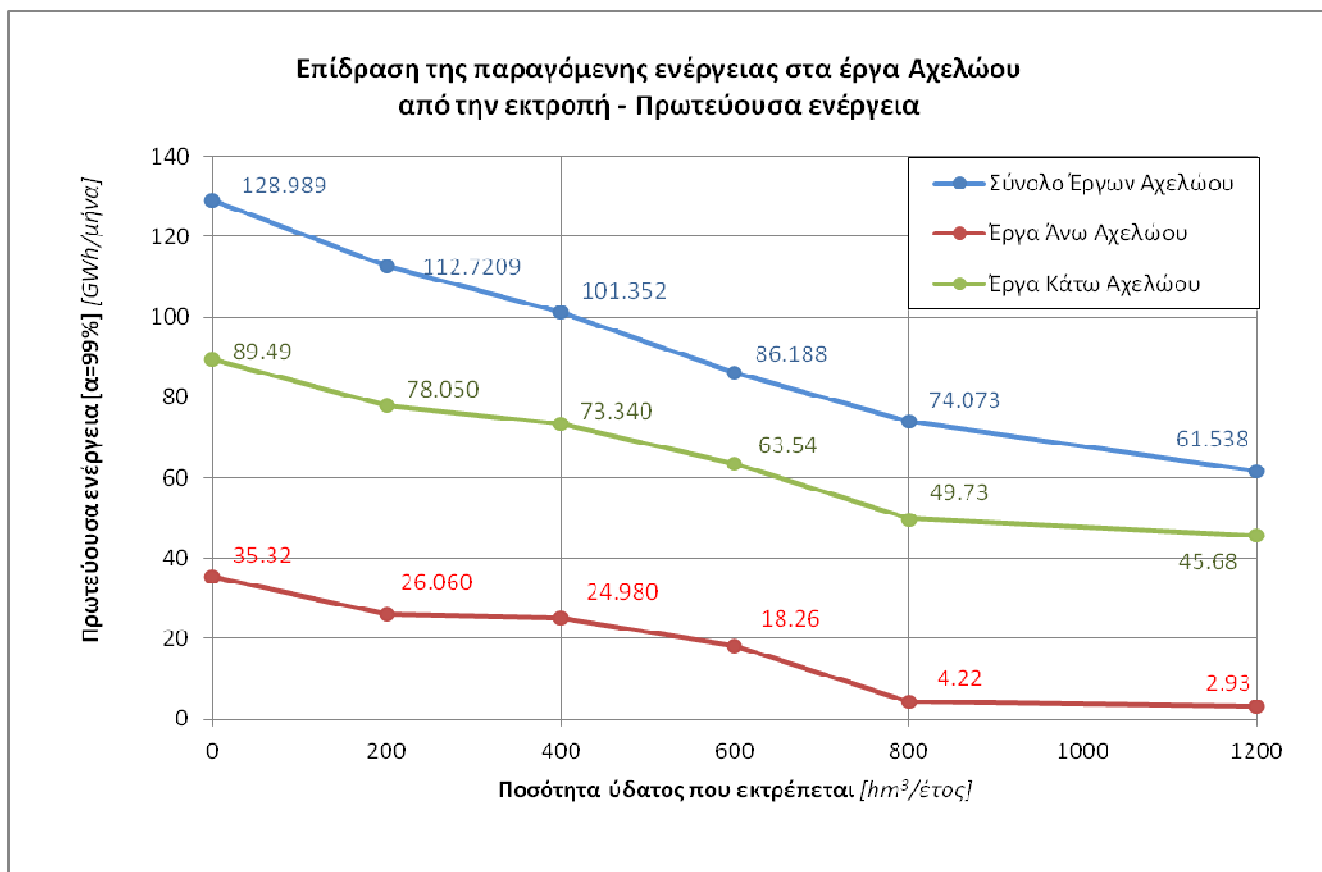
Αρχικά, κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης παρατηρήθηκε ότι για μεγάλες τιμές απολήψεων (600 hm³ και πάνω) ο στόχος εκτροπής δεν μπορούσε να καλυφθεί με αρκούντως μικρή πιθανότητα αστοχίας. Προκειμένου λοιπόν να δοθεί βαρύτητα και στην κάλυψη αυτού του στόχου, επαναλήφθηκαν οι βελτιστοποιήσεις με μία πολυκριτηριακή στοχική συνάρτηση, η οποία περιελάμβανε τα κριτήρια:

1. μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής (Total Generated Firm Power)
2. ελαχιστοποίησης της μέσης ετήσιας πιθανότητας αστοχίας για το στόχο της εκτροπής (Average Annual Failure Probability)

Η αναλογία βαρύτητας των κριτηρίων ήταν 1:2, δίνοντας περισσότερη έμφαση στην κάλυψη του αρδευτικού στόχου. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα φαίνονται στους εξής πίνακες και διαγράμματα (Πίνακες 8-3 και 8-4, Εικόνες 8-4 και 8-5).

| | | A/A Βελτιστοποίησης | 1 | 2 | 3 |
|--|--|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| | | Ποσότητα Εκτροπής [$hm^3/έτος$] | 0 | 200 | 400 |
| Ενεργειακοί Στόχοι [GWh] | Στράτος | | 8.36 | 11.68 | 9.01 |
| | Κρεμαστά | | 39.50 | 36.28 | 39.01 |
| | Καστράκι | | 35.45 | 7.48 | 13.53 |
| | Μεσοχώρα | | 16.69 | 17.99 | 15.40 |
| | Συκιά | | 23.27 | 17.36 | 11.75 |
| Αποτελέσματα πρωτεύουσας ενέργειας [$\alpha=99\%$] | Πρωτεύουσα ενέργεια Συστήματος [Gwh/μήνα] | | 128.99 | 112.72 | 101.35 |
| | Πρωτεύουσα ενέργεια κάτω Αχελώου [Gwh/μήνα] | | 89.49 | 78.05 | 73.34 |
| | Πρωτεύουσα ενέργεια άνω Αχελώου [Gwh/μήνα] | | 35.32 | 26.06 | 24.98 |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας συστήματος | | 0.00% | 12.61% | 21.43% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων κάτω Αχελώου | | 0.00% | 12.78% | 18.05% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων άνω Αχελώου | | 0.00% | 26.22% | 29.28% |
| Αποτελέσματα μέσης μηνιαίας ενέργειας | Μέση ετήσια ενέργεια Συστήματος [GWh/μήνα] | | 191.93 | 179.17 | 165.32 |
| | Μέση ετήσια ενέργεια κάτω Αχελώου [GWh/μήνα] | | 134.84 | 126.31 | 117.30 |
| | Μέση ετήσια ενέργεια άνω Αχελώου [GWh/μήνα] | | 57.10 | 52.87 | 48.02 |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας συστήματος | | 0.00% | 6.65% | 13.86% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων κάτω Αχελώου | | 0.00% | 6.33% | 13.01% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων άνω Αχελώου | | 0.00% | 7.41% | 15.89% |
| Ποσοστό αστοχίας περιβαλλοντικών / αρδευτικών Στόχων | Άρδευση Αιτωλοακαρνανίας | | 0.27% | 0.28% | 0.58% |
| | Περιβαλλοντική Εκροή | | 0.18% | 0.18% | 0.41% |
| | Περιβαλλοντική Εκροή Μεσοχώρας | | 0.22% | 0.26% | 0.13% |
| | Περιβαλλοντική Εκροή Κατάντη Συκιάς | | 0.07% | 0.10% | 0.20% |
| | Εκτροπή Αχελώου | | | 0.00% | 0.54% |

| | | A/A Βελτιστοποίησης | 4 | 5 | 6 |
|--|--|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| | | Ποσότητα Εκτροπής [$hm^3/έτος$] | 600 | 800 | 1200 |
| Ενεργειακοί Στόχοι [GWh] | Στράτος | | 7.72 | 8.08 | 3.24 |
| | Κρεμαστά | | 32.26 | 18.93 | 19.44 |
| | Καστράκι | | 4.24 | 7.72 | 7.01 |
| | Μεσοχώρα | | 16.67 | 23.51 | 13.53 |
| | Συκιά | | 6.20 | 1.50 | 0.00 |
| Αποτελέσματα πρωτεύουσας ενέργειας [$\alpha=99\%$] | Πρωτεύουσα ενέργεια Συστήματος [Gwh/μήνα] | | 86.19 | 74.07 | 61.54 |
| | Πρωτεύουσα ενέργεια κάτω Αχελώου [Gwh/μήνα] | | 63.54 | 49.73 | 45.68 |
| | Πρωτεύουσα ενέργεια άνω Αχελώου [Gwh/μήνα] | | 18.26 | 4.22 | 2.93 |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας συστήματος | | 33.18% | 42.57% | 52.29% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων κάτω Αχελώου | | 29.00% | 44.43% | 48.96% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων άνω Αχελώου | | 48.30% | 88.05% | 91.70% |
| Αποτελέσματα μέσης μηνιαίας ενέργειας | Μέση ετήσια ενέργεια Συστήματος [GWh/μήνα] | | 152.46 | 143.30 | 133.02 |
| | Μέση ετήσια ενέργεια κάτω Αχελώου [GWh/μήνα] | | 108.82 | 102.16 | 95.34 |
| | Μέση ετήσια ενέργεια άνω Αχελώου [GWh/μήνα] | | 43.64 | 41.14 | 37.68 |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας συστήματος | | 20.57% | 25.34% | 30.69% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων κάτω Αχελώου | | 19.30% | 24.23% | 29.29% |
| | Ποσοστό μείωσης ενέργειας έργων άνω Αχελώου | | 23.56% | 27.95% | 34.00% |
| Ποσοστό αστοχίας περιβαλλοντικών / αρδευτικών Στόχων | Άρδευση Αιτωλοακαρνανίας | | 0.19% | 0.00% | 0.00% |
| | Περιβαλλοντική Εκροή | | 0.13% | 0.00% | 0.00% |
| | Περιβαλλοντική Εκροή Μεσοχώρας | | 0.20% | 2.98% | 1.06% |
| | Περιβαλλοντική Εκροή Κατάντη Συκιάς | | 0.21% | 1.17% | 20.02% |
| | Εκτροπή Αχελώου | | 0.56% | 2.20% | 15.11% |



Εικόνες 8-4 και 8-5: Διαγράμματα μείωσης της πρωτεύουσας και της μέσης μηνιαίας ενέργειας για τα έργα του Αχελώου.

Από την ανάλυση προκύπτουν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

1. Για το σύνολο του χρόνου προσομοίωσης ο στόχος της εκτροπής επιτυγχάνεται με ιδιαίτερα μικρή πιθανότητα αστοχίας (0.56%) για την τιμή σχεδιασμού των 600 hm³. Επομένως, η διάταξη των έργων της εκτροπής μπορεί να εξασφαλίσει με ασφάλεια την ποσότητα εκτρεπόμενου ύδατος ακόμα και σε ιδιαίτερα ξηρές περιόδους.
2. Το σύνολο των περιβαλλοντικών περιορισμών επί του ρου του Αχελώου δύναται να καλυφθεί χωρίς σημαντικά ποσοστά αστοχίας για την τιμή των 600 hm³. Δεν αναμένονται επομένως επιπτώσεις στην περιβαλλοντική διαχείριση από την εκτροπή.
3. Το ποσοστό μείωσης της εξασφαλισμένης (πρωτεύουσας) ενέργειας από την εκτροπή των 600 hm³ νερού αποτιμάται στο 29% για τα έργα του κάτω Αχελώου, ήτοι 311.4 GWh ετησίως. Αντίστοιχα, η μείωση της μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας για τα έργα του κάτω Αχελώου είναι 19.3%, ήτοι 312.2 GWh ετησίως. Το αποτέλεσμα για τη μέση ετήσια ενέργεια είναι σύμφωνο με το αντίστοιχο παλαιότερης μελέτης (απώλεια 300 GWh ετησίως, Γεωργακάκος και συν. 1995).
4. Η ικανότητα παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας για τα έργα του άνω Αχελώου μειώνεται στο ήμισυ, κατά 204.7 GWh ετησίως, για ποσότητα εκτροπής 600 hm³ σε σχέση με τη μη-εκτροπή. Τα έργα αυτά πρακτικά παύουν να έχουν ικανότητα παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας για μεγαλύτερες ποσότητες εκτροπής.
5. Συνολικά, το σύστημα των υδροηλεκτρικών έργων του Αχελώου θα απολέσει το 33% της ικανότητας παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας, ήτοι 513.6 GWh ετησίως, με την εκτροπή των 600 hm³.

Άξιο αναφοράς είναι επίσης το γεγονός ότι για το σενάριο εκτροπής των 1200 hm³ η αστοχία κάλυψης του στόχου ήταν εύλογα πολύ υψηλή (15.11%), αλλά το μέσο ετήσιο έλλειμμα για την κάλυψη του αρδευτικού στόχου είναι 263.8 hm³ ετησίως. Αυτό σημαίνει πως η παρούσα διάταξη εκτροπής έχει δυναμική κάλυψης της τάξης των 900 hm³ ετησίως χωρίς σημαντική αστοχία.

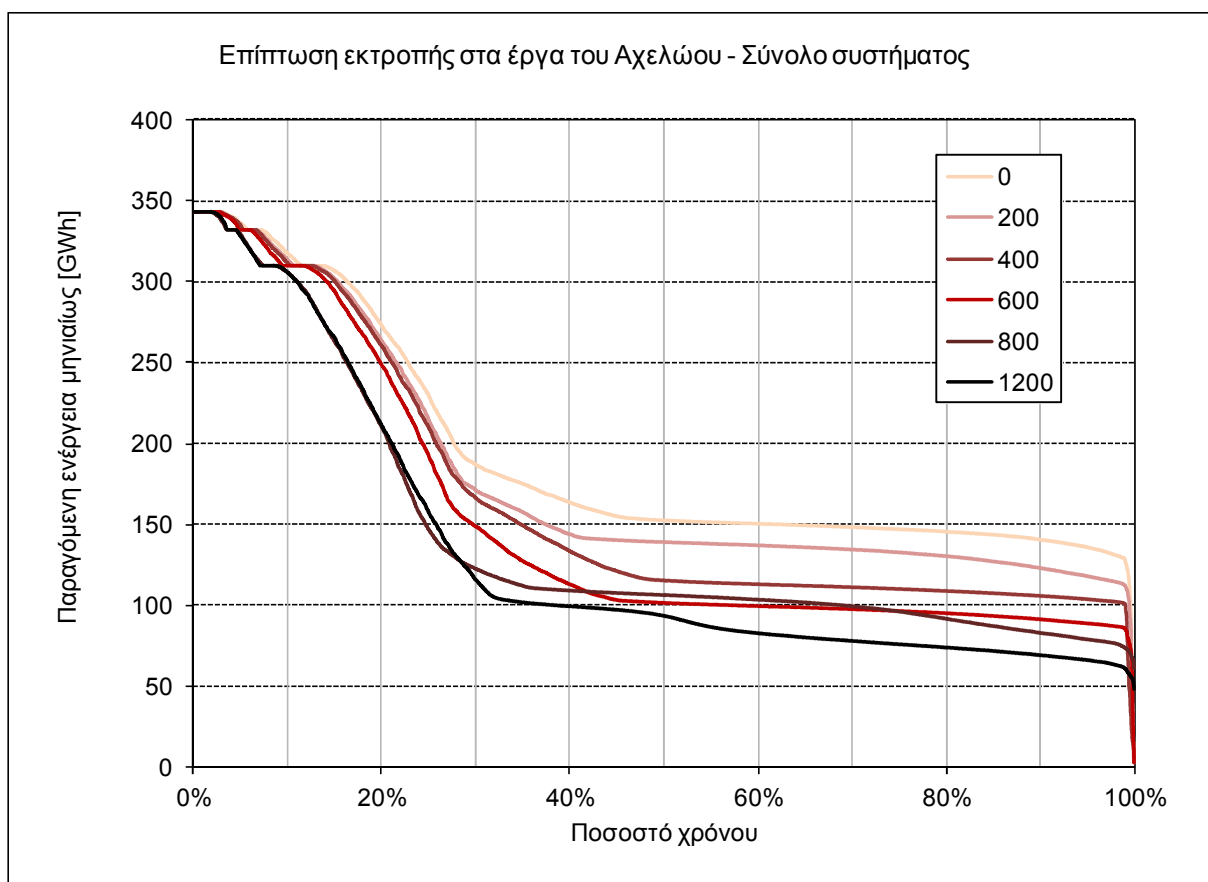
Σημειώνεται πάντως ότι στο σενάριο αυτό περιέχονται ορισμένες παραδοχές οι οποίες δεν σκιαγραφούν πλήρως τις προοπτικές της εκτροπής:

α.) Η προαναφερθείσα ενεργειακή απώλεια αφορά μόνο στα έργα του (κάτω ή άνω) Αχελώου. Στην περίπτωση ενιαίας διαχείρισης του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας ωστόσο, θα αντισταθμιστεί από τα υδροηλεκτρικά έργα της εκτροπής και συγκεκριμένα από τον ΥΗΣ Πευκοφύτου και το ΥΗΣ Μουζακίου. Τα μεγάλα ύψη πτώσης μάλιστα, εγγυώνται περιορισμό της απώλειας ενεργειακής παραγωγής ή και θετικό ενεργειακό ισοζύγιο αν τελικώς εγκατασταθούν διατάξεις άντλησης-ταμίευσης.

