

## Μεθοδολογία Εκτίμησης Εισροών σε Ταμιευτήρες Υδροηλεκτρικών Σταθμών με Στόχο τη Μεσοπρόθεσμη Πρόγνωση τους σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής

ΤΖΑΝΕΣ Γ.<sup>1,2,\*</sup>, ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΣ Γ.<sup>1</sup>, ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ Α.<sup>1</sup>, ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ Α.<sup>3</sup>, ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ Ι.<sup>2</sup> και ΣΤΑΜΟΥ Α.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15780, Αθήνα

<sup>2</sup>Σχολή Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 12244, Αιγάλεω

<sup>3</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100, Χανιά

\*Υπεύθυνος για την αλληλογραφία συγγραφέας / E-mail: g.t.zanes@gmail.com

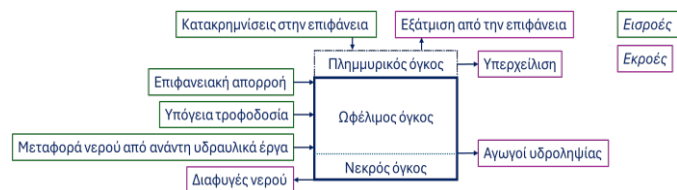
### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεσοπρόθεσμη πρόγνωση των εισροών είναι κρίσιμη για τον βέλτιστο προγραμματισμό της λειτουργίας των ΥΗΣ και συνεπώς την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, ιδιαίτερα υπό τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, συχνά, δεν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα των ιστορικών εισροών. Αντίθετα, μετρήσεις της υδροηλεκτρικής παραγωγής και της στάθμης των ταμιευτήρων είναι συνήθως διαθέσιμες και αξιόπιστες.

Η εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη μεθοδολογίας που εκτιμά τις εισροές, αξιοποιώντας τα δεδομένα αυτά. Η εκτίμησή τους αποτελεί προαπαιτούμενο για τη δόμηση και επικύρωση προγνωστικών μοντέλων που αναπτύσσονται υπό το ερευνητικό έργο Climpect (<https://climpect.gr/>).

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στον υπό μελέτη ταμιευτήρα (S. Mihas et al., 2015), το οποίο περιγράφεται στο Σχήμα 1.



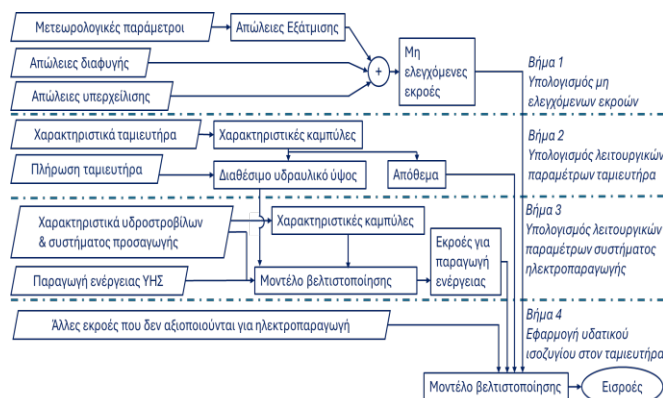
Σχήμα 1. Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα.

Αρχικά εκτιμώνται οι συνολικές εισροές, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, της στάθμης του ταμιευτήρα, των τοπικών μετεωρολογικών παραμέτρων, καθώς και των τεχνικών χαρακτηριστικών του έργου. Η μεθοδολογία περιγράφεται συνοπτικά στο Σχήμα 2 και περιλαμβάνει τέσσερα βήματα: (α) τον υπολογισμό των μη ελεγχόμενων εκροών, δηλαδή απωλειών λόγω εξάτμισης, υπόγειων διαφυγών, και υπερχειλίσεων, (β) τον υπολογισμό του διαθέσιμου υδραυλικού ύψους και του αποθέματος, που αποτελούν λειτουργικές μεταβλητές του ταμιευτήρα, (γ) τον υπολογισμό των εκροών που απαιτούνται για την ηλεκτροπαραγωγή, και (δ) τον υπολογισμό των συνολικών εισροών, επιλύοντας το υδατικό ισοζύγιο στον ταμιευτήρα.

Στην παρούσα εργασία και στο πρώτο μεθοδολογικό βήμα, ως μη ελεγχόμενες εκροές θεωρήθηκαν οι απώλειες εξάτμισης, όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Penman και τα τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα.

