

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/339473013>

# Framework for optimal management of hydroelectric reservoirs through pumped storage: Investigation of Acheloos–Thessaly and Aliakmon hydrosystems

Conference Paper · October 2017

CITATIONS

0

READS

15

5 authors, including:



**Panagiotis Dimas**

Hydroex Consulting Engineers

13 PUBLICATIONS 6 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Dionysios Nikolopoulos**

National Technical University of Athens

17 PUBLICATIONS 40 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Dimitrios Bouziotas**

KWR Water Research Institute

23 PUBLICATIONS 166 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Andreas Efstratiadis**

National Technical University of Athens

158 PUBLICATIONS 1,793 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Climate stochasticity [View project](#)



Investigation of the stochastic nature of solar radiation for renewable resources management [View project](#)

# Πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων μέσω άντλησης-ταμίευσης: Διερεύνηση στην περίπτωση των υδροσυστημάτων Αχελώου-Θεσσαλίας και Αλιάκμονα

Π. Δήμας

*Πολιτικός Μηχανικός, MSc.*

Δ. Νικολόπουλος

*Πολιτικός Μηχανικός, MSc.*

Δ. Κουτσογιάννης

*Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
ΕΜΠ*

Δ. Μπουζιώτας

*Πολιτικός Μηχανικός, MSc.*

Α. Ευστρατιάδης

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΔΙΠ, Σχολή  
Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ*

*Λέξεις κλειδιά:* Υδροηλεκτρική παραγωγή, υδροσυστήματα, συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, αξιοπιστία, άντληση-ταμίευση, Υδρονομείας, στοχαστική προσομοίωση

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Περιγράφεται μια ολιστική προσέγγιση για τη διαχείριση σύνθετων συστημάτων ταμιευτήρων, οι οποίοι εξυπηρετούν πολλαπλούς και, συχνά, αντικρουόμενους στόχους, όπως είναι η παραγωγή ενέργειας και η κάλυψη αρδευτικών/υδρευτικών ή άλλων αναγκών. Η εν λόγω διαδικασία είναι κατά κανόνα πολύπλοκη λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, αλλά και της έντονα μη γραμμικής δυναμικής των συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων. Για να αντιμετωπιστεί η έντονη μεταβλητότητα της ανανεώσιμης ενεργειακής παραγωγής (υδροηλεκτρικής και κάθε μορφής) προτείνεται η εφαρμογή της τεχνολογίας της άντλησης-ταμίευσης. Για την εύρεση βέλτιστων σχημάτων διαχείρισης του συστήματος γίνεται χρήση του μεθοδολογικού πλαισίου «παραμετροποίηση-στοχαστική προσομοίωση-βελτιστοποίηση», όπως υλοποιείται στο λογισμικό Υδρονομείας. Στόχος των αναλύσεων είναι η αποτίμηση της ικανότητας παραγωγής εγγυημένης ενέργειας με συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας και το συνεπαγόμενο οικονομικό όφελος μέσω της εφαρμογής του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου σε δύο εκ των μεγαλύτερων και πλέον σύνθετων υδροσυστημάτων του Ελληνικού χώρου (Αχελώου-Θεσσαλίας και Αλιάκμονα). Επιπλέον, επισημαίνεται η δυνατότητα που προσφέρει η τεχνολογία άντλησης-ταμίευσης σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με σημαντική μεταβλητότητα, όπως η αιολική, για περαιτέρω διείσδυση στο ενεργειακό μείγμα.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βέλτιστος σχεδιασμός συστημάτων υδατικών πόρων με Υ/Η ταμιευτήρες αποτελεί ένα ζήτημα – πρόκληση λόγω της εγγενούς πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικής δυναμικής τους. Η μελέτη που σχετίζεται με την επεξεργασία και την μοντελοποίηση ενός υδροσυστήματος αφορά τον κύκλο φυσική προσφορά, αποθήκευση, μεταφορά και κατανάλωση νερού, που περιλαμβάνει τις συνιστώσες του φυσικού περιβάλλοντος (λεκάνες απορροής, ποτάμια, υδροφορείς, κλπ.) και τα

σχετιζόμενα υδραυλικά έργα (ταμιευτήρες, υδραγωγεία, αντλιοστάσια, γεωτρήσεις, κλπ.), χωρίς ωστόσο να εκτείνεται στη λεπτομέρεια των υδρευτικών ή αρδευτικών δικτύων διανομής.

Η συνθετότητα των διαχειριστικών προβλημάτων οφείλεται σε μια πληθώρα παραγόντων, όπως η μη γραμμική δυναμική των φυσικών διεργασιών, η ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης πολλαπλών και, συχνά, αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών, που επιβάλλονται από ομάδες με διαφορετικά συμφέροντα, η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των υδρολογικών εισροών και, σε μικρότερο βαθμό, της ζήτησης, καθώς και η ανάγκη συγκερασμού της οικονομικότητας και του ρίσκου, και μάλιστα σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Τα παραπάνω επιβάλλουν μια συστηματική προσέγγιση στη λήψη των αποφάσεων που επιτυγχάνεται με τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, που κωδικοποιούνται σε κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης.

Η ανάγκη χρήσης κατάλληλων μοντέλων γίνεται ακόμα σημαντικότερη αν λάβουμε υπ' όψη το γεγονός πως στο σημερινό ενεργειακό σκηνικό παρατηρείται μια ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής και της 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.

Στην κατεύθυνση αυτή, αναπτύχθηκαν δύο διαχειριστικά μοντέλα των υδροσυστημάτων Αχελώου-Θεσσαλίας και Αλιάκμονα, 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 Υδρονομέας, 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. Διερευνήθηκαν διάφορα σενάρια διατάξεων των συστημάτων, αναδεικνύοντας ποικίλες πτυχές που εμφανίζονται κατά την ενεργειακή διαχείρισή τους.

## 2 ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

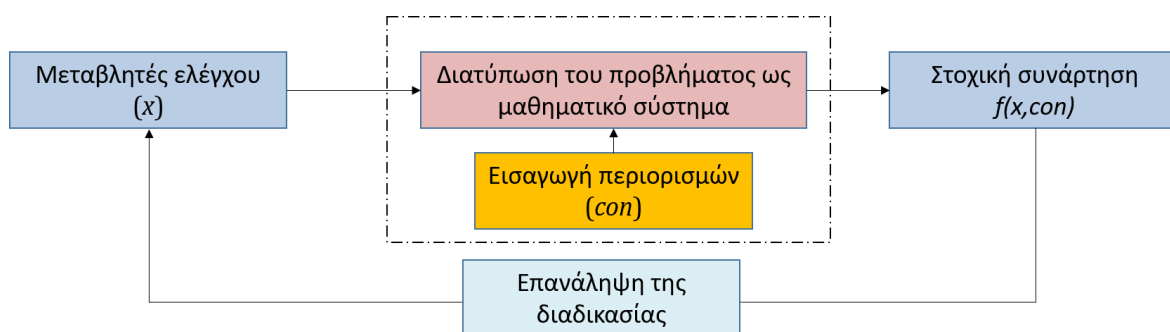
### 1.1 Το πλαίσιο παραμετροποίηση - προσομοίωση – βελτιστοποίηση (PSO framework)