β.) Ακόμα και με απαίτηση εξόδου 600 hm³ προς τη Θεσσαλία (στη θέση Μαυροματίου), η πραγματική εκτρεπόμενη ποσότητα από τον Αχελώο θα είναι μικρότερη λόγω της ύπαρξης

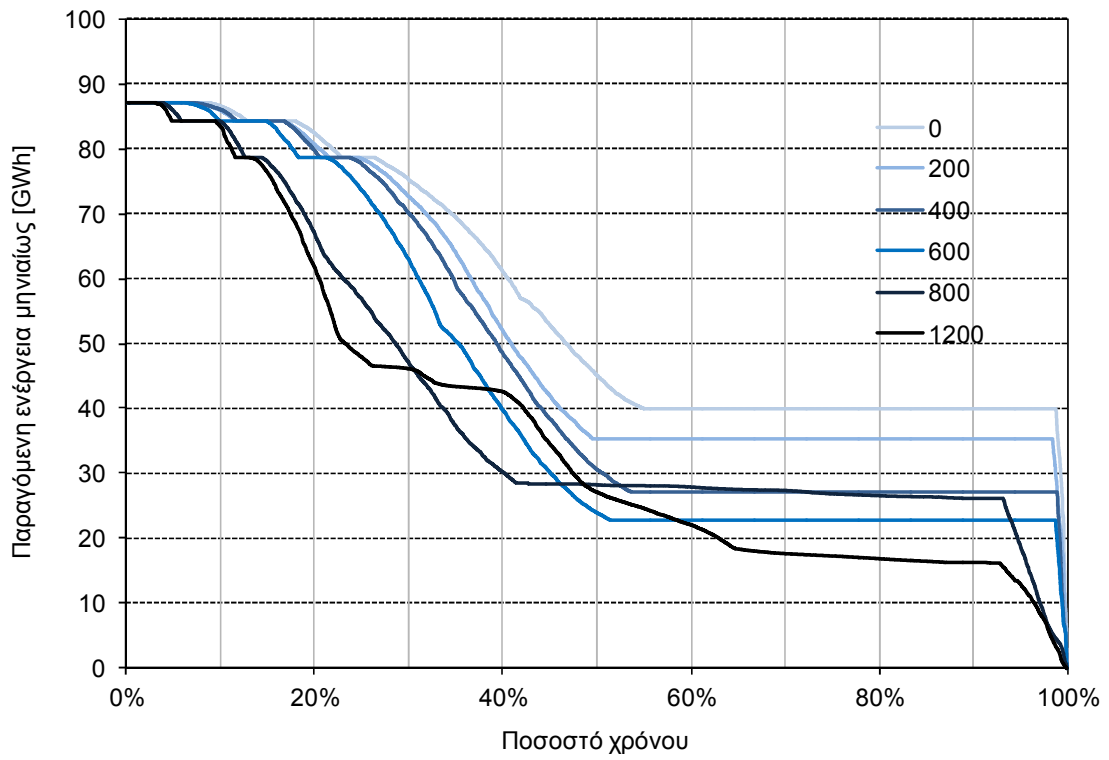
ταμιευτήρων στη Θεσσαλία (Πύλη και Μουζάκι), οι οποίοι έχουν συνδρομή στην κάλυψη της ζήτησης. Επίσης, λόγω της αποθηκευτικής ικανότητας των ταμιευτήρων αυτών αναμένεται μία εποχιακή ανακατανομή των ποσοτήτων εκτροπής, με το νερό να λαμβάνεται από τη Συκιά ορισμένους μήνες πριν από τη στιγμή που πραγματικά απαιτείται. Με αυτό τον τρόπο μετριάζονται οι συνέπειες στην ενεργειακή παραγωγή, ειδικά στους θερινούς μήνες οι οποίοι είναι και οι πιο κρίσιμοι.

Η συνολική προσομοίωση και βελτιστοποίηση του συστήματος για το σενάριο εκτροπής πραγματοποιείται στην ενότητα 8.4. Παρακάτω (Εικόνα 8-6) παρατίθενται και οι εικόνες ενεργειακής παραγωγής για όλες τις ποσότητες εκτροπής:

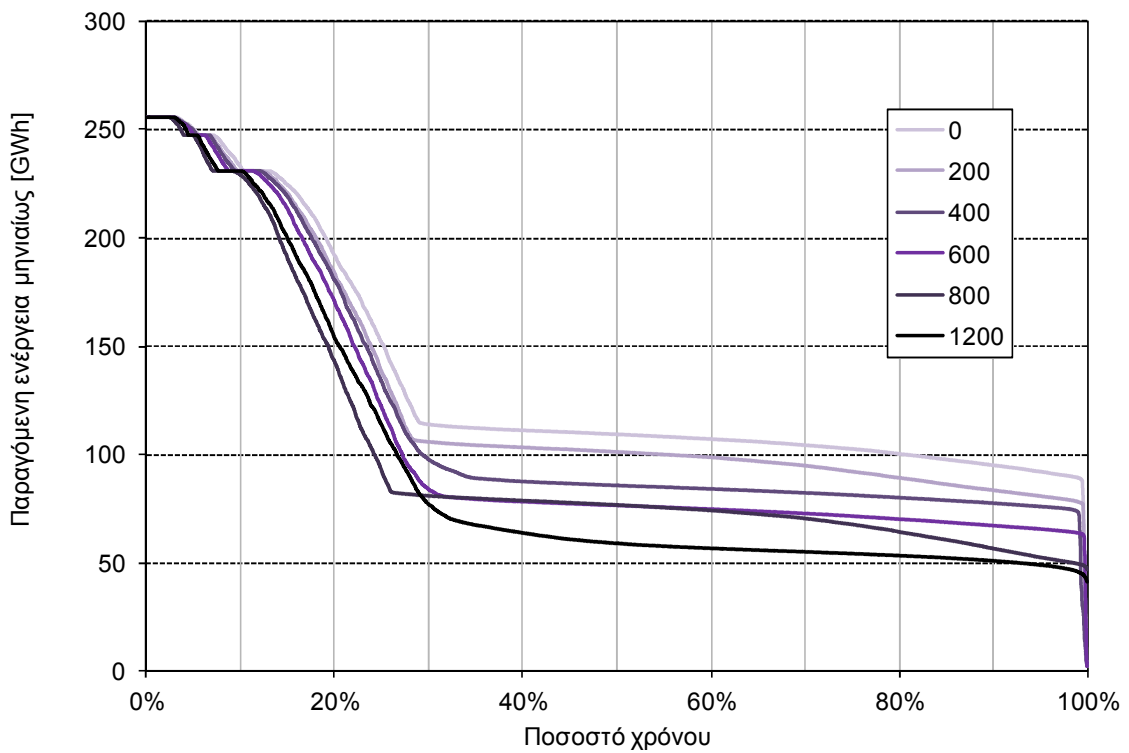


Εικόνα 8-6: Καμπύλες διάρκειας της ενεργειακής παραγωγής για όλες τις ποσότητες εκτροπής.

Επίπτωση εκτροπής στα έργα του Αχελώου - Έργα άνω Αχελώου



Επίπτωση εκτροπής στα έργα του Αχελώου - Έργα Κάτω Αχελώου



8.4. Διερεύνηση των διατάξεων εκτροπής

8.4.1. Εφαρμογές στα σενάρια εκτροπής

Τα σχετικά με την εκτροπή σενάρια προσφέρονται για τη σύνθετη εφαρμογή των συναρτήσεων που μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μιας και συνδυάζουν τους αντικρουόμενους στόχους (ενεργειακή παραγωγή και αρδευτική ζήτηση) με την πολυπλοκότητα της τοπολογίας και τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής μέσω των διατάξεων άντλησης – ταμίευσης. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διερευνώνται οι εξής τρεις εφαρμογές των συναρτήσεων για τα σενάρια εκτροπής:

- α.) Διερεύνηση των μέγιστων δυνατοτήτων άντλησης, εφ' όσον καλύπτεται επαρκώς ο στόχος άρδευσης με στόχο τη μεγιστοποίηση της πρωτεύουσας ενεργειακής παραγωγής
- β.) Μεγιστοποίηση του ενεργειακού οφέλους του υδροσυστήματος.
- γ.) Μεγιστοποίηση του μικτού (ενεργειακού και αρδευτικού) οφέλους του υδροσυστήματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις ο στόχος άρδευσης της Θεσσαλίας (έξοδος Μαυροματίου) τέθηκε σταθερός και ίσος με 600 hm^3 ετησίως. Για την πρώτη εφαρμογή, επειδή σκοπός είναι η εύρεση της μέγιστης δυνατής απόδοσης που μπορεί να έχει η διάταξη άντλησης-ταμίευσης, δεν προσμετρήθηκε το (οικονομικό ή ενεργειακό) κόστος άντλησης ως παράγοντας προς βελτιστοποίηση. Έτσι, στο σύστημα θεωρείται ότι παρέχεται ενέργεια άντλησης σε αφθονία και διερευνάται η μέγιστη δυνατότητα άντλησης ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί η πρωτεύουσα ενεργειακή παραγωγή χωρίς ωστόσο να διαταράσσεται η ασφαλής κάλυψη της αρδευτικής ζήτησης. Χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο η Total Generated Firm Power, η οποία συμπληρώνεται από ένα κριτήριο διατήρησης της αστοχίας του στόχου άρδευσης στη Θεσσαλία σε χαμηλά επίπεδα. Οι πρώτες δοκιμές έδειξαν ότι το κριτήριο μέσης ετήσιας πιθανότητας αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 8.3 δεν παρουσίαζε την απαιτούμενη ελαστικότητα, μιας και θεωρούσε ως αστοχία ακόμα και πολύ μικρές αδυναμίες κάλυψης του στόχου εκτροπής (της τάξης των $1-2 \text{ hm}^3$ ετησίως) με συνέπεια να μη μπορεί να μειωθεί πέρα από ένα βαθμό. Για το λόγο αυτό, ως συμπληρωματικό κριτήριο τέθηκε τελικά το μέσο ετήσιο έλλειμμα (Average Annual Deficit) του στόχου άρδευσης της Θεσσαλίας. Ο συνδυασμός αυτού του κριτηρίου με το ενεργειακό έγινε με βαρύτητα 1:1 και οι δοκιμαστικές βελτιστοποιήσεις έδειξαν ότι ήταν επιτυχημένος, καθώς έφθανε σε πολύ χαμηλές τιμές μέσου ετήσιου ελλείμματος (μικρότερες του 1 hm^3). Η προσομοίωση μάλιστα έδειξε ότι η αστοχία άρδευσης υπολογισμένη στο σύνολο των χρονικών βημάτων με αυτό το στόχο ήταν εν τέλει πολύ χαμηλή, κάτω του 1% σε όλες τις περιπτώσεις.

Για τη δεύτερη και τρίτη εφαρμογή προσμετρήθηκε το κόστος άντλησης (με την τιμή που αναφέρεται στην παράγραφο 6.8). Η κύρια συνάρτηση κόστους/οφέλους που

χρησιμοποιήθηκε είναι η Total Cost/Benefit of the System ως μία πιο γενική συνάρτηση κόστους/οφέλους που καλύπτει και το αντλητικό κόστος (κάτι τέτοιο δεν θα ήταν δυνατό με την Total Benefit for Fulfilling Targets).

Όσον αφορά στη διατήρηση της αστοχίας του στόχου άρδευσης σε χαμηλά επίπεδα, στη δεύτερη εφαρμογή εφαρμόστηκε το συμπληρωματικό κριτήριο μέσου ετησίου ελλείμματος (Average Annual Deficit) με την ίδια αναλογία όπως προηγουμένως. Η τρίτη εφαρμογή, ωστόσο, προϋποθέτει την εισαγωγή του μοναδιαίου οφέλους και της μοναδιαίας ποινής για το στόχο άρδευσης της Θεσσαλίας (σύμφωνα με τις τιμές της παραγράφου 6.8). Κατά συνέπεια, είναι δυνατή η εκτέλεση βελτιστοποιήσεων μόνο με το κριτήριο Cost/Benefit of the System, καθώς η διαδικασία μπορεί να οδηγηθεί από μόνη της στην εύρεση μίας αστοχίας κάλυψης του στόχου άρδευσης (κατ' αντιστοιχία με την αξιοπιστία της ενεργειακής παραγωγής), η οποία απορρέει από τη σχέση προσδοκώμενου οφέλους από την κάλυψη προς την ποινή του ελλείμματος που ενεργοποιείται με κάθε αστοχία. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τριών εφαρμογών δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 8-5):

Πίνακας 8-5: Συνοπτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των εφαρμογών βελτιστοποίησης.

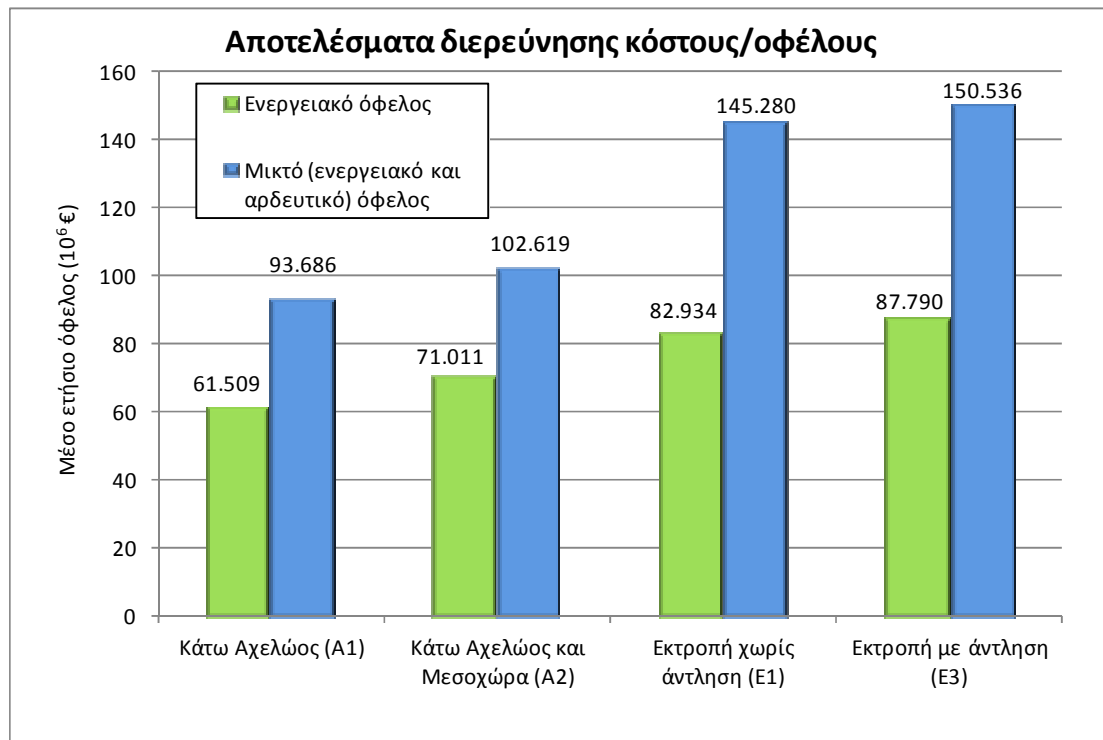
| | | α | β | γ |
|--------------------------|---|-------------------------------|----------------------------------|---|
| Ζητούμενο | | Εκτίμηση δυνατοτήτων άντλησης | Υπολογισμός ενεργειακού οφέλους | Υπολογισμός μικτού οφέλους (ενέργεια + άρδευση) |
| Σενάρια | | E1,E2,E3 | E1,E3 | E1,E3 |
| Κριτήρια βελτιστοποίησης | Βασική Συνάρτηση | Total Generated Firm Power x1 | Total Cost/Benefit of the System | Total Cost/Benefit of the System |
| | Συμπληρωματικό Κριτήριο (ελαχ. αστοχίας άρδευσης Θεσσαλίας) | Average Annual Deficit x1 | Average Annual Deficit x1 | - |

8.4.2. Αποτελέσματα εφαρμογών

Τα αποτελέσματα των εφαρμογών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, μαζί με αντίστοιχα αποτελέσματα βελτιστοποιήσεων των σεναρίων του Αχελώου για λόγους σύγκρισης.

