

# Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας

Ανδρέας Ευστρατιάδης  
*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ*

Δημήτρης Στεφ. Μπουζιώτας  
*Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ*

Δημήτρης Κουτσογιάννης  
*Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ*

*Λέξεις κλειδιά:* υδροηλεκτρική παραγωγή, υδροσυστήματα, συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, αξιοπιστία, άντληση-ταμίευση, Υδρονομέας

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Περιγράφεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση σύνθετων υδροσυστημάτων με κύριο στόχο την υδροηλεκτρική παραγωγή, η οποία βασίζεται στο μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση-στοχαστική προσομοίωση-βελτιστοποίηση και υλοποιείται μέσω του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων Υδρονομέας. Εξηγείται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής και στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του πλαισίου αυτού σε μία σειρά εναλλακτικών διατάξεων του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας. Στα αποτελέσματα των αναλύσεων περιλαμβάνονται η αποτίμηση της ικανότητας παραγωγής εγγυημένης ενέργειας αλλά και το ισοδύναμο όφελος της υδροηλεκτρικής παραγωγής, ευρήματα ιδιαίτερα χρήσιμα για τη χάραξη μακροπρόθεσμης και ολοκληρωμένης ενεργειακής πολιτικής.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βέλτιστος έλεγχος και διαχείριση των Υ/Η ταμιευτήρων παραμένει ένα ζήτημα-πρόκληση, καθώς συνδυάζει τις εγγενείς δυσκολίες της μοντελοποίησης, λόγω της στοχαστικής φύσης των υδρολογικών εισροών και της μη γραμμικής δυναμικής των υδρο-ενεργειακών διεργασιών, με την ανάγκη μιας ολιστικής θεώρησης του διαχειριστικού προβλήματος, λόγω της ύπαρξης πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων στόχων. Αποτελεί μάλιστα ζήτημα αυξανόμενης σημασίας, καθώς στο σημερινό ενεργειακό σκηνικό παρατηρείται μια ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Οι δύο αυτές ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, λόγω της έντονης και μη προβλέψιμης διακύμανσης της παραγωγής, ως συνέπεια της αβεβαιότητας που διέπει τις σχετικές υδρομετεωρολογικές διεργασίες, εγείρει απαιτήσεις χρονικής αναρρύθμισης και αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να αναθεωρηθούν αφενός οι τρέχουσες αναπτυξιακές και διαχειριστικές πολιτικές και αφετέρου οι μεθοδολογίες και τα υπολογιστικά εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων, τα οποία κρίνονται μάλλον ανεπαρκή.

Υπό αυτό το πρίσμα της αναθεώρησης της ενεργειακής στρατηγικής της χώρας, οφείλουμε να επανεξετάσουμε και το πολυσύνθετο ζήτημα του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας και διη τη σκοπιμότητα λειτουργίας των έργων εκτροπής, η οποία έχει αδρανήσει. Η ενεργειακή διάσταση μάλιστα αποκτά ειδικό βάρος αν αναλογιστεί κανείς το αναμενόμενο όφελος από την αξιοποίηση των έργων αυτών, υπό το καθεστώς οικονομικής κρίσης και ανάγκης εξοικονόμησης πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, είναι ανάγκη να εξετασθεί η χάραξη μίας καινοτόμου, ωφέλιμης διαχειριστικής

ενεργειακής πολιτικής υπό το πρίσμα των τελευταίων μεθοδολογικών και τεχνολογικών εξελίξεων, της ανάγκης για αειφορικό σχεδιασμό αλλά και των σύγχρονων περιβαλλοντικών θεωρήσεων.

Στην κατεύθυνση αυτή, αναπτύχθηκε ένα διαχειριστικό μοντέλο του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας, με επέκταση του λογισμικού Υδρονομέας. Ο Υδρονομέας είναι ένα καταξιωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, με επιτυχή εφαρμογή σε σύνθετα προβλήματα υδατικών πόρων στην Ελλάδα, μεταξύ των οποίων στην επιχειρησιακή διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Το μαθηματικό μοντέλο του Υδρονομέα, που βασίζεται σε μια προσέγγιση στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, αναπτύχθηκε περαιτέρω ώστε να χειρίζεται συστήματα υδροενεργειακών έργων και να βελτιστοποιεί την επίδοσή τους, τόσο σε όρους εγγυημένης παραγωγής ενέργειας όσο και συνολικού οικονομικού οφέλους. Με τη νέα έκδοση του προγράμματος διερευνήθηκαν διάφορα σενάρια διάταξης του συστήματος, αναδεικνύοντας ποικίλες πτυχές που εμφανίζονται κατά την ενεργειακή διαχείρισή του. Για κάθε διάταξη έργων, υφιστάμενων και μελλοντικών, αναζητήθηκε η βέλτιστη διαχειριστική πολιτική με βάση πολλαπλά κριτήρια επίδοσης, που περιλαμβάνουν τόσο οικονομικούς όσο και ενεργειακούς δείκτες. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η σχέση ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και αξιοπιστίας, καθώς και το περιθώριο οφέλους από τη συνδυασμένη κάλυψη ενεργειακών και αρδευτικών ζητήσεων. Επιπλέον, αποτιμήθηκε η οικονομική ζημία που οφείλεται στην καθυστέρηση της ένταξης των έργων της Μεσοχώρας στο σύστημα, ενώ εξετάστηκε η περαιτέρω εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού του συστήματος, μέσω έργων άντλησης-ταμίευσης. Το παραπάνω εύρος εφαρμογών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση του οφέλους από εναλλακτικές διατάξεις του συστήματος, συμβάλλοντας στον σχεδιασμό μιας ολοκληρωμένης μακροπρόθεσμης ενεργειακής πολιτικής, για το σημαντικότερο σχήμα Υ/Η ταμιευτήρων της Ελλάδας.

## 2 ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ: ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Το λογισμικό Υδρονομέας αποτελεί ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα για τη διαχείριση υδροσυστημάτων οποιασδήποτε τοπολογίας και πολυπλοκότητας. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν απολήψεις από ταμιευτήρες, ποτάμια και συστήματα γεωτρήσεων, καθώς και έργα υποδομής, για την κάλυψη πολλαπλών χρήσεων νερού και λειτουργικών ή/και περιβαλλοντικών περιορισμών. Ο Υδρονομέας αναπτύχθηκε ως κεντρική συνιστώσα ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, στα πλαίσια της επιχειρησιακής διαχείρισης του υδροσυστήματος των Αθηνών [1]. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά απαιτητικό πρόβλημα, που απαιτεί την κάλυψη της υδρευτικής ζήτησης της Αθήνας από συνδυασμό επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, με υψηλή αξιοπιστία και κάτω από πληθώρα τεχνικών, λειτουργικών και περιβαλλοντικών περιορισμών.

