

# ΕΝΑ ΦΕΙΔΩΛΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ ΡΟΩΝ ΣΕ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΑ

**Κ. Ρίσβα<sup>(1\*)</sup>, Δ. Νικολόπουλος<sup>(2)</sup>, Α. Ευστρατιάδης<sup>(2)</sup>, Ι. Ναλμπάντης<sup>(1)</sup>**

(1) Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, , Ηρώων Πολυτεχνείου 9 – 15780, Ζωγράφου

(2) Εργαστήριο Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, , Ηρώων Πολυτεχνείου 5 - 15780 Ζωγράφου

\*Επικοινωνία: [conrisva@gmail.com](mailto:conrisva@gmail.com)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περίοδος χαμηλών απορροών ενός ποταμού, εμφανίζεται συνήθως εποχιακά στις ξηρές περιόδους και συχνά συνοδεύεται από αυξημένες ανάγκες σε νερό. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας, συχνά προκαλεί ποικίλα διαχειριστικά προβλήματα. Η εργασία στοχεύει στην υλοποίηση αποτελεσματικών και επιχειρησιακά εφαρμόσιμων εργαλείων για την πρόβλεψη χαμηλών ροών. Η μεθοδολογία βασίζεται στην υιοθέτηση μοντέλου με μορφή εκθετικής μείωσης για την καμπύλη στείρευσης. Ως τιμή εκκίνησης χρησιμοποιείται ένα στατιστικό χαρακτηριστικό των ροών προ της ξηρής περιόδου. Ο ρυθμός στείρευσης εκφράζεται ως γραμμική συνάρτηση της τιμής εκκίνησης. Οι παράμετροι της συνάρτησης είναι σταθερές στο χρόνο και βαθμονομούνται σε δεδομένα που αντιπροσωπεύουν την συνιστώσα των χαμηλών ροών στα ολικά υδρογραφήματα. Χρησιμοποιούνται ημερήσιες χρονοσειρές από τον Αχελώου στην Ελλάδα, τον Ξερό και τη Περιστερώνα στην Κύπρο και τον Salso στην Ιταλία. Τα ολικά υδρογραφήματα φιλτράρονται με τεχνικές επεξεργασίας σήματος ώστε να αφαιρεθεί η επίδραση των πλημμυρικών γεγονότων κατά τις ξηρές περιόδους. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι είναι δυνατόν να προκύψουν ικανοποιητικές προβλέψεις χαμηλών ροών για μεσογειακές λεκάνες με διαφορετικό υδρολογικό καθεστώς.

**Λέξεις-κλειδιά:** ξηρή περίοδος, ρυθμός ύφεσης, φίλτρο Savitzky–Golay, κριτήριο αναφοράς, βαθμονόμηση Monte Carlo

## A SIMPLE MODEL FOR LOW FLOW FORECASTING IN MEDITERRANEAN STREAMS

**Konstantina Risva (1), Dionysios Nikolopoulos(2) , Andreas Efstratiadis(2) , Ioannis Nalbantis (1)**

(1) School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens, Greece

(2) School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece, 9 Heroon Polytechniou St., Zographou 157 80 Athens, Greece. E-mail: [conrisva@gmail.com](mailto:conrisva@gmail.com)

## ABSTRACT

Low flows commonly occur in rivers during dry seasons within each year. They often concur with increased water demand which creates numerous water resources management problems. This paper seeks for simple yet efficient tools for low-flow forecasting, which are easy to implement, based on the adoption of an exponential decay model for the flow recession curve. A statistical attribute of

flows preceding the start of the dry period is used as the starting flow. On the other hand, the decay rate (recession parameter) is assumed as a linear function of the starting flow. The two parameters of that function are time-invariant, and they are optimized over a reference time series representing the low flow component of the observed hydrographs. The methodology is tested in the basins of Achelous, Greece, Xeros and Peristerona, Cyprus, and Salso, Italy. Raw data are filtered by signal processing techniques which remove the effect of flood events occurring in dry periods, thus allowing the preservation of the decaying form of the flow recession curve. Results indicate that satisfactory low flow forecasts are possible for Mediterranean basins of different hydrological behaviour.

**Key words:** dry period; recession rate; Savitzky-Golay filter; benchmark function; Monte Carlo calibration

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο παγκόσμιος μετεωρολογικός οργανισμός (World Meteorological Organization – WMO) ορίζει ως χαμηλή ροή, την απορροή του ποταμού κατά τη διάρκεια παρατεταμένων ξηρών περιόδων. Οι χαμηλές ροές είναι περιοδικά φαινόμενα και αναπόσπαστα στοιχεία του υδρολογικού καθεστώτος. Συγκεκριμένα, στις μεσογειακές λεκάνες που παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση κατά τη διάρκεια των εποχών, η βασική ροή είναι η σημαντικότερη, και συνήθως η μοναδική συνιστώσα του υδρογραφήματος κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Ως εκ τούτου, οι προβλέψεις χαμηλών ροών, όσον αφορά το μέγεθος, τη συχνότητα και τη διάρκεια, αποτελούν βασική προϋπόθεση για πολυάριθμες μελέτες και θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων.