Ιδιαίτερα σημαντικά είναι τα αποτελέσματα της διερεύνησης κόστους/οφέλους για τα σενάρια εκτροπής E1 και E3 (εφαρμογές (β) και (γ)) σε σύγκριση με τα σενάρια A1 και A2 (Εικόνα 8-7). Παρατηρείται ότι η ενεργειακή αξιοποίηση του υδροσυστήματος με τη συμβατική διάταξη εκτροπής (Σενάριο E1) ανέρχεται στα 83 εκατ. €/έτος, ενώ υπάρχει περιθώριο περαιτέρω αύξησης κατά 5 εκατ. €/έτος με τη χρήση αντλιοστροβίλων. Το περιθώριο αύξησης είναι μικρό λόγω της θεώρησης μάλλον συντηρητικού κόστους άντλησης το οποίο ανέρχεται στα επίπεδα του οφέλους της δευτερεύουσας ενέργειας (0.022 €/kWh) και ενδέχεται να είναι μεγαλύτερο σε επιχειρησιακό επίπεδο. Η βελτιστοποίηση με θεώρηση

μικτού (ενεργειακού και αρδευτικού) οφέλους ανεβάζει το κέρδος από τη διαχείριση του υδροσυστήματος στα 150.5 εκατ. € ετησίως (Εικόνα 8-7) ενώ, όπως αποδείχθηκε και μετά το πέρας των βελτιστοποιήσεων, οδηγεί σε πολύ μικρές αστοχίες για τους στόχους άρδευσης (Πίνακας 8-6), αντίστοιχες με αυτές των άλλων εφαρμογών όπου η αστοχία διατηρήθηκε μικρή με πρόσθετο κριτήριο. Συμπεραίνεται επομένως ότι η Total Cost/Benefit ενοποιεί με αποτελεσματικότητα διαφορετικές κατηγορίες αντικρουόμενων στόχων σε ένα καθολικό κριτήριο (εφ' όσον αυτοί τεθούν με οικονομικές παραμέτρους) και οδηγεί σε ασφαλείς καλύψεις αναγκών αναλόγως της οικονομικής βαρύτητας κάθε στόχου.



Εικόνα 8-7: Αποτελέσματα της διερεύνησης κόστους/οφέλους για το ενεργειακό και το μικρό όφελος.

Πίνακας 8-6: Αποτελέσματα της εφαρμογής (γ) για τις αστοχίες άρδευσης.

| Εφαρμογή (γ) - Βελτιστοποίηση με την Total Cost/Benefit of the System Θεώρηση μικτού οφέλους | Κάτω Αχελώος (A1) | Κάτω Αχελώος και Μεσοχώρα (A2) | Εκτροπή χωρίς άντληση (E1) | Εκτροπή με άντληση (E3) |
|---|-------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Τιμή στοχ. συνάρτησης [10 ⁶ €/έτος] | 93.686 | 102.619 | 145.280 | 150.536 |
| Αστοχία άρδευσης Αιτωλοακαρνανίας | 0.34% | 0.16% | 0.24% | 0.00% |
| Αστοχία άρδευσης Θεσσαλίας | - | - | 0.18% | 0.32% |

Η σειρά βελτιστοποιήσεων με τη συνάρτηση Total Generated Firm Power (εφαρμογή (α)) επιτρέπει την καταγραφή της εξέλιξης της ενεργειακής παραγωγής για τα διάφορα σενάρια μελέτης. Στην Εικόνα 8-8 που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων από όλα τα σενάρια μελέτης (ακόμα και τα ενδιάμεσα A3 και E2) για βελτιστοποιήσεις με τη συνάρτηση ενέργειας και αξιοπιστία $\alpha=99\%$. Παρατηρείται ότι η

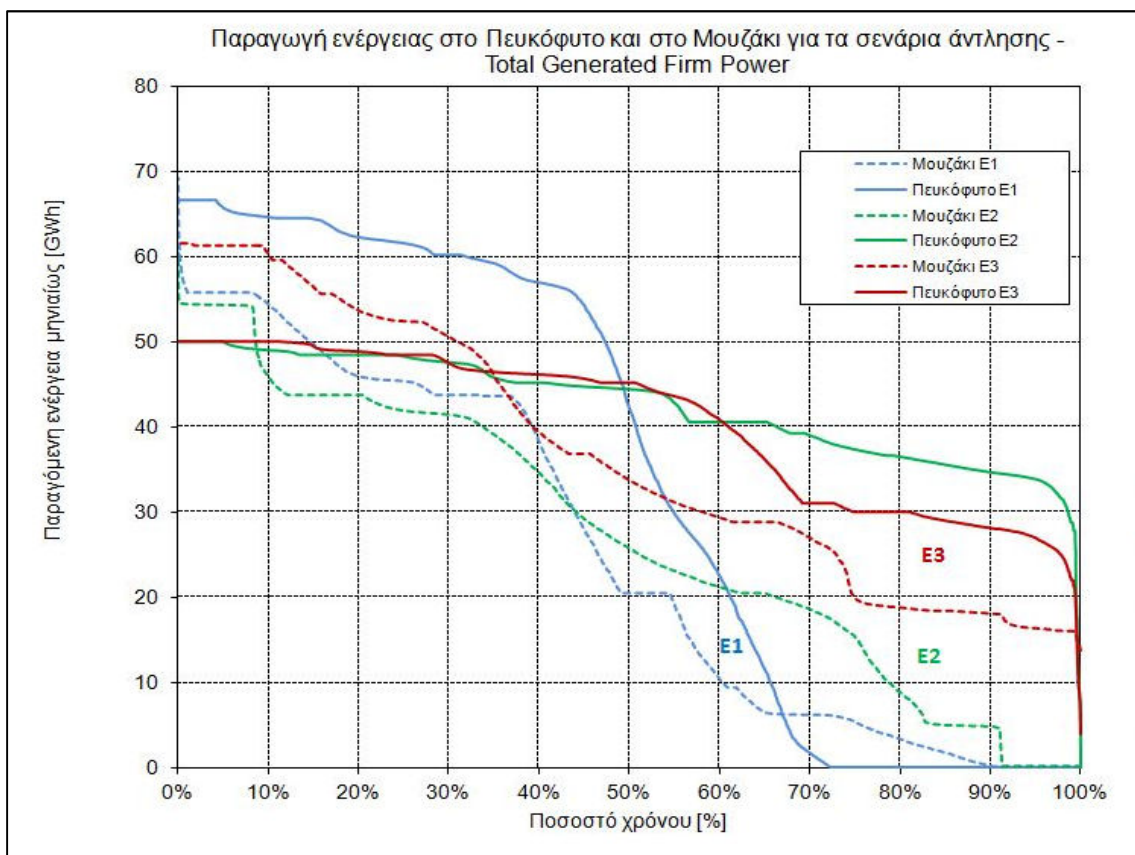
συμβατική διάταξη εκτροπής (χωρίς άντληση-ταμίευση) θα μειώσει την εγγυημένη ενεργειακή παραγωγή κατά περίπου 30% (όπως είχε παρατηρηθεί και στη διερεύνηση του Σεναρίου A3). Ωστόσο, η εικόνα της ενεργειακής παραγωγής αντιστρέφεται πλήρως εάν χρησιμοποιηθούν αντλιοστρόβιλοι. Και μόνο η χρήση του ΥΗΣ Πευκοφύτου ως αντλιοστρόβιλου (Σενάριο E2) αυξάνει την πρωτεύουσα ενεργειακή παραγωγή στα επίπεδα που θα είχε το υδροσύστημα του Αχελώου με την προσθήκη της Μεσοχώρας και της Συκιάς. Επιπλέον, η λειτουργία του υδροσυστήματος με την πλήρη διάταξη άντλησης-ταμίευσης (Σενάριο E3) θα αυξήσει περαιτέρω την πρωτεύουσα ενέργεια στις 147 GWh το μήνα. Αυτό σημαίνει ότι η διάταξη της εκτροπής του Αχελώου με άντληση-ταμίευση επιτρέπει τόσο την ασφαλή κάλυψη των αρδευτικών ζητήσεων σε Αιτωλοακαρνανία και Θεσσαλία όσο και την παραγωγή 1760 GWh ετησίως.



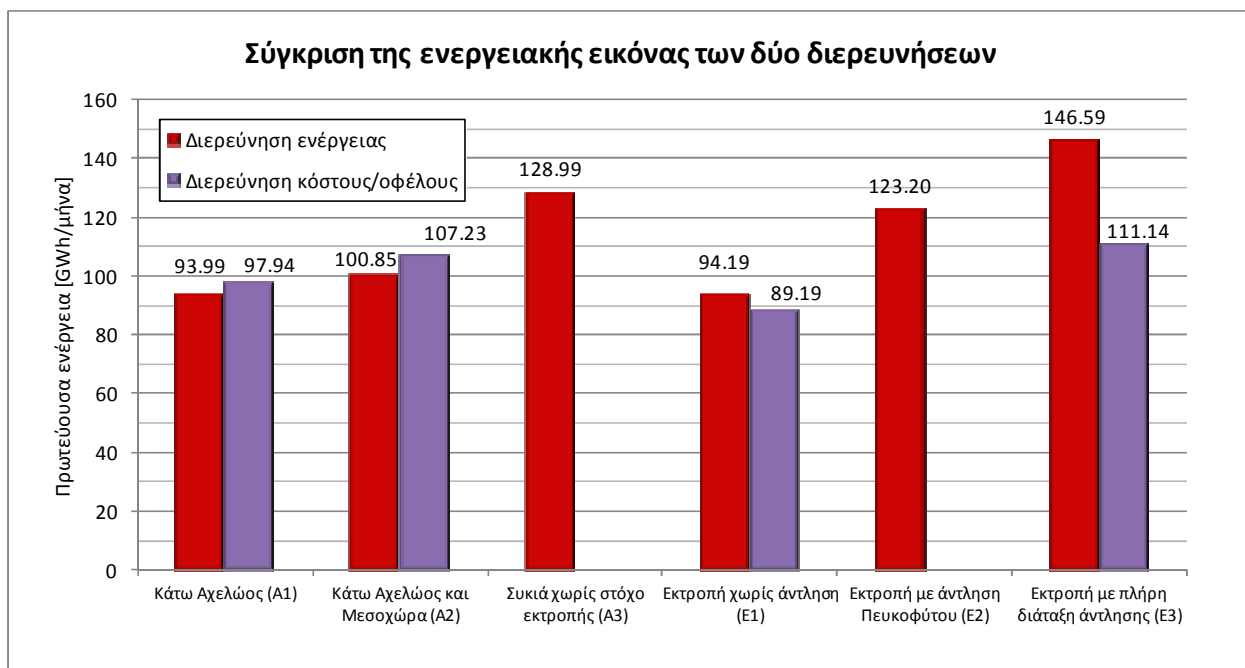
Εικόνα 8-8: Γενική εικόνα της παραγωγής ενέργειας για τα διάφορα σενάρια μελέτης.

Η σημαντική αύξηση της πρωτεύουσας ενεργειακής παραγωγής έγκειται στην αλλαγή της δυναμικής των ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου, όπου προβλέπεται η εγκατάσταση αντλιοστροβίλων. Στην παρακάτω Εικόνα 8-9 των σχετικών καμπυλών διάρκειας φαίνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της ενεργειακής συνάρτησης (εφαρμογή (α)) για τα τρία σενάρια εκτροπής E1, E2, E3. Παρατηρείται η διαμόρφωση μίας εικόνας σταθερής ενεργειακής παραγωγής σε κάθε έργο στο οποίο προβλέπεται να εγκατασταθεί αντλιοστρόβιλος. Έτσι, η λειτουργία άντλησης-ταμίευσης επιτρέπει την παράλληλη ασφαλή κάλυψη του σημαντικού αρδευτικού στόχου στη Θεσσαλία και τη σταθερή μηνιαία ενεργειακή παραγωγή στο υδροσύστημα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η αντιπαράβολή της γενικής εικόνας υδροηλεκτρικής παραγωγής για τις παραπάνω επιλύσεις με την αντίστοιχη εικόνα που προκύπτει από τις επιλύσεις με τη συνάρτηση κόστους-οφέλους. Όπως προαναφέρθηκε, η συνάρτηση κόστους-οφέλους οδηγεί σε πιο συντηρητικές λύσεις άντλησης λόγω της συμπερίληψης του κόστους αντλήσεως στη βελτιστοποίηση. Στην Εικόνα 8-10 αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών (α) και (β), δηλαδή των βελτιστοποιήσεων με την ενεργειακή συνάρτηση και τη συνάρτηση κόστους/οφέλους αντίστοιχα. Τονίζεται ότι η εγγυημένη ενέργεια που παρουσιάζεται στο γράφημα αντιστοιχεί σε διαφορετικό επίπεδο αξιοπιστίας, μιας και η σειρά βελτιστοποιήσεων με την Total Generated Firm Power έγινε με δεδομένη αξιοπιστία 99%, ενώ η σειρά βελτιστοποιήσεων με την Total Cost/Benefit of the System οδηγεί στην εύρεση της χαρακτηριστικής αξιοπιστίας για το σύστημα στα επίπεδα του 98% κατά μέσο όρο.