Ως πυρήνα της μεθοδολογίας του, ο Υδρονομέας υλοποιεί το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση [2]. Όπως περιγράφεται στο Σχήμα 1, τα βασικά στοιχεία της μεθοδολογίας είναι τα εξής:

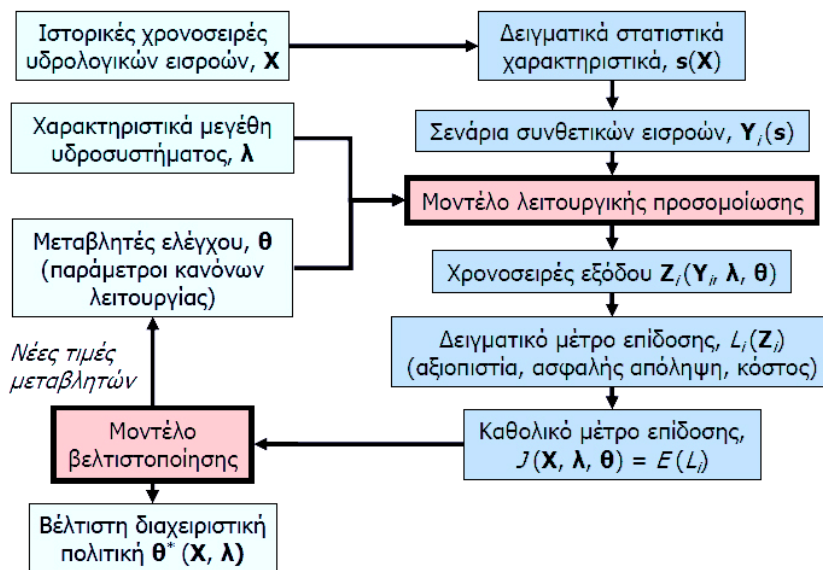
- Παραμετροποίηση της γενικής διαχειριστικής πολιτικής του συστήματος, με χρήση κανόνων λειτουργίας, που περιγράφονται από μικρό αριθμό παραμέτρων  $\theta$ . Οι κανόνες καθορίζουν τις επιθυμητές ροές νερού από τα κύρια έργα αξιοποίησης, με βάση την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, π.χ. τις απολήψεις-στόχους από τους ταμιευτήρες, συναρτήσει των διαθέσιμων αποθεμάτων [3]. Η παραμετροποίηση εξασφαλίζει δραστική μείωση των ονομαστικών βαθμών ελευθερίας του συστήματος (χωρίς όμως ουσιαστική επίπτωση ως προς τα οφέλη, βλ. [2]), ώστε να είναι υπολογιστικά πρόσφορη η βελτιστοποίησή του. Επιπλέον, η μορφή των κανόνων είναι απλή, ώστε να είναι κατανοητή από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη.
- Αναπαράσταση των διεργασιών του υδροσυστήματος μέσω στοχαστικής προσομοίωσης. Η υπολογιστική διαδικασία περιλαμβάνει: (α) την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών (π.χ. εισροές ταμιευτήρων, απώλειες λόγω εξάτμισης), μέσω στοχαστικών μοντέλων γέννησης συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους, που αναπαράγουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά

των ιστορικών δειγμάτων, και (β) την προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος, με δεδομένες χρονοσειρές εισόδου και δεδομένες τιμές παραμέτρων των κανόνων λειτουργίας. Σε κάθε χρονικό βήμα (μήνας), ο προσδιορισμός των άγνωστων ροών του συστήματος (απολήψεις, παροχές) διατυπώνεται ως πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης σε ένα εννοιολογικό μοντέλο διγράφου [4]. Στο πέρας της προσομοίωσης αποτιμάται ένα καθολικό μέτρο επίδοσης  $J(\theta)$ , που εκφράζεται σε όρους κόστους, αξιοπιστίας, κτλ., καθώς και σε συνδυασμούς των παραπάνω.

- Εντοπίζεται η πλέον πρόσφορη διαχειριστική πολιτική, μέσω βελτιστοποίησης των παραμέτρων  $\theta$  ως προς το μέτρο επίδοσης  $J(\theta)$ . Για τον σκοπό αυτό διαμορφώνεται ένα πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης, που επιλύεται με τον εξελικτικό αλγόριθμο ανόπτησης-απλόκου [5]. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει μια συστηματική διαδικασία μη γραμμικής αναζήτησης, καλώντας το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης, για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων.

Το παραπάνω πλαίσιο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης, που είναι η πιστή αναπαράσταση των διεργασιών των συστημάτων υδατικών πόρων, με αυτά της βελτιστοποίησης, που είναι ο εντοπισμός της κατάλληλης διαχειριστικής πολιτικής. Ιδιαίτερη σημασία έχει η στοχαστική προσέγγιση, που ανεξαρτητοποιεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από τη (μικρού μήκους) ιστορική πληροφορία των εισροών. Επιπλέον, οδηγεί σε πιθανοτικές εκτιμήσεις όλων των μεγεθών επίδοσης του συστήματος, με στατιστική επεξεργασία των χρονοσειρών απόκρισης του μοντέλου προσομοίωσης, βάσει των οποίων αποτιμάται το μέτρο  $J(\theta)$ . Η ακρίβεια εκτίμησης του  $J(\theta)$  εξαρτάται από το μήκος της προσομοίωσης, ήτοι το μήκος των συνθετικών χρονοσειρών.

Για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών χρησιμοποιείται το λογισμικό Κασταλία [6]. Η Κασταλία υλοποιεί ένα πολυμεταβλητό στοχαστικό μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων (ετήσια και μηνιαία), το οποίο διατηρεί τα ουσιώδη στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων (μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις, συντελεστές ασυμμετρίας, αυτοσυσχετίσεις και ετεροσυσχετίσεις) και στις δύο κλίμακες. Επιπλέον, αναπαράγει το ιδιαίτερα κρίσιμο φαινόμενο της εμμονής (ή αλλιώς δυναμική Hurst-Kolmogorov), που χαρακτηρίζει τις υδρολογικές διεργασίες στις μεγάλες κλίμακες [7].



Σχήμα 1: Το πλαίσιο παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης που υλοποιεί ο Υδρονομέας.

### 3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ Υ/Η ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Σε πρόσφατη εργασία, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή του παραπάνω μεθοδολογικού πλαισίου για προβλήματα υδροηλεκτρικής παραγωγής, υλοποίησή του στον Υδρονομέα καθώς και έλεγχος

του στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας [8]. Η γενίκευση της μεθοδολογίας αφορά σε τρία βασικά στοιχεία του μοντέλου, που περιγράφονται στη συνέχεια.

### 3.1 Παραμετροποίηση κανόνων λειτουργίας Y/H μονάδων

Η παραμετροποίηση της λειτουργίας των Y/H σταθμών (YHΣ) γίνεται με τη θεώρηση χρονικά σταθερών στόχων παραγωγής ενέργειας, στο υδραγωγείο που αναπαριστά τη λειτουργία των στροβίλων. Συνεπώς, κατά την σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, για κάθε Y/H διάταξη εισάγεται μία παράμετρος, που αναφέρεται στον άγνωστο ενεργειακό στόχο. Η θεωρητικά μέγιστη τιμή του εν λόγω στόχου προκύπτει με βάση την εγκατεστημένη ισχύ του YHΣ.

Κατά την προσομοίωση, κάθε ενεργειακός στόχος αντιμετωπίζεται ως περιορισμός ελάχιστης ροής στον στρόβιλο. Η τήρηση του περιορισμού εξασφαλίζεται με την αντιστοίχιση ενός εικονικού μοναδιαίου κέρδους στο αντίστοιχο υδραγωγείο. Στο μοντέλο γραμμικής βελτιστοποίησης, το οποίο διαμορφώνεται στα πλαίσια της προσομοίωσης, το κέρδος αυτό εξαρτάται από τη σχετική σημασία κάθε στόχου, σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήσεις νερού και περιορισμούς [4].

Σε κάθε χρονικό βήμα, για δεδομένο ενεργειακό διαθέσιμο και δεδομένο συντελεστή απόδοσης, υπολογίζεται ο αντίστοιχος όγκος νερού που πρέπει να διοχετευτεί μέσω των στροβίλων ώστε να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια. Στη συνήθη περίπτωση που το ενεργειακό διαθέσιμο, καθώς και ο συντελεστής απόδοσης των στροβίλων, εξαρτώνται από τη στάθμη του ανάντη ταμιευτήρα, η επιθυμητή εκροή για την παραγωγή της ζητούμενης ενέργειας μεταβάλλεται ανά μήνα.

