

**ΕΚΤΡΟΠΗ ΡΕΜΑΤΟΣ ΣΟΥΛΟΥ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΕΗ ΣΤΟ ΟΡΥΧΕΙΟ
ΝΟΤΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ-
ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ**

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΔΡ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΝΙΚΟΣ ΜΑΜΑΣΗΣ

ΔΡ ΑΓΡΟΝΟΜΟΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΕΔΠ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ – ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2004

1 Αντικείμενο

Προκειμένου να αναπτυχθεί ομαλά η λιγνιτική εκμετάλλευση του ορυχείου Νοτίου Πεδίου στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης-Πτολεμαΐδας έως το έτος 2011, απαιτείται η εκτροπή του ρέματος Σουλού κοντά στα χωριά Ποντοκόμη και Μαυροδέντρι σε μήκος περίπου 3 km. Για το σκοπό αυτό προτάθηκε η τεχνική λύση της κατασκευή αντλιοστασίου και καταθλιπτικού αγωγού για την ανύψωση των υδάτων σε υψομετρική διαφορά 37 m, και ταμιευτήρα ανάσχεσης για τη ρύθμιση των πλημμυρικών παροχών του ρέματος.

Αντικείμενο της παρούσας διερεύνησης είναι ο προσεγγιστικός υδρολογικός σχεδιασμός του συστήματος αντλιοστασίου - καταθλιπτικού αγωγού - ταμιευτήρα ανάσχεσης. Τα μεγέθη σχεδιασμού είναι η παροχετευτικότητα του υποσυστήματος αντλιοστασίου – καταθλιπτικού αγωγού και η χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανάσχεσης.