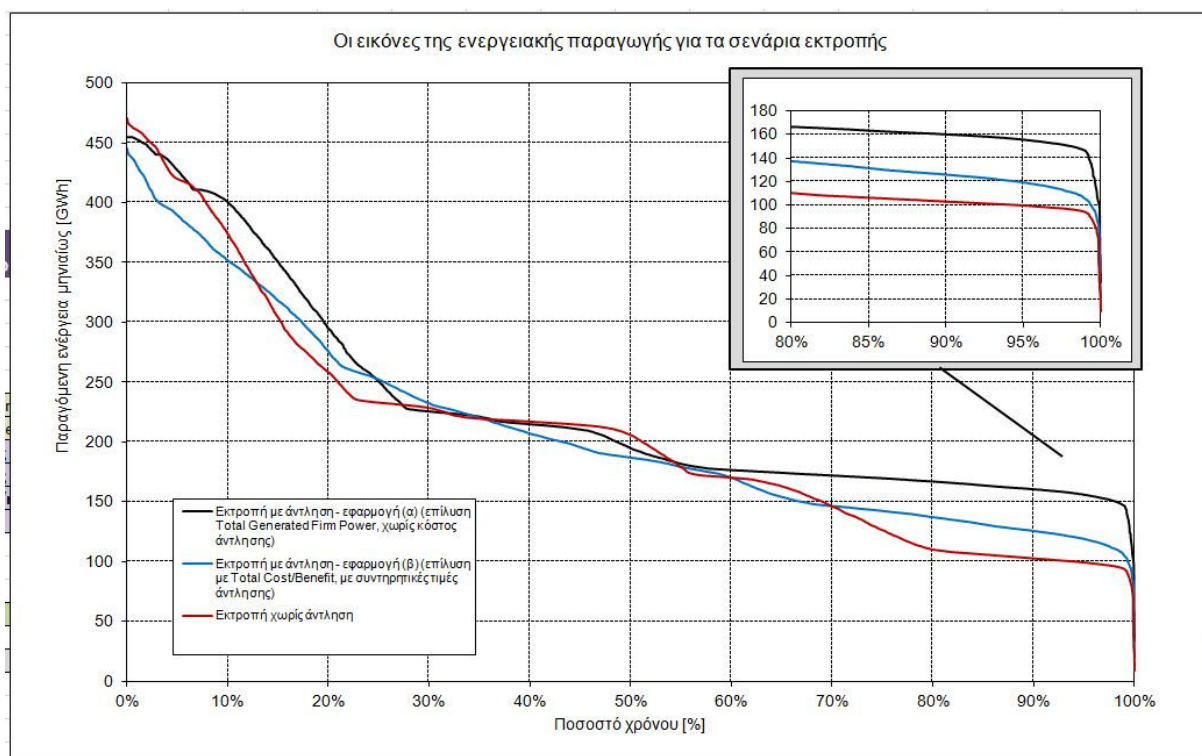
Εικόνα 8-9: Παραγωγή ενέργειας στον ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου – εφαρμογή (α)



Εικόνα 8-10: Σύγκριση της ενεργειακής παραγωγής για τις εφαρμογές (α) και (β)

Λόγω του συνυπολογισμού του κόστους άντλησης η πρωτεύουσα ενεργειακή παραγωγή για τη διάταξη άντλησης-ταμίευσης (Σενάριο E3) είναι σαφώς πιο συντηρητική, φτάνοντας τις 111 GWh το μήνα. Και πάλι όμως σημειώνει σημαντική αύξηση κατά 25% σε σχέση με τη συμβατική διάταξη εκτροπής.

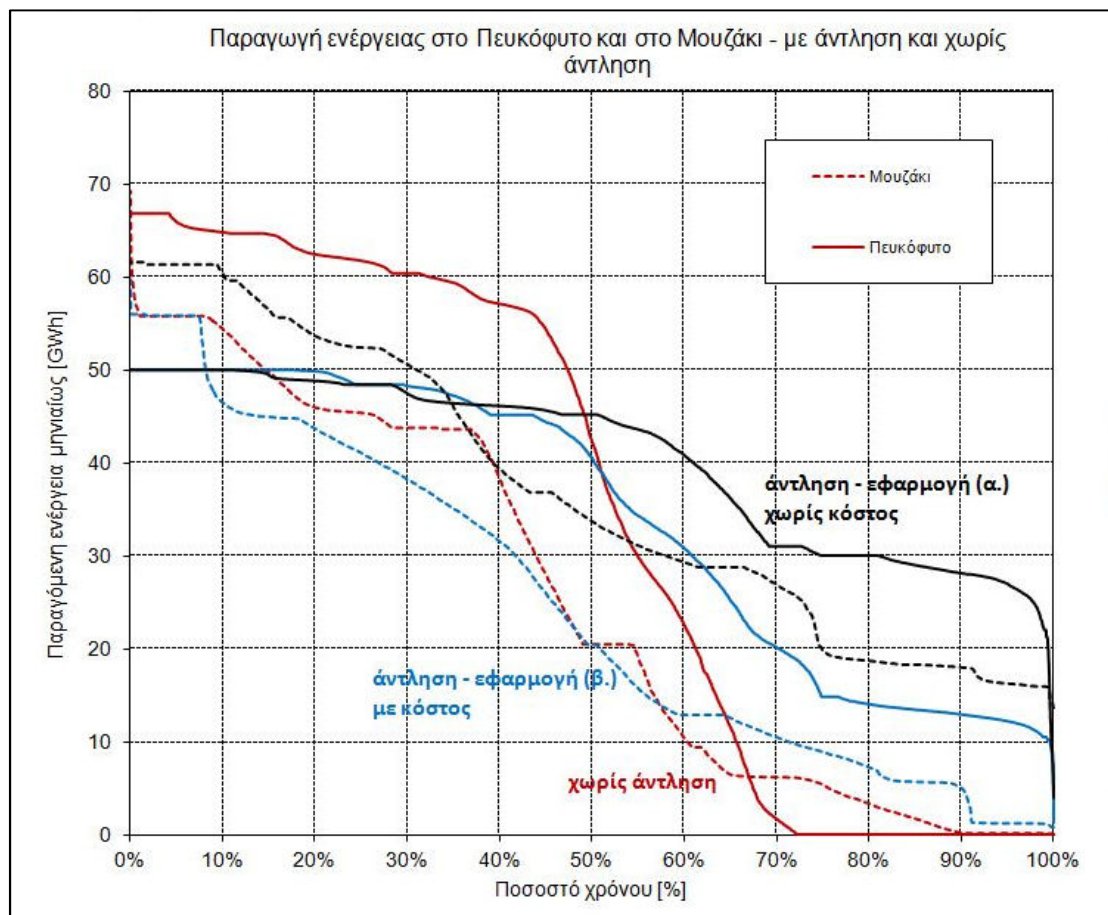
Πλήρης εικόνα της ενεργειακής παραγωγής δίνεται μέσω των καμπυλών διάρκειας που φαίνονται στην Εικόνα 8-11. Στις επιλύσεις του τελικού σεναρίου άντλησης-ταμίευσης E3 (εφαρμογή (α) και (β)) αντιπαραβάλλεται επίλυση της συμβατικής διάταξης εκτροπής χωρίς άντληση (Σενάριο E1) με τη συνάρτηση Total Generated Firm Power. Παρατηρείται ότι το υδροσύστημα έχει πολύ σημαντικές δυνατότητες αύξησης της πρωτεύουσας ενεργειακής παραγωγής με την εγκατάσταση αντλιοστροβίλων στον ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου.



Εικόνα 8-11: Καμπύλες διάρκειας του συστήματος για τις εφαρμογές (α) και (β)

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η ραγδαία αλλαγή της εικόνας της ενεργειακής παραγωγής στον ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου αν σε αυτούς εγκατασταθούν αντλιοστρόβιλοι. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8-12, η συμβατική εικόνα ενεργειακής παραγωγής χωρίς άντληση-ταμίευση συνίσταται εξ' ολοκλήρου σε δευτερεύουσα ενέργεια και για τις δύο διατάξεις, διότι παράγεται ενέργεια μόνο κατά τους μήνες που καλύπτεται ο αρδευτικός στόχος. Αντιθέτως, η εικόνα αλλάζει θεαματικά αν εγκατασταθούν αντλιοστρόβιλοι, με τους ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου να αποκτούν τη δυνατότητα μέγιστης παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας 28 GWh/μήνα και 17 GWh/μήνα αντίστοιχα, ενώ παράλληλα καλύπτεται με ασφάλεια η αρδευτική ζήτηση. Ο περιορισμός κόστους θα οδηγήσει βέβαια σε λύσεις μικρότερης δυναμικότητας, όπως στην εφαρμογή (β.), με το Πευκόφυτο ωστόσο να διατηρεί σημαντική πρωτεύουσα παραγωγή άνω των 10 GWh/μήνα.

Σημειώνεται ότι σε όλες τις παραπάνω επιλύσεις η αστοχία των αρδευτικών στόχων Αιτωλοακαρνανίας και Θεσσαλίας δεν ξεπέρασε σε καμία περίπτωση το 1%, με μέση τιμή το 0.34%. Ακόμη, εντός λογικών πλαισίων (<2%) ήταν και οι αστοχίες των περιβαλλοντικών περιορισμών. Τα μικρά ποσοστά αστοχιών αποτελούν ένδειξη σωστής ιεράρχησης των ποικίλων αντικρουόμενων στόχων από την πλευρά του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.



Εικόνα 8-12: Παραγωγή ενέργειας στον ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου για τις εφαρμογές (α) και (β)

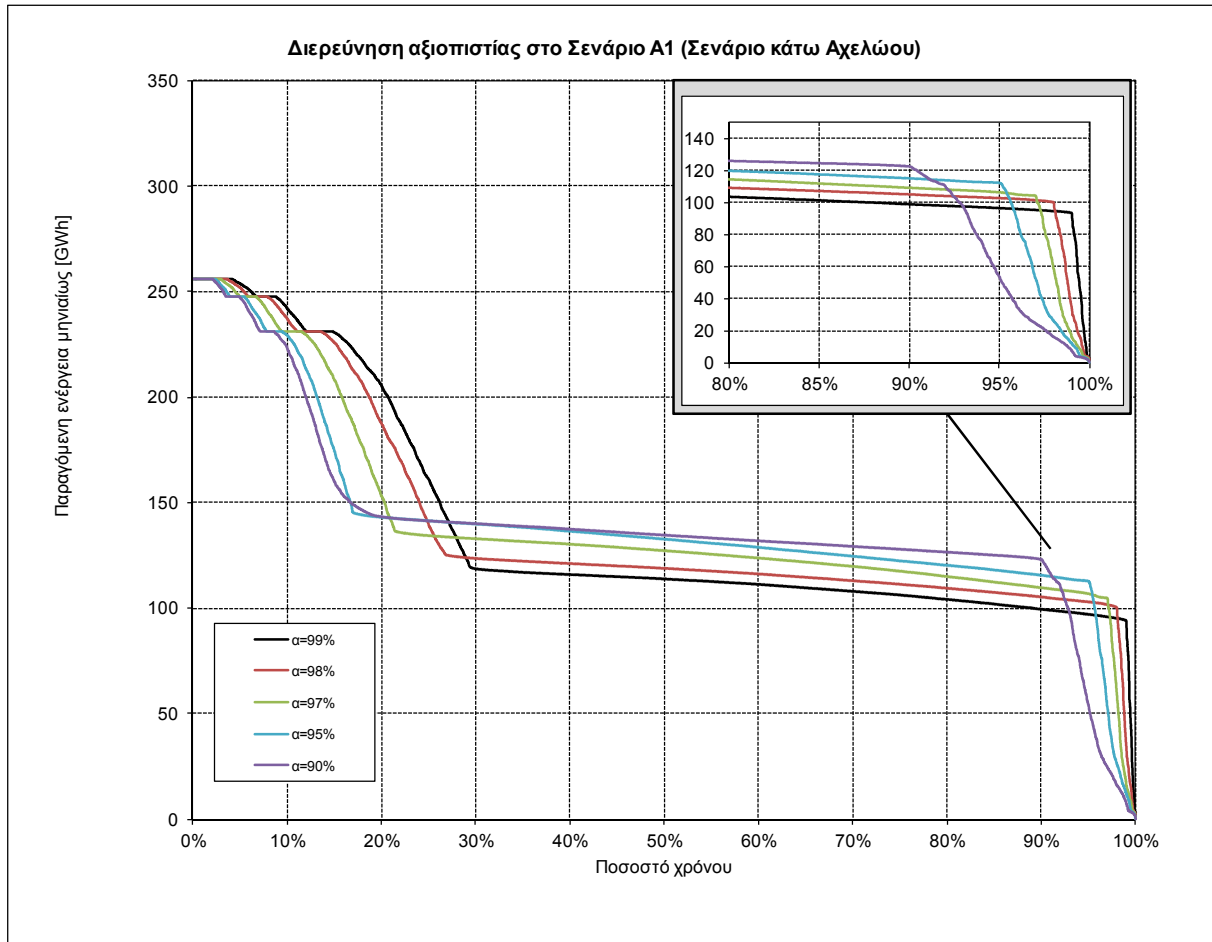
8.5. Εύρος αξιοπιστίας για τα κυριότερα σενάρια

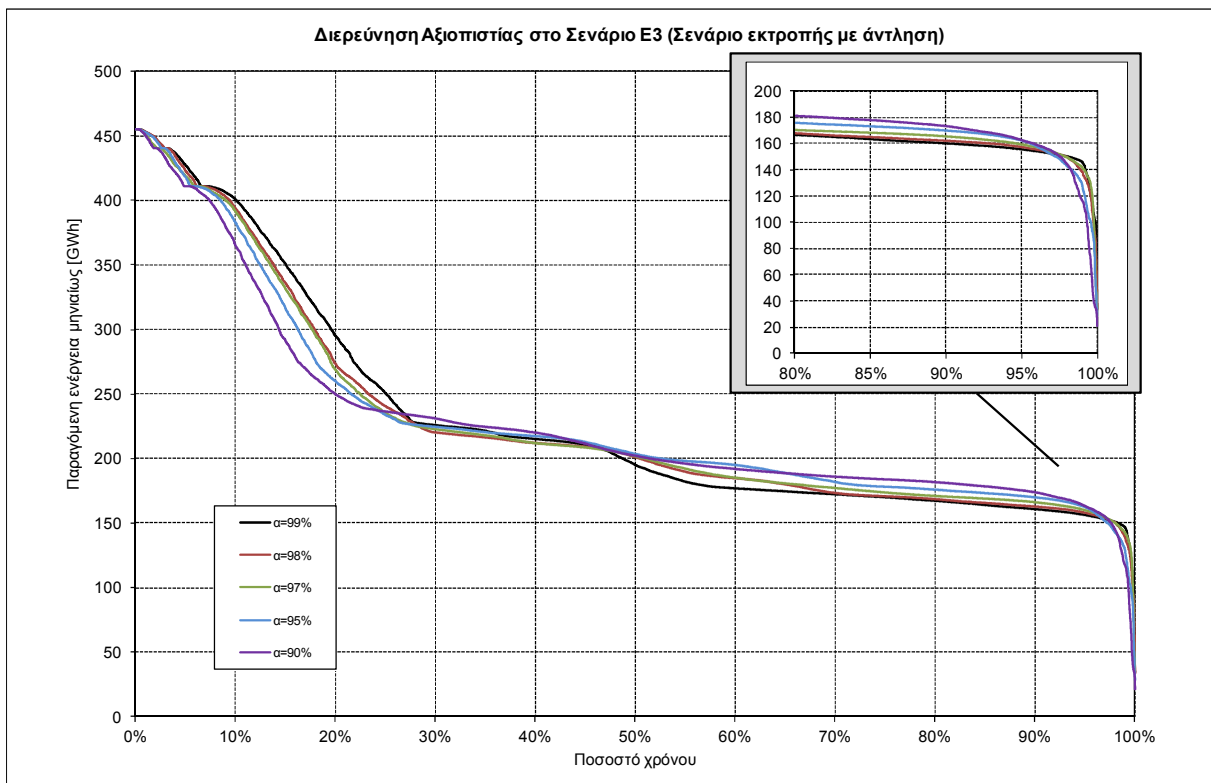
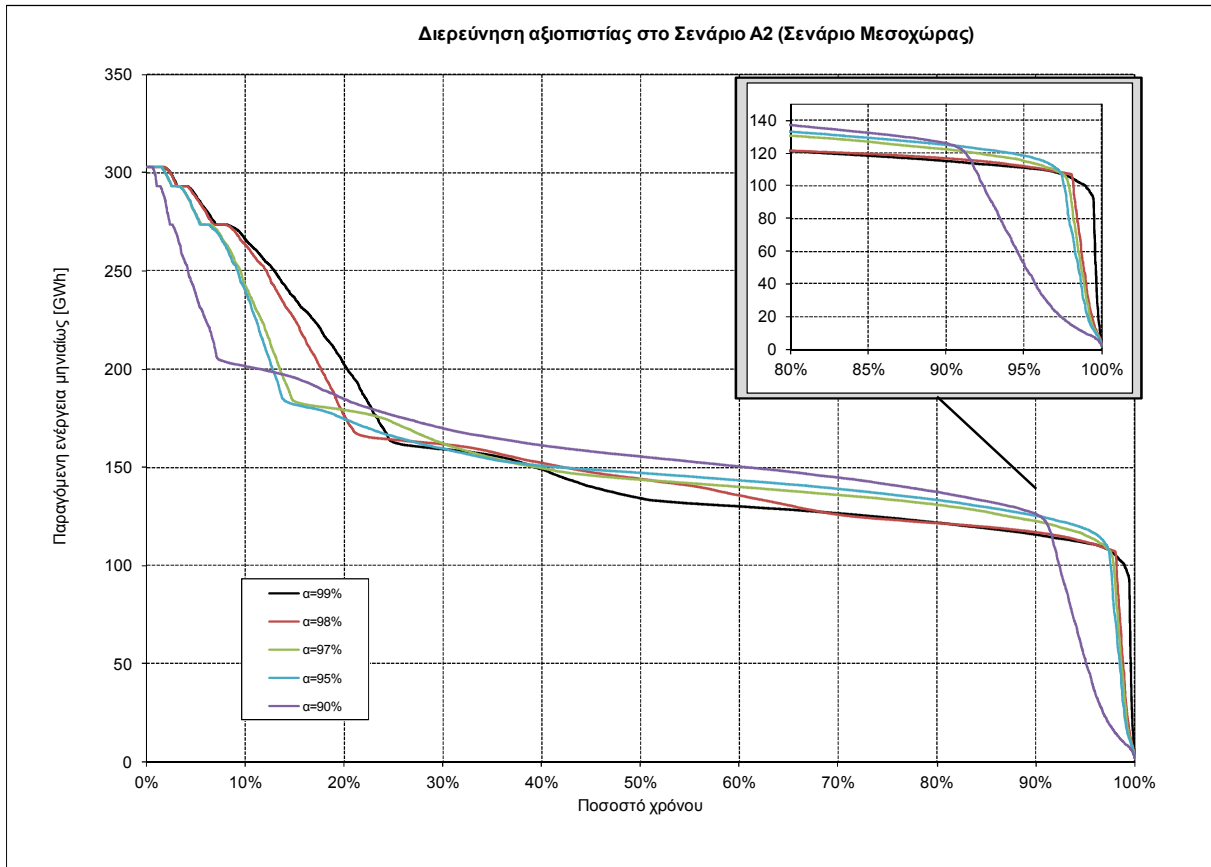
Η συνάρτηση Total Generated Firm Power δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για διαφορετικές τιμές αξιοπιστίας α . Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας γίνεται διερεύνηση της επίπτωσης που έχει η εκλογή διαφορετικής αξιοπιστίας από το χρήστη στην εικόνα της ενεργειακής παραγωγής για τα κυριότερα σενάρια μελέτης A1, A2 και E3. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις καμπύλες διάρκειας που ακολουθούν (Εικόνα 8-13).