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης του συστήματος περιλαμβάνει διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις (decisions) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης. Κάθε τέτοιου τύπου προσέγγιση απαιτεί αλγορίθμους και τεχνικές αναζήτησης των βέλτιστων (optimal) λύσεων σε συνδυασμό με ένα μέτρο επίδοσης (performance measure) που να τις αξιολογεί. Η συστηματοποίηση των προαναφερθεισών τεχνικών ονομάζεται βελτιστοποίηση (optimisation). Για το λόγο αυτό, η ανάλυση συστημάτων έχει πρακτικά ταυτιστεί με τον γενικότερο όρο βελτιστοποίηση (optimisation), που χρησιμοποιείται τόσο σε πραγματικές εφαρμογές όσο και σε μαθηματικά προβλήματα, για να υποδηλώσει μια διαδικασία συστηματικής αναζήτησης της μέγιστης ή, ανάλογα με τη διατύπωση του προβλήματος, ελάχιστης τιμής μιας στοχαστικής συνάρτησης (objective function) ως προς τις μεταβλητές ελέγχου της (control variables) (Εικόνα 1).

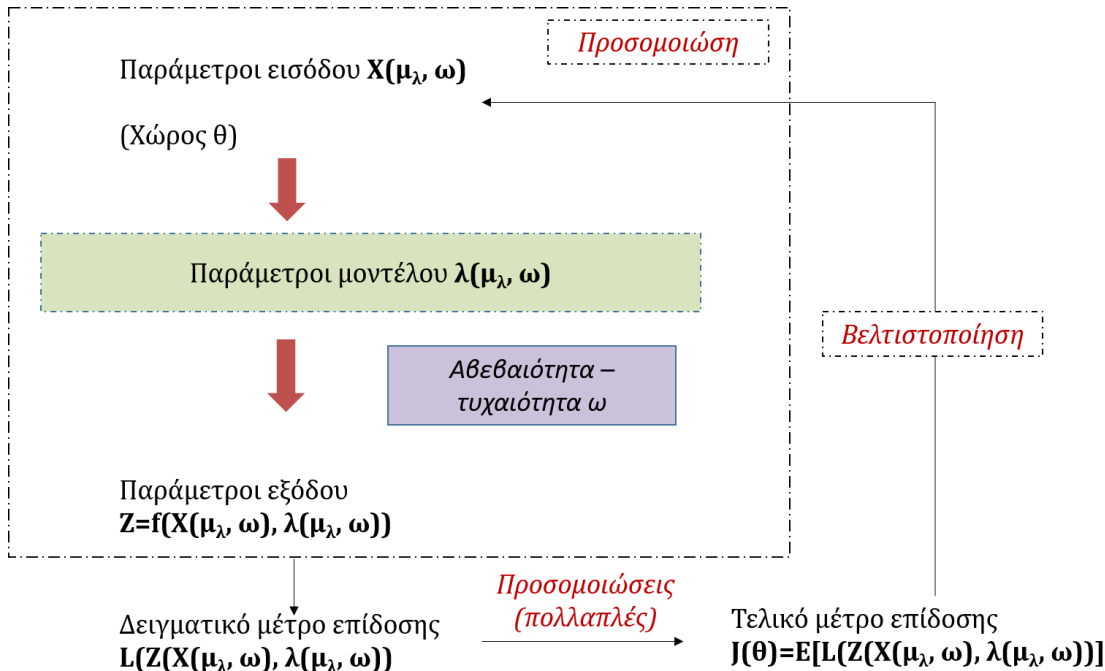
Η μεθοδολογία του λογισμικού «Υδρονομέας» βασίζεται στη διαδικασία της στοχαστικής βελτιστοποίησης (stochastic optimization). Επιτυγχάνει δηλαδή τη σύζευξη της προσομοίωσης με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης: τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βοηθούν στην αποτίμηση της στοχαστικής συνάρτησης, ενώ μερικές εκ των παραμέτρων της προσομοίωσης αξιοποιούνται από το σύστημα ως μεταβλητές ελέγχου της βελτιστοποίησης (Μπουζιώτας, 2012). Η εν λόγω σύζευξη

διαμορφώνει το πλαίσιο παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση (parametrization-simulation-optimisation) (Εικόνα 2).

Στην κλίμακα του χρονικού βήματος, το μοντέλο βελτιστοποιεί το συνολικό κόστος μεταφοράς νερού στο δίκτυο (κόστος λειτουργίας υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων), τηρώντας αυστηρά τους φυσικούς περιορισμούς (εξισώσεις συνέχειας, περιορισμοί χωρητικότητας, κλπ.), επιδιώκοντας να ικανοποιήσει τους επίκαιρους στόχους και λειτουργικούς περιορισμούς, με την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας, και ταυτόχρονα να αποκλίνει όσο το δυνατόν λιγότερο από τα επιθυμητά μεγέθη εκροών που επιβάλουν οι κανόνες λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας εκτιμώνται μέσω μιας διαδικασίας μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ως προς ένα καθολικό μέτρο επίδοσης που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα κριτηρίων. Με τον τρόπο αυτό το λογισμικό υλοποιεί ένα σχήμα δύο επιπέδων βελτιστοποίησης, μιας εξωτερικής -μη γραμμική ως προς τις παραμέτρους των κανόνων λειτουργίας, και μιας εσωτερικής, που είναι γραμμική ως προς τις βήμα-προς-βήμα αποφάσεις που αφορούν στην κατανομή των εκροών στο υδросύστημα (Ευστρατιάδης et al., 2007).



Εικόνα 1. Σχηματοποίηση της βελτιστοποίησης και των επιμέρους συνιστωσών της



Εικόνα 2. Σύζευξη μεθοδολογίας προσομοίωσης και βελτιστοποίησης (Fu & Hu, 1997)

## 2.1 Το πλαίσιο βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής

### 2.1.1 Κανόνες 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 στροβίλο. 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. 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.

### 2.1.2 Η έννοια της αξιοπιστίας: Διάκριση ανάμεσα σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια

Ένα εξαιρετικά κρίσιμο χαρακτηριστικό ενός συστήματος υδατικών πόρων είναι η αξιοπιστία (reliability), ορίζεται ως η πιθανότητα επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες (Chow et al., 1988, σ. 434). Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας είναι η πιθανότητα αστοχίας που ορίζεται ως:

$$a = P(X < x^*) \quad (2.1)$$

όπου  $X$  τυχαία μεταβλητή που εκφράζει ένα ποσοτικό μέτρο επίδοσης του συστήματος (π.χ. απόληψη, παραγωγή ενέργειας) και  $x^*$  η επιθυμητή τιμή (τιμή-στόχος) της εν λόγω επίδοσης.