### 3.2 Πιθανοτική θεώρηση ενεργειακής παραγωγής – Διάκριση πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας

Στο πλαίσιο της αναβάθμισης του μεθοδολογικού πλαισίου του Υδρονομέα, διαμορφώθηκαν επιπρόσθετα μέτρα επίδοσης, που σχετίζονται με την υδροηλεκτρική παραγωγή. Η εκτίμησή τους βασίζεται στην στατιστική-πιθανοτική ανάλυση των προσομοιωμένων χρονοσειρών παραγωγής ενέργειας σε κάθε μεμονωμένο YHΣ, καθώς και της συνολικά παραγόμενης ενέργειας από όλες τις Y/H μονάδες του υδροσυστήματος. Το θεμελιώδες πιθανοτικό μέγεθος που προκύπτει από τις αναλύσεις των χρονοσειρών  $e_t$  είναι η *αξιοπιστία της ενεργειακής παραγωγής*, που ορίζεται ως:

$$r_E = P(E \geq e^*) \approx n' / n \quad (1)$$

όπου  $E$  τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την παραγωγή ενέργειας και  $e^*$  ο στόχος ενεργειακής παραγωγής. Για μεγάλα μήκη προσομοίωσης η πιθανότητα αυτή μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά ως το ποσοστό των χρονικών βημάτων που καλύπτουν το στόχο, δηλαδή το λόγο των χρονικών βημάτων  $n'$  για τα οποία ισχύει  $e_t \geq e^*$  προς το σύνολο των βημάτων (μήκος) προσομοίωσης  $n$ .

Στα Y/H συστήματα, το μέγεθος  $r_E$  συνδέεται άμεσα με την έννοια της *πρωτεύουσας ενέργειας*  $e_p$ , δηλαδή της *εγγυημένης* ενέργειας που προβλέπεται να είναι διαθέσιμη στον χρονικό ορίζοντα λειτουργίας του συστήματος, με πολύ υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, της τάξης του 95 ως 99%. Όταν η ενεργειακή παραγωγή  $e_t$  υπερβαίνει την τιμή  $e_p$ , τότε η περίσσεια  $e_t - e_p$  καλείται *δευτερεύουσα ενέργεια*. Επειδή η ενέργεια αυτή εξαρτάται από την τυχαιότητα των υδρολογικών συνθηκών, είναι χρονικά ακανόνιστη και μη προβλέψιμη, και συνεπώς έχει χαμηλότερη αξία από την πρωτεύουσα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο χρονικά σταθερός ενεργειακός στόχος  $e^*$  υποδηλώνει την επιθυμητή παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας. Ωστόσο, επειδή η διάκριση της παραγόμενης ενέργειας σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα είναι δυνατή μόνο μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, η πραγματική τιμή της πρωτεύουσας ενέργειας  $e_p$  δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τον στόχο  $e^*$ .

### 3.3 Διαμόρφωση μέτρων επίδοσης ενεργειακής παραγωγής

Τα μέτρα επίδοσης  $J(\theta)$  που εισάγονται ως στοχαστικές συναρτήσεις στη βελτιστοποίηση πρέπει να έχουν εύληπτη μορφή για συνήθεις χειριστικές πρακτικές, φυσική υπόσταση και γενικότητα χρήσης. Στο παραπάνω πλαίσιο, αναπτύχθηκαν δύο εναλλακτικά κριτήρια επίδοσης. Στο πρώτο, η

επίδοση του συστήματος αποτιμάται στη λογική της μεγιστοποίησης της *συνολικά παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας*, η οποία έχει υψηλότερη αξία σε σχέση με τη δευτερεύουσα. Για τον υπολογισμό του εν λόγω μέτρου σε κάθε χρονικό βήμα  $t$ , αθροίζονται οι προσομοιωμένες τιμές της παραγόμενης ενέργειας  $e_t^k$  από κάθε στρόβιλο  $k$ , οπότε προκύπτει η χρονοσειρά παραγωγής ενέργειας του συστήματος,  $E_t = \sum e_t^k$ . Στη συνέχεια, γίνεται διαχωρισμός της σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα, με βάση το επίπεδο αξιοπιστίας  $r_E$  που θέτει ο χρήστης.

Στη δεύτερη περίπτωση επιδιώκεται η σύνδεση της ενεργειακής παραγωγής με το ισοδύναμο οικονομικό όφελος. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι, σε κάθε χρονικό βήμα, μπορεί να αντιστοιχισθεί ένα οικονομικό όφελος που αποδίδεται στο σύστημα από την ικανοποίηση κάθε μεμονωμένου ενεργειακού στόχου, μέσω μιας συνάρτησης οφέλους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αναγωγή στη λογική κόστους/οφέλους όλων των τύπων στόχων και διαχειριστικών περιορισμών  $i$ , δηλαδή στόχων άρδευσης, ύδρευσης, ελάχιστης περιβαλλοντικής παροχής, κτλ. Η συνάρτηση οφέλους για κάθε τύπο στόχου  $i$  και διατυπώνεται ως:

$$P_i^t = c_i^B \cdot \sum_{i=1}^n S_i + c_i^F \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n D_i^t - \sum_{i=1}^n S_i\right), 0\right\} - c_i^D \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n D_i^t\right), 0\right\} \quad (2)$$

όπου το συνολικό όφελος  $P_i^t$  για το μήνα  $t$  προκύπτει ως άθροισμα τριών όρων, με τον πρώτο να είναι το όφελος από την εκπλήρωση του στόχου  $S_i$ , το δεύτερο να είναι ένας όρος πρόσθετου οφέλους σε περίπτωση που η παραγόμενη ποσότητα  $D_i$  το μήνα  $t$  ξεπεράσει τον επιθυμητό στόχο  $S_i$  και τον τρίτο να είναι ένας όρος ποινής, σε περίπτωση που η ποσότητα  $D_i$  δεν φτάσει τα επίπεδα του στόχου και παρατηρηθούν ελλείμματα. Προφανώς οι δύο τελευταίοι όροι ενεργοποιούνται μόνο σε περίπτωση πλεονάσματος ή ελλείμματος σε κάποιο χρονικό βήμα. Οι συντελεστές  $c_i^B$ ,  $c_i^E$  και  $c_i^D$  υποδηλώνουν το μοναδιαίο όφελος από την κάλυψη του κύριου στόχου  $B$ , το πρόσθετο μοναδιαίο όφελος από την πλεονασματική παραγωγή  $E$ , καθώς και το μοναδιαίο κόστος των ελλειμμάτων  $D$  που προκύπτουν από την παραβίαση της τιμής-στόχου, που θεωρείται ότι καλείται να πληρώσει ο διαχειριστής. Οι παραπάνω συντελεστές ορίζονται από τον χρήστη. Ειδικότερα, στην παραγωγή  $Y/H$  ενέργειας, τα μοναδιαία κόστη και οφέλη αντιπροσωπεύουν το όφελος από την κάλυψη του ενεργειακού στόχου  $e^*$ , το μειωμένο όφελος από την παραγωγή πλεονασματικής ενέργειας, καθώς και το κόστος ποινής που εκτιμάται, π.χ. ως το κόστος παραγωγής ενέργειας από τρίτη πηγή, προκειμένου να καλυφθούν τα ενεργειακά ελλείμματα. Το τελικό μέτρο επίδοσης, που καλείται *συνολικό κόστος/όφελος συστήματος*, εκτιμάται ως η μέση τιμή του συνολικού ετήσιου οφέλους από τις  $m$  ομάδες στόχων του συστήματος, ήτοι:

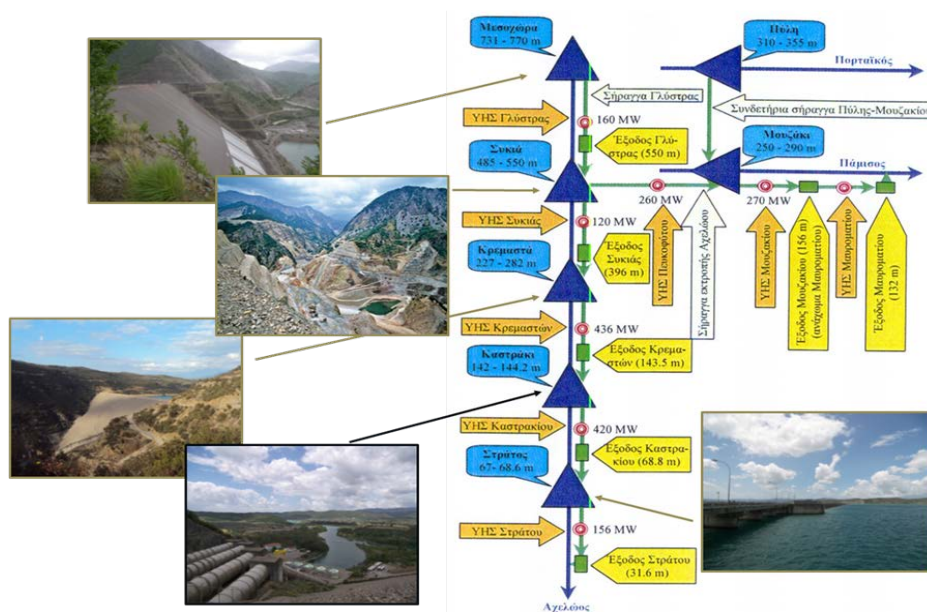
$$J(\theta) = \sum_{i=1}^m E\{P_{tot,i}^{year}\} = \sum_{i=1}^m E\left\{\sum_{t=1}^{12} P_i^t\right\} \quad (3)$$

Τα δύο παραπάνω κριτήρια επίδοσης χρησιμοποιούνται για διαφορετικό σκοπό. Συγκεκριμένα, με το πρώτο επιδιώκεται μια πολιτική λειτουργίας που εξασφαλίζει μια κατά το δυνατό σταθερή ενεργειακή παραγωγή, για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αναζητείται η πολιτική που μεγιστοποιεί το μέσο ετήσιο όφελος από τις διάφορες χρήσεις νερού, εφόσον είναι γνωστές οι οικονομικές παράμετροι που το καθορίζουν. Είναι φανερό ότι το πρώτο κριτήριο είναι προσανατολισμένο σε υδροσυστήματα στα οποία ενδιαφέρει πρωτίστως η ενεργειακή παραγωγή, ενώ το δεύτερο είναι πιο κατάλληλο για συστήματα πολλαπλού σκοπού. Το υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας ενδείκνυται για τη διερεύνηση και των δύο κριτηρίων, καθώς περιλαμβάνει σενάρια λειτουργίας με κύριο ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής (π.χ. σενάριο B, όπου εξετάζεται η ένταξη της Μεσοχώρας στα υφιστάμενα σχήμα έργων), με σενάρια στα οποία η  $Y/H$  παραγωγή συνδυάζεται με την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της Θεσσαλίας.

#### 4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΑΧΕΛΩΟΥ-ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

##### 4.1 Διαμόρφωση σεναρίων για διάφορες διατάξεις έργων

Το αναβαθμισμένο μεθοδολογικό πλαίσιο του Υδρονομέα εφαρμόζεται σε μία σειρά σεναρίων που αφορούν στη διαχείριση του υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας. Τα σενάρια αναφέρονται σε εναλλακτικές διατάξεις έργων με διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας, και παρουσιάζουν μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον. Η λεπτομερής διερεύνηση τους, μέσω προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, αποσκοπεί όχι μόνο στην εκτίμηση του υδροηλεκτρικού δυναμικού του συστήματος αλλά και την αντικειμενική αξιολόγηση των επιπτώσεων από την λειτουργία των νέων έργων αξιοποίησης, στα πλαίσια του σχεδίου μερικής εκτροπής του Αχελώου προς τη Θεσσαλία, με μεταφορά μιας δεδομένης ποσότητας νερού ετησίως. Οι επιπτώσεις των έργων αυτών τόσο στο υδατικό δυναμικό των ποταμών όσο και στις ανταγωνιστικές αρδευτικές χρήσεις κρίνονται αναγκαίες προκειμένου να απαντηθούν οι διάφοροι προβληματισμοί, που έχουν μέχρι στιγμής παγώσει το σχέδιο της μερικής εκτροπής του Αχελώου.



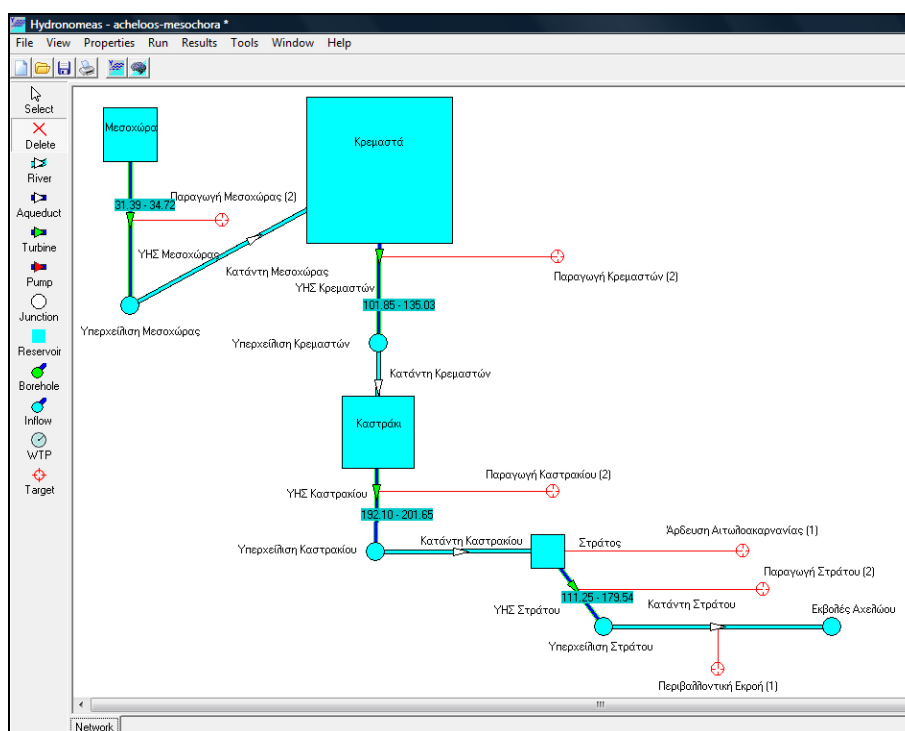
Σχήμα 2: Γενική διάταξη έργων υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας

Στο Σχήμα 2 διακρίνονται οι κύριες συνιστώσες του ολοκληρωμένου σχήματος έργων, καθώς και φωτογραφίες από τη σημερινή κατάσταση των έργων. Το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια ιδιαίτερα σύνθετη τοπολογία, καθώς περιλαμβάνει δύο συζευγμένα ποτάμια συστήματα με τις αντίστοιχες λεκάνες απορροής, επτά ταμιευτήρες, συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας 4 700 hm<sup>3</sup>, επτά Υ/Η μονάδες, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1.7 GW, και τα σχετικά έργα μεταφοράς. Πέραν της υδροηλεκτρικής παραγωγής, το εν λόγω σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει πολλαπλές και, εν μέρει, αντικρουόμενες χρήσεις νερού, συγκεκριμένα τη διάθεση αρδευτικού νερού στη Θεσσαλία και την Αιτωλοακαρνανία, την αντιπλημμυρική προστασία του κάτω ρου του Αχελώου και την εξασφάλιση μιας ελάχιστης παροχής περιβαλλοντικής διατήρησης κατά μήκος των του Αχελώου και των δύο παραποτάμων του Πηνειού (Πορταϊκός, Πάμισος).