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του Σεναρίου A2 η εικόνα ενεργειακής παραγωγής καθίσταται πιο αξιόπιστη σε σχέση με αυτή του A1, με συνέπεια να 'αντιστέκεται' στη μείωση της αξιοπιστίας (ειδικά για τις τιμές $\alpha=95\%$ και $\alpha=90\%$). Παρ' ότι ο ταμιευτήρας Μεσοχώρας δεν παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία στην ενεργειακή του παραγωγή (όπως φάνηκε και σε προηγούμενες εφαρμογές), η προσθήκη του οδηγεί το σύστημα να λειτουργεί αποδοτικά με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Ιδιαίτερα υψηλής αξιοπιστίας είναι και η ενεργειακή εικόνα για τα έργα εκτροπής. Το αποτέλεσμα της διερεύνησης δείχνει ότι η λειτουργία του συστήματος με αξιοπιστία

μικρότερη του 96% είναι πρακτικώς μη συμφέρουσα, μιας και η εκλογή χαμηλότερης αξιοπιστίας από το χρήστη δεν οδηγεί σε πιο αποδοτική, αντίστοιχα χαμηλής αξιοπιστίας, εικόνα.





Εικόνα 8-13: Αποτελέσματα διερεύνησης αξιοπιστίας για τα σενάρια A1, A2, E3

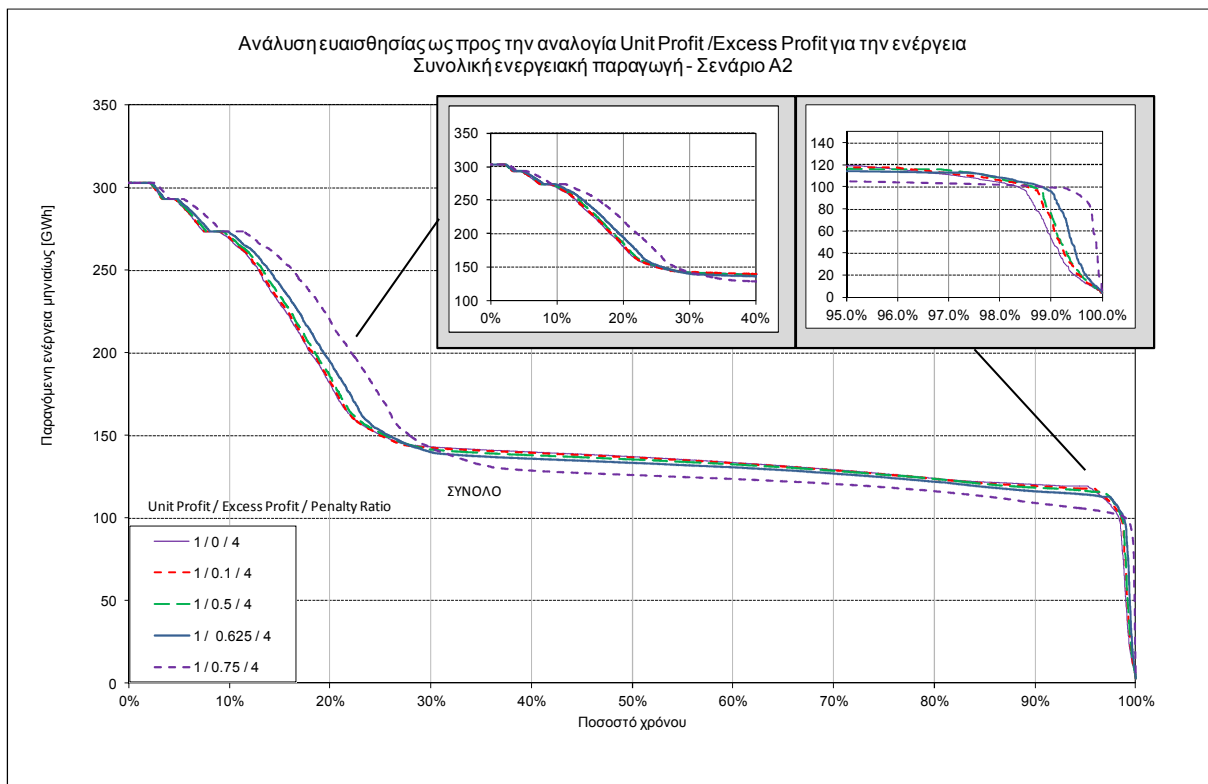
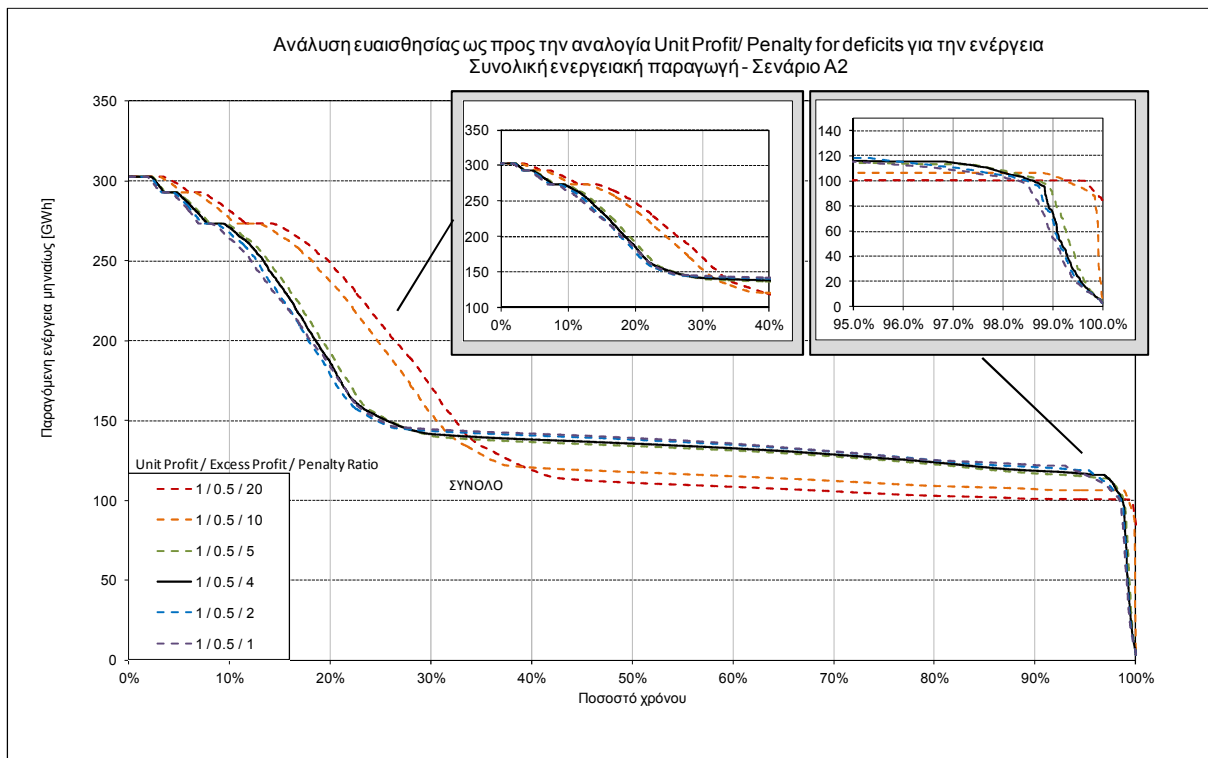
8.6. Ανάλυση ευαισθησίας για τις συναρτήσεις κόστους / οφέλους

Δεδομένου ότι η εικόνα της ενεργειακής παραγωγής που προκύπτει από τις συναρτήσεις κόστους/οφέλους εξαρτάται από τις οικονομικές παραμέτρους των στόχων, (βλ. και σχέση (7.12)) είναι ιδιαίτερα σημαντική η ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων αυτών. Ειδικότερα, διερευνώνται οι μεταβολές που παρουσιάζουν οι λύσεις όταν μεταβάλλονται:

1. Ο λόγος βασικού προς πλεονασματικό όφελος (c^B / c^E) για την ενέργεια.
2. Ο λόγος βασικού οφέλους προς ποινή ελλείμματος (c^B / c^D) για την ενέργεια.
3. Ο λόγος βασικού οφέλους προς ποινή ελλείμματος (c^B / c^D) για το στόχο άρδευσης της Θεσσαλίας.
4. Ο λόγος βασικού οφέλους του αρδευτικού στόχου προς το βασικό όφελος της ενέργειας.

Οι δύο τελευταίες αναλύσεις προστέθηκαν καθώς ο στόχος κάλυψης της αρδευτικής ζήτησης έχει μεγάλη βαρύτητα και, ως αντικρουόμενη (conflicting) χρήση νερού, ασκεί επιρροή στην υδροηλεκτρική παραγωγή. Η διαδικασία των αναλύσεων έχει ως στόχο να διερευνήσει τόσο την ευαισθησία των συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν απέναντι στη μεταβολή των συντελεστών εισόδου όσο και την ευαισθησία του συστήματος απέναντι στην αβεβαιότητα εκτίμησης των οικονομικών παραμέτρων (λ.χ. στην εκτίμηση του αρδευτικού οφέλους, το οποίο μπορεί να μην είναι δυνατό να εκτιμηθεί με ακρίβεια).

Η ανάλυση ευαισθησίας για τις ενεργειακές παραμέτρους (περιπτώσεις 1 και 2) πραγματοποιήθηκε στο Σενάριο A2 με βελτιστοποίηση της συνάρτησης Total Benefit for Fulfilling Targets. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνα 8-14). Όσον αφορά στην αναλογία βασικού οφέλους προς ποινή ελλείμματος, δεν παρατηρείται ευαισθησία καθώς η ποινή αυξομειώνεται εντός λογικών διαστημάτων (ακόμα και όταν μειώνεται αισθητά). Παρατηρείται διαφοροποίηση μόνο όταν η ποινή λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές σε σχέση με το βασικό όφελος (δεκαπλάσια και εικοσαπλάσια του οφέλους), οπότε και η ενεργειακή παραγωγή προσαρμόζεται σε όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη πρωτεύουσα παραγωγή. Τέτοια επίπεδα ποινών βέβαια δεν είναι συνήθη σε επιχειρησιακό επίπεδο. Όσον αφορά στο λόγο βασικού οφέλους προς δευτερεύον, δεν παρατηρούνται αξιόλογες μεταβολές.