Η βιβλιογραφία αναφέρει πολλαπλές προσπάθειες για τη μοντελοποίηση των χαμηλών ροών, συμπεριλαμβανομένης του υδρογραφήματος ύφεσης, στοχαστικές συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης, φυσικά μοντέλα και προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα (Smakhtin, 2001). Μία τυπική ιδέα είναι το μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα που αντιπροσωπεύει το κλάδο ύφεσης του υδρογραφήματος ως εκροή από μία δεξαμενή άπειρης χωρητικότητας, υλοποιώντας την αποθήκευση υπογείων υδάτων. Το μοντέλο είναι γραμμικό δεδομένου ότι η εκροή εκφράζεται ως σταθερά συναρτήσει της αποθήκευσης, έχοντας ως αποτέλεσμα μία συνάρτηση εκθετικής μείωσης.

Το παρόν άρθρο πραγματεύεται τη χρήση της παραπάνω προσέγγισης ως εργαλείο πρόβλεψης της ξηρής περιόδου, χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα απορροής από το πρώτο δεκαπενθήμερο του Απριλίου. Βασικός σκοπός είναι η εξαγωγή ενός φειδωλού μοντέλου, αποδεκτής ικανότητας πρόβλεψης, που μπορεί να αξιοποιηθεί για λειτουργικούς σκοπούς (ετήσιο αρδευτικό σχεδιασμό). Το μοντέλο αξιολογείται σε τέσσερα υδατορεύματα με διαφορετική δυναμική χαμηλών ροών, τον Αχελώου (Ελλάδα), Salso (Ιταλία), Ξερός και Περιστερώνα (Κύπρος).

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

### 2.1 Παραδοχές μοντέλου

Γενικά, ένα υδρογράφημα χωρίζεται σε ανοδικούς κλάδους, αντανακλώντας την αύξηση της απορροής σε γεγονότα κατακρήμνισης, και καθοδικούς κλάδους, που αντιπροσωπεύουν την καθυστέρηση στην ροή λόγω διαδικασιών στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη. Συγκεκριμένα, οι χαμηλές ροές κατά τη ξηρή περίοδο, κυρίως αποδίδονται σε αποκρίσεις υπογείων υδάτων, οι οποίες μπορούν να εκπροσωπούνται ως εκροές από ένα γραμμικό ταμιευτήρα. Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή, η συνιστώσα της χαμηλής ροής του υδρογραφήματος ξηρής περιόδου ενός συγκεκριμένου έτους  $j$  μπορεί να μοντελοποιηθεί από μία φθίνουσα εκθετική συνάρτηση:

$$q_{jt} = q_{0j} \exp(-k_j t) \quad (1)$$

Όπου  $q_{0j}$  η χαμηλή ροή κατά την έναρξη της ξηρής περιόδου του έτους  $j$ ,  $t$  ο δείκτης ημέρας και  $k_j$  η παράμετρος στείρευσης, η οποία σχετίζεται με την μακροσκοπική υδρολογική συμπεριφορά του

υδροφορέα. Εδώ, η εξίσωση (1) εφαρμόζεται σε διακριτή μορφή, χρησιμοποιώντας ημερήσιο χρονικό βήμα, όπου οι απορροές εκφράζονται σε  $m^3/s$ , το χρονικό βήμα εκφράζεται σε ημέρες, ενώ το  $k_j$  σε αντίστροφη ημερήσια μονάδα. Η έναρξη και η λήξη της ξηρής περιόδου, η αρχική απορροή  $q_{0j}$  και η παράμετρος στείρευσης  $k_j$  διαφέρουν στα υδρολογικά έτη. Στο υπόλοιπο κείμενο ο δείκτης  $j$  παραλείπεται όταν θεωρείται περιττός.

Για λόγους ευκολίας, θεωρούμε χρονικό ορίζοντα αναφοράς έξι μήνες, από 15 Απριλίου έως 15 Οκτωβρίου, που είναι μία λογική παραδοχή για τη μέγιστη διάρκεια της ξηρής περιόδου στα μεσογειακά υδατορεύματα. Επιπλέον, μετά από προκαταρκτικές έρευνες, αποφασίσαμε να πάρουμε ως αρχική απορροή  $q_{0j}$ , την ελάχιστη τιμή των δύο πρώτων εβδομάδων του Απριλίου. Έτσι, για κάθε έτος  $j$ , η  $q_{0j}$  προσδιορίζεται a priori, σύμφωνα με τα δεδομένα απορροής, σε αντίθεση με τον συντελεστή ύφεσης  $k_j$ , ο οποίος προκύπτει από βαθμονόμηση, με την προσαρμογή της εξίσωσης (1) στο υδρογράφημα ξηρής περιόδου.

## 2.2 Παραγωγή τροποποιημένων δεδομένων χαμηλών ροών

Έχοντας ως δεδομένα ημερήσιες μετρήσεις απορροής μεταξύ 15 Απριλίου και 15 Οκτωβρίου και ένα δεδομένο  $q_{0j}$ , η εκτίμηση του  $k_j$  υπερβαίνει ένα τυπικό πρόβλημα βαθμονόμησης, δεδομένου ότι η διάρκεια της ξηρής περιόδου δεν είναι σταθερή, καθώς και το υδρογράφημα ξηρής περιόδου περιέχει τόσο ανοδικούς όσο και καθοδικούς κλάδους, καθώς και μεμονωμένες κορυφές. Επομένως, για κάθε έτος, είναι απαραίτητο να εξαχθεί η συνιστώσα χαμηλής ροής από το συνολικό υδρογράφημα. Αυτά τα δεδομένα αναφέρονται στο εξής ως τροποποιημένες χαμηλές ροές. Προκειμένου να κατασκευαστούν οι τροποποιημένες απορροές από τα παρατηρημένα δεδομένα, και ταυτόχρονα να προσδιοριστεί το πραγματικό μήκος της ξηρής περιόδου που συμβατικά ξεκινά στις 15 Απριλίου, εφαρμόζουμε μία διαδικασία επεξεργασίας πολλαπλών βημάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 και περιγράφεται παρακάτω.