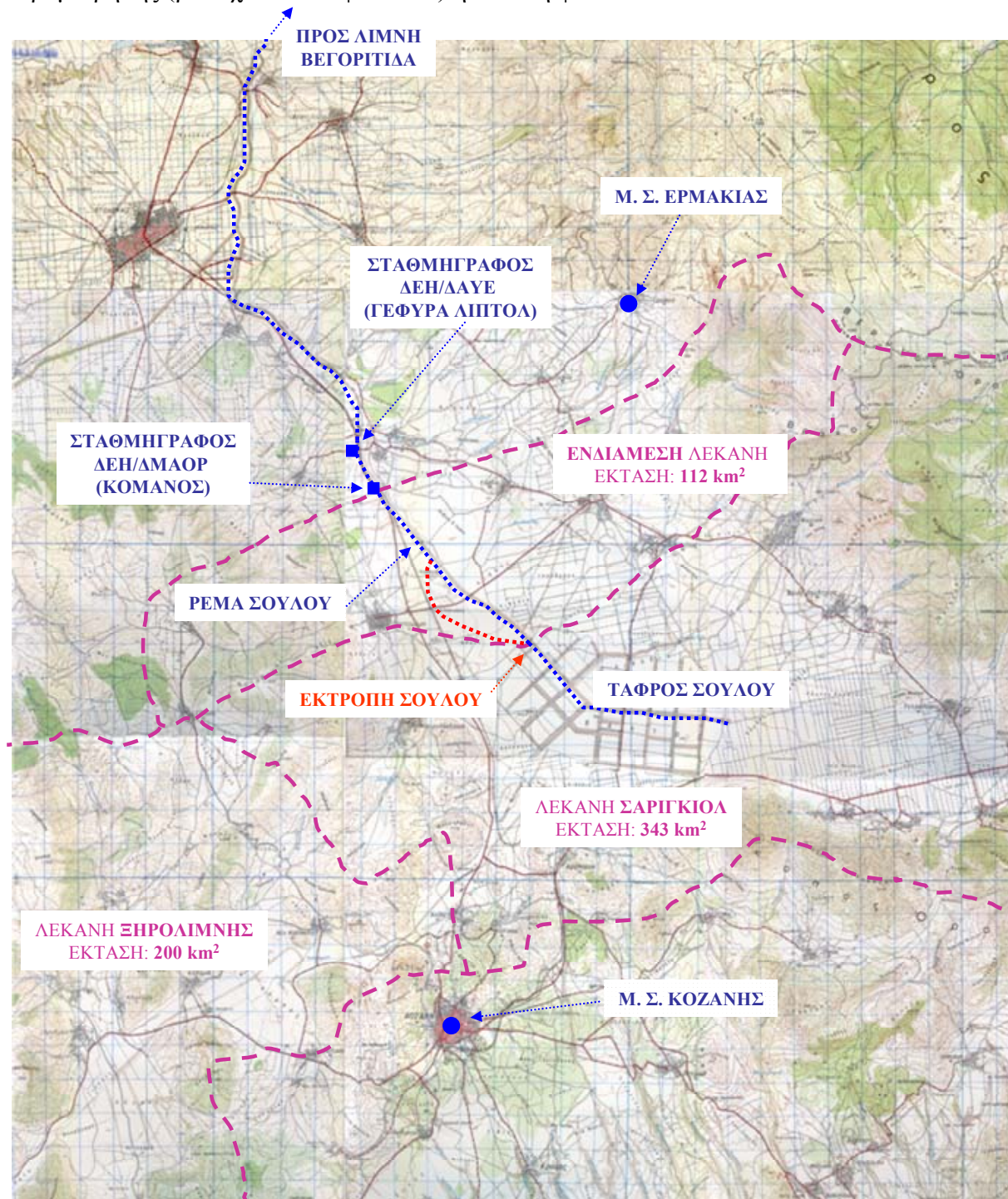
2 Λεκάνες απορροής

Η λεκάνη Σαριγκιόλ (βλ. Σχ. 1) αποτελεί κλειστή υδρολογική λεκάνη που σχηματίζεται ανάμεσα στους καρστικούς ορεινούς όγκους Βερμίου και Ασκίου. Στα χαμηλότερα υψόμετρα της λεκάνης σχηματίζονται η ομώνυμη ελώδης περιοχή (γνωστή παλιότερα και ως Χρυσολίμνη ή Κίτρινη λίμνη, με έκταση 13 km² κατά τον Λ. Παπαδήμο, 1975). Με την κατασκευή (περί το 1951) στραγγιστικού – αποχετευτικού δικτύου και ιδίως της τάφρου Σουλού, που αποτελεί τεχνητή επέκταση προς τα νοτιοανατολικά του φυσικού ρέματος Σουλού, αποστραγγίστηκε η ελώδης περιοχή και ενώθηκε η κλειστή λεκάνη Σαριγκιόλ με την ευρύτερη κλειστή λεκάνη της Πτολεμαΐδας. Στην τελευταία λεκάνη σχηματίζονται μεγάλες λίμνες, η σημαντικότερη από τις οποίες είναι η λίμνη Βεγορίτιδα (γνωστή επίσης και ως λίμνη Οστρόβου ή Αρνίσσης), όπου και εκβάλλει το ρέμα Σουλού.

Ως προς τους υδροκρίτες των λεκανών και υπολεκανών της ευρύτερης περιοχή υπάρχουν σημαντικές ασάφειες. Κατ' αρχάς η καρστική σύσταση των πετρωμάτων δημιουργεί διαφοροποίηση των επιφανειακών και υπόγειων υδροκριτών. Εξ άλλου, η αφθονία εμφανίσεων καταβόθρων στην περιοχή δημιουργεί ασάφειες ακόμη και για τα όρια των επιφανειακών υδροκριτών. Αναφέρεται ως πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα η περιοχή Ξηρολίμνης στο νοτιοδυτικό άκρο της ευρύτερης περιοχής (βλ. Σχ. 1). Σύμφωνα με το χάρτη της ΓΥΣ, η περιοχή αυτή, έκτασης περί τα 200 km² φαίνεται να αποτελεί τμήμα της λεκάνης Σαριγκιόλ, και η κύρια μισγάγκειά της φαίνεται να συνδέεται με το ρέμα Σουλού (απεικονίζεται ως μπλε γραμμή στο χάρτη). Ωστόσο, η επιτόπου επίσκεψη έδειξε ότι στην πραγματικότητα δεν υπάρχει τέτοια σύνδεση και ότι η περιοχή αποχετεύεται σε μία κύρια καταβόθρα και τουλάχιστον σε μία δευτερεύουσα (κατάντη του οικισμού Κοΐλα).

Επί πλέον, τα επιχώματα που έχουν δημιουργηθεί ως αποτέλεσμα των εξορύξεων – αποθέσεων της λιγνιτικής εκμετάλλευσης στην περιοχή έχουν αποκλείσει τις διεξόδους προς το ρέμα Σουλού των απορροών από άλλες περιοχές. Έτσι, οι λεκάνες απορροής που φαίνονται στο Σχ. 1 είναι ενδεικτικές και τα εμβαδά τους αποτελούν χονδροειδείς

προσεγγίσεις και ίσως ανώτατα όρια των πραγματικών εκτάσεων. Ακολουθώντας τα πορίσματα του ερευνητικού προγράμματος ΕΛΙΜΕΙΑ (1999· Χρηματοδότηση ΓΓΕΤ, Εκπόνηση ΔΕΗ, ΕΜΠ, ΚΤΕΣΚ, ΔΕΥΑ Κοζάνης, ΙΝΤΕΛΕΚ), δεχόμαστε ότι η λεκάνη του Σουλού ανάντη της θέσης εκτροπής έχει έκταση 343 km², ενώ μέχρι τους σταθμούς υδρομέτρησης (βλ. Σχ. 1 και κεφάλαιο 4) η έκταση φτάνει τα 455 km².