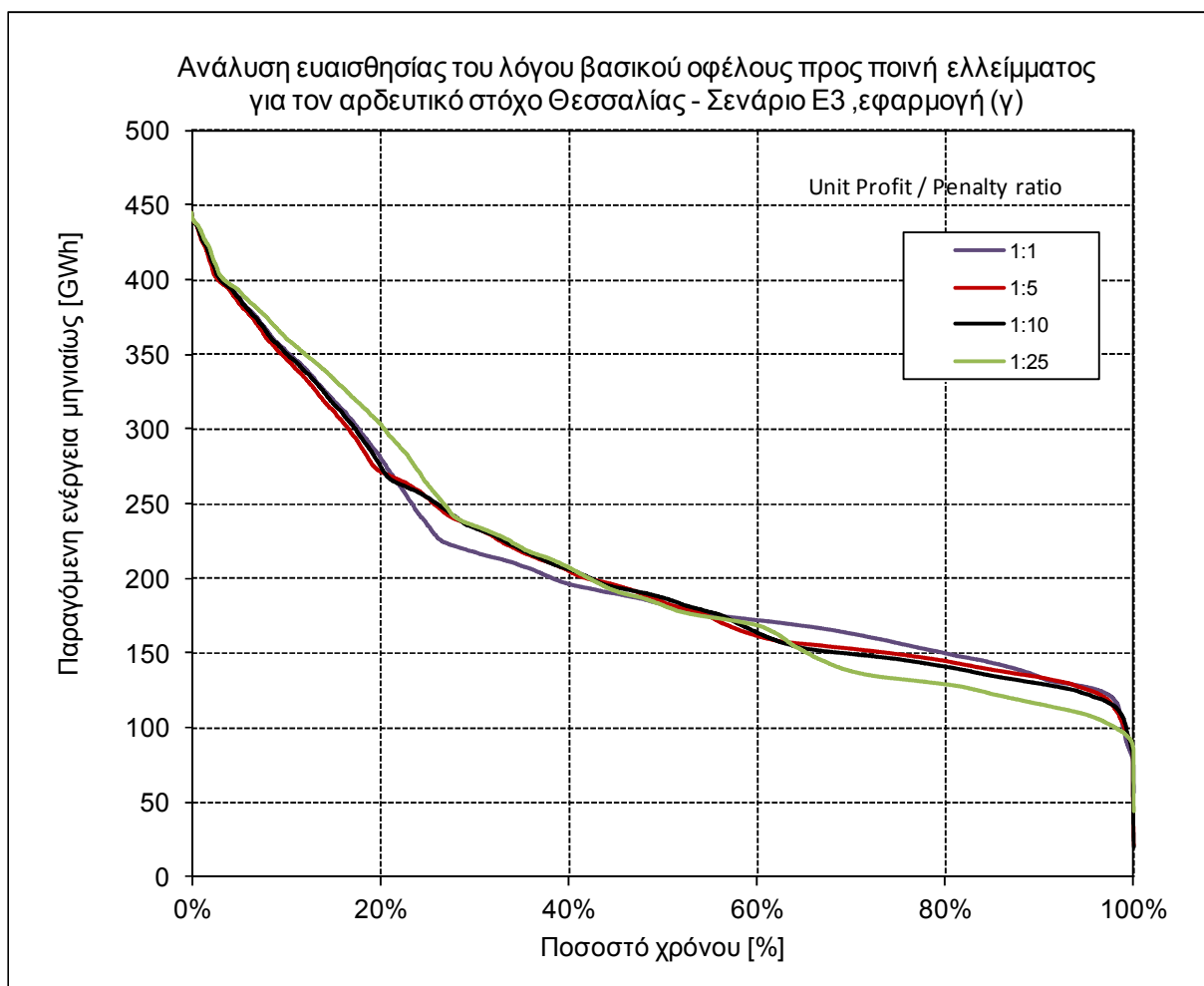


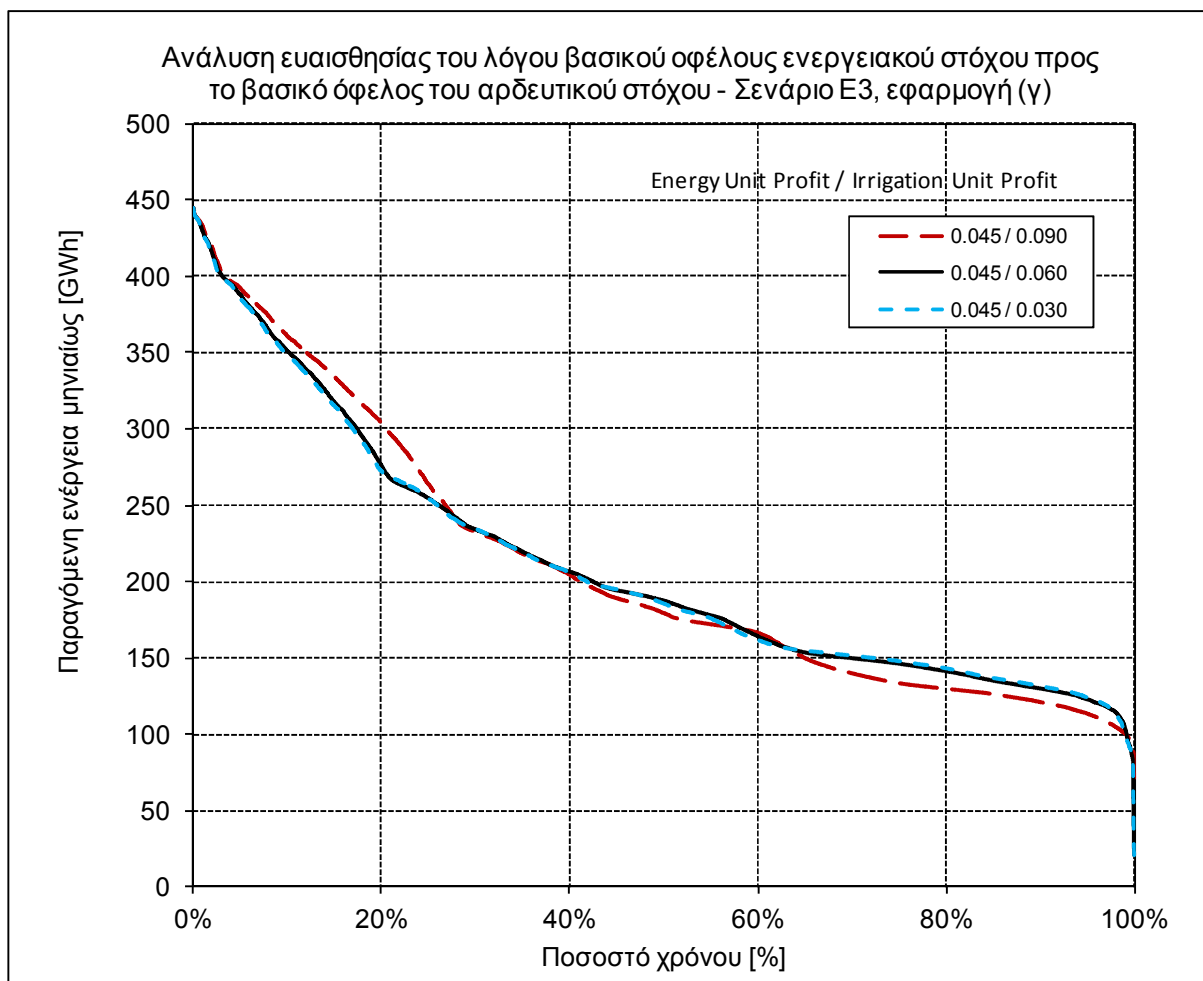
Εικόνα 8-14: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για την ενέργεια.

Η ανάλυση ευαισθησίας για τη σχέση παραγωγής ενέργειας και άρδευσης πραγματοποιείται στο σενάριο E3, με καταλληλότερη τη βελτιστοποίηση του μικτού οικονομικού οφέλους (περίπτωση γ). Η σχετική συνάρτηση είναι η Total Cost/Benefit of the

System. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνα 8-15). Η ανάλυση βασικού οφέλους προς ποινή ελλείμματος για την άρδευση δε δείχνει αξιόλογη μεταβολή της εικόνας της ενεργειακής παραγωγής για μεταβολή των παραμέτρων ακόμα και όταν αυτές λαμβάνουν μεγάλες τιμές (λ.χ. ποινή ελλείμματος 25 φορές ίση με το μοναδιαίο βασικό όφελος άρδευσης). Επίσης, η ανάλυση του βασικού οφέλους των δύο διαφορετικών στόχων δείχνει πολύ μικρή εξάρτηση, ακόμα και στην περίπτωση που το όφελος άρδευσης γίνεται κατά 50% μεγαλύτερο ή μικρότερο.

Βάσει των παραπάνω αναλύσεων συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με τις συναρτήσεις κόστους/οφέλους δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα έναντι της μεταβολής των οικονομικών παραμέτρων εντός λογικών πλαισίων. Επιπρόσθετα, συμπεραίνεται ότι οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση των παραμέτρων αυτών δεν επηρεάζουν δραστικά τις εκτιμώμενες από τη βελτιστοποίηση λύσεις.





Εικόνα 8-15: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τη σχέση ενεργειακής παραγωγής – άρδευσης.

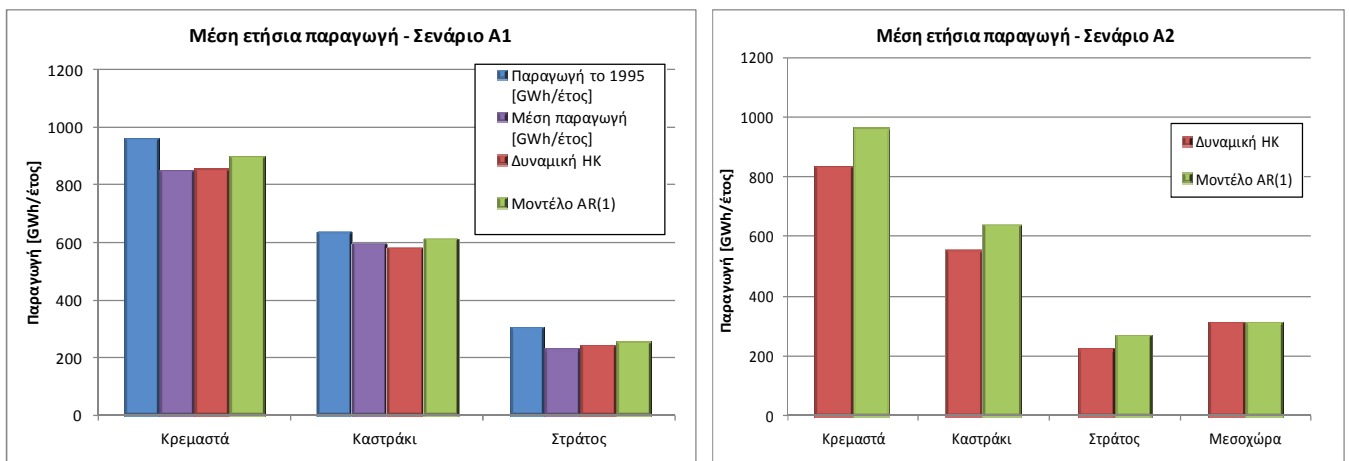
8.7. Χρήση μοντέλων AR(1) έναντι διατήρησης της δυναμικής ΗΚ

Παρά το γεγονός ότι η δυναμική Hurst-Kolmogorov αποτελεί εγγενή ιδιότητα σημαντικών υδρολογικών μεταβλητών όπως η απορροή, τα στοχαστικά μοντέλα βραχυπρόθεσμης μνήμης όπως το AR(1) συνεχίζουν να εφαρμόζονται στις υδρολογικές εφαρμογές (λ.χ. Lamond και Boukhtouta 1996). Έτσι, αμελείται πολλές φορές η εμμένουσα συμπεριφορά η οποία είναι κρίσιμη σε αρκετά προβλήματα όπως στη διαχείριση ταμιευτήρων (βλ. και παράγραφο 3.2) και είναι στενά συνδεδεμένη με την αποτίμηση της υδρολογικής αβεβαιότητας (Ευστρατιάδης 2011).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προκειμένου να διερευνηθεί ο αντίκτυπος που έχει η μη διατήρηση της εμμονής στη διαχείριση υδροσυστημάτων και δη στην υδροηλεκτρική παραγωγή, πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες ενεργειακών βελτιστοποιήσεων, με χρήση δύο διαφορετικών στοχαστικών μοντέλων εισροών. Στην πρώτη περίπτωση, κρατήθηκαν τα αποτελέσματα ενεργειακής βελτισποίησης με χρήση συνθετικών χρονοσειρών που

διατηρούν την εμμονή ενώ στη δεύτερη έγινε χρήση συνθετικών χρονοσειρών που παρήχθησαν με ένα μοντέλο AR(1). Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν βελτιστοποιήσεις μόνο με ενεργειακούς στόχους (είδος παραμετροποίησης 1) για τη συνάρτηση Total Generated Firm Power. Για την εφαρμογή επιλέχθηκαν τα Σενάρια A1 (Σενάριο κάτω Αχελώου) και A2 (Σενάριο Μεσοχώρας).

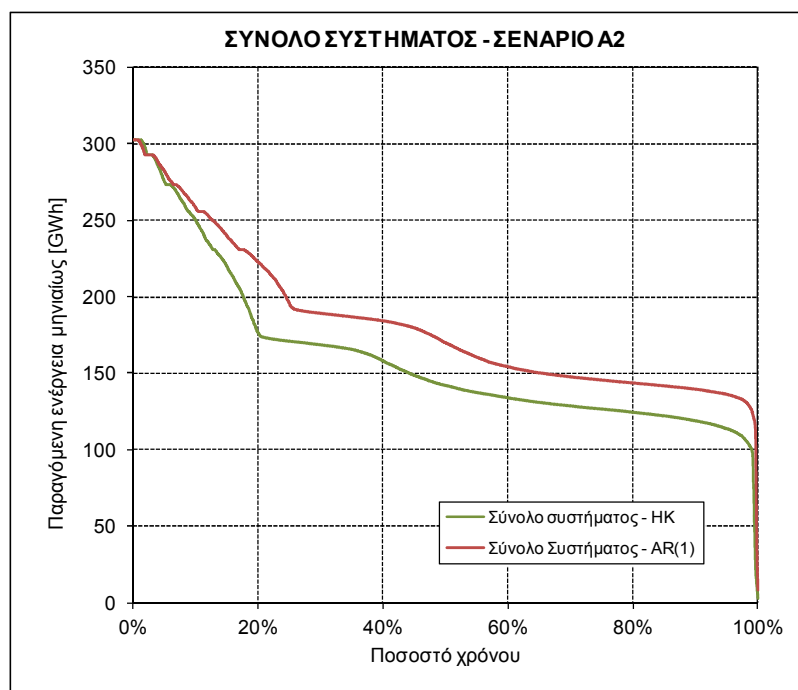
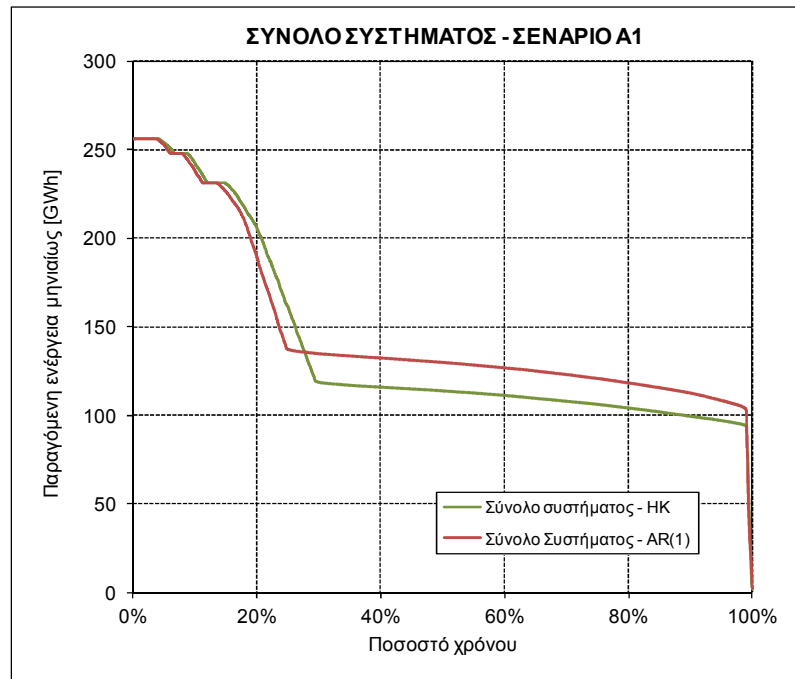
Παρακάτω παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τόσο σε μορφή καμπυλών διάρκειας (Εικόνα 8-17) όσο και σε μορφή διαγραμμάτων μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας του συστήματος (Εικόνα 8-16). Για το Σενάριο A1 αντιπαραβάλλονται και πραγματικά δεδομένα παραγωγής του υδροσυστήματος (Αργυράκης 2009). Παρατηρείται ότι η χρήση μοντέλων AR(1) οδηγεί σε υπερεκτίμηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής με μεγαλύτερη απόκλιση στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών, η οποία προσεγγίζει την παραγωγή του (καλού) υδρολογικού έτους 1995. Το μοντέλο που διατηρεί εμμονή δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα, πλησιέστερα στην παρατηρημένη εικόνα μέσης ενεργειακής παραγωγής. Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα και στις καμπύλες διάρκειας, με το μοντέλο AR(1) να δίνει υπερεκτιμημένη εικόνα ενεργειακής παραγωγής για το σύνολο σχεδόν του χρόνου.



Εικόνα 8-16: Αποτελέσματα μέσης ετήσιας παραγωγής για τα Σενάρια A1 και A2

Κρίνεται, συνεπώς, επιβεβλημένη η διατήρηση του στοχαστικού χαρακτήρα των εισροών με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων που να διατηρούν την εμμονή. Επισημαίνεται ότι η εγγενής τυχαιότητα στα υδρολογικά μοντέλα, η οποία αποκτάει ιδιαίτερη βαρύτητα όταν μελετώνται ακραία γεγονότα ή υδρολογικά φαινόμενα σε μακροπρόθεσμη κλίμακα, θα πρέπει να αποδοθεί πιστά με την υιοθέτηση στοχαστικών μεθόδων και όχι με ντετερμινιστικές τεχνικές (Koutsoyiannis 2010). Οι τελευταίες βρίσκουν ακόμη σημαντική εφαρμογή, καθώς τα αποτελέσματα (ντετερμινιστικών) κλιματικών μοντέλων μεγάλης κλίμακας όπως τα GCM θεωρούνται αξιόπιστα και χρησιμοποιούνται από πολλούς μελετητές ως βάση για εφαρμογές

διαχείρισης υδατικών πόρων, παρά την ύπαρξη μελετών που αποδεικνύουν το αντίθετο (Tsaknias et al. 2011).