**Στάδιο (α):** Το υδρογράφημα της ξηρής περιόδου παρουσιάζει μεγάλη και μικρή κλίμακα διακυμάνσεις. Οι πρώτες, οφείλονται σε πλημμυρικά γεγονότα, ενώ οι τελευταίες προκαλούνται γενικά από τυχαία σφάλματα της παρακολούθησης, με αποτέλεσμα να προκύπτουν τοπικά ελάχιστα μηδαμινής φυσικής σημασίας. Προκειμένου να απομακρύνουμε αυτά τα αποτελέσματα και να αποκτήσουμε ένα πιο ομαλό υδρογράφημα, χρησιμοποιούμε το αριθμητικό φίλτρο που εισήχθη από τους Savitzky και Golay (1964), που επιτρέπει την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο χωρίς την στρέβλωση του σήματος σε μεγάλο βαθμό. Αυτό επιτυγχάνεται αντικαθιστώντας τις πρώτες τιμές με νέες, από ένα κινούμενο πολυώνυμο σε γειτονικά σημεία  $2n + 1$ , με το  $n$  να είναι τουλάχιστον ίσο με το βαθμό του πολυωνύμου. Αυτό έχει ομοιότητα με τον σταθμισμένο κινητό μέσο όρο, δεδομένου ότι το οι συντελεστές της διαδικασίας εξομάλυνσης παραμένουν σταθεροί.

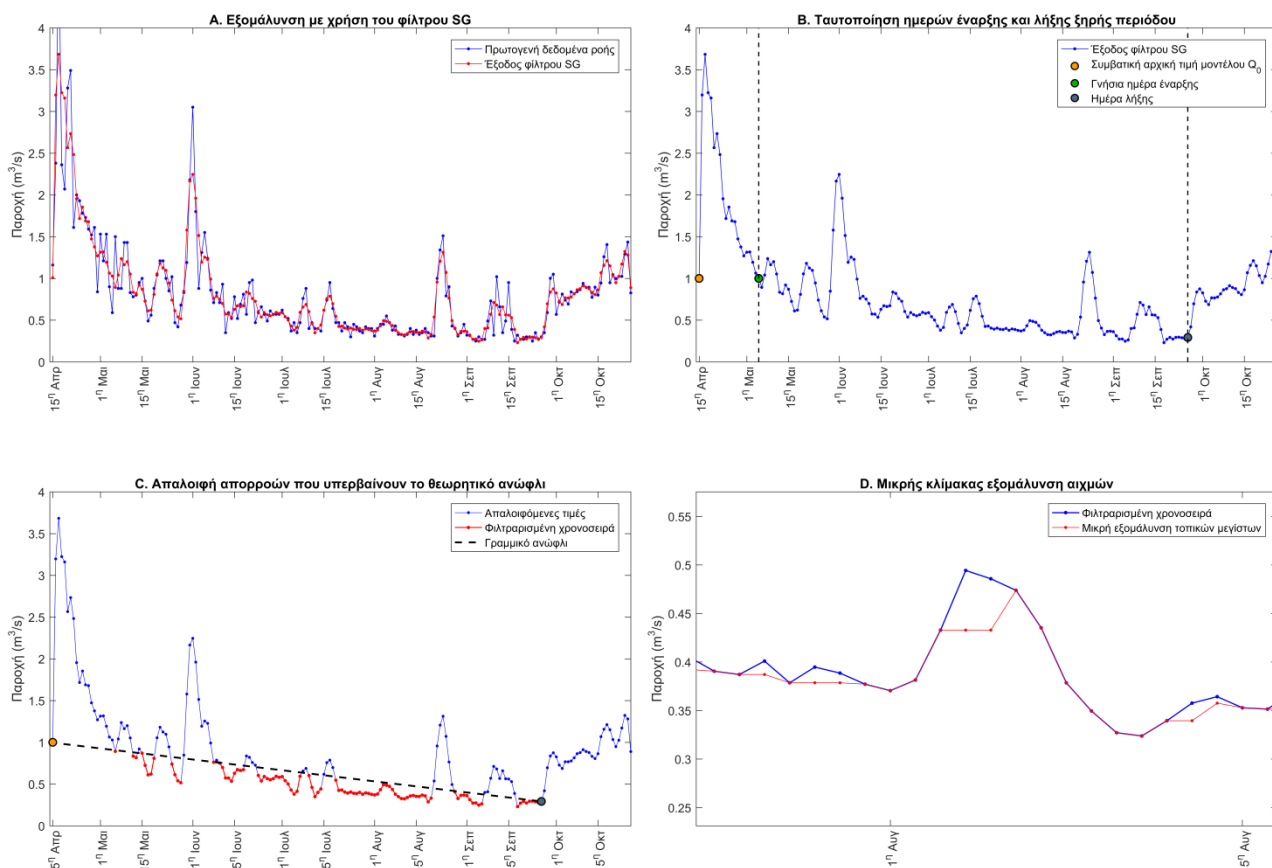
**Στάδιο (β):** Ορίζουμε την έναρξη και λήξη της ξηρής περιόδου και την τελευταία τιμή,  $q_{jn}$ . Αρχικά, χρησιμοποιώντας ως κατώφλι αποκοπής την αρχική ροή,  $q_{0j}$ , αναζητούμε την τελευταία τιμή απορροής που είναι μεγαλύτερη από  $q_{0j}$ . Η ημέρα με την τιμή αυτή υποδηλώνει την πραγματική έναρξη της ξηρής περιόδου, ενώ οι παρατηρημένες τιμές για τις προηγούμενες ημέρες αγνοούνται εντός του μοντέλου. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις μέσες τιμές για διαστήματα 15 ημερών και τις πρώτες διαφορές τους μέχρι τις 15 Οκτωβρίου. Προχωρώντας προς τα πίσω στο χρόνο, εξετάζουμε αν η τάση ροής μεταβάλλεται από αρνητική σε θετική, που σηματοδοτεί το λήξη της ξηρής περιόδου.