Τονίζεται ότι η επίδοση του συστήματος θεωρείται τυχαία μεταβλητή, καθώς είναι συνάρτηση των υδρολογικών εισροών, που είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές. Στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας η αξιοπιστία αφορά τη δυνατότητα κάλυψης ενός στόχου παραγωγής ενέργειας (και σε μεταγενέστερο στάδιο τη δυνατότητα κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης) και όχι την ασφαλή απόληψη (safe yield). Ειδικότερα, η έννοια της αξιοπιστίας διευρύνεται για να συμπεριλάβει την αξιόπιστη επίδοση του συστήματος: είναι η τιμή στόχος  $x^*$  που το σύστημα δύναται να αποδώσει για ένα συγκεκριμένο επίπεδο (π.χ. 99%, 97%, 95%):

$$a^* = P(X \geq x^*) \quad (2.2)$$

Αν η χρονοσειρά απόκρισης του συστήματος παράγει  $n'$  πλήθος τιμών που ικανοποιούν την κάλυψη ενός ενεργειακού στόχου και  $n$  το μήκος της χρονοσειράς, τότε η αξιοπιστία μπορεί να εκφραστεί ως η σχετική συχνότητα:

$$a = \frac{n'}{n} \quad (2.3)$$

Πρωτεύουσα ενέργεια (firm energy) λέγεται η εξασφαλισμένη υδροηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί με τις δυσμενέστερες υδρολογικές συνθήκες για την κάλυψη των αναγκών της κατανάλωσης. Κάθε παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια επιπλέον της πρωτεύουσας καλείται δευτερεύουσα.

Η πρωτεύουσα ενέργεια εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι: α) Η στοχαστική φύση των εισροών στους ταμιευτήρες και η αβεβαιότητα των υδρολογικών φαινομένων. β) Η ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος. γ) Το αποδεκτό επίπεδο διακινδύνευσης στην παραγωγή ενέργειας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η πρωτεύουσα ενέργεια που παράγει το υδροσύστημα για ένα δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας.

Μια επιπλέον διάκριση βαρύνουσας σημασίας είναι αυτή ανάμεσα σε ενέργεια βάσης και ενέργεια αιχμής. Ενέργεια αιχμής θεωρείται αυτή που ζητείται σε περιόδους έντονης ζήτησης ενέργειας, ενώ ενέργεια βάσης είναι αυτή που καλύπτει την ελάχιστη, συνεχή ζήτηση. Η ελληνική πρακτική θέλει τις θερμοηλεκτρικές μονάδες (που χρειάζονται μεγάλους χρόνους για να εκκινήσουν) να λειτουργούν ως έργα βάσης και τα ΥΗΕ να λειτουργούν στις αιχμές της ζήτησης: η πρωτεύουσα υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει αιχμές (ή μέρος των αιχμών) της ζήτησης.

Η προαναφερθείσα παραδοχή δεν βλάπτει τη γενικότητα, εφόσον η διάκριση ανάμεσα σε αιχμή και βάση γίνεται σε λεπτότερες κλίμακες (ωριαία, ημερήσια) απ' ό,τι η διερεύνηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής ενός υδροσυστήματος (ετήσια ή μηνιαία κλίμακα). Επομένως, η διάκριση σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια δεν σχετίζεται με την πολιτική διαχείρισης των υδροηλεκτρικών έργων από πλευράς παρόχου (έργο αιχμής ή βάσης). Σε άλλες χώρες, όπου υπάρχει πολύ μεγαλύτερο υδροδυναμικό προς αξιοποίηση τα υδροηλεκτρικά μπορούν να λειτουργήσουν ως έργα βάσης.

### 2.1.3 Γενίκευση του πλαισίου παραμετροποίησης- προσομοίωσης – βελτιστοποίηση, συμπερίληψη της ενεργειακής παραγωγής μέσω μέτρων επίδοσης

Τα μέτρα επίδοσης  $J(\theta)$  που εισάγονται ως στοχαστικές συναρτήσεις στη βελτιστοποίηση πρέπει να έχουν εύληπτη μορφή για συνήθεις διαχειριστικές 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  $e_i^k$  από κάθε στρόβιλο  $k$ , οπότε προκύπτει η χρονοσειρά παραγωγής ενέργειας του συστήματος,  $E_t = \sum e_i^k$ . 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:

$$P_i^t = c_i^B \cdot \sum_{i=1}^n S_i + c_i^E \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n D_i^t - \sum_{i=1}^n S_i\right), 0\right\} - c_i^D \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n D_i^t\right), 0\right\} \quad (2.4)$$

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:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^m E\{P_{tot,i}^{year}\} = \sum_{i=1}^m E\left\{\sum_{t=1}^{12} P_i^t\right\} \quad (2.5)$$

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 υφιστάμενο σχήμα έργων), με σενάρια στα οποία η Y/H παραγωγή συνδυάζεται με την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της Θεσσαλίας. Το σύστημα Αλιάκμονα ενδείκνυται επίσης για την αποτίμηση της ευρωστίας και των δύο κριτηρίων, καθώς έχει απλούστερη τοπολογία και είναι περισσότερο εύληπτο ενώ καθιστά απλούστερη και τη διερεύνηση της σύζευξης υδροηλεκτρικής – αιολικής ενέργειας.

### 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΧΕΛΩΟΥ ΚΑΙ ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ

#### 3.1 Το σύστημα Αχελώου

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. Στην εικόνα 3 διακρίνονται οι κύριες συνιστώσες του ολοκληρωμένου σχήματος 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 Y/H 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 του Αχελώου και των δύο παραποτάμων του Πηνειού (Πορταϊκός, Πάμισος).

Στα σενάρια λειτουργίας, το πλήρες σχήμα έργων διερευνάται με την υπόθεση κατασκευής έργων άντλησης- ταμίευσης (πρόταση ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '90) 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:

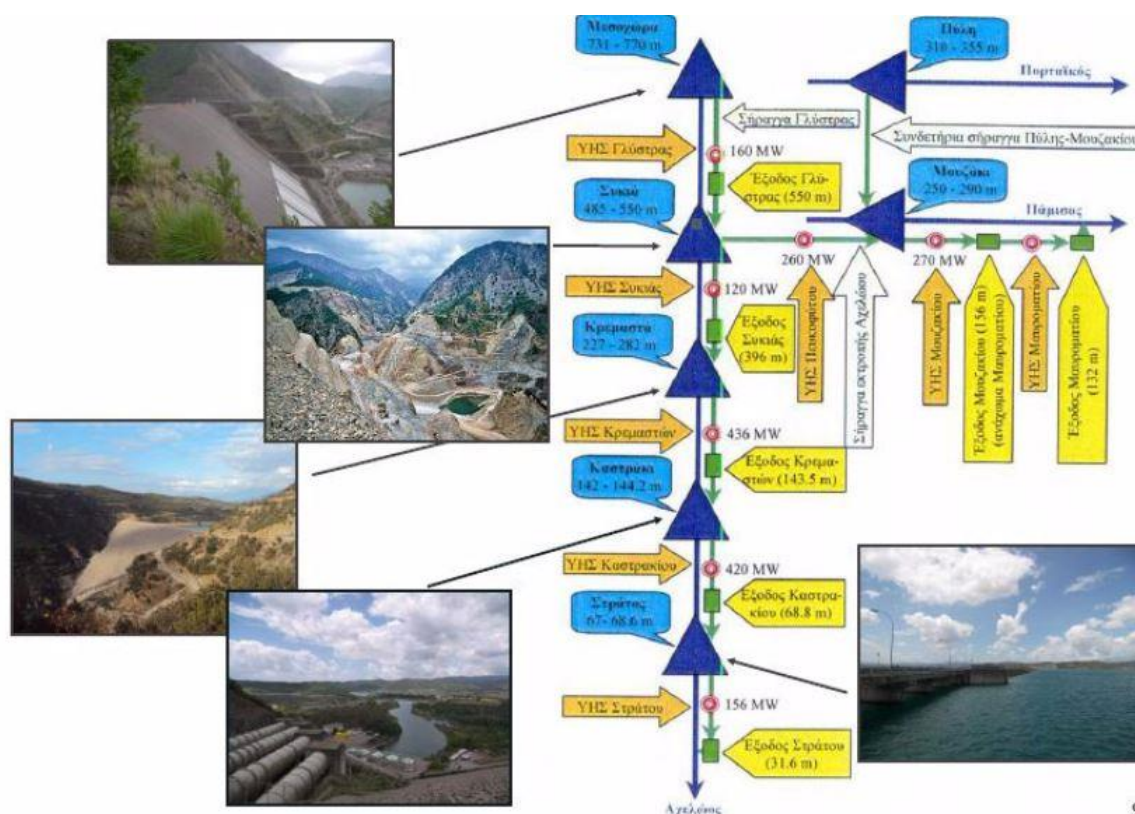


Διάταξη (A1): Υφιστάμενη διάταξη έργων Κάτω Αχελώου (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος), με σκοπό τον έλεγχο του πλαισίου βελτιστοποίησης με πραγματικά δεδομένα του συστήματος.

Διάταξη (A2): Πλήρης λειτουργική ένταξη του ταμιευτήρα Μεσοχώρας, ως του έργου κεφαλής ενός σειριακού σχήματος τεσσάρων Υ/Η ταμιευτήρων κατά μήκος του Αχελώου (Εικόνα 4). 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.

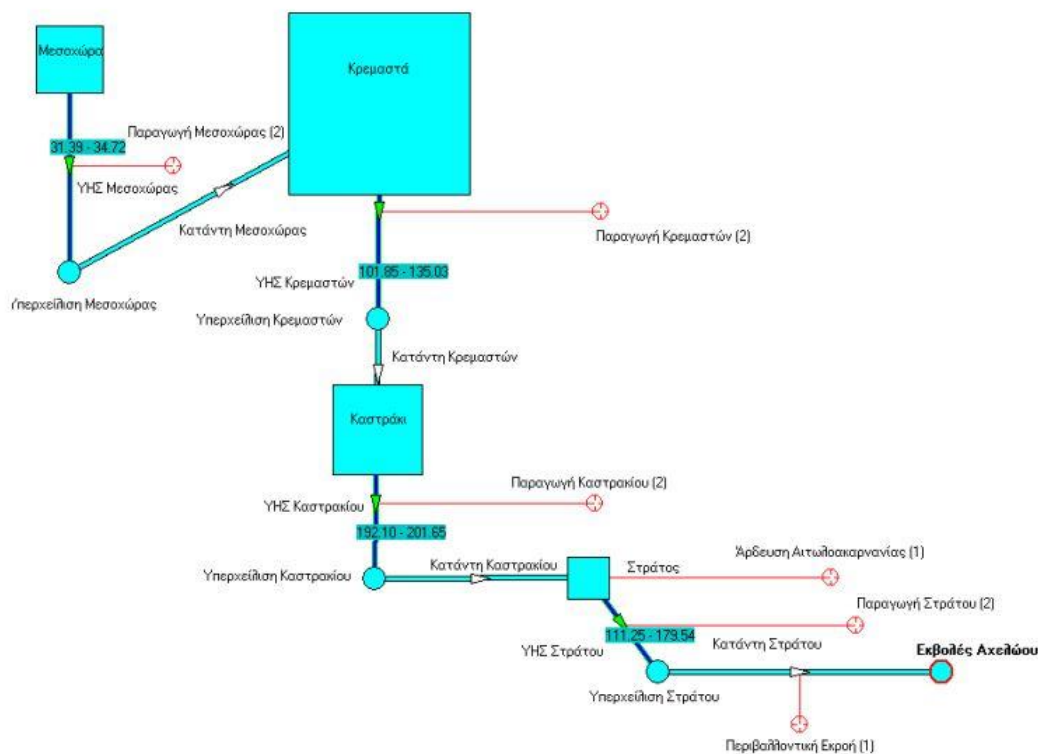
Διάταξη (E1): Ολοκλήρωση και λειτουργία έργων εκτροπής (ταμιευτήρας Συκιάς στον Αχελώο, ταμιευτήρες Μουζακίου και Πύλης Θεσσαλίας), με συμβατικούς ΥΗΣ (χωρίς άντληση).

Διάταξη (E2): Πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, με διατάξεις άντλησης-ταμίευσης στη σήραγγα Πενκόφυτου και κατάντη του Μουζακίου.



Εικόνα 3. Γενική διάταξη έργων υδροσυστήματος Αχελώου-Θεσσαλίας





Εικόνα 4. Σχηματοποίηση μοντέλου προσομοίωσης για τη διάταξη έργων Α2 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.