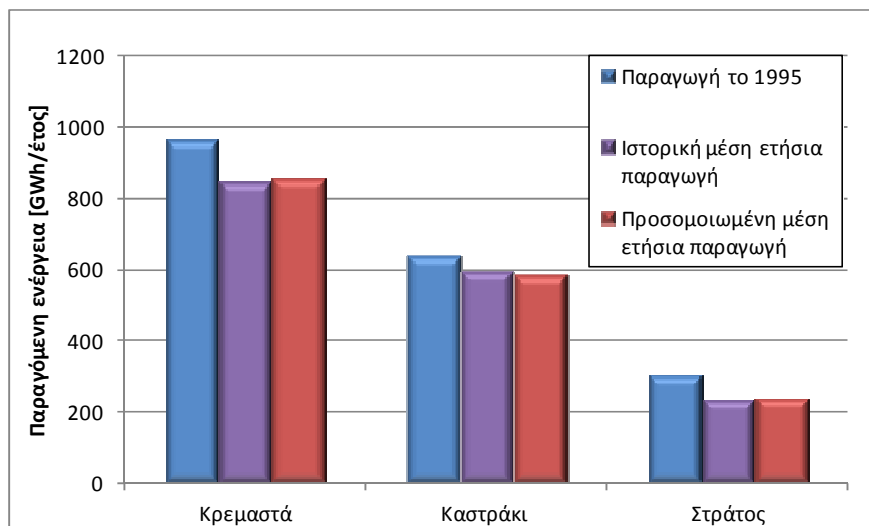
Εικόνα 8-17: Καμπύλες διάρκειας για τα σενάρια Α1 και Α2 και τα δύο διαφορετικά μοντέλα εισροών.

8.8. Σύγκριση αποτελεσμάτων με πραγματικά δεδομένα και παλαιότερες μελέτες

8.8.1. Σύγκριση με πραγματικά δεδομένα

Η βελτιστοποίηση του Σεναρίου Α1, το οποίο περιέχει μόνο τα υφιστάμενα λειτουργικά έργα του κάτω Αχελώου, επιτρέπει τον έλεγχο της ενεργειακής παραγωγής σε σχέση με τα

πραγματικά δεδομένα από τη λειτουργία του υδροσυστήματος. Τα ιστορικά δεδομένα λαμβάνονται από σχετικές πηγές (Αργυράκης 2009, Στεφανάκος 2008). Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 8-18) γίνεται σύγκριση μεταξύ της πραγματικής και της προσομοιωμένης μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας ανά ταμιευτήρα, ενώ συμπληρωματικά προστίθεται η ετήσια παραγωγή στο (μάλλον καλό) υδρολογικό έτος 1995. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πρακτικά συμπίπτουν με τις παρατηρημένες τιμές.



Εικόνα 8-18: Σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών με πραγματικά δεδομένα.

8.8.2. Σύγκριση με παλαιότερες μελέτες

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα σενάρια μελέτης με παλαιότερες μελέτες. Οι δύο κυριότερες μελέτες που αποτελούν τη βάση της σύγκρισης είναι παλαιότερη σχετική διπλωματική εργασία (Ευστρατιάδης και Ζερβός, Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων - Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας 1999), καθώς και η παλαιότερη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ / ΕΥΔΕ Αχελώου (Κουτσογιάννης 1996). Και οι δύο μελέτες παρουσιάζουν ομοιότητες στη μεθοδολογική προσέγγιση, δηλαδή στη διερεύνηση της διαχείρισης του υδροσυστήματος υπό το πρίσμα της παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης. Ωστόσο, εμφανίζουν και σημαντικές διαφορές, όπως:

- η χρήση ιστορικών δεδομένων για τις χρονοσειρές εισόδου αντί συνθετικών που παρήχθησαν βάσει αυτών.
- η προσομοίωση και βελτιστοποίηση επιμέρους υποσυστημάτων του ευρύτερου υδροσυστήματος, αντί της διερεύνησης στο πλήρες σχήμα έργων. Στη διπλωματική εργασία εξετάζονται ξεχωριστά το υποσύστημα που σχετίζεται με τα έργα εκτροπής, δηλαδή οι ταμιευτήρες Μεσοχώρας-Συκιάς-Πευκοφύτου-Μουζακίου-Πύλης καθώς και το υποσύστημα των έργων του Αχελώου, δηλαδή οι ταμιευτήρες Μεσοχώρας-Συκιάς-

Κρεμαστών-Καστρακίου-Στράτου, ενώ στη μελέτη ΥΠΕΧΩΔΕ / ΕΥΔΕ εξετάζονται μόνο τα έργα εκτροπής και οι απώλειες στα έργα του κάτω Αχελώου υπολογίζονται προσεγγιστικά.

- η διαφοροποίηση στα σενάρια λειτουργίας (λ.χ. ύψος στέψης Μουζακίου, ύπαρξη ή όχι της Πύλης στο σχήμα έργων κ.α.), στις τιμές ενεργειακού οφέλους, στα κριτήρια επίδοσης και στις παραδοχές άντλησης.

Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις από την παρούσα μελέτη θα οδηγήσουν αναπόφευκτα σε αποκλίσεις στις τιμές των μεγεθών. Κατά συνέπεια, ο σκοπός των συγκρίσεων δεν είναι η λεπτομερής αποτίμηση των διαφορών στα αποτελέσματα αλλά η επιβεβαίωση ότι τα γενικά, ενεργειακά κυρίως, μεγέθη είναι σύμφωνα με τα αντίστοιχα παλαιότερων μελετών.

Από την παλαιότερη διπλωματική εργασία (Ευστρατιάδης και Ζερβός 1999), άμεσα συγκρίσιμα είναι το πλήρες σχήμα έργων (Σχήμα Γ στην εργασία), το οποίο και συγκρίνεται με τη σειρά βελτιστοποιήσεων πάνω στο Σενάριο Ε3, καθώς και τα σχήματα έργων Αχελώου Β₁ και Β₂ (χωρίς και με στόχο εκτροπής 600 hm³ αντίστοιχα), τα οποία συγκρίνονται με τις επιλύσεις του Σεναρίου Α3. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον πίνακα που παρατίθεται στη συνέχεια (Πίνακας 8-7):

Πίνακας 8-7: Συγκεντρωτικός πίνακας συγκρίσεων με παλαιότερη μελέτη.

| Πλήρες Σενάριο Εκτροπής | | | | | | |
|--|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| | | Ετήσια πρωτεύουσα ενέργεια [GWh] | Εν. Όφελος [10 ⁶ δρχ] | Εν. Όφελος [10 ⁶ €] | Μικτό Όφελος [10 ⁶ δρχ] | Μικτό Όφελος [10 ⁶ €] |
| Παρούσα εργασία | Τιμές Μεγεθών | 1759 | | 87.790 | | 150.536 |
| Ευστρατιάδης και Ζερβός, 1995 | | 1985 | 25133 | 73.758 | 44282 | 129.955 |
| | Ποσοστό Μεταβολής | -11.38% | | 19.02% | | 15.84% |
| Διάταξη έργων Αχελώου | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Χωρίς Εκτροπή | | Ετήσια πρωτεύουσα ενέργεια [GWh] | Μέση ετήσια ενέργεια [GWh] | | | |
| Παρούσα εργασία | Τιμές Μεγεθών | 1547.868 | 2303.16 | | | |
| Ευστρατιάδης και Ζερβός, 1995 | | 1488 | 2623.19 | | | |
| | Ποσοστό Μεταβολής | 4.02% | -12.20% | | | |
| | | | | | | |
| Με Εκτροπή (600 hm³) | | Ετήσια πρωτεύουσα ενέργεια [GWh] | Μέση ετήσια ενέργεια [GWh] | | | |
| Παρούσα εργασία | Τιμές Μεγεθών | 1034.256 | 1829.52 | | | |
| Ευστρατιάδης και Ζερβός, 1995 | | 927.39 | 2087.41 | | | |
| | Ποσοστό Μεταβολής | 11.52% | -12.35% | | | |

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα βρίσκονται σε γενική συμφωνία, τόσο στο ενεργειακό όσο και στο οικονομικό σκέλος, με όλες τις αποκλίσεις να είναι μικρότερες του

20%. Οι (αρνητικές κυρίως) αποκλίσεις που παρατηρούνται στην ενεργειακή παραγωγή δικαιολογούνται από τη διαφορετική προσέγγιση στη διαχείριση της υδρολογικής πληροφορίας (γέννηση συνθετικών χρονοσειρών, αντί της χρήσης αυτούσιων των ιστορικών για την προσομοίωση), ενώ οι θετικές αποκλίσεις στο κόστος οφείλονται στην αναπροσαρμογή των μοναδιαίων οικονομικών μεγεθών σε σημερινές τιμές.

Από τη μελέτη ΥΠΕΧΩΔΕ / ΑΥΔΕ (Κουτσογιάννης 1996), κατάλληλα για άμεση σύγκριση είναι το σχήμα έργων 0 (έργα του Αχελώου, χωρίς εκτροπή), καθώς και το σχήμα έργων Eb (εκτροπή και άντληση, Μουζάκι στα +290 m με Πύλη). Για το σενάριο Eb δεν παρατηρείται ιδιαίτερα σημαντική απόκλιση. Για το σενάριο 0 συγκρίνεται η πρωτεύουσα ενεργειακή παραγωγή των επιμέρους ταμιευτήρων και τα μεγέθη προκύπτουν παρόμοια (μείωση της τάξης του 4.60% για τον ταμιευτήρα Μεσοχώρας και 6.86% για τον ταμιευτήρα Συκιάς).

Βάσει των παραπάνω συγκρίσεων συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι αξιόπιστα και συγγενή με αυτά προηγούμενων σχετικών μελετών διερευνητικού πάντα χαρακτήρα.

9. Συμπεράσματα – προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη μπορούν να χωρισθούν στις εξής δύο κατηγορίες:

α.) Συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν και αναφέρονται στο γενικό τρόπο χρήσης, στην αποτελεσματικότητα και στη συμπεριφορά τους.

β.) Συμπεράσματα από τη μελέτη εφαρμογής στο υδροσύστημα του Αχελώου-Θεσσαλίας.

9.1. Συμπεράσματα για τις συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν

1. Οι δύο οικογένειες συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν αποτελούν γενικά μεθοδολογικά εργαλεία, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση μελέτης υδροσυστημάτων με κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή, είτε αυτά έχουν απλή, σειριακή διάταξη είτε παρουσιάζουν πολύπλοκη δομή.
2. Οι ενεργειακές συναρτήσεις Total Generated Firm Power και Sum of Generated Firm Power λειτουργούν βάσει δεδομένης αξιοπιστίας που αποτελεί όρισμα του χρήστη, μεγιστοποιώντας την πρωτεύουσα ενεργειακή παραγωγή. Η Total Generated Firm Power αποτελεί καταλληλότερη συνάρτηση στην περίπτωση υδροσυστημάτων με ενιαία διαχείριση ενώ η Sum of Generated Firm Power βρίσκει εφαρμογή αν κάθε έργο συνοδεύεται από διαφορετικό φορέα διαχείρισης. Πιο αποτελεσματική για τη συνολική ενεργειακή παραγωγή κρίνεται η Total Generated Firm Power.
3. Οι συναρτήσεις κόστους/οφέλους Total Benefit for Fulfilling Targets και Total Cost/Benefit of the System λειτουργούν βάσει δεδομένων μοναδιαίων οικονομικών μεγεθών (βασικό κόστος, κόστος πλεονάσματος και ποινή ελλείμματος) ανά στόχο ή κατηγορία στόχου, μεγιστοποιώντας το οικονομικό όφελος από τη διαχείριση του υδροσυστήματος. Όσον αφορά στην υδροηλεκτρική παραγωγή, αμφότερες οδηγούν στην εύρεση μιας χαρακτηριστικής αξιοπιστίας για κάθε έργο και για το σύστημα βάσει των μοναδιαίων οικονομικών μεγεθών. Η Total Cost/Benefit of the System αποτελεί γενίκευση της πρώτης συνάρτησης και συνεπώς αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη έκφραση για τη βελτιστοποίηση κόστους/οφέλους.
4. Στην περίπτωση που υπάρχει αντικρουόμενη (στην ενεργειακή παραγωγή) χρήση νερού μεγάλης βαρύτητας (λ.χ. μεγάλη αρδευτική ζήτηση), οι ενεργειακές συναρτήσεις θα

πρέπει να συνοδευτούν από ένα δευτερεύον κριτήριο ελαχιστοποίησης της αστοχίας ή του ελλείμματος της ζήτησης αυτής. Αντιθέτως, οι συναρτήσεις κόστους/οφέλους μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα εάν η χρήση αυτή τεθεί με οικονομικές παραμέτρους, κατανέμοντας τις ποσότητες υδάτων αναλόγως της οικονομικής σημασίας κάθε στόχου.

5. Η πολιτική της φειδωλής παραμετροποίησης (principle of parsimony) καλύπτεται μόνο με στόχους μεταφοράς νερού. Οι στόχοι αυτοί συνίστανται σε στόχους ενεργειακής παραγωγής για κάθε στρόβιλο και σε στόχους ελάχιστης ή/και μέγιστης ροής για κάθε αγωγό μεταφοράς που δε συνοδεύεται από υδροηλεκτρικό σταθμό. Δεν απαιτείται η προσθήκη των παραμέτρων b_i , εκτός εάν απαιτείται η εξέταση της λεπτομερούς απόκρισης του υδροσυστήματος ή απαιτείται η εξαγωγή των καμπυλών λειτουργίας των ταμιευτήρων.

9.2. Συμπεράσματα από την εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας

1. Η προσθήκη της Μεσοχώρας θα καταστήσει το σύστημα πιο αξιόπιστο και θα έχει ενεργειακό όφελος 10 εκατ. € ετησίως, προσθέτοντας 225 GWh στη μέση ετήσια παραγωγή του συστήματος Αχελώου. Το ποσοστό αυτό αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερο αν θεωρηθεί μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας ή συνυπολογισθεί το όφελος από την αντίστοιχη μείωση της λιγνιτικής ή πετρελαϊκής παραγωγής. Η πλήρωση του ταμιευτήρα και η ένταξή του στο σύστημα ως αυτόνομο ενεργειακό έργο ανεξάρτητα από την έκβαση της εκτροπής, κρίνονται απαραίτητες για να αντιστραφεί το μεγάλο οικονομικό κόστος της επένδυσης.
2. Όσον αφορά στη διάταξη εκτροπής, τα σενάρια άντλησης – ταμίευσης είναι τα βέλτιστα δυνατά, καθιστώντας το σύστημα πιο ευέλικτο και αξιοποιώντας στο έπακρο τις δυνατότητες ενεργειακής παραγωγής. Η δυνατότητα πρωτεύουσας μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής αυξάνεται θεαματικά από τις 94 GWh στις 147 GWh αν εγκατασταθούν αντλιοστρόβιλοι στο Πευκόφυτο και το Μουζάκι, πάντα καλύπτοντας με ασφάλεια το στόχο εκτροπής 600 hm³. Το σύστημα αποκτάει ισχυρό ενεργειακό χαρακτήρα έχοντας τη δυνατότητα να προσφέρει 1759 GWh ανανεώσιμης, εγγυημένης ενέργειας ετησίως, γεγονός πολύ σημαντικό αν αναλογιστεί κανείς ότι αντιστοιχεί στο 38% της σημερινής μέσης ετήσιας ενεργειακής παραγωγής από υδροηλεκτρικά έργα.
3. Οι αρδευτικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί στην Αιτωλοακαρνανία ικανοποιούνται και μετά την εκτροπή με πρακτικά μηδενική αστοχία. Παρομοίως, η εκτρεπόμενη ποσότητα των 600 hm³ καλύπτεται με πρακτικά μηδενικά ποσοστά αστοχίας σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης, ενώ απεδείχθη ότι η διάταξη έργων όπως έχει προταθεί έχει

δυνατότητα αύξησης της εκτρεπόμενης ποσότητας κατά περίπου 40% χωρίς σημαντικές αστοχίες, εφ'όσον απαιτηθεί.

4. Το ενεργειακό όφελος από τη διαχείριση του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας με άντληση – ταμίευση αναμένεται στα 88 εκατ. € ετησίως. Η λειτουργία ενός τέτοιου υδροσυστήματος επιτρέπει μία ευέλικτη, συνδυασμένη ενεργειακή-αρδευτική προσέγγιση στη διαχείριση αποφέροντας περί τα 150 εκατ. € μικτού (ενεργειακού και αρδευτικού) οφέλους ετησίως. Το τελευταίο πόρισμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι εύλογα συμπεραίνεται ότι πρέπει να γίνει άμεσα μελέτη ολοκληρωμένης διαχείρισης για το υδροσύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας, η οποία να συνδυάζει την ενεργειακή παραγωγή με την κατάλληλη αναδιάρθρωση και αξιοποίηση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων που μπορεί να αποφέρει το μέγιστο όφελος (λ.χ. καλλιέργεια βιοκαυσίμων) ή να συμβάλλει στην αειφόρο ανάπτυξη και στην πρωτογενή αυτονομία της χώρας (λ.χ. βιολογικές καλλιέργειες, εφαρμογές τεχνικών όπως αμειψισπορά και αγρανάπαυση κ.α.).