**Στάδιο (γ):** Αφαιρούμε όλες τις τιμές απορροής πάνω από τη γραμμή που ενώνει την  $q_{0j}$  με την  $q_{jn}$  δηλαδή:

$$q_{jt} = q_{0j} - (q_{0j} - q_{jn})t/n_j \quad (2)$$

αφού το εκθετικό μοντέλο μείωσης της χαμηλής ροής (1) μεταξύ  $q_{0j}$  και  $q_{jn}$  εξ ορισμού βρίσκεται κάτω από αυτή τη γραμμή. Στην εξ. (2),  $n_j$  είναι ο αριθμός των ημερών μεταξύ της 15<sup>ης</sup> Απριλίου και του τέλους της ξηρής περιόδου του έτους  $j$ .

**Στάδιο (d):** Μειώνουμε τις κορυφές απορροής που παραμένουν κάτω από το θεωρητικό ανώφλι (2), λαμβάνοντας υπόψη γεγονότα μικρής κλίμακας πλημμυρών με τυπική διάρκεια μέχρι δύο ημέρες. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόζουμε δύο φορές μία διαδικασία αποκοπής που περιλαμβάνει την ταυτοποίηση όλων των τοπικών μέγιστων ροών κατά την ξηρή περίοδο, τα οποία στην συνέχεια θέτονται ίσα με την τιμή της προηγούμενης ημέρας. Οι υπόλοιπες τιμές μεταξύ  $q_{0j}$  και  $q_{nj}$  περιλαμβάνουν το τροποποιημένο δείγμα χαμηλής ροής, το οποίο χρησιμοποιείται στην προσαρμογή της εξ. (1). Είναι γενικά μη συνεχές και περιέχει πολύ λιγότερες τιμές από το μήκος  $n_j$ , αφού έχουν αφαιρεθεί όλα τα σημαντικά τοπικά συμβάντα πλημμύρας.



**ΕΙΚΟΝΑ 1:** Στάδια επεξεργασίας για την εξαγωγή των τροποποιημένων χαμηλών ροών.

### 2.3 Βαθμονόμηση μοντέλου

Για κάθε έτος  $j$ , ένα μονοδιάστατο πρόβλημα βαθμονόμησης επιλύεται, για την εύρεση της τιμής του  $k_j$ , που εξασφαλίζει τη βέλτιστη προσαρμογή της εξ. (1) στα τροποποιημένα δεδομένα. Η στοχαστική συνάρτηση είναι μία τροποποιημένη έκφραση του κριτηρίου επίδοσης (modified expression of efficiency - MEF), χρησιμοποιώντας ως κριτήριο αναφοράς τις αναμενόμενες απορροές κατά την περίοδο αναφοράς. Αυτό έχει καίρια σημασία, αφού ο γνωστός δείκτης απόδοσης Nash-Sutcliffe συγκρίνει τις προσομοιωμένες τιμές έναντι της μέσης ροής, παρέχοντας έτσι μη ρεαλιστικά υψηλές επιδόσεις του μοντέλου. Φαίνεται, πως ο μέσος όρος δεν είναι αντιπροσωπευτικός του ποταμού κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, αφού οι απορροές παρουσιάζουν μη στάσιμη συμπεριφορά λόγω της συστηματικής μείωσης. Αυτή η αδυναμία, έχει συζητηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία (π.χ. Pushpalatha *et al.*, 2012).

Αρχικά, θεωρήσαμε ως κριτήριο αναφοράς όχι τη συνολική μέση ροή για τον χρονικό ορίζοντα αναφοράς, αλλά την μέση τιμή κάθε μεμονωμένης ημέρας, καθώς και τη διάμεση τιμή, η οποία είναι γενικά καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με τον μέσο όρο, δεδομένου ότι οι απορροές της ξηρής περιόδου παρουσιάζουν υψηλή ασυμμετρία. Ωστόσο, λόγω θορύβου τα δύο κριτήρια αναφοράς (ιδίως ο μέσος όρος) παρουσιάζουν τυχαίες διακυμάνσεις, οι οποίες δεν είναι επιθυμητές (Σχήμα 2). Για

να καταργήσουμε τέτοιες επιδράσεις, παρουσιάσαμε τρεις βαθμιδωτές εκθετικές συναρτήσεις, προσαρμοσμένες στους ημερήσιους μέσους και διαμέσους, καθώς και στα τοπικά ελάχιστα των διαμέσων. Η τελευταία είναι η πιο αντιπροσωπευτική του καθεστώτος του ποταμού κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, και έτσι χρησιμοποιήθηκε τελικά ως αναφορά στις βαθμονομήσεις.