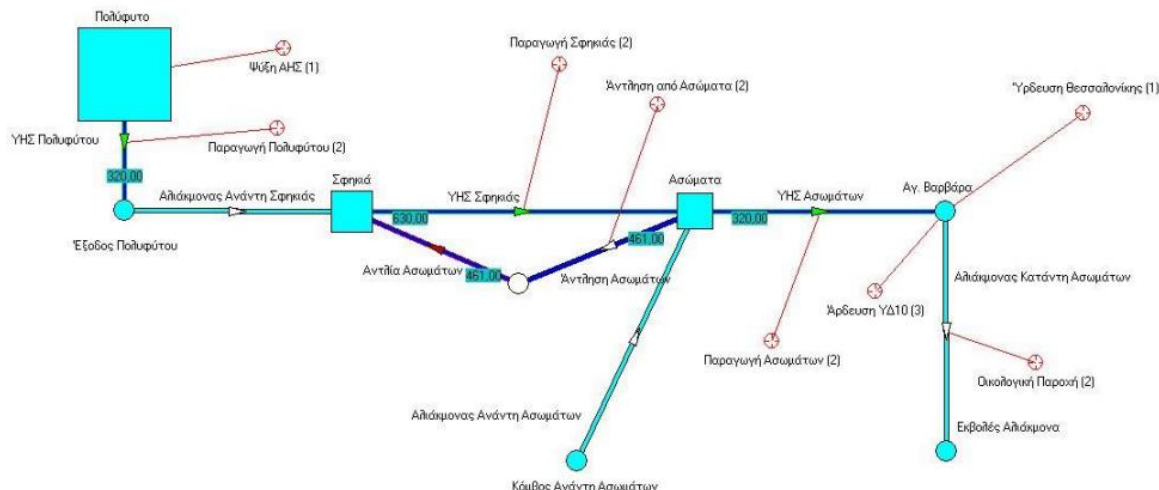
### 3.2 Το σύστημα Αλιάκμονα

Στον Αλιάκμονα έχουν κατασκευαστεί τεχνητοί ταμιευτήρες: του Πολυφύτου (360MW), της Σφηκιάς (315MW στους στροβίλους και 324MW στις αντλήσεις), των Ασωμάτων (110MW) και της Αγ. Βαρβάρας. Ανάντη του φράγματος στο Πολύφυτο κατασκευάζεται ήδη άλλο ένα, αυτό του Ιλαρίωνα. Παράλληλα διερευνάται η κατασκευή ενός ακόμη φράγματος ανάντη του Ιλαρίωνα, αναπτύσσοντας το ΥΗΕ Ελαφίου. Κατάντη του αναρρυθμιστικού της Αγ. Βαρβάρας λειτουργεί και μικρό υδροηλεκτρικό έργο (χωρίς ταμιευτήρα) στο Μακροχώρι. Ανάμεσα στους ταμιευτήρες Σφηκιάς και Ασωμάτων λειτουργεί έργο άντλησης - ταμίευσης. Η τοπολογία του συγκεκριμένου συστήματος είναι πολλή απλή σε σύγκριση με εκείνη του Αχελώου, μιας και όλα τα έργα είναι τοποθετημένα σε σειρά με την τοπολογία που φαίνεται στην εικόνα 5.

Πιο συγκεκριμένα τα σενάρια της προσομοίωσης που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι:

- Σενάριο Σ1: Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα χωρίς αντλητική διάταξη. Χρησιμεύει στη δυνατότητα που μας δίνεται να διερευνήσουμε την επιρροή της τεχνολογίας άντλησης-ταμίευσης σε σχέση με την απλή διάταξη που δε δίνει τέτοια δυνατότητα.
- Σενάριο Σ2: Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της συνάρτησης Sum of Generated Firm Power.
- Σενάριο Σ3: Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της συνάρτησης Total Generated Firm Power.

- Σε όλα τα σενάρια η συμβολή του ΜΥΗΕ Αγ. Βαρβάρας είναι πολύ μικρή, συνεπώς δεν μοντελοποιείται.



### 3.3 Δεδομένα εισόδου των μοντέλων προσομοίωσης

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.

- σταθερή μηνιαία υδροηλεκτρική παραγωγή (σε GWh/μήνα, για κάθε Υ/Η σταθμό)
- κάλυψη αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών καθώς και ανάγκες ψύξης ΑΗΣ.
- διατήρηση επαρκούς περιβαλλοντικής ροής στα κατάντη τμήματα των ποταμών.
- στόχοι άντλησης στην περίπτωση του συστήματος Αλιάκμονα

Για την προσομοίωση της λειτουργίας των αντλιών για συγκεκριμένο ποσοστό χρόνου μέσα στην ημέρα θεωρήθηκαν κατάλληλοι συντελεστές μείωσης ανά περίπτωση.

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

### 4.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Αχελώου

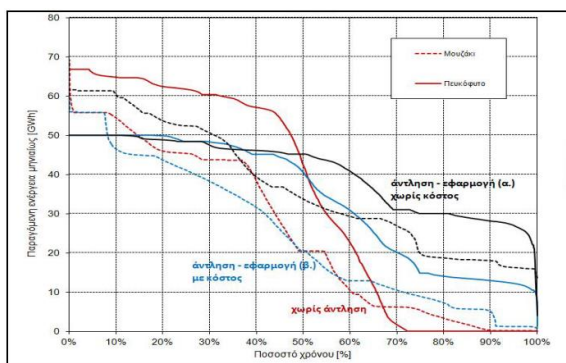
Στη συγκεκριμένη εργασία εστίασαμε στα αποτελέσματα που θα έχει η προσθήκη των έργων άντλησης – ταμείωσης στο σύστημα καθώς και στη σύγκριση των συναρτήσεων κόστους/οφέλους και παραγόμενης ενέργειας. Σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρείται στόχος ετήσιας εκτρεπόμενης ποσότητας νερού 600 hm<sup>3</sup>, που 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%.

Η εικόνα για την εγγυημένη ενεργειακή παραγωγή συνοψίζεται στον Πίνακα 1. 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.

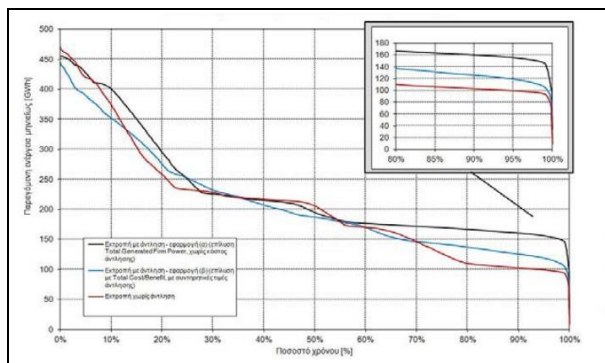
Πίνακας 1: Παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια ανά μήνα (GWh) για όλα τα σενάρια μελέτης

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

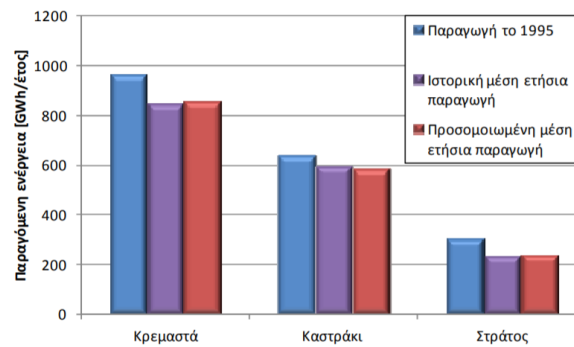
Η διαφοροποίηση οφείλεται κυρίως στην αλλαγή της πολιτικής λειτουργίας των ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου. Πράγματι, ενώ στη συμβατική διάταξη E1 η μεταφορά νερού μέσω της σήραγγας εκτροπής, και συνεπώς η παραγωγή ενέργειας από τους δύο ΥΗΣ, περιορίζεται την αρδευτική περίοδο, με την διάταξη E2 οι δύο 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. Στις Εικόνες 6 και 7 απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας – παραγωγής ενέργειας για τους ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου και το συνολικό σύστημα, αντίστοιχα.



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



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



Εικόνα 8: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων με προσομοιωμένες τιμές.

Όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη, 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 αύξησης 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.

Όσον αφορά τη σύγκριση με τα ιστορικά μεγέθη υδροηλεκτρικής παραγωγής του συστήματος Αχελώου, θεωρήθηκε ως αντιπροσωπευτικό σενάριο το A1, το οποίο περιέχει μόνο τα υφιστάμενα λειτουργικά έργα του κάτω Αχελώου. Τα ιστορικά δεδομένα λαμβάνονται από σχετικές πηγές (Αργυράκης 2009, Στεφανάκος 2008). Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 8) γίνεται σύγκριση μεταξύ της πραγματικής και της προσομοιωμένης μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας ανά ταμειευτήρα, ενώ προστίθεται και η ετήσια παραγωγή στο καλό υδρολογικό έτος 1995. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πρακτικά συμπίπτουν με τις παρατηρημένες τιμές.