Μια κομβική πτυχή της διαχείρισης του παραπάνω συστήματος είναι η δυνατότητα προσαρμογής του υφιστάμενου σχεδίου των έργων εκτροπής, εντάσσοντας τουλάχιστον δύο μονάδες άντλησης – ταμίευσης. Η τροποποίηση αυτή είχε προταθεί ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 από μελετητές [9, 10], ώστε αξιοποιηθούν τα ιδιαίτερα ευνοϊκά χαρακτηριστικά του συστήματος (ειδικότερα, η μεγάλη παροχетеυτικότητα της σήραγγας Πολυφύτου και η διαθέσιμη υψομετρική διαφορά, σε συνδυασμό με την εποχιακή μόνο χρήση της για μεταφορά νερού στη Θεσσαλία),

αλλά και για να αποκτήσει το ελληνικό σύστημα περαιτέρω ευελιξία και δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, ενόψει της αναμενόμενης (τότε) επέκτασης των ΑΠΕ. Για τον λόγο αυτό, στα σενάρια λειτουργίας, το πλήρες σχήμα έργων διερευνάται με την υπόθεση κατασκευής έργων άντλησης-ταμίευσης στη σήραγγα εκτροπής (Πολύφυτο) και κατάντη του ταμιευτήρα Μουζακίου, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσον αυτές οι διατάξεις οδηγούν σε πιο αποδοτική εικόνα ενεργειακής παραγωγής. Τα σενάρια που τελικά εξετάστηκαν αναφέρονται στις εξής τέσσερις διατάξεις:

- Διάταξη (A1): Υφιστάμενη διάταξη έργων Κάτω Αχελώου (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος), με σκοπό τον έλεγχο του πλαισίου βελτιστοποίησης με πραγματικά δεδομένα του συστήματος.
- Διάταξη (A2): Πλήρης λειτουργική ένταξη του ταμιευτήρα Μεσοχώρας, ως του έργου κεφαλής ενός σειριακού σχήματος τεσσάρων Υ/Η ταμιευτήρων κατά μήκος του Αχελώου (Σχήμα 3). Το σενάριο αυτό έχει μεγάλη διαχειριστική σημασία, καθώς τα έργα της Μεσοχώρας (φράγμα, Υ/Η σταθμός και σήραγγα προσαγωγής) έχουν ολοκληρωθεί πριν μια δεκαετία, αλλά δεν έχουν τεθεί σε λειτουργία, μεταξύ άλλων με αιτιολόγηση ότι συνδέονται με τα έργα εκτροπής.
- Διάταξη (E1): Ολοκλήρωση και λειτουργία έργων εκτροπής (ταμιευτήρας Συκιάς στον Αχελώο, ταμιευτήρες Μουζακίου και Πύλης Θεσσαλίας), με συμβατικούς ΥΗΣ (χωρίς άντληση).
- Διάταξη (E2): Πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, με διατάξεις άντλησης-ταμίευσης στη σήραγγα Πευκόφυτου και κατάντη του Μουζακίου.



Σχήμα 3: Σχηματοποίηση μοντέλου προσομοίωσης για τη διάταξη έργων A2 στο περιβάλλον λειτουργίας του Υδρονομέα. Διακρίνονται οι ταμιευτήρες του Αχελώου, τα κατάντη Υ/Η έργα, και οι στόχοι παραγωγής ενέργειας, άρδευσης της Αιτωλοακαρνανίας και περιβαλλοντικής εκροής κατάντη Στράτου.

#### 4.2 Δεδομένα εισόδου μοντέλου προσομοίωσης

Η σχηματοποίηση, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, τα υδρολογικά δεδομένα, καθώς και οι αρδευτικοί, υδρευτικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί, ελήφθησαν από προηγούμενες μελέτες [9, 10, 11, 12]. Με βάση τα στοιχεία αυτά, διαμορφώθηκαν τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Υδρονομέας, για τις τέσσερις διατάξεις που εξετάστηκαν.



Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Κασταλία για τη στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών του συστήματος και την παραγωγή μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, μήκους 1000 ετών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μοντέλο αυτό αναπαράγει την παρατηρημένη στατιστική διάτατα των ιστορικών δειγμάτων, μεταξύ των οποίων την δυναμική Hurst-Kolmogorov, καθώς και τις χωρικές συσχετίσεις μεταξύ βροχής και απορροής ανά ταμιευτήρα, και απορροής των όμορων υπολεκανών. Τα ιστορικά δείγματα κυμαίνονται από 30 έως 50 έτη και αναφέρονται στις απορροές των ταμιευτήρων, τις βροχοπτώσεις στην επιφάνεια των ταμιευτήρων και τις απώλειες εξάτμισης.

Οι στόχοι και περιορισμοί που τέθηκαν στο μοντέλο είναι:

- σταθερή μηνιαία υδροηλεκτρική παραγωγή (σε GWh/μήνα, για κάθε Υ/Η σταθμό),
- κάλυψη αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών της Αιτωλοακαρνανίας και της Θεσσαλίας,
- διατήρηση επαρκούς περιβαλλοντικής ροής στα κατάντη τμήματα των ποταμών.

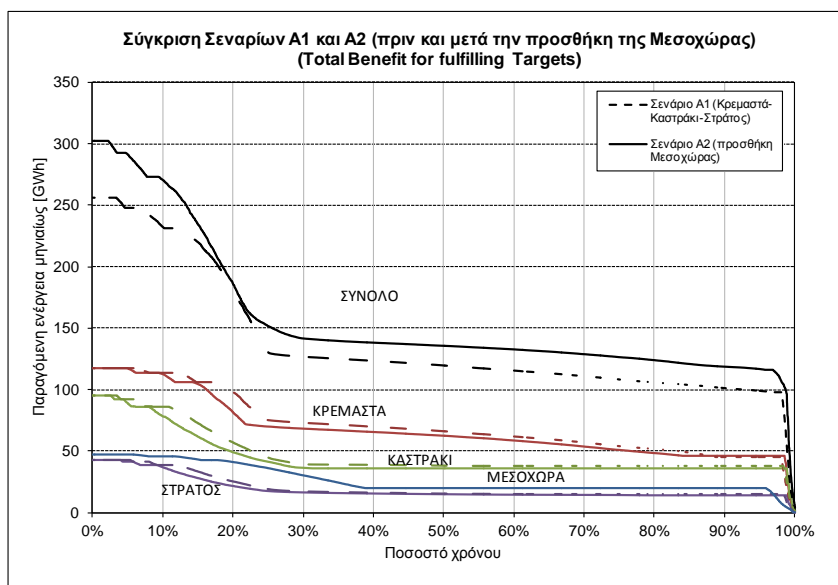
Για τις αρδευτικές ανάγκες της Θεσσαλίας θεωρήθηκε ετήσια ζήτηση, κατάλληλα κατανεμημένη την αρδευτική περίοδο, με εναλλακτικές τιμές μεταξύ 0 και 1200 hm<sup>3</sup> με ιδιαίτερη ανάλυση για την τιμή 600 hm<sup>3</sup>. Για τις διατάξεις άντλησης-ταμίευσης έγινε η παραδοχή αντλητικής λειτουργίας στο 25% του χρόνου κάθε μήνα, θεωρώντας εξάωρη λειτουργία των αντλιών ημερησίως. Για τα οικονομικά μεγέθη, θεωρήθηκε μοναδιαίο όφελος 0.045 και 0.023 €/kWh για την παραγωγή πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, αντίστοιχα, το μοναδιαίο κόστος άντλησης τέθηκε ίσο με 0.022 €/kWh. (Ας σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές είναι πολύ χαμηλότερες από την επίσημη, διά νόμου καθορισμένη, τιμή της ανανώσιμης ενέργειας από υδροηλεκτρικά έργα). Τέλος, για τη γεωργική παραγωγή, το ισοδύναμο οικονομικό όφελος από την χρήση αρδευτικού νερού ορίστηκε σε 0.060 €/m<sup>3</sup>.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Προσθήκη έργων Μεσοχώρας στο υφιστάμενο σύστημα