#### 2.4 Σχηματοποίηση μοντέλου για πρόβλεψη

Η αρχική σχηματοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης χαμηλής ροής (1), λαμβάνοντας υπόψη μία ετήσια μεταβολή του συντελεστή στείρευσης, έχει περιορισμένη πρακτική χρησιμότητα, καθώς επιδιώκουμε την ανάπτυξη ενός εργαλείου πρόβλεψης με γνωστές παραμέτρους πριν από την έκδοση μίας πρόβλεψης. Για την εφαρμογή της εξ. (1) στη λειτουργία πρόβλεψης, χρειαζόμαστε μία σχέση για την εκτίμηση μίας ετήσιας παραμέτρου  $k_j$ , βασισμένης σε εύκολα ανακτήσιμες πληροφορίες, που είναι διαθέσιμες πριν από την έναρξη της ξηρής περιόδου. Προς αυτήν την κατεύθυνση, και για τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών βαθμονομήσεων, εξετάσαμε την εφαρμογή μίας γραμμικής σχέσης μεταξύ  $k_j$  και  $q_{0j}$ , δηλ.  $k_j = aq_{0j} + b$ , όπου  $a$  ( $s\ m^{-3}d^{-1}$ ) και  $b$  ( $d^{-1}$ ) είναι καθολικές παράμετροι, δηλαδή σταθερές για κάθε λεκάνη και ανεξάρτητες από τον δείκτη έτους  $j$ . Επομένως, το μοντέλο στη λειτουργία πρόβλεψης μπορεί να γραφτεί:

$$q_{jt} = q_{0j} \exp[-(aq_{0j} + b)t] \quad (3)$$

Προκειμένου να εξαχθούν οι παράμετροι  $a$  και  $b$ , εξετάζουμε δύο διαδικασίες. Αρχικά, χρησιμοποιούμε ένα σύνολο ήδη βαθμονομημένων τιμών  $k_j$  και προσαρμόζουμε μία εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης στην ανεξάρτητη μεταβλητή  $q_{0j}$ . Αποδεχόμενοι τις παραδοχές της προσέγγισης των ελαχίστων τετραγώνων, η κλίση και αποτέμνουσα του μοντέλου παλινδρόμησης είναι οι βέλτιστοι εκτιμητές των  $a$  και  $b$ . Εναλλακτικά, οι παράμετροι  $a$  και  $b$  θεωρούνται μεταβλητές ελέγχου ενός καθολικού προβλήματος βελτιστοποίησης, ζητώντας την προσαρμογή της εξ. (3) σε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων απορροής (σε αντίθεση με την εξ. (1), όπου οι διαφορετικές τιμές του  $k_j$  λαμβάνονται με βαθμονόμηση έναντι των χαμηλών ροών κάθε ξηρής περιόδου).

Και για τις δύο διαδικασίες, η απόδοση του μοντέλου αξιολογήθηκε ως προς το τροποποιημένο κριτήριο επίδοσης MEF μέσω της περιόδου βαθμονόμησης, ενώ η προβλεπτική ικανότητά της αξιολογήθηκε με τον υπολογισμό του MEF ενός ανεξάρτητου συνόλου δεδομένων (επαλήθευση).

#### 2.5 Ανάλυση αβεβαιότητας

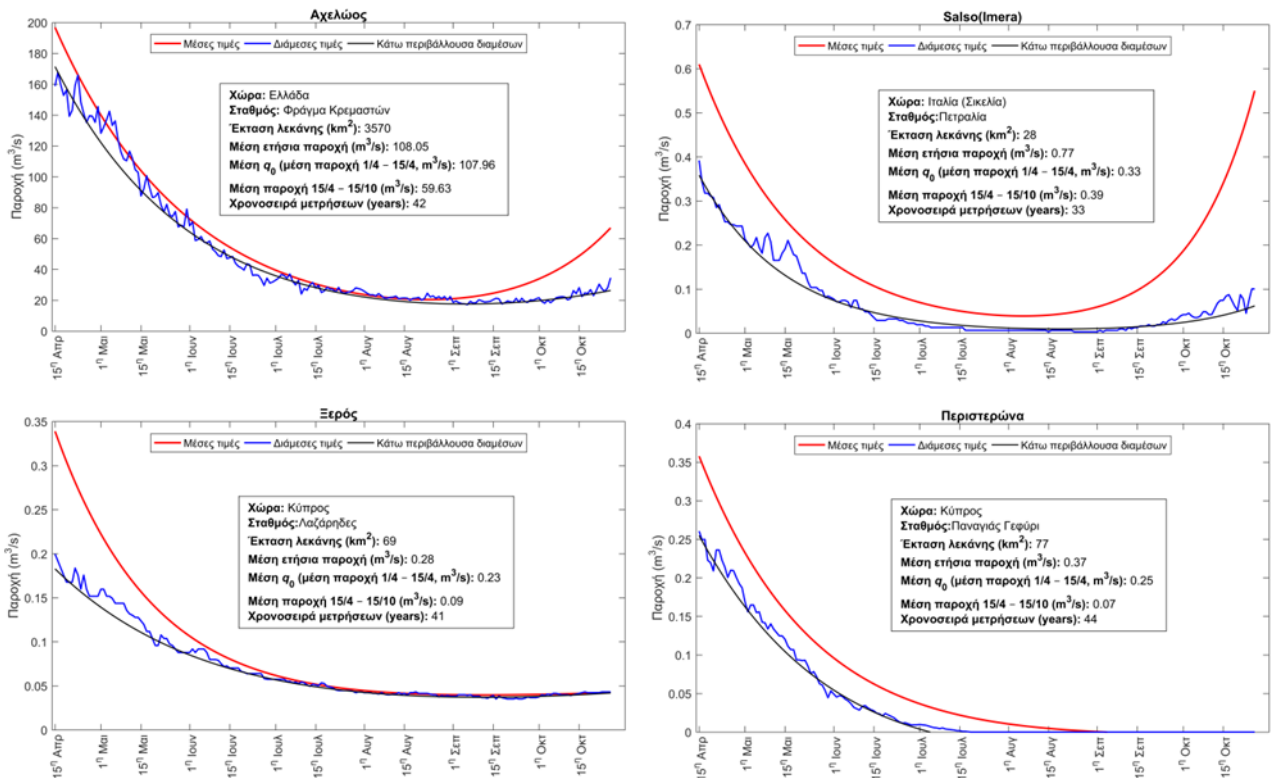
Μία βασική αδυναμία του κλασικού παραδείγματος βαθμονόμησης - επαλήθευσης, γνωστό ως split-sample test, είναι η εξάρτηση της απόδοσης του μοντέλου από το μήκος και το χρονικό διάστημα του δείγματος δεδομένων. Αυτό μπορεί να εισάγει σημαντική αβεβαιότητα, όχι μόνο στην απόδοση του μοντέλου αλλά και στις βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων.