#### 4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Αλιάκμονα

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης του συστήματος Αλιάκμονα διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις των δύο ακόλουθων συναρτήσεων ως προς την αποτελεσματικότητα της ενεργειακής βελτιστοποίησης:

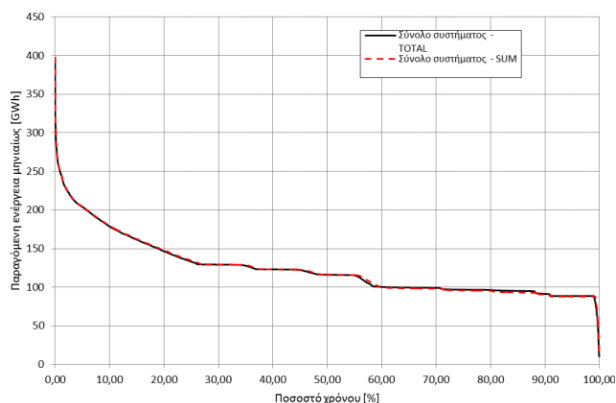
- Total Generated Firm Power (Συνολική παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια): Ορίζεται ως η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το σύστημα για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας  $\alpha^*$ . Η αξιοπιστία υπολογίζεται βάσει της χρονοσειράς της συνολικής μηνιαίας παραγόμενης ενέργειας του συστήματος ως εξής: (α.) Αθροίζεται η ενέργεια κάθε ΥΗΕ σε κάθε χρονικό βήμα και προκύπτει η συνολική χρονοσειρά. (β.) Υπολογίζεται η αξιοπιστία βάσει της συνολικής χρονοσειράς. Η στοχική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

$$J(\theta) = \hat{\alpha} \cdot \sum_{i=1}^v E_i(t) \quad (4.1)$$

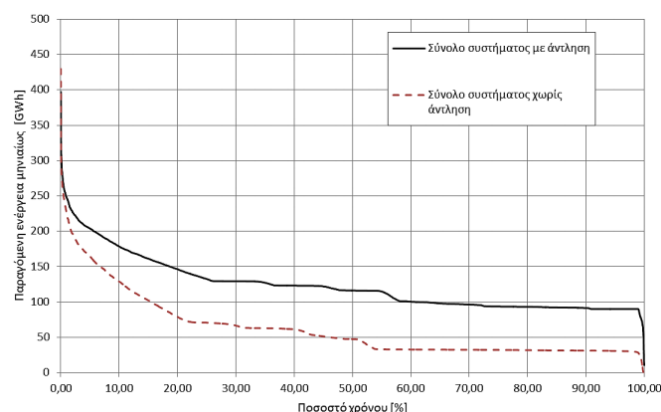
- Sum of Generated Firm Power (Άθροισμα παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας): Ορίζεται ως το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να αποδώσει κάθε έργο για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας  $\alpha^*$ . Εκτιμάται με τα ακόλουθα βήματα: (α.) Υπολογίζεται η πρωτεύουσα ενέργεια κάθε έργου από την αντίστοιχη χρονοσειρά επιμέρους παραγόμενης ενέργειας. (β.) Υπολογίζεται το άθροισμα των επιμέρους πρωτευουσών ενεργειών. Δε χρησιμοποιείται η συνολική παραγόμενη ενέργεια του συστήματος:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^v \hat{\alpha} \cdot E_i(t) \quad (4.2)$$

Στα διαγράμματα των εικόνων 9 και 10 εικονίζονται οι καμπύλες διαρκείας της μηνιαίας παραγόμενης ενέργειας συγκρίνοντας τα σενάρια Σ2-Σ3 και Σ1-Σ4 αντίστοιχα.



Εικόνα 9: Σύγκριση σεναρίων Σ2-Σ3.



Εικόνα 10: Σύγκριση σεναρίων Σ1-Σ4.

Παρά τις μικρές διαφορές των δύο καμπυλών διαρκείας, παρατηρούμε πως η συνάρτηση Total Generated Firm Power οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια. Η συνάρτηση Sum of Generated Firm Power δίνει μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας από την Total Generated Firm Power μόνο για τον ΥΗΣ Σφηκιάς ενώ στα υπόλοιπα έργα (αλλά και στο σύνολο) η εικόνα είναι αντιδιαμετρική, με την Total Generated Firm Power να δίνει μεγαλύτερες τιμές. Όπως είναι εμφανές από την εικόνα 9 η παρουσία συστήματος άντλησης – ταμίευσης οδηγεί σε δραματική αύξηση της πρωτεύουσας ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα ελάχιστα το ποσοστό αξιοπιστίας: από 27.34 GWh για αξιοπιστία 99% στο σενάριο Σ1, μεταπηδούμε σε 89.96 GWh για αξιοπιστία 98.8%. Επιτυγχάνεται, δηλαδή, υπερτριπλασιασμός της πρωτεύουσας ενέργειας, με το συνεπαγόμενο οικονομικό όφελος να είναι επίσης σημαντικό.

#### 4.3 Πρόβλημα σχεδιασμού υποθετικού υβριδικού συστήματος αιολικής – υδροηλεκτρικής ενέργειας Αλιάκμονα

Για να επισημανθεί η δυνατότητα που προσφέρει η τεχνολογία άντλησης-ταμίευσης σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με σημαντική μεταβλητότητα, όπως η αιολική, για περαιτέρω διείσδυση στο ενεργειακό μείγμα στα πλαίσια της μελέτης σχεδιάστηκε ένα υποθετικό υβριδικό σύστημα. Ακολούθηθηκε μια μεθοδολογία διακριτής μοντελοποίησης του υδροηλεκτρικού και του αιολικού σκέλους. Για να διατυπωθεί ένα συνεκτικό πλαίσιο σχεδιασμού υποθέτουμε μια μέση ζήτηση ίση με 150 GWh ανά μήνα. Μια τέτοια ζήτηση αντιστοιχεί σε μια πόλη 50000 κατοίκων. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα εξάγεται από τις αναλύσεις της διπλωματικής του Ιωάννου (2012). Στη συγκεκριμένη εργασία η μέση ζήτηση του ελληνικού χώρου εκτιμάται σε 4290 GWh το μήνα. Η σχηματοποίηση του υβριδικού συστήματος με τις αντίστοιχες ροές νερού και ενέργειας φαίνεται στην εικόνα 11.

Οι συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου βασίστηκαν σε στοιχεία από τον σταθμό του Κιλκίς και παρήχθησαν μέσω του μοντέλου Bartlett – Lewis σε ωριαία κλίμακα. Ζητούμενο του προβλήματος σχεδιασμού είναι ο προσδιορισμός του αριθμού των απαιτούμενων ανεμογεννητριών για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Ως ανεμογεννήτρια σχεδιασμού επιλέχθηκε η E-126/7,5 MW/38 της Enercon και μέσω της καμπύλης ισχύος οι συνθετικές χρονοσειρές ανέμου μεταφράστηκαν σε χρονοσειρές παραγωγής ενέργειας και στη συνέχεια συναθροίστηκαν σε επίπεδο μήνα.