Σχ. 1 Υδρολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης

3 Υφιστάμενες μελέτες

Για το υπόψη αντικείμενο έχουν εκπονηθεί διάφορες τεχνικές εκθέσεις, σύνοψη των οποίων παρατίθεται πιο κάτω:

1. Ανάπτυξη Ορυχείου Πεδίου Καρδιάς στο ΝΔ Πεδίο (ΔΕΗ/ΔΜΑΟΡ, Μάρτιος 2004)

Πρόκειται για μια πρώτη προσέγγιση, βασισμένη στα δεδομένα μηνιαίων παροχών στην περιοχή Κομάνου, όπου εκτιμάται απαιτούμενη παροχεταιυτικότητα αντλιών λίγο μεγαλύτερη του $1 \text{ m}^3/\text{s}$ και χωρητικότητα ταμιευτήρα ανάσχεσης της τάξης των $100\,000 \text{ m}^3$.

2. Μελέτη εκτίμησης πλημμυρικής παροχής ρέματος Σουλού (Η. Βαλιούλης & Συνεργάτες, Μάιος 2004)

Με βάση την ορθολογική μέθοδο και υποθέτοντας συντελεστές απορροής 0.25-0.40 εκτιμήθηκαν πλημμυρικές παροχές ίσες με 106, 141 και $177 \text{ m}^3/\text{s}$ για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 έτη, αντίστοιχα.

3. Υδρολογική έκθεση για τη δυνατότητα εκτροπής τμήματος της τάφρου Σουλού μήκους 3 km παρά την Ποντοκόμη (ΔΕΗ/ΔΑΥΕ, Ιούνιος 2004)

Με βάση στατιστική επεξεργασία των υψών βροχής στην Κοζάνη και τον Έξαρχο, παίρνοντας υπόψη και προγενέστερη μελέτη όμβριων καμπυλών της λεκάνης του Αλιάκμονα στη θέση Κορομηλιά και της λίμνης Καστοριάς, και υποθέτοντας συντελεστή απορροής 0.28, εκτιμήθηκε πλημμυρικός όγκος 9.5 hm^3 για περίοδο επαναφοράς 16 ετών. Το μέγεθος αυτό αντιστοιχεί σε έκταση λεκάνης που συμπεριλαμβάνει και την περιοχή της Ξηρολίμνης, ενώ αν αφαιρεθεί η εν λόγω περιοχή, ο όγκος περιορίζεται στα 6.1 hm^3 . Θεωρείται ότι οι δύο αυτές τιμές του πλημμυρικού όγκου αντιστοιχούν σε διάρκειες 3 και 2.5 ημερών, αντίστοιχα. Παράλληλα, με στατιστική ανάλυση των ιστορικών δειγμάτων στάθμης και παροχής του Σουλού εκτιμήθηκε ότι η παροχή του ρέματος Σουλού θα υπερβαίνει τα $3 \text{ m}^3/\text{s}$ τρεις μέρες το χρόνο κατά μέσο όρο.

4. Εκτίμηση πλημμυρικής παροχής ρέματος Σουλού (ΔΕΗ/ΔΑΚΑΜ, Ιούλιος 2004)

Αναπροσαρμόστηκαν οι τιμές της πλημμυρικής παροχής που εκτιμήθηκαν στην πιο πάνω μελέτη με αριθμό 2, θεωρώντας ότι ο μέσος συντελεστής απορροής της λεκάνης είναι 7%. Έτσι, προκύπτουν οι τιμές 30, 39 και $50 \text{ m}^3/\text{s}$ για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 έτη, αντίστοιχα. Παράλληλα, μετά από λήψη γεωμετρικών δεδομένων της διατομής της τάφρου Σουλού στο τεχνητό τμήμα και της κατά μήκος κλίσης της (0.341‰), και μετά από υδραυλικούς υπολογισμούς, εκτιμήθηκε ότι η παροχεταιυτικότητα της τάφρου είναι $8.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Με βάση και τη μαρτυρία των κατοίκων της περιοχής ότι δεν υπήρξε υπερχειλίση της τάφρου ποτέ στη διάρκεια λειτουργίας της (περίπου 50 χρόνια), συμπεραίνεται ότι η πλημμυρική του χειμάρρου δεν έχει ξεπεράσει ιστορικά τα $8.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

5. Εκτροπή ρέματος Σουλού – Εκτίμηση πλημμυρικής απορροής (ΔΕΗ/ΔΜΑΟΡ, Αύγουστος 2004)

Μετά από συνοπτική επισκόπηση και αξιολόγηση των προηγούμενων μελετών εκτιμάται ότι τα έργα πρέπει να σχεδιαστούν για πλημμυρικό όγκο 3 hm^3 που αναφέρεται σε διάρκεια 6 ημερών. Για τη διαχείριση αυτού του όγκου, αναφέρεται ότι η άντληση, με παροχή $3 \text{ m}^3/\text{s}$, στη διάρκεια του εξαημέρου θα εξασφαλίσει την απομάκρυνση 1.5 hm^3 . Για τα υπόλοιπα 1.5 hm^3 προτείνεται ταμιευτήρας ανάσχεσης χωρητικότητας 0.5 hm^3 και διοχέτευση του επιπλέον 1.0 hm^3 στα βαθύτερα σημεία των ορυχείων, απ' όπου θα αντληθούν μετέπειτα από τα υπάρχοντα αντλιοστάσια.