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τέτοιες αβεβαιότητες κατά την εκτίμηση των παραμέτρων  $a$  και  $b$ , χρησιμοποιείται ένα σύστημα Monte Carlo βαθμονόμησης - επαλήθευσης. Και για τις δύο προσεγγίσεις, βαθμονομήσαμε τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  έναντι 1000 τυχαία επιλεγμένων υποσυνόλων (όχι απαραίτητα συνεχών) για ολόκληρη την περίοδο των τροποποιημένων χαμηλών ροών και τις επαληθεύσαμε έναντι των υπολοίπων που απομένουν (εξετάζεται σταθερό δείγμα επαλήθευσης 10 ετών). Για όλα τα αποτελέσματα (τιμές παραμέτρων και κριτήρια απόδοσης) εκτιμήθηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση τους.

### 3. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε τέσσερα υδατορεύματα διαφορετικής κλίμακας (ένα μεγάλο και τρία μικρά) και υδρολογικού καθεστώτος (Ρίββα, 2016). Τα βασικά χαρακτηριστικά τους καθώς και οι αντίστοιχες ημερήσιες, μέσες και διάμεσες τιμές της απορροής στον χρονικό ορίζοντα αναφοράς απεικονίζονται στην Εικόνα 3. Η χαμηλή ροή σε καθεστώτα των επιλεγμένων ποταμών είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα, ο Αχελώος, ο οποίος παράγει την υψηλότερη ετήσια απορροή στην

Ελλάδα (950 mm), διατηρεί σημαντική εκροή, ενώ η απόκλιση του μέσου όρου της ημερήσιας ροής από τη διάμεσο είναι πρακτικά αμελητέα από τον Μάιο έως τον Αύγουστο. Αντίθετα, στον ποταμό Salso υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ μέσων και διαμέσων, δεδομένου ότι οι απορροές την ξηρή περίοδο παρουσιάζουν σημαντική ασυμμετρία λόγω περιστασιακών αλλά αρκετά υψηλών γεγονότων πλημμύρας. Τέλος, στα δύο υδατορεύματα της Κύπρου, παρατηρούνται επίσης συστηματικές διαφορές μεταξύ μέσων και διάμεσων τιμών, μέχρι τα μέσα του καλοκαιριού. Συγκεκριμένα, από τις αρχές Ιουλίου, ο ποταμός Ξερός διατηρεί μία πρακτικά σταθερή βασική ροή, ενώ στην Περιστέρωνα η ροή διακόπτεται.



**ΕΙΚΟΝΑ 2:** Συνοπτικές πληροφορίες για τις λεκάνες, γραφήματα των μέσων και διάμεσων ημερήσιων τιμών και η προσαρμογή εκθετικού μοντέλου στην κάτω περιβάλλουσα των διαμέσων.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

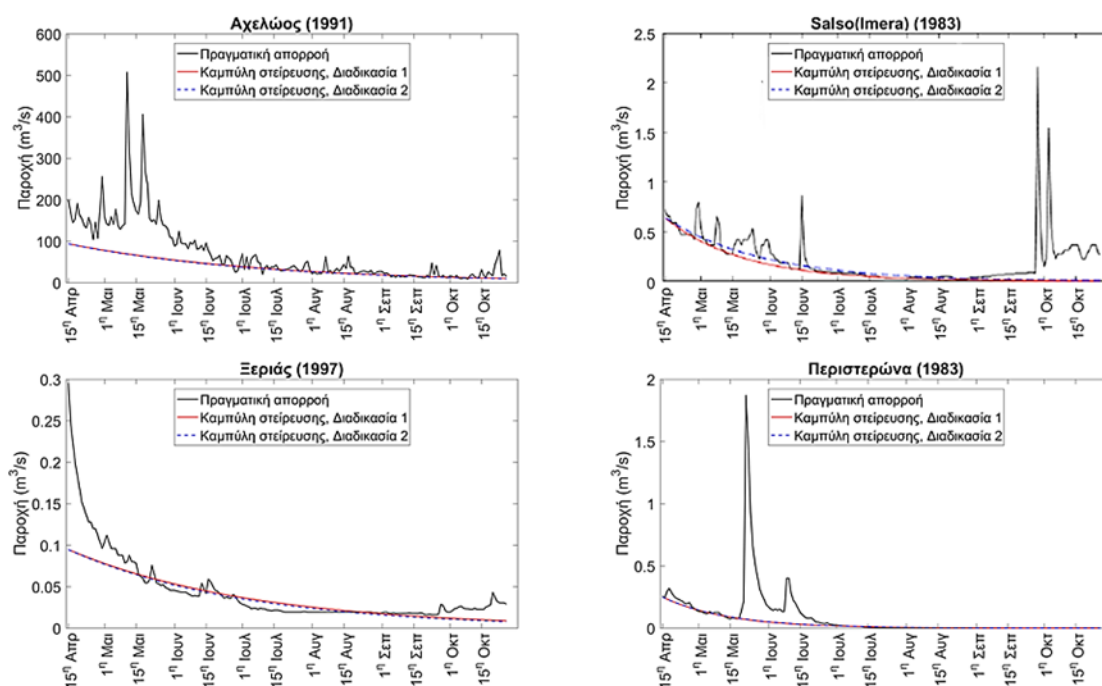
Τα βασικά αποτελέσματα για όλους τα υδατορεύματα συνοψίζονται στους Πίνακες 1 και 2. Οι δύο προσεγγίσεις εκτίμησης των παραμέτρων εξετάζονται σε ένα πλαίσιο Monte Carlo.