Στο δεύτερο μεθοδολογικό βήμα, χρησιμοποιείται ο βαθμός πλήρωσης και οι καμπύλες αποθέματος-στάθμης και στάθμης-ύψους πτώσης για την εύρεση των αντίστοιχων μεταβλητών, συναρτήσει της τιμής στάθμης. Οι ημερήσιες

συχνότητες καταγραφές του βαθμού πλήρωσης για τους ΥΗΣ του εθνικού διασυνδεδεμένου συστήματος είναι διαθέσιμες από τον ΑΔΜΗΕ (<https://www.admie.gr/>).



Σχήμα 2. Μεθοδολογικό πλαίσιο.

Στο τρίτο μεθοδολογικό βήμα υπολογίζονται οι εκροές νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ως ακολούθως:

1. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών καμπυλών: Για κάθε υδροστροβίλο, οι καμπύλες αυτές συναρτούν διαφορετικές παροχές λειτουργίας (α) με τις απώλειες υδραυλικής ενέργειας στο σύστημα προσαγωγής και (β) με τον βαθμό απόδοσης κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Για τα παραπάνω απαιτούνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υδροστροβίλων και του συστήματος προσαγωγής.
2. Προσδιορισμός της εκροής νερού από τους υδροστροβίλους: Η εκροή προσδιορίζεται με βάση τις ωριαίες μετρήσεις παραγωγής ενέργειας που είναι διαθέσιμες από τον ΑΔΜΗΕ και μέσω μοντέλου βελτιστοποίησης, που αναλύεται στη συνέχεια.

Καθώς οι μετρήσεις είναι διαθέσιμες ανά ΥΗΣ, το μοντέλο βελτιστοποίησης (α) επιμερίζει τη συνολική παραγωγή ενέργειας στους υδροστροβίλους, και (β) υπολογίζει την διερχόμενη παροχή για την παραγωγή της ενέργειας αυτής. Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί τη συνολική παροχή,  $Q_{hps}$ , υπό τους περιορισμούς (α) η συνολική παραγωγή ενέργειας του ΥΗΣ να ισούται με αυτή των καταγραφών, (β) της εξίσωσης ισχύος σε κάθε υδροστροβίλο, (γ) του καθαρού υδραυλικού ύψους και (δ) της απόδοσης των υδροστροβίλων συναρτήσει της διακινούμενης παροχής, και (ε) των ορίων λειτουργίας των υδροστροβίλων, όπως περιγράφονται αντίστοιχα στις Εξισώσεις (1)-(5), για κάθε χρονικό βήμα με διάρκεια  $\Delta T$ :

$$E_{hps} = \sum_{n=1}^N P_n \Delta T \quad (1)$$

$$P_n = p \cdot g \cdot H_{N_n}(Q_n) \cdot Q_n \cdot \eta_n(Q_n) \quad (2)$$

$$H_N(Q) = H_G - H_T(Q) = H_G - (\alpha \cdot Q^2 + \beta \cdot Q + \gamma) \quad (3)$$

$$\eta_n(Q_n) = \alpha \cdot Q_n^2 + \beta \cdot Q_n + \gamma \quad (4)$$

$$Q_n^{\text{MIN}} \leq Q_n \leq Q_n^{\text{MAX}} \text{ if } Q_n \neq 0 \quad (5)$$

όπου,  $P_n$ ,  $H_{N_n}$ ,  $Q_n$  και  $\eta_n$  η ισχύς, το καθαρό υδραυλικό ύψος, η παροχή και ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου, ο οποίος σημειώνεται με τον δείκτη  $n$  και ανήκει στο σύνολο (SET) των υδροστροβίλων  $N$ ,  $Q_n^{\text{MIN/MAX}}$  η ελάχιστη/μέγιστη παροχή που μπορεί να διακινήσει ο υδροστροβίλος,  $E_{hps}$  η ενεργειακή παραγωγή του ΥΗΣ,  $H_G$  το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος,  $H_T$  οι απώλειες υδραυλικού ύψους,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  οι συντελεστές των πολυωνύμων που περιγράφουν τις αντίστοιχες καμπύλες. Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός των απωλειών υδραυλικής ενέργειας,  $H_T(Q)$ , πρέπει να λάβει υπόψη τη διάταξη του συστήματος προσαγωγής και να παραμετροποιηθεί κατά περίπτωση.