4 Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη, η μεθοδολογία προσέγγισης του προβλήματος στηρίζεται στις ακόλουθες τρεις παρατηρήσεις:

1. Επειδή θα ήταν εξαιρετικά αντιοικονομικό να αντλείται η φυσική πλημμυρική παροχή στο σύνολό της, ένα αντιπλημμυρικό αντλιοστάσιο είναι σκόπιμο να συνδυάζεται με ταμιευτήρα ανάσχεσης ανάντη. Κατά συνέπεια, το πρώτιστο μέγεθος σχεδιασμού δεν είναι η αιχμή της πλημμύρας αλλά ο πλημμυρικός όγκος. Παίρνοντας υπόψη και τις γενικότερες υδρολογικές συνθήκες της περιοχής (μεγάλοι χρόνοι απόκρισης) συμπεραίνουμε ότι οι χρονικές κλίμακες μελέτης κυμαίνονται από μία έως μερικές ημέρες (π.χ. 10) και δεν απαιτείται η εξέταση αιχμών σε λεπτές χρονικές κλίμακες π.χ. ώρας.
2. Η μελέτη κάθε τεχνικού προβλήματος οφείλει να λαμβάνει υπόψη τις συνέπειες από την περίπτωση αστοχίας. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, τυχόν αστοχία (π.χ. από πλημμύρα μεγαλύτερη της παροχής σχεδιασμού) δεν αναμένεται να οδηγήσει σε απώλειες ζωής ή σε καταστροφές τεχνικών έργων ή περιουσιακών στοιχείων. Εν προκειμένω, μια αστοχία θα οδηγήσει σε διαφυγή πλημμυρικού νερού στα βαθύτερα σημεία των ορυχείων με πιθανό αποτέλεσμα ορισμένες καθυστερήσεις στη διαδικασία εξόρυξης του λιγνίτη και βέβαιο αποτέλεσμα την άντληση του νερού από μεγαλύτερα βάθη. Έτσι, οι διαστάσεις του προβλήματος είναι κυρίως οικονομικές και υπό αυτή την έννοια δεν θεωρείται επιβεβλημένη η υιοθέτηση αυστηρών κριτηρίων σχεδιασμού (π.χ. υψηλών περιόδων επαναφοράς σχεδιασμού).
3. Είναι γνωστό ότι όταν η περίοδος επαναφοράς σχεδιασμού είναι υψηλή (π.χ. εκατοντάδων ή χιλιάδων ετών), η εκτίμηση της πλημμύρας είναι απαραίτητο να στηρίζεται στην αντίστοιχη καταγιδα σχεδιασμού και το μετασχηματισμό της τελευταίας σε πλημμύρα με κατάλληλο υδρολογικό μοντέλο. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται κατ' ανάγκη ακόμη και όταν η περίοδος επαναφοράς είναι χαμηλή, αλλά δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων παροχής. Όμως, στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η ύπαρξη ιστορικών δειγμάτων παροχής ικανοποιητικού μήκους (βλ.

κεφάλαιο 5) και οι χαμηλές περίοδοι επαναφοράς μάς απαλλάσσουν από την ανάγκη χρήσης δεδομένων βροχής και υδρολογικών μοντέλων. Οι εκτιμήσεις μπορούν να βασιστούν απευθείας στην ανάλυση των χρονοσειρών παροχής. Παίρνοντας υπόψη και τα ιδιαίτερα προβλήματα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 ως προς την ασάφεια της έκτασης των λεκανών και αυτά που σκιαγραφήθηκαν στο κεφάλαιο 3 ως προς την αβεβαιότητα των συντελεστών απορροής, προκύπτει σαφώς το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μέθοδος που στηρίζεται αποκλειστικά στις χρονοσειρές παροχής οδηγεί σε πολύ πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