Για την πρώτη προσέγγιση, επιδεικνύουμε το βελτιστοποιημένο MEF με βάση την εξ. (1), με παραμέτρους  $k_j$  που έχουν προκύψει από τη βέλτιστη προσαρμογή ανά δείγμα βαθμονόμησης, και με βάση την εξ. (3) τα  $a$  και  $b$  υπολογίζονται a priori με παλινδρόμηση μεταξύ των βελτιστοποιημένων τιμών των  $k_j$  και  $q_{0j}$ . Στην τελευταία περίπτωση, το MEF αναφέρεται στα δείγματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης και στο πλήρες δείγμα δεδομένων (στη λειτουργία πρόβλεψης). Επιπλέον, δείχνουμε τις βελτιστοποιημένες τιμές των  $a$  και  $b$ , καθώς και τον συντελεστή προσδιορισμού ( $r^2$ ) της γραμμικής παλινδρόμησης. Τέλος, χρησιμοποιώντας ως τυπική αρχική ροή τη μέση τιμή  $q_{0j}$  (μέσος όρος των ελάχιστων απορροών στις αρχές Απριλίου για το ολόκληρο την περίοδο) παρέχουμε το αντίστοιχο ρυθμό στέρησης,  $k$ . Αξιοσημείωτο είναι, ότι ακόμη και μία χαμηλή συσχέτιση μεταξύ  $i$  και  $q_0$  μπορεί να δώσει ικανοποιητική πρόβλεψη, όπως φαίνεται για τον ποταμό Salso και, ιδιαίτερα, για την Περιστέρωνα.

Όσον αφορά τη δεύτερη προσέγγιση, παρουσιάζουμε τις τιμές MEF για τα δείγματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης, και το πλήρες δείγμα δεδομένων (λειτουργία πρόβλεψης), τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους  $a$  και  $b$  και τον μέσο ρυθμό στέρησης,  $k$ .

Συγκρίνοντας το MEF στην πρόβλεψη, φαίνεται ότι και οι δύο προσεγγίσεις εξασφαλίζουν παρόμοια πρόβλεψη, που είναι λογικό, δεδομένου ότι οι μέσοι ρυθμοί ύφεσης είναι σχεδόν πανομοιότυποι (με εξαίρεση τον Salso). Ωστόσο, στον Αχελώο και στο Salso, οι δύο προσεγγίσεις δεν είναι εξίσου ισχυρές (robust), όπως φαίνεται από την μεταβλητότητα του MEF. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προτείνουμε την επιλογή της παραμετροποίησης εξασφαλίζοντας τη χαμηλότερη αβεβαιότητα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα προσαρμογής του μοντέλου στην κατάσταση πρόβλεψης φαίνονται στην Εικόνα 3. Το μοντέλο είναι απόλυτα συνεπές με την αναμενόμενη υδρολογική συμπεριφορά κάθε ποταμού, η οποία εκπροσωπείται από το μέσο ρυθμό ύφεσης. Όπως φαίνεται στους Πίνακες 1 και 2, ο χαμηλότερος ρυθμός παρατηρείται στον Αχελώο, δηλ. σε ένα μεγάλο ποταμό με μόνιμη ροή, ενώ ο υψηλότερος ρυθμός στην Περιστερώνα, που επιτρέπει την αναπαραγωγή διαλειπούσας ροής.



**ΕΙΚΟΝΑ 3:** Παραδείγματα προβλεπόμενων χαμηλών ροών μέσω των δύο μεθόδων εκτίμησης παραμέτρων (1: παλινδρόμηση, 2: καθολική βελτιστοποίηση) σε σύγκριση με τα παρατηρημένα υδρογραφήματα κατά τη διάρκεια της περιόδου αναφοράς (15/4 έως 15/10).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις τέσσερις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής και εκτίμηση παραμέτρων μέσω μεθόδου παλινδρόμησης.