Το πρόβλημα σχεδιασμού χωρίζει τη λειτουργία σε δύο περιόδους. Θεωρούμε τέσσερις παραμέτρους:

- i. Το ποσοστό λειτουργίας των στροβίλων,  $a$ .
- ii. Το ποσοστό της ζήτησης των ωρών της ημέρας,  $b$ , ως ποσοστό της μέσης ημερήσιας ζήτησης.
- iii. Τη μέση ημερήσια ζήτηση,  $D$ .
- iv. Τον αριθμό των ανεμογεννητριών,  $n$ .

Έτσι, έχουμε δύο διακριτές περιόδους:

- a) Τις ώρες λειτουργίας των στροβίλων ως  $a$  ποσοστό του χρόνου. Σε αυτή την περίοδο θεωρούμε μειωμένη ζήτηση ίση με:

$$D_{energy}^1 = b \cdot D \quad (4.3)$$

Σε αυτή την περίοδο, αν  $\Pi_w$  είναι η παραγωγή των  $n$  ανεμογεννητριών, θα έχουμε παραγωγή ενέργειας ίση με:

$$E_{total} = a \cdot \Pi_w + E_{tur}^* \quad (4.4)$$

Το έλλειμμα ενέργειας αυτής της περιόδου είναι:

$$E_{def} = \min(E_{total} - D_{energy}^1, 0) \quad (4.5)$$

- Το παραπάνω έλλειμμα λαμβάνει αρνητικό πρόσημο όταν η  $E_{total}$  είναι μικρότερη της  $D_{energy}^1$ .

- b) Τις ώρες λειτουργίας της αντλίας ως ποσοστό  $(1-a)$  του χρόνου. Σε αυτή την περίοδο η αστική ζήτηση ενέργειας είναι:

$$D_{urban} = (1-b) \cdot D \quad (4.6)$$

Η συνολική ζήτηση ενέργειας θα είναι:

$$D_{energy}^2 = D_{urban} + E_p^* \quad (4.7)$$

Η παραγωγή ενέργειας, εφόσον οι στροβίλοι δε λειτουργούν, είναι:

$$E_{total} = (1-a) \cdot \Pi_w \quad (4.8)$$

Το αντίστοιχο έλλειμμα ενέργειας της περιόδου είναι:

$$E_{def} = \min(E_{total} - D_{energy}^2, 0) \quad (4.9)$$

Για το πρόσημο του ελλείμματος ισχύει ότι και στην περίοδο (a).

Και στις δύο παραπάνω περιόδους με αριθμό αναφοράς (i), έχουμε πλεόνασμα ενέργειας που ισούται με:

$$E_{exc} = \max(E_{total} - D_{energy}^i, 0) \quad (4.10)$$

Η λογική της μεθοδολογίας που προτείνεται βασίζεται στην κατάλληλη –λογική– επιλογή των τεσσάρων παραμέτρων ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση του μέσου ελλείμματος των δύο διακριτών περιόδων με ταυτόχρονη αύξηση της αξιοπιστίας του συνδυασμένου συστήματος στις δύο περιόδους.

Για το λόγο αυτό υπολογίζουμε την πιθανότητα αστοχίας του συστήματος στις δύο περιόδους (που υπολογίζει τον αριθμό  $n_{def}$  των μηνών που η ζήτηση δεν καλύπτεται από το συνδυασμένο σύστημα):

$$p_1 = \frac{n_{def1}}{12000} \cdot 100 \quad (4.12)$$

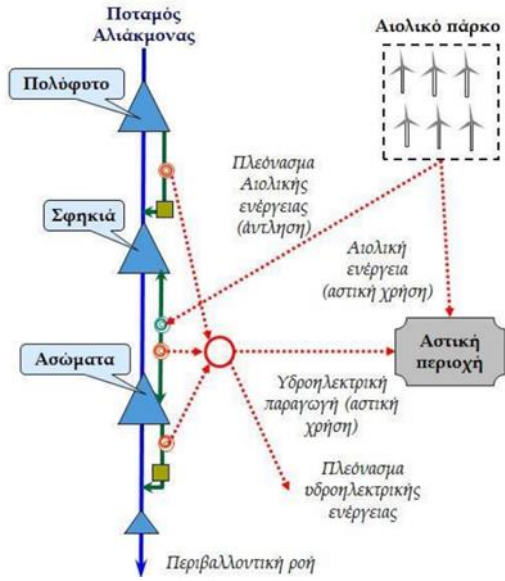


$$p_2 = \frac{n_{def2}}{12000} \cdot 100 \quad (4.13)$$

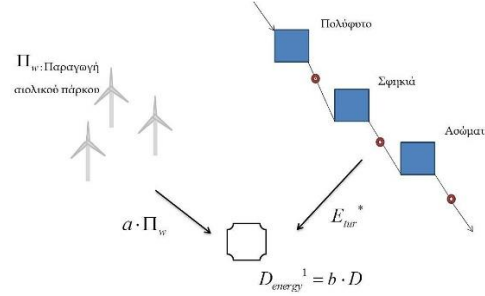
όπου ο αριθμός  $n_{def}$  υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$n_{def} = countif(E_{def} < 0) \quad (4.14)$$

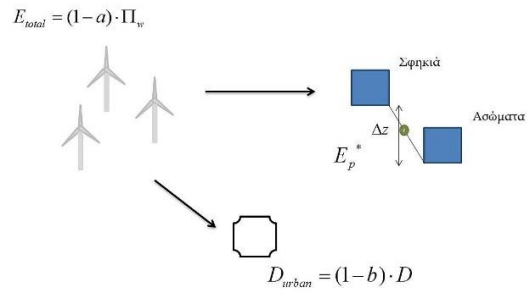
Στην εικόνα 12 και 13 φαίνονται σχηματοποιημένα οι δύο περίοδοι λειτουργίας. Για λόγους απλοποίησης απεικονίζονται μόνο οι δύο ταμιευτήρες όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα άντλησης/ταμίευσης (Σφηκιά, Ασώματα).



Εικόνα 11: Σχηματοποίηση του υβριδικού συστήματος. Απεικονίζονται οι ροές νερού και ενέργειας.

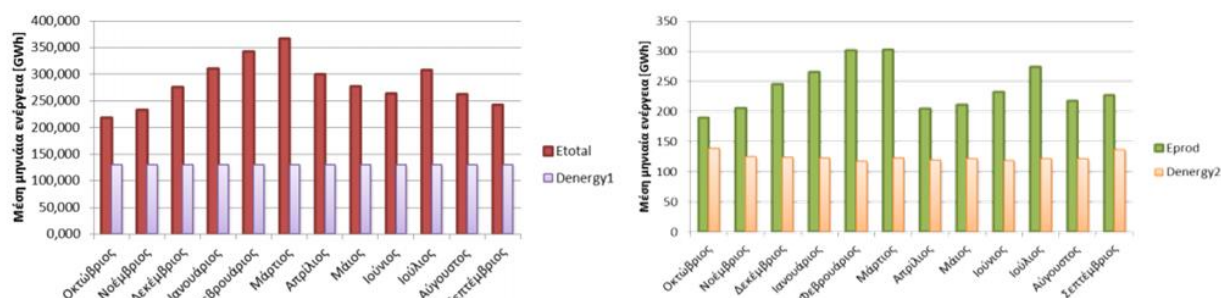


Εικόνα 12: Σχηματοποίηση λειτουργίας πρώτης περιόδου.