Στον Πίνακα 1 συγκρίνονται τα βασικά ενεργειακά μεγέθη που προκύπτουν από τις αναλύσεις των δύο πρώτων διατάξεων, ήτοι του υφιστάμενου σχήματος A1 (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος), και της διευρυμένης διάταξης A2, στην οποία έχουν ενταχθεί τα έργα της Μεσοχώρας. Ακόμη, στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η χρονική κατανομή της ενεργειακής παραγωγής, με τη μορφή καμπυλών διαρκείας, ανά Υ/Η μονάδα και για το σύνολο του συστήματος. Στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ως μέτρο επίδοσης η συνάρτηση κόστους/οφέλους. Με τον τρόπο αυτό, εντοπίστηκε η διαχειριστική πολιτική (σε όρους στόχων παραγωγής ενέργειας ανά ΥΗΣ) που μεγιστοποιεί το συνολικό μέσο ετήσιο όφελος από την παραγόμενη ενέργεια, πριν και μετά την προσθήκη της Μεσοχώρας. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η ένταξη της Μεσοχώρας στο υφιστάμενο σχήμα θα έχει πολύ θετική επίδραση, καθώς αναμένεται να συνεισφέρει με 316 GWh/έτος, προσθέτοντας περίπου 10 Μ€ καθαρού ενεργειακού οφέλους, σε μέση ετήσια βάση. Το ποσό αυτό κρίνεται σημαντικό και δείχνει πόσο σημαντικές είναι οι οικονομικές συνέπειες από την έως τώρα μη λειτουργία του έργου.





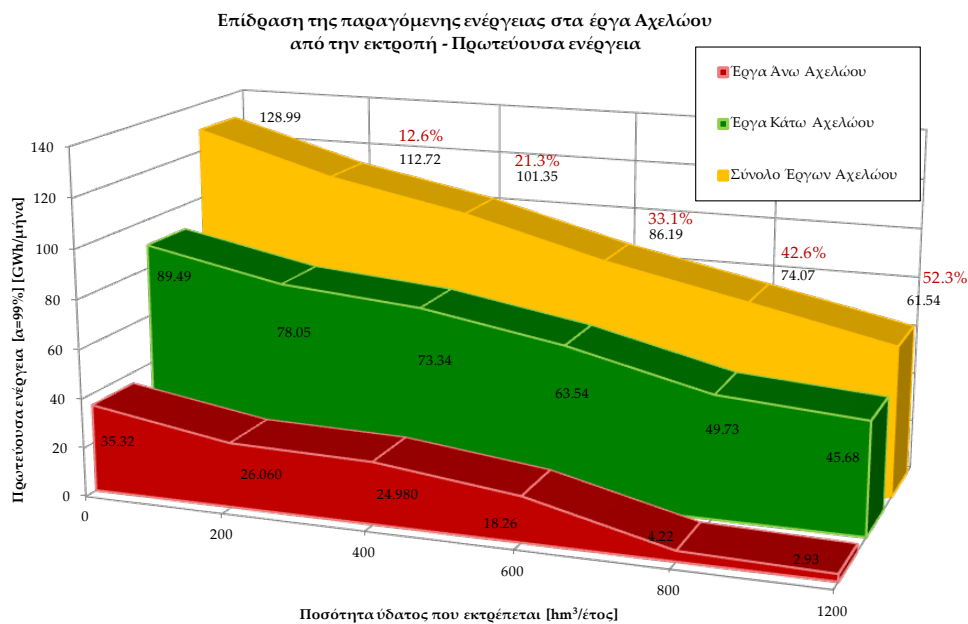
Σχήμα 4: Καμπύλες διάρκειας και ενεργειακής παραγωγής, πριν και μετά την προσθήκη της Μεσοχώρας, για τα επιμέρους Υ/Η έργα και το συνολικό σύστημα.

Πίνακας 1: Μέση μηνιαία ενεργειακή παραγωγή και μέσο ετήσιο οικονομικό όφελος από το υφιστάμενο σχήμα έργων και μετά την προσθήκη των έργων της Μεσοχώρας.

		Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος	Μεσοχώρα	Σύνολο Συστήματος	Οικονομικό Όφελος Ενεργειακής Παραγωγής Συστήματος (10 <sup>6</sup> €/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	

## 5.2 Η επίπτωση της εκτροπής στα έργα του Αχελώου

Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάζονται εναλλακτικές τιμές του ετήσιου όγκου εκτροπής (0, 200, 400, 600, 800 και 1200 hm<sup>3</sup>) με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της συνολικά παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας, για αξιοπιστία 99%. Τονίζεται ότι, κατά καιρούς, έχουν γίνει αναπροσαρμογές της εκτρεπόμενης ποσότητας, ανάλογα με την πορεία εξέλιξης των δικαστικών αποφάσεων και τα επικαιροποιημένα σχέδια διαχείρισης. Συγκεκριμένα, η υψηλή τιμή των 1200 hm<sup>3</sup> είναι κοντά σε αυτή που είχε προταθεί στον αρχικό σχεδιασμό, ενώ στο πλέον πρόσφατα υποβληθέν διαχειριστικό σχέδιο των λεκανών, ο όγκος της εκτροπής έχει πλέον μειωθεί σε μόλις 250 hm<sup>3</sup>. Σε όλα τα σενάρια θεωρείται τμήμα της διάταξης E1 (χωρίς έργα στη Θεσσαλική πλευρά), στην οποία η ποσότητα νερού που εκτρέπεται από τον ταμιευτήρα Συκιάς αντιμετωπίζεται ως στόχος αρδευτικής απόληψης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, σε όρους παραγωγής ενέργειας, συνοψίζονται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Διαγράμματα μείωσης της πρωτεύουσας ενέργειας για το σύνολο των έργων του Αχελώου, καθώς και για τις υποομάδες έργων του υφιστάμενου σχήματος (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος) και των έργων του Άνω Αχελώου (Μεσοχώρα, Συκιά), για διάφορες τιμές του ετήσιου όγκου εκτροπής. Με κόκκινα γράμματα απεικονίζονται τα ποσοστά μείωσης σε σχέση με το σενάριο μηδενικής εκτροπής.

Η διαμόρφωση των παραπάνω σεναρίων επιτρέπει τη διερεύνηση των επιπτώσεων της μερικής εκτροπής του Αχελώου στο υφιστάμενο σχήμα Κρεμαστών-Καστρακίου-Στράτου, αλλά και στην τήρηση των περιορισμών περιβαλλοντικής ροής. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι, με την υπόθεση εκτροπής 600 hm<sup>3</sup> ετησίως, η πρωτεύουσα ενέργεια θα μειωθεί κατά 312 GWh/έτος, ήτοι ποσοστό 29%, σε σχέση με αυτή που μπορεί θεωρητικά να παραχθεί από τα υπάρχοντα έργα. Βεβαίως, θα μπορεί να γίνει πλήρης αναπλήρωση της απώλειας αυτής από τους νέους ΥΗΣ Πολυφύτου και Μουζακίου (εφόσον αυτοί κατασκευαστούν), όπως τεκμηριώνεται παρακάτω. Επισημαίνεται ακόμα ότι για εκτροπή μεγαλύτερη των 600 hm<sup>3</sup>, οι ΥΗΣ Μεσοχώρας και Συκιάς χάνουν κάθε ικανότητα παραγωγής εγγυημένης ενέργειας. Οι περιορισμοί οικολογικής παροχής κατάντη των φραγμάτων Μεσοχώρας, Συκιάς και Στράτου καλύπτονται με πολύ μικρή πιθανότητα αστοχίας (<2%), για όλες τις τιμές εκτροπής, εκτός των 1200 hm<sup>3</sup>.