Όνομα ρέματος	Αχελώος	Salso (Imera)	Ξερός	Περιστερώνα
Εκτίμηση παραμέτρων μέσω παλινδρόμησης μεταξύ $k$ και $q_0$				
MEF, τοπική βαθμονόμηση	0.643 (0.035)	0.790 (0.026)	0.889 (0.017)	0.831 (0.016)
Συντ. προσδιορισμού, $r^2$	0.771 (0.028)	0.073 (0.029)	0.437 (0.031)	0.083 (0.019)
Παράμετρος $a$ ( $\text{mm}^{-1} \text{d}^{-1}$ )	0.0034 (0.0001)	0.0052 (0.0011)	0.0204 (0.0012)	-0.0179 (0.0023)
Παράμετρος $b$ ( $\text{d}^{-1}$ )	0.0037 (0.0002)	0.0244 (0.0014)	0.0098 (0.0003)	0.0400 (0.0009)
Ρυθμός ύφεσης $k$ ( $\text{d}^{-1}$ ) για μέσο $q_0$ (mm)	0.0126 (0.0003)	0.0297 (0.0018)	0.0157 (0.0005)	0.0350 (0.0011)
MEF, βαθμονόμηση	0.523 (0.044)	0.441 (0.070)	0.787 (0.032)	0.721 (0.021)
MEF, επαλήθευση	0.496 (0.124)	0.414 (0.195)	0.752 (0.146)	0.713 (0.078)
MEF, πρόβλεψη	0.523 (0.029)	0.437 (0.008)	0.788 (0.006)	0.721 (0.006)

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις τέσσερις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής και εκτίμηση παραμέτρων μέσω μεθόδου καθολικής βελτιστοποίησης.

Όνομα ρέματος	Αχελώος	Salso (Imera)	Ξερός	Περιστερόνα
Εκτίμηση παραμέτρων μέσω καθολικής βαθμονόμησης				
Παράμετρος $\alpha$ ( $\text{mm}^{-1} \text{d}^{-1}$ )	0.0030 (0.0003)	0.0074 (0.0033)	0.0159 (0.0035)	-0.0170 (0.0070)
Παράμετρος $b$ ( $\text{d}^{-1}$ )	0.0049 (0.0009)	0.0170 (0.0040)	0.0109 (0.0012)	0.0390 (0.0028)
Ρυθμός ύφεσης $k$ ( $\text{d}^{-1}$ ) για μέσο $q_0$ (mm)	0.0129 (0.0011)	0.0245 (0.0052)	0.0155 (0.0016)	0.0342 (0.0034)
MEF, βαθμονόμηση	0.529 (0.036)	0.483 (0.076)	0.800 (0.035)	0.725 (0.020)
MEF, επαλήθευση	0.484 (0.143)	0.320 (0.196)	0.729 (0.173)	0.692 (0.113)
MEF, πρόβλεψη	0.525 (0.006)	0.438 (0.084)	0.794 (0.006)	0.718 (.004)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δυναμική χαμηλών ροών σε υδατορεύματα της Μεσογείου μπορεί να προσεγγιστεί με τη χρήση του μοντέλου γραμμικού ταμιευτήρα, που συνεπάγεται τον προσδιορισμό δύο παραμέτρων, δηλαδή της αρχικής ροής και του ρυθμού στείρευσης (αντίστοιχα συμβολίζονται ως  $q_0$  και  $k_j$  στις εξισώσεις (1) - (4)). Οι αναλύσεις μας έδειξαν ότι η πρώτη μπορεί να οριστεί εύκολα ως η χαμηλότερη ημερήσια απορροή στις αρχές Απριλίου, ενώ η τελευταία μπορεί να εκφραστεί ως μία γραμμική συνάρτηση του  $q_0$ . Από την άποψη αυτή, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα απλό αλλά αποτελεσματικό εργαλείο πρόβλεψης χαμηλής ροής, προσδιορίζοντας την κλίση και την αποτέμνουσα της παραπάνω συνάρτησης, με βάση τα ιστορικά δεδομένα.

Βασικές καινοτομίες του προτεινόμενου πλαισίου είναι η εξαγωγή των τροποποιημένων δεδομένων απορροής από το συνολικό υδρογράφημα, μετά από μία σειρά διαδοχικών μετασχηματισμών των αρχικών δεδομένων (εξομάλυνση, απομάκρυνση κορυφών κλπ.), η επιλογή των τοπικών ελαχίστων των διάμεσων τιμών ως κριτήριο αναφοράς που χρησιμοποιείται στις βαθμονομήσεις, και η στοχαστική εφαρμογή των βαθμονομήσεων, η οποία επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων και των μέτρων απόδοσης.

Οι μελέτες περιπτώσεων έδειξαν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι κατάλληλη τόσο για τα μεγάλα όσο και για μικρές λεκάνες απορροής, προκαλώντας μόνιμη και μη μόνιμη απορροή. Το ισχυρό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η φειδωλότητά του, όχι μόνο σε ότι αφορά τις παραμέτρους αλλά και στις απαιτήσεις δεδομένων, καθώς μετά τη βαθμονόμηση μοναδική είσοδος είναι η αρχική απορροή  $q_0$ . Αυτό καθιστά το μοντέλο εύκολο να εφαρμοστεί σε λειτουργικό πλαίσιο, έτσι ώστε να παρέχονται αξιόπιστες εκτιμήσεις της επιφανειακής απορροής κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Andréassian, V., 2012. *A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations*. J. Hydrol. 420–421: 171–182.
- Risva, K., 2016. *Model development for low flow estimations in river basins across the Mediterranean*. Diploma thesis, School of Rural Engineering, National Technical University of Athens.
- Savitzky, A. Golay, M.J.E., 1964. *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. Analyt. Chem. 36(8):1627–39.
- Smakhtin, V.U., 2001. *Low flow hydrology: a review*. J. Hydrol. 240: 147–186.
- World Meteorological Organization (WMO), 1974. *International Glossary of Hydrology*.