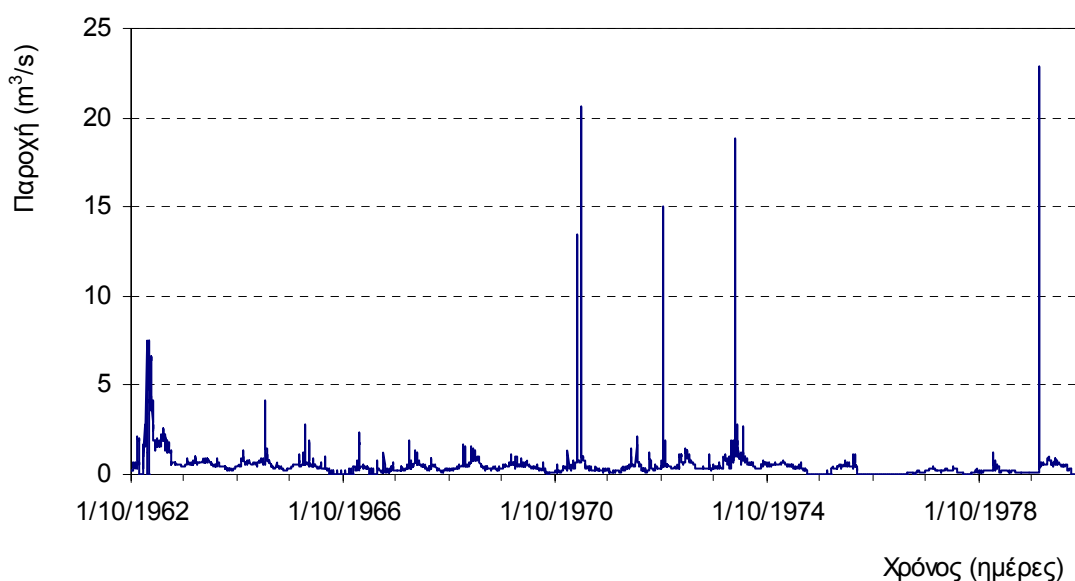
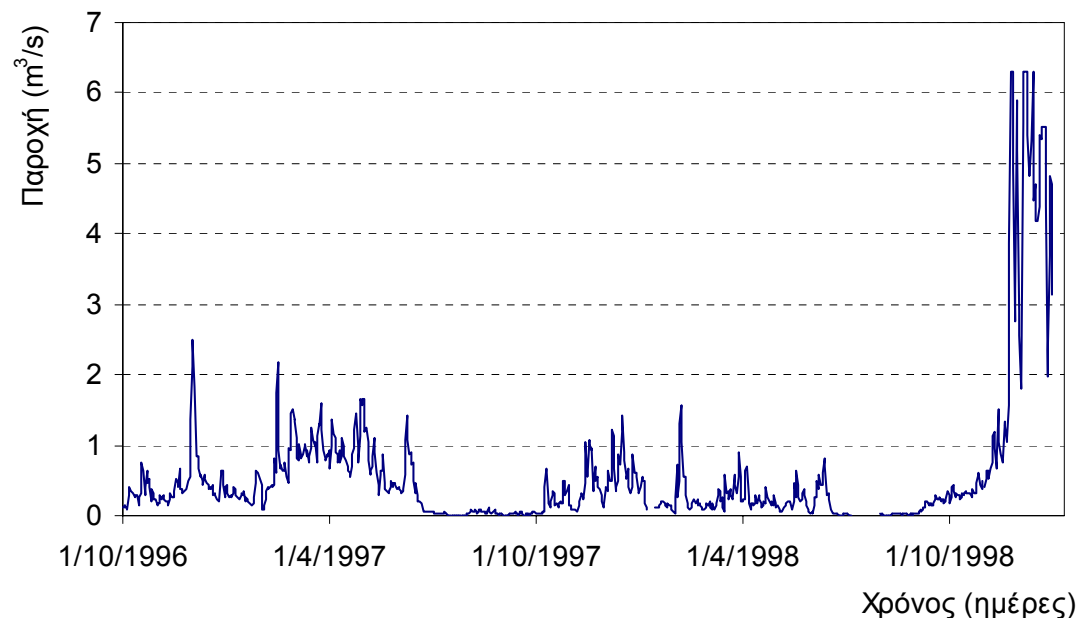
Είναι γνωστό, ότι η πλέον αξιόπιστη μεθοδολογία για το πρόβλημα του σχεδιασμού της χωρητικότητας ενός ταμιευτήρα, στην προκειμένη περίπτωση του ταμιευτήρα ανάσχεσης, ο οποίος συνδέεται στενά και με το σχεδιασμό του αντλιοστασίου, είναι η στοχαστική προσομοίωση (Koutsoyiannis, 2005a, b). Ωστόσο, τα χρονικά και οικονομικά όρια της παρούσας μελέτης και ο αναγκαστικά προσεγγιστικός χαρακτήρας της δεν επέτρεψαν τη χρήση αυτής της μεθοδολογίας. Έτσι, χρησιμοποιείται ως βάση η προσομοίωση με το ιστορικό δείγμα αποκλειστικά, τα αποτελέσματα της οποίας ελέγχονται και αναπροσαρμόζονται με μια πιθανοτική μέθοδο.