### 5.3 Διερεύνηση διατάξεων εκτροπής και δυνατοτήτων άντλησης-ταμίευσης

Στα σενάρια αυτά διερευνώνται διάφορες διατάξεις έργων, με χρήση των δύο κριτηρίων επίδοσης που αναπτύχθηκαν. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που διατυπώνονται αφορούν: (α) στη μεγιστοποίηση του μικτού (ενεργειακού και αρδευτικού) οφέλους του υδροσυστήματος, για όλες τις διατάξεις έργων (πριν και μετά την εκτροπή), και (β) στη μεγιστοποίηση του ενεργειακού οφέλους από την υλοποίηση των έργων άντλησης-ταμίευσης (E2), αντί των συμβατικών έργων εκτροπής που προτάθηκαν αρχικά (E1), δεδομένου ότι και στις δύο περιπτώσεις ο ετήσιος στόχος των 600 hm<sup>3</sup> καλύπτεται επαρκώς.

Σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρείται στόχος ετήσιας εκτρεπόμενης ποσότητας νερού 600 hm<sup>3</sup>, που ικανοποιείται με ποσοστό αστοχίας μικρότερο του 1%, για όλα τα σενάρια που εξετάζονται. Οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί Αχελώου και Πάμισου επίσης καλύπτονται σε όλα τα σενάρια, με ποσοστά αστοχίας μικρότερα του 2%. Τα ποσοστά αυτά αποτελούν ένδειξη ορθής ιεράρχησης του προβλήματος και των πολλαπλών χρήσεων νερού στο υπολογιστικό πλαίσιο του Υδρονομέα.

Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των μέσων ετήσιων οικονομικών μεγεθών, για τα σενάρια που εξετάστηκαν. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι το ετήσιο όφελος από την ενεργειακή αξιοποίηση με τη συμβατική διάταξη εκτροπής ανέρχεται στα 83 Μ€ ετησίως, ενώ υπάρχει περιθώριο αύξησής του κατά 5 Μ€ ετησίως, με τη χρήση αντλιοστροβίλων (διάταξη E2). Το περιθώριο αύξησης είναι μικρό, καθώς θεωρήθηκε αρκετά συντηρητικό κόστος άντλησης (0.022 €/kWh). Συνυπολογίζοντας και το ισοδύναμο γεωργικό όφελος από την προμήθεια αρδευτικού νερού στην Αιτωλοακαρνανία και Θεσσαλία, εκτιμάται ότι το συνολικό μέσο ετήσιο όφελος του συστήματος θα φτάσει στα 150 Μ€ για το σενάριο με άντληση-ταμίευση.

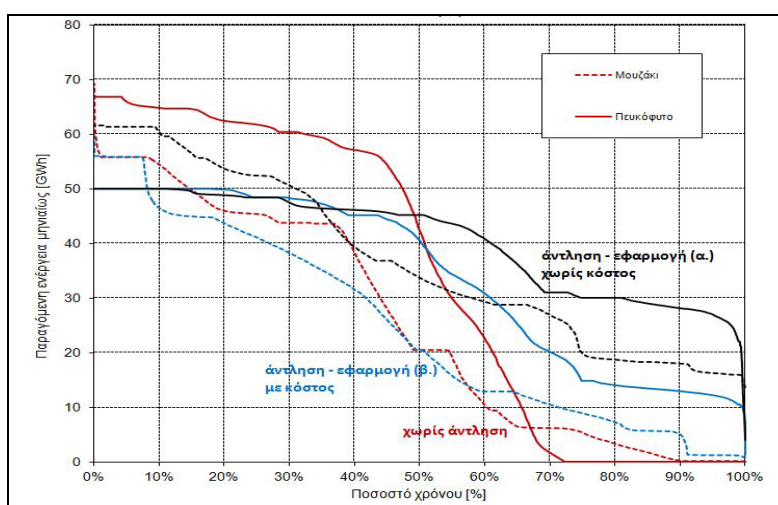
Αντίστοιχη είναι η εικόνα για την εγγυημένη ενεργειακή παραγωγή του Πίνακα 3. Συνεπώς, αν και η συμβατική (χωρίς άντληση) εκτροπή νερού προς Θεσσαλία θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια του συστήματος (δεδομένου ότι αφαιρείται ένα ποσοστό των διαθέσιμων εισροών στους ταμιευτήρες του Κάτω Αχελώου), η διάταξη E2 όχι μόνο ισοσκελίζει αυτή την απώλεια αλλά και αυξάνει τα εγγυημένα ενεργειακά οφέλη στις 147 GWh/μήνα, ενώ καλύπτει με πλήρη αξιοπιστία τον στόχο αρδευτικής ζήτησης στη Θεσσαλία.

Πίνακας 2: Μέσο ετήσιο ενεργειακό και συνολικό όφελος (Μ€) για τις διατάξεις έργων που εξετάζονται.

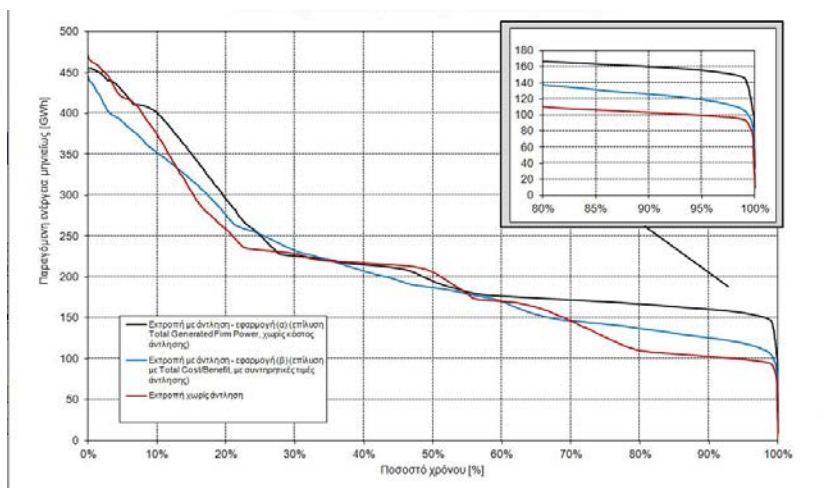
	Υφιστάμενο σχήμα (A1)	Κάτω Αχελώος και Μεσοχώρα (A2)	Εκτροπή χωρίς άντληση (E1)	Εκτροπή με πλήρη διάταξη άντλησης (E3)
Ενεργειακό όφελος	61.5	71.0	82.9	87.8
Συνολικό όφελος	93.7	102.6	145.3	150.5

Πίνακας 3: Παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια ανά μήνα (GWh) για όλα τα σενάρια μελέτης.

Υφιστάμενο σχήμα (A1)	Κάτω Αχελώος και Μεσοχώρα (A2)	Συκιά χωρίς εκτροπή (A3)	Εκτροπή χωρίς άντληση (E1)	Εκτροπή με άντληση Πευκοφύτου (E2)	Εκτροπή με πλήρη διάταξη άντλησης (E3)
93.99	100.85	128.99	94.19	123.20	146.59



Σχήμα 6: Καμπύλες διάρκειας –ενέργειας ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου, με και χωρίς άντληση.