9.3. Προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης

Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ και το πλαίσιο βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής που το συνοδεύει διαθέτει, προφανώς, προοπτικές περαιτέρω βελτίωσης και επέκτασης. Παρακάτω δίνονται ορισμένες γενικές διερευνητικές κατευθύνσεις, χρήσιμες για μελλοντική μελέτη.

- Η αντικατάσταση των σταθερών μηνιαίως στόχων ενεργειακής παραγωγής από εποχικά μεταβαλλόμενους. Η υιοθέτηση ενός τέτοιου είδους παραμετροποίησης θα επιτρέψει την αναπροσαρμογή της πολιτικής παραγωγής ενέργειας ανά εποχή, με στόχο λ.χ. τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής τη θερινή περίοδο (στην οποία παρουσιάζεται μεγαλύτερη ζήτηση) και τη μέγιστη δυνατή αύξηση των αποθεμάτων τη χειμερινή.
- Η δημιουργία ενός ξεχωριστού στοιχείου (component) αντλιοστροβίλου στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, ο οποίος μπορεί να δίνει τη δυνατότητα είτε νυχτερινής άντλησης είτε κατά προτεραιότητα άντλησης ορισμένους μόνο μήνες. Μία τέτοια επέκταση μπορεί να συνδυαστεί με εις βάθος μελέτη των συστημάτων άντλησης – ταμίευσης, αντλώντας επιχειρησιακά δεδομένα από τη λειτουργία υφιστάμενων συστημάτων στην Ελλάδα.
 - Σε μεταγενέστερο επίπεδο, η μετατροπή του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ από πρόγραμμα υποστήριξης της υδροηλεκτρικής παραγωγής σε ένα πολυσύνθετο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την ολοκληρωμένη ενεργειακή διαχείριση (λ.χ. υβριδικά συστήματα, δηλαδή συνδυασμός αιολικής - ηλιακής ενέργειας με ταμιευτήρες).

Βιβλιογραφικές αναφορές

Albiac J., and Murua Juan Ramon. «The European Water Framework Directive: Potential for Change and Implications Beyond 2020.» *Water Resources Development and Management*, DOI 10.1007/978-3-540-89346-2 8, 2009.

Archibald T.W., McKinnon K.I.M., and Thomas L.C. «An Aggregate Stochastic Dynamic Programming Model of Multireservoir Systems.» *Water Resources Research*, 1997: 333-340.

Bloschl G., and A. Montanari, «Climate change impacts—throwing the dice?» *Hydrological Processes*, 2010: 374–381.

Bras R. L., and I. Rodriguez-Iturbe, «Random Functions and Hydrology.» Dover Publications, 1993.

Cai X., D. McKinney, and L. Lasdon «Piece-by-Piece Approach to Solving Large Nonlinear Water Resources Management Models.» *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2001: 363–368.

Charnes A. and W.W. Cooper, *Chance-constrained programming*. Τόμ. 6. Manage Sci., 1960.

Chow V., D.R. Maidment and L.W. Mays, *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

Costa L. and P. Oliveira, «Evolutionary algorithms approach to the solution of mixed integer non-linear programming problems.» *Computers & Chemical Engineering*, 2001: 257–266.

Diaz, Gustavo E., Brown, C. Thomas and Oli Sveinsson, *Aquarius: A modeling system for river basin water allocation*. General Technical Report, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky, 2000, 172.

Efstratiadis A., «Models in practice: Experience from the water supply system of Athens.» *Invited Lecture*. Tokyo: Tokyo Metropolitan University , 2010.

Efstratiadis A., D. Koutsoyiannis D. and D. Xenos, «Minimising water cost in the water resource management of Athens.» *Urban Water Journal*, 2004: 3-15.

Efstratiadis A. and D. Koutsoyiannis, «An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems.» *Proceedings of the Fifth International*

Conference on Hydroinformatics. Cardiff, UK: International Water Association, 2002. 1423–1428.

French S. *Decision Analysis and Decision Support Systems*. 3rd edition. 2000.

Fu M., and J.Q. Hu , *Conditional Monte Carlo - Gradient Estimation and Optimization Applications*. Boston: Kluwer, 1997.

Grigg N.S. *Water Resources Management*. New York: McGraw-Hill, 1996.

Grygier J., and J. Stedinger , «Algorithms for Optimizing Hydropower System Operation.» *Water Resources Research*, 1985: 1-10.

Karamouz M. and M.H. Houck, «Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization.» *Water Resources Research*, 1982: 1337–1344.

Koutsoyiannis D., «Scale of water resources development and sustainability: small is beautiful, large is great.» *Hydrological Sciences Journal*, 2011: 553-575.

Koutsoyiannis D., «The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy.» *Hydrological Sciences Journal*, 2002: 573–595.

Koutsoyiannis D., «Hydrology and Change (Plenary lecture).» *IUGG 2011*. Melbourne: International Union of Geodesy and Geophysics, 2011.

Koutsoyiannis D., «A random walk on water.» *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010: 585-601.

Koutsoyiannis D., «A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series.» *Water Resources Research*, 2000: 1519-1533.

Koutsoyiannis D. and A. Economou, «Evaluation of the parameterisation-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems.» *Water Resources Research*, 2003: 1-17.

Koutsoyiannis, D. «Reliability concepts in reservoir design, edited by J. H. Lehr and J. Keeley.» In *Water Encyclopedia, Vol. 4, Surface and Agricultural Water*, 259–265. New York: Wiley, 2005.

Lamaddalena N., «PARTICIPATORY WATER MANAGEMENT IN ITALY: CASE STUDY OF THE CONSORTIUM “BONIFICA DELLA CAPITANATA”.» *OPTIONS méditerranéennes*, 2001: Series B, n° 48.

Lamond B.F., and A. Boukhtouta, «Optimizing long-term hydro-power production using Markov processes.» *International transactions in operational research*, 1996: 223-241.

Mandelbrot B.B. «Une classe de processus stochastiques homothétiques a soi: application à la loi climatologique de H. E. Hurst.» *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1965: 3284–3277.

Margaris N., C. Galogiannis, M. Grammatikaki. «Water management in Thessaly, central Greece.» *Groundwater and Ecosystems*, 237-242, 2006.

Mays L.W., and Y.K. Tung, *Hydrosystems Engineering and Management*. New York: McGraw-Hill, 1992.

Nalbantis I., and D. Koutsoyiannis, «A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems.» *Water Resources Research*, 1997: 2165-2177.

Neelakantan T.R., and N.V. Pundarikanthan, «Neural network-based simulation-optimization model for reservoir operation.» *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001: 57-64.

Philbrick R., and P. Kitanidis, «Limitations of Deterministic Optimization Applied to Reservoir Operations.» *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1999: 135-142.

Poff N. L., and J.K.H. Zimmerman, «Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows.» *Freshwater Biology*, 2010: 55: 194–205.

Revelle C. «Research Challenges in environmental management.» *European Journal of Operational Research*, 2000: 218-231.

Russell S., and P. Campbell, «Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming.» *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 1996: 165–170.

Tegos A., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, «A parametric model for potential evapotranspiration estimation based on a simplified formulation of the Penman-Monteith equation.» *Evapotranspiration - An Overview*, 2012: edited by S. Alexandris, InTech.

Tsaknias D., D. Bouziotas, A. Christofides, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis «Statistical comparison of observed temperature and rainfall extremes with climate model outputs.» *European Geosciences Union General Assembly 2011*. Vienna: European Geosciences Union, 2011.

Varveris, A., P. Panagopoulos, K. Triantafillou, A. Tegos, A. Efstratiadis, N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, «Assessment of environmental flows of Acheloos Delta.» *European Geosciences Union General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts*, 2010.

Winston W. L. *Operations Research, Applications and Algorithms*. 3rd Edition. Duxbury, Belmont, 1994.

Αντωναρόπουλος Π. & Συνεργάτες. *Μελέτη διαχείρισης των υδάτων λεκάνης απορροής Αχελώου π., Μέρος Α': Υδατικό δυναμικό*. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ, 2006, 153.

Αργυράκης Ι. «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού.» *Η Συμβολή των Υδροηλεκτρικών Έργων στον Ενεργειακό Σχεδιασμό της Χώρας*. Ιωάννινα: Περιφερειακό Τμήμα Ηπείρου του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2009. 61.

Γεωργακάκος, Α., Κ. Νουτσόπουλος, Η. Υαο, και Η. Υυ, «Πιλοτικό μοντέλο για τη διαχείριση του συστήματος ταμιευτήρων Αχελώου.» *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2*. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1995. 132 σελίδες.

ΔΕΗ/ΔΑΥΕ. *Εκτροπή Αχελώου και Αξιοποίηση Θεσσαλικής Πεδιάδας*. Έργα κεφαλής συγκροτήματος εκτροπής, Ενημερωτική έκθεση, Αθήνα: ΔΕΗ, 1987.

Επιστημονική Επιτροπή Υδραυλικών Έργων Τ.Ε.Ε. «Απόψεις για τις δυνατότητες επέκτασης των αρδεύσεων στη Θεσσαλία.» *Ενημερωτικό Δελτίο Τ.Ε.Ε., Τεύχος 1039*, Μάρτιος 1979.

ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO. *Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της Εκτροπής Αχελώου*. Αθήνα: Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1995.

Ευστρατιάδης Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.

Ευστρατιάδης Α., *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*. Διδακτορική διατριβή, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008, 391 σελίδες.

Ευστρατιάδης Α., «Στοχαστική προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών - το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ.» *Διάλεξη στα πλαίσια του μαθήματος: Στοχαστικές Μέθοδοι στους Υδατικού Πόρους, 9ου εξ., σχολής Πολιτικών Μηχανικών*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2011. 18.

Ευστρατιάδης Α., και Ν. Ζερβός *Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων - Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1999, 181 σελίδες.

Ευστρατιάδης Α., και Δ. Κουτσογιάννης, «Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών.» Στο *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας*

και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, 103 σελίδες, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.

Ευστρατιάδης Α., Γ. Καραβοκυρός, και Δ. Κουτσογιάννης, «Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ).» Αθήνα, 2007.

Ευστρατιάδης Α., Γ. Καραβοκυρός, και Ν. Μαμάσης, «Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2009, Συντήρηση, αναβάθμιση και επέκταση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ,» Τεύχος 1, 116 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009.

Ευστρατιάδης Α., Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, «Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων.» Σημειώσεις μαθήματος: Διαχείριση Υδατικών Πόρων, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., 2007.

Θανόπουλος Ι. «Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο Σμοκόβου: Αξιοποιώντας έναν Ταμιευτήρα Άρδευσης.» *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας - Η θέση τους στο νέο ενεργειακό τοπίο της χώρας και στην περιοχή της Θεσσαλίας.* Λάρισα: Τ.Ε.Ε., 2007. 46.

Κ/Ξια Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Έκθεση Επισκόπησης Σημαντικών Θεμάτων Διαχείρισης Νερών: Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2011.

Κ/Ξια Διαχείρισης Υδάτων Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Έκθεση Επισκόπησης Σημαντικών Θεμάτων Διαχείρισης Νερών: Υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας. Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2011.

Κουτσογιάννης Δ., *Γενική διάταξη έργων εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία: Μελέτη Λειτουργίας Ταμιευτήρων.* Αθήνα: Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αχελώου - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Συνεργαζόμενοι: Γ. Καλαούζης, ELECTROWATT, Π. Μαρίνος, Δ. Κουτσογιάννης, 1996.

Κουτσογιάννης Δ., «Εκτροπές και Παρεκτροπές.», *Το Βήμα της Κυριακής*, 2006.

Κουτσογιάννης Δ., *Μελέτη λειτουργίας των ταμιευτήρων, στα πλαίσια της Γενικής Διάταξης Έργων Εκτροπής Αχελώου προς τη Θεσσαλία.* Αθήνα: Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε./ ΕΥΔΕ Αχελώου, 1996.

Κουτσογιάννης Δ., και Α. Ευστρατιάδης Α, «Το υπολογιστικό σύστημα Υδρονομείας και η εφαρμογή του στην μελέτη των έργων εκτροπής του Αχελώου.» *Διαχείριση υδατικών πόρων με έμφαση στην Ήπειρο*. Ιωάννινα: Δημοτική Επιχείριση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ιωαννίνων, 2003.

Κουτσογιάννης Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Τομέας Υδατικών Πόρων, 1999.

Κουτσογιάννης, Δ. *Γενική διάταξη έργων εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία: Υδρολογική Διερεύνηση*. Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αχελώου – Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων – Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, 1996, 44.

—. *Σημειώσεις μαθήματος: Στοχαστικές μέθοδοι στους υδατικούς πόρους, 9ου εξ.* . Αθήνα: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2000.

Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ανδρεαδάκης, Ρ. Μαυροδήμου, Α. Χριστοφίδης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Γ. Καραβοκυρός, Σ. Κοζάνης, Δ. Μαμάης, και Κ. Νουτσόπουλος. *Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*. υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.

Λαζαρίδης Λ., και Σ. Μίχας, «Αξιοποίηση των κατασκευαζόμενων έργων του φράγματος Συκιάς στον π.Αχελώο και της σήραγγας μεταφοράς προς Θεσσαλία για παραγωγή ενέργειας - Συνοπτική Έκθεση.» 2011.

Λαζαρίδης, Λ., «Η διαχείριση των υδατικών πόρων - το Θεσσαλικό πρόβλημα - παρόν και προοπτικές.», Βόλος, 2010.

Μακρόπουλος Χ., *Σημειώσεις μαθήματος: Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων* , 9ου εξ., Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.

Μαμάσης Ν., *Σημειώσεις μαθήματος: Περιβάλλον και Ανάπτυξη*, 8ου εξ. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., 2011.

Μιμίκου Μ.Α., *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2006.

Οικονόμου Α., *Αξιολόγηση της μεθόδου Παραμετροποίησης - Προσομοίωσης - Βελτιστοποίησης στη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων*. Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2000.

Σαμαράς Β., *Υδατικές Απαιτήσεις των Καλλιεργειών Βάμβακος, Καλαμποκιού, Βιομηχανικής Ντομάτας και Τεύτλων στο Θεσσαλικό Χώρο*. Πρόγραμμα HYDROSENSE, <http://www.hydrosense.org/>, 2010.

Στεφανάκος Ι., «Δεν είναι όλα τα φράγματα και οι εκτροπές καταστροφικές για το περιβάλλον.», *Capital.gr*, 2009.

Στεφανάκος Ι., «Ενέργεια: Σημερινή εικόνα, σχεδιασμός, προοπτικές.» Αθήνα: Τ.Ε.Ε., 2010.

Στεφανάκος Ι. *Σημειώσεις μαθήματος: Υδροηλεκτρικά Έργα, 8ου εξ.* Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., 2008.

Στεφανάκος Ι.Π., και Ε.Ε. Ράμπιας, «Διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής έργων αποταμίευσης ενέργειας σε περιοχές του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.» *Ενέργεια: σημερινή εικόνα – Σχεδιασμός – Προοπτικές*. Αθήνα: ΤΕΕ, 2010. 49.

Τέγος, Α., «Αχελώος: Το νερό ανήκει μόνο στα ψάρια.» *Νέος Αγώνας Καρδίτσας (Νέος Αγώνας Καρδίτσας)*, 2009.

ΥΠΕΧΩΔΕ, Γ.Γ.Δ.Ε., Ε.Υ.Δ.Ε Αχελώου. *Παροχή υπηρεσιών συμβούλου για την υποβοήθηση της Υπρεσίας στην προσαρμογή των μελετών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εκτροπή του Αχελώου στη Θεσσαλία (υδραυλικά - υδρολογικά - υδρογεωλογικά θέματα)*. Αθήνα: Υδροεξυγιαντική Λ. Σ. Λαζαρίδης & Σία Ε. Ε. (Σύμβουλος), 1995.