5 Δεδομένα

Από τη ΔΕΗ/ΔΜΑΟΡ μας χορηγήθηκαν οι χρονοσειρές παροχής σε δύο υδρομετρικούς σταθμούς του ρέματος Σουλού. Η πρώτη αναφέρεται στο σταθμό της ΔΕΗ/ΔΜΑΟΡ που λειτούργησε στη θέση Κόμανος την περίοδο 10/1996 έως 12/1998 (λίγο παραπάνω από 2 χρόνια) στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΕΛΙΜΕΙΑ. Η δεύτερη αναφέρεται στο σταθμό της ΔΕΗ/ΔΑΥΕ στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ την περίοδο 10/1962 έως 6/1980 με καθαρό μήκος δείγματος (αφού αφαιρεθούν οι ελλείψεις μετρήσεων) πάνω από 15 χρόνια (15.7 χρόνια). Απεικονίσεις των δύο χρονοσειρών δίνονται στο Σχ. 2. Επειδή και οι δύο σταθμοί βρίσκονται κατάντη της θέσης εκτροπής, η αναγωγή στην εν λόγω θέση μπορεί να γίνει προσεγγιστικά με βάση το λόγο εμβαδών των υπολεκανών ($343/455 = 0.75$). Σε σχέση με την αξιοπιστία των δεδομένων, μπορούν να γίνουν τα ακόλουθα σχόλια:

1. Η χρονοσειρά παροχής στη θέση Κόμανος προέκυψε από σχέση στάθμης-παροχής της μορφής $Q = 1.448 \times 10^{-12} z^{6.37633}$, όπου Q η παροχή σε m^3/s και z η στάθμη σε cm . Η υψηλή τιμή του εκθέτη αυτής της σχέσης δύναμης (6.37633) δείχνει πολύ μικρή ευαισθησία της στάθμης σε σχέση με την παροχή, δηλαδή μάλλον όχι τόσο αξιόπιστη καμπύλη. Εξ άλλου, μια τόσο μεγάλη τιμή δεν μπορεί να είναι ρεαλιστική (συμβατή με την υδραυλική) σε μεγάλες στάθμες και παροχές, άρα θα υπάρχει υπερεκτίμηση των υψηλών παροχών. Πάντως, στην περίοδο των μετρήσεων δεν υπήρξαν πολύ υψηλές παροχές, άρα δεν πρέπει να υπάρχει σοβαρό πρόβλημα αναξιοπιστίας.
2. Για τη χρονοσειρά στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ δεν είχαμε στη διάθεσή μας τις καμπύλες στάθμης-παροχής και δεν μπορούμε να διατυπώσουμε ανάλογα σχόλια. Ίσως όμως

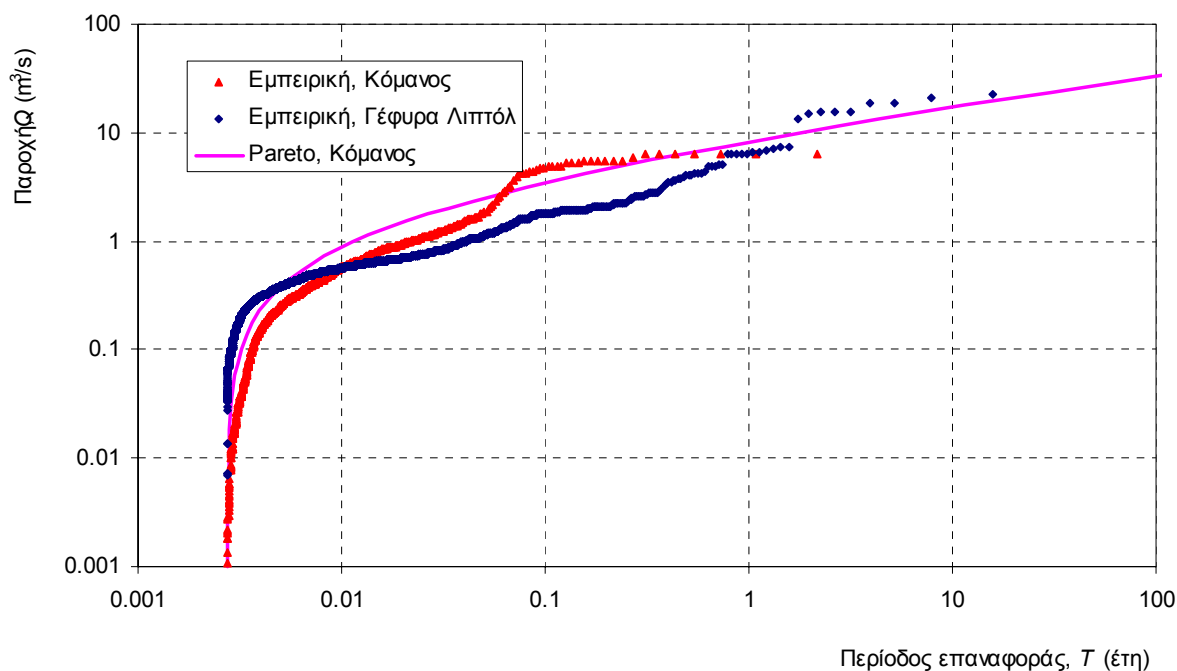
και εδώ να υπάρχει υπερεκτίμηση για τις μεγάλες παροχές. Συγκεκριμένα, η μέγιστη ημερήσια παροχή της περιόδου φαίνεται να είναι $22.9 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή που αν αναχθεί στη θέση ενδιαφέροντος γίνεται $17.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Η τελευταία τιμή ξεπερνά κατά πολύ την εκτίμηση της μέγιστης ιστορικής παροχής των $8.2 \text{ m}^3/\text{s}$ που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 (σημείο 4).