Σχήμα 7: Καμπύλες διάρκειας – συνολικής ενεργειακής παραγωγής υδροσυστήματος, με και χωρίς άντληση.

Η διαφοροποίηση οφείλεται κυρίως στην αλλαγή της πολιτικής λειτουργίας των ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου. Πράγματι, ενώ στη συμβατική διάταξη E1 η μεταφορά νερού μέσω της σήραγγας εκτροπής, και συνεπώς η παραγωγή ενέργειας από τους δύο ΥΗΣ, περιορίζεται την αρδευτική περίοδο, με την διάταξη E2 οι δύο ΥΗΣ λειτουργούν πλέον σε συνεχή βάση, «ανακυκλώνοντας» (κατά τη χειμερινή περίοδο) τα αποθέματα των διασυνδεδεμένων ταμιευτήρων. Η αλλαγή της διαχειριστικής πολιτικής έχει ιδιαίτερα θετική επίδραση και στη συνολική παραγωγή. Στα Σχήματα 6 και 7 απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας – παραγωγής ενέργειας για τους ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου και το συνολικό σύστημα, αντίστοιχα. Στα διαγράμματα συγκρίνονται η συμβατική διάταξη E1, η E2 με κόστος άντλησης 0.022 €/kWh, και η E2 χωρίς κόστος, ως θεωρητικό όριο της δυνατότητας παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας του συστήματος.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις λεπτομερείς και εκτεταμένες αναλύσεις που έγιναν αποδεικνύεται ότι το πλαίσιο παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης, και ειδικότερα η γενίκευσή του για συστήματα Υ/Η έργων, δύναται να αποδώσει πιστά τη λειτουργία υδροσυστημάτων, όσο σύνθετη τοπολογία και αν έχουν, καθώς και να ιεραρχήσει την πληθώρα αντικρουόμενων στόχων που τα συνοδεύουν. Μέσα από τον Υδρονομέα είναι δυνατή όχι μόνο η ανάδειξη του υδροενεργειακού δυναμικού του συστήματος αλλά και η σε βάθος διερεύνηση της αλληλεπίδρασής του με αντικρουόμενες χρήσεις νερού, όπως η άρδευση. Επίσης, ο Υδρονομέας προσφέρεται για τη διερεύνηση και εξέταση εναλλακτικών διατάξεων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν σε διαχειριστικό επίπεδο. Ειδικότερα, η στοχαστική προσέγγιση επιτρέπει την εξαγωγή αξιόπιστων στατιστικών συμπερασμάτων, μη εξαρτώμενων από το μικρό μήκος των ιστορικών δειγμάτων, ενώ καθίσταται υπολογιστικά πρόσφορη λόγω της φειδωλής παραμετροποίησης του προβλήματος.

Με την εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας αναδεικνύονται ορισμένες σημαντικές διαχειριστικές πτυχές. Καταρχάς, η προσθήκη της Μεσοχώρας στο σύστημα θα το καταστήσει πιο αξιόπιστο και θα ενισχύσει τη μέση ετήσια ενεργειακή παραγωγή κατά 225 GWh, ήτοι 10 Μ€. Το ποσό αυτό αναμένεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερο αν θεωρηθεί μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας ή συνυπολογισθεί το ισοδύναμο όφελος από την αντίστοιχη μείωση της λιγνιτικής και πετρελαικής παραγωγής. Σχετικά με τη διάταξη εκτροπής, η υλοποίηση της πρότασης για άντληση-ταμίευση θα έχει θεαματικά αποτελέσματα στην αξιοπιστία της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, αυξάνοντας την παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια από τις 94 στις 147 GWh/μήνα, χωρίς να υπομονεύει το στόχο της ασφαλούς κάλυψης των αρδευτικών ζητήσεων. Το σύστημα πλέον αποκτά μεγάλη ευελιξία και ισχυρό ενεργειακό χαρακτήρα, έχοντας τη δυνατότητα

να προσφέρει άνω των 1700 GWh εγγυημένης ενέργειας ετησίως, ποσότητα ιδιαίτερα σημαντική, αφού αντιστοιχεί στο 35% περίπου της σημερινής μέσης ετήσιας ενεργειακής παραγωγής από ΥΗΕ στην Ελλάδα. Τέλος, η ετήσια εκτροπή των 600 hm<sup>3</sup> είναι απόλυτα συμβατή με τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς του συστήματος, που καλύπτονται με πλήρη ασφάλεια.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, & A. Christofides, 2003. A decision support system for the management of the water resource system of Athens. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28 (14-15): 599–609.
2. Koutsoyiannis D. & A. Economou, 2003. Evaluation of the parameterisation-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems. *Water Resources Research*, 39(6): 1170.
3. Nalbantis I., & D. Koutsoyiannis, 1997. A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems. *Water Resources Research*, 33(9): 2165–2177
4. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, & D. Xenos, 2004. Minimising water cost in the water resource management of Athens. *Urban Water Journal*, 1(1): 3–15.
5. Efstratiadis A. & D. Koutsoyiannis, 2002. An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resources systems. *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, International Water Association, 1423-1428.
6. Ευστρατιάδης Α. & Δ. Κουτσογιάννης, 2004. *Κασταλία (Έκδοση 2.0) – Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών*, ΕΜΠ-ΤΥΠΥΘΕ.
7. Koutsoyiannis, D., 2011. Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3): 481–495.
8. Μπουζιώτας, Δ., 2012. *Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό Υδρονομέας – Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ-ΤΥΠΕΡ.
9. Κουτσογιάννης Δ., 1996. *Μελέτη λειτουργίας των ταμιευτήρων στα πλαίσια της Γενικής Διάταξης Έργων Εκτροπής Αχελώου προς τη Θεσσαλία*, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΕ Αχελώου.
10. Λαζαρίδης Λ. & Σ. Μίχας, 2011. *Αξιοποίηση των κατασκευαζόμενων έργων του φράγματος Συκιάς στον Αχελώο και της σήραγγας μεταφοράς προς Θεσσαλία για παραγωγή ενέργειας*.
11. Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, & Α. Ευστρατιάδης, 2009. Διερεύνηση οικολογικής παροχής, *Ειδική Τεχνική Μελέτη για την Οικολογική Παροχή από το Φράγμα Στράτου*, Εργοδότης: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Ανάδοχος: ECOS Μελετητική Α.Ε.
12. Αντωνρόπουλος Π. & Συνεργάτες, 2006. *Μελέτη διαχείρισης των υδάτων λεκάνης απορροής Αχελώου π., Μέρος Α': Υδατικό δυναμικό*, Αθήνα, Υπουργείο Ανάπτυξης.
13. ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO, 1995. *Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της Εκτροπής Αχελώου*, Αθήνα, ΥΠΕΧΩΔΕ.

## A Decision Support System for the management of hydropower systems – Application to the Acheloos-Thessaly hydrosystem

Andreas Efstratiadis

*Dr. Civil Engineer, School of Civil Engineering, NTUA*

Dimitris Bouziotas

*Civil Engineer NTUA*

Demetris Koutsoyiannis

*Professor, School of Civil Engineering, NTUA*

*Key Words:* hydroelectric production, hydrosystems, decision support systems, reliability, pump-storage, Hydronomeas

**SUMMARY:** We describe a holistic approach for the management of complex hydrosystems whose primary aim is hydropower production. This is based on the parameterisation-simulation-optimization methodological framework, which is implemented within the Decision Support System “Hydronomeas”. After the analysis of the developed methodology and simulation and optimization tools, a number of applications in the Acheloos-Thessaly hydrosystem are shown. The results include the assessment of the hydropower potential of the system as well as its corresponding benefit, thus being of particular interest to long-term energy planning.