Στο τελευταίο μεθοδολογικό βήμα επιλύεται το υδατικό ισοζύγιο στον ταμιευτήρα, σύμφωνα με την Εξίσωση 6.

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{hps}} + \frac{V_{t+1} - V_t}{\Delta T} + Q_l + Q_c \quad (6)$$

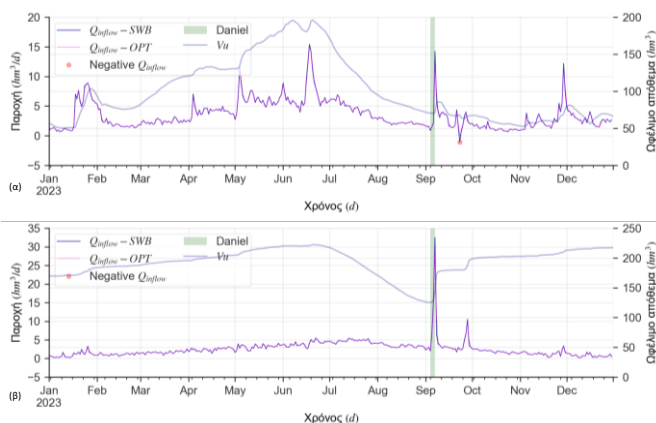
όπου  $V_t$  και  $V_{t+1}$  το απόθεμα στην έναρξη και λήξη της χρονικής περιόδου  $\Delta T$ ,  $Q_c$  και  $Q_l$  οι ελεγχόμενες και μη εκροές που δεν αξιοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή.

Καθώς οι καμπύλες που περιγράφουν τη γεωμετρία του ταμιευτήρα εμπεριέχουν αβεβαιότητα, με την εφαρμογή της Εξίσωσης 6 μπορεί να προκύψουν αρνητικές τιμές εισροών. Σε αυτήν τη βάση, το ισοζύγιο επιλύεται εφαρμόζοντας και επιπλέον μοντέλο βελτιστοποίησης, σύμφωνα με τους Deng et al. (2015), το οποίο α) δεν επιτρέπει αρνητικές τιμές και β) επιτρέπει την εξομάλυνση των έντονων διακυμάνσεων στις εισροές μεταξύ συνεχόμενων χρονικών βημάτων, που μπορεί να προκύπτουν λόγω μετρητικών σφαλμάτων.

Τα επιμέρους βήματα της μεθοδολογίας και η διαδικασία της συλλογής των δεδομένων παραγωγής ενέργειας και πλήρωσης των ταμιευτήρων, έχουν αυτοματοποιηθεί, καθώς σκοπός είναι η εφαρμογή της σε εθνικό επίπεδο.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των εισροών στους ΥΗΣ Ιλαρίωνα και ΥΗΣ Πλαστήρα.



**Σχήμα 3.** Οι ημερήσιες εισροές και το ωφέλιμο απόθεμα (α) στον ΥΗΣ Ιλαρίωνα και (β) στον ΥΗΣ Πλαστήρα, το 2023.

Στα Σχήματα 3α και 3β φαίνονται οι ημερήσιες εισροές, όπως υπολογίζονται από την Εξίσωση 6 ( $Q_{\text{inflow}} - SWB$ ) και το μοντέλο βελτιστοποίησης ( $Q_{\text{inflow}} - OPT$ ). Ακόμα, σημειώνονται οι τυχόν αρνητικές τιμές των εισροών ( $Negative Q_{\text{inflow}}$ ), η χρονοσειρά του ωφέλιμου αποθέματος ( $V_u$ ) και το γεγονός της κακοκαιρίας Daniel.

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία χρηματοδοτήθηκε από τη Δράση «Υποστήριξη της αναβάθμισης λειτουργίας του Εθνικού Δικτύου για την Κλιματική Αλλαγή (CLIMPACT)» του έργου με κωδ. αρ. 2023NA11900001, της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Καινοτομίας.



### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Deng C. et al. (2015). Estimation of nonfluctuating reservoir inflow from water level observations using methods based on flow continuity. *Journal of Hydrology*, 529, 1198–1210.

Mihás S. et al. (2015). Lecture notes on "Hydraulic Structures-Dams", Department of Water Resources and Environmental Engineering, NTUA, 460p.