Σχ. 2 Απεικόνιση των χρονοσειρών παροχής του ρέματος Σουλού στις θέσεις Κόμανος (πάνω) και Γέφυρα Λιπτόλ (κάτω).

3. Η σύγκριση των δύο χρονοσειρών, επειδή δεν υπάρχει κοινό διάστημα στις περιόδους τους, μπορεί να γίνει μόνο σε πιθανοτικούς όρους. Γραφική σύγκριση σε πιθανοτικούς όρους παρουσιάζεται στο Σχ. 3, το οποίο δείχνει μάλλον συμβατές συμπεριφορές.

Λόγω του πολύ μεγαλύτερου μήκους της χρονοσειράς στη Γέφυρα Λιπτόλ, επιλέγεται αυτή η χρονοσειρά για τις περαιτέρω αναλύσεις.



Σχ. 3 Σύγκριση εμπειρικών συναρτήσεων κατανομής της παροχής του ρέματος Σουλού στις θέσεις Κόμανος και Γέφυρα Λιπτόλ.

6 Στατιστική επεξεργασία παροχών

Στη διαμόρφωση της συνολικής παροχής του ρέματος Σουλού συμβάλλουν κατ' ελάχιστο δύο φυσικοί μηχανισμοί και ένας ανθρωπογενής. Πρόκειται για τους φυσικούς μηχανισμούς της βασικής ροής που χαρακτηρίζεται από μικρές τιμές της παροχής και αργές διακυμάνσεις της, και ο μηχανισμός της πλημμυρογένεσης που χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές της παροχής και χρονικά έντονες διακυμάνσεις. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, λόγω των ευρείας διάδοσης των καρστικών σχηματισμών, είναι φυσικό να περιμένουμε ότι στο μηχανισμό της πλημμυρογένεσης συμμετέχει και το καρστ, δηλαδή ότι η πλημμυρική ροή δεν είναι μόνο επιφανειακή (όπως στις στεγανές λεκάνες) αλλά και εν μέρει υπόγεια, με σχετικά αυξημένους χρόνους απόκρισης. Ο ανθρωπογενής μηχανισμός σχετίζεται με την απόρριψη από τη ΔΕΗ του υπόγειου νερού που αντλείται στα ορυχεία και του νερού από την ψύξη των ΑΗΣ.

Η ύπαρξη των τριών αυτών μηχανισμών προφανώς οδηγεί σε διαφοροποίηση της στατιστικής συμπεριφοράς της παροχής στις περιοχές των μικρών και μεγάλων τιμών της παροχής (βλ. και Σχ. 3). Αν περιορίσουμε το ενδιαφέρον μας στις μεγάλες τιμές, π.χ. στις μεγαλύτερες από τη διάμεσο τιμή, τότε κυριαρχεί ο μηχανισμός της πλημμυρογένεσης και μπορούμε να αναμένουμε τον εντοπισμό μιας απλής και ενιαίας πιθανοτικής συνάρτησης κατανομής. Όπως, εξακριβωμένα πλέον, συμβαίνει και με τις βροχές (Koutsoyiannis, 2004a, b) είναι λογικό να περιμένουμε ότι αυτή η πιθανοτική συνάρτηση κατανομής είναι τύπου

Pareto (βλ. και Turcotte, 1994· Turcotte & Malamud, 2003). Η κατανομή Pareto περιγράφεται από τις εξισώσεις

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{\kappa x}{\lambda}\right)^{-1-1/\kappa}, \quad F^*(x) = 1 - F(x) = \left(1 + \frac{\kappa x}{\lambda}\right)^{-1/\kappa} \quad (1)$$

όπου x η τιμή της εξεταζόμενης μεταβλητής, εν προκειμένω της παροχής, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μια τυχαία μεταβλητή X . $f(x)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής· $F(x)$ η συνάρτηση κατανομής της μεταβλητής, ίση εξ ορισμού με την πιθανότητα μη υπέρβασης της τιμής x · $F^*(x)$ η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής x · λ και κ παράμετροι της κατανομής (παράμετροι κλίμακας και σχήματος, αντίστοιχα, αμφότερες θετικοί αριθμοί). Τα μεγέθη $f(x)$, $F(x)$ και $F^*(x)$ συνδέονται μεταξύ τους καθώς και με την περίοδο επαναφοράς T με τις σχέσεις

$$F^*(x) := P\{X > x\} =: 1 - F(x), \quad T = \frac{\delta}{F^*(x)}, \quad f(x) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} = -\frac{\partial F^*(x)}{\partial x} \quad (2)$$

όπου $P\{A\}$ συμβολίζει την πιθανότητα ενός γεγονότος A και δ είναι ο μέσος χρόνος άφιξης ενός γεγονότος που αντιπροσωπεύεται από την μεταβλητή X . Για παράδειγμα, αν η X αντιπροσωπεύει τη μέση ετήσια τιμή ή τη μέγιστη ετήσια τιμή δεδομένης διάρκειας, τότε $\delta = 1$ έτος· αν η X αντιπροσωπεύει όλες τις ημερήσιες τιμές της παροχής, τότε $\delta = 1$ ημέρα (= 1/365.25 έτη)· τέλος, αν η X αντιπροσωπεύει τις ημερήσιες τιμές της παροχής που είναι μεγαλύτερες από τη διάμεσο x_m , για την οποία ισχύει $F^*(x_m) = F(x_m) = 0.5$, τότε $\delta = 2$ ημέρες (= 2/365.25 έτη).

Γενικότερα, όταν στη μελέτη χρησιμοποιείται ένα κατώφλι c για την υπό μελέτη μεταβλητή και όταν η χρονική κλίμακα μελέτης είναι d , τότε εύκολα συνάγεται ότι

$$\delta = d / F^*(c) \quad (3)$$

Στην τελευταία περίπτωση, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε στη μελέτη τη μεταβλητή

$$Y := X - c \quad (4)$$

αντί της X και να περιορίσουμε το ενδιαφέρον μας στις θετικές μόνο τιμές της Y . Τότε προκύπτει η δεσμευμένη κατανομή της Y , $F_Y(y|Y > 0)$, η οποία συνδέεται με την κατανομή της X μέσω της συναρτησιακής σχέσης

$$F_Y^*(y|Y > 0) = \frac{F_X^*(y+c)}{F_X^*(c)} \quad (5)$$

Στην περίπτωση που η X ακολουθεί κατανομή Pareto όπως στην εξίσωση (1), αποδεικνύεται ότι και η δεσμευμένη $F_Y(y|Y > 0)$ είναι Pareto με την ίδια παράμετρο σχήματος κ και παράμετρο κλίμακας $\lambda + \kappa c$. Το αντίστροφο δεν ισχύει αναγκαστικά, δηλαδή μπορεί η $F_Y(y|Y > 0)$ να είναι Pareto χωρίς η X να ακολουθεί κατανομή Pareto. Πάντως στην

υπό μελέτη περίπτωση, όπως εξηγήθηκε πιο πάνω, ενδιαφέρει η κατανομή της Y για θετικές τιμές της ή, ισοδύναμα, της X για τιμές μεγαλύτερες της διαμέσου.

Η εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων κ και λ μπορεί να γίνει σχετικά εύκολα, είτε με τη μέθοδο των ροπών, είτε με αυτή των L ροπών (Κουτσογιάννης, 1997· Stedinger et al., 1993). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προσαρμόστηκε η κατανομή Pareto με τη μέθοδο των L ροπών τόσο στο δείγμα ημερήσιων παροχών, όσο και σε αυτά των διημέρου, τριημέρου, πενθημέρου και δεκαημέρου. Χρησιμοποιήθηκε ως κατώφλι η διάμεσος τιμή $c = x_m = 0.413 \text{ m}^3/\text{s}$ (πρακτικώς ανεξάρτητη της κλίμακας αναφοράς d) και η προσαρμογή έγινε στο δείγμα θετικών τιμών της μεταβλητής $Y = X - c$. Προέκυψε ότι η παράμετρος σχήματος κ είναι πρακτικώς σταθερή, με τιμή $\kappa = 0.48$, ενώ η παράμετρος κλίμακας λ εξαρτάται από τη χρονική κλίμακα αναφοράς d σε τρόπο που μπορεί να εκφραστεί με καλή ακρίβεια, για $d = 1-10$ ημέρες, από τη σχέση

$$\lambda = \lambda_0 / (d + \theta)^\eta \quad (6)$$

όπου $\theta = 4 \text{ d}$ (ημέρες), $\eta = 0.065$ και $\lambda_0 = 0.23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-0.065}$.

Συνδυάζοντας την εξίσωση (6) με τις (1)-(5) παίρνουμε την εξίσωση

$$T = \frac{d}{F^*(c)} \left[1 + \frac{\kappa (x - c) (d + \theta)^\eta}{\lambda_0} \right]^{1/\kappa}, \quad x > c \quad (7)$$

που αν επιλυθεί ως προς $x \equiv Q$ δίνει

$$x = c + \frac{\lambda_0 [T F^*(c) / d]^\kappa - 1}{\kappa (d + \theta)^\eta}, \quad x > c \quad (8)$$

Οι τελικές εξισώσεις (7) και