Εικόνα 13: Σχηματοποίηση λειτουργίας δεύτερης περιόδου.

Ως βέλτιστος σχεδιασμός μετά τους υπολογισμούς προκύπτει εκείνος που θα λειτουργούν 750 ανεμογεννήτριες με τα ποσοστά  $a$  και  $b$  να διαμορφώνονται σε 40% και 87% και τις πιθανότητες αστοχίας  $p_1$ ,  $p_2$  να είναι 0.05% και 4.96% αντίστοιχα. Στην εικόνα 14 παρατηρούμε σε μορφή ραβδωτών διαγραμμάτων την περίσσεια ενέργειας ανά μήνα για κάθε περίοδο λειτουργίας (1, 2). Οι απεικονίσεις είναι χαρακτηριστικές και των διακυμάνσεων της υδροηλεκτρικής και της αιολικής παραγωγής ανάμεσα στους διαφορετικούς μήνες. Να σημειωθεί, επίσης, πως το σενάριο που προκύπτει ως βέλτιστο δεν προϋποθέτει την κατασκευή 750 ανεμογεννητριών στην περιοχή του Κιλκίς, απλώς λαμβάνει τα ανεμολογικά δεδομένα από αυτή την περιοχή. Προφανώς οι απαιτούμενες ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε διάσπαρτες και απομακρυσμένες μεταξύ τους περιοχές με κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες, ενώ το σενάριο αναφέρεται σε έναν υποθετικό μέγιστο αριθμό.



Εικόνα 14: Περίσσεια ενέργειας ανά μήνα για κάθε περίοδο λειτουργίας (1, 2) σεναρίου βέλτιστου σχεδιασμού.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις λεπτομερείς και εκτεταμένες αναλύσεις που έγιναν αποδεικνύεται ότι το πλαίσιο παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση δύναται να αποδώσει πιστά τη λειτουργία υδροσυστημάτων (Tsoukalas et al., 2015). 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. Τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται από τις αναλύσεις και των δύο υδροσυστημάτων.

Ειδικότερα για το σύστημα Αχελώου:

- 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€..
- 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.

Για το σκέλος της ενεργειακής παραγωγής του Αλιάκμονα:

- Η συνάρτηση -συνιστώσα του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ- Total Generated Firm Power οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια. Η συνάρτηση Sum of Generated Firm Power δίνει μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας από την Total Generated Firm Power μόνο για τον ΥΗΣ Σφηκιάς ενώ στα υπόλοιπα έργα (αλλά και στο σύνολο) η εικόνα είναι αντιδιαμετρική, με την Total Generated Firm Power να δίνει μεγαλύτερες τιμές.
- Η παρουσία στόχου άντλησης με παράλληλη εφαρμογή της συνάρτησης Total Generated Firm Power αυξάνει την πρωτεύουσα ενέργεια, ενώ έχει ισχυρή επιρροή στη μορφή της καμπύλης διαρκείας της παραγόμενης ενέργειας του ΥΗΕ Σφηκιάς. Παράλληλα, ως τεχνολογία, η άντληση/ταμίευση αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για την αποθήκευση ενέργειας και τη διείσδυση των ΑΠΕ σε μεγάλη κλίμακα.

Σχετικά με τον σχεδιασμό του υποθετικού υβριδικού συστήματος:

- Παρατηρείται πως με την μείωση του ποσοστού λειτουργίας των στροβίλων μπορεί ταυτόχρονα να αυξάνεται η ζήτηση της 2ης περιόδου λειτουργίας με ταυτόχρονη μείωση του απαιτούμενου αριθμού των ανεμογεννητριών. Η αύξηση του αριθμού των ανεμογεννητριών σε σχέση με την πρώτη θεώρηση σχεδιασμού είναι εύλογη μιας και διατηρείται σταθερή η ζήτηση της αστικής περιοχής ενώ παράλληλα αξιοποιείται με αποδοτικότερο τρόπο η ενέργεια που παράγεται από τους στροβίλους του υδροσυστήματος.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Chow V., D.R. Maidment and L.W. Mays, Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.
2. Tsoukalas I., Dimas P., Makropoulos C., Hydrosystem optimization on a budget: Investigating the potential of surrogate based optimization techniques, publication description Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA) Journal, Special issue on Mathematical Models and Methods for Environmental Systems & Related Topics, 2015.
3. Αντωνρόπουλος 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.
4. Αργυράκης Ι., Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως έργων Πολλαπλού Σκοπού, Η Συμβολή των Υδροηλεκτρικών Έργων στον Ενεργειακό Σχεδιασμό της Χώρας, Ιωάννινα, ΤΕΕ, 2009.
5. Στεφανάκος Ι., Σημειώσεις μαθήματος Υδροηλεκτρικών Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2008.
6. Ευστρατιάδης Α., Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, Δεύτερο Διεθνές Συνέδριο "Περιβάλλον - Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων", Αθήνα, Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας, European Council of Civil Engineers, 2007.
7. Ιωάννου Χ., Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας, Διπλωματική εργασία, 122 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2012.
8. 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.
9. Μπουζιώτας Δ., Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό Υδρονομέας - Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας, Διπλωματική εργασία, 162 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2012.

# Optimal hydropower reservoirs' systems management framework: Investigation on the Acheloos - Thessaly and Aliakmonas hydrosystems

P. Dimas

*Civil Engineer, MSc.*

D. Nikolopoulos

*Civil Engineer, MSc.*

D. Koutsoyiannis

*Professor, School of Civil Eng. NTUA*

D. Bouziotas

*Πολιτικός Μηχανικός, MSc.*

A. Efstratiadis

*Civil Engineer, PhD, NTUA*

*Key words:* Pumped storage, Hydropower systems management, Hydronomeas, optimization

**ABSTRACT:** In this study, a holistic approach for the optimal management of two large, multi-reservoir hydrosystems in Greece is analysed, applied in cases of multiple and conflicting water uses, such as hydroelectric production and the coverage of irrigation and drinking water demands. In general, the optimal management of such hydrosystems presents a strong challenge for engineers, due to the stochasticity of inflows and the non-linear nature of hydroelectric production. To manage the strong variability of renewable energy production, the use of the two studied cases of Acheloos-Thessaly and Aliakmonas as pump-storage systems is proposed. To explore the optimal management policies, the methodological framework of “Parameterisation-Simulation-Optimisation” (PSO) is applied, employed through the use of Hydronomeas software and its hydroelectric production optimization module. The goal of the analysis is the estimation of the capacity to generate firm energy with a preset high reliability level in both systems, as well as the assessment of the consequent economic benefit obtained with the optimal policies found through Hydronomeas. Moreover, the benefits of employing pump-storage schemes in order to provide a buffer for other renewable energy sources with strong variability, such as wind energy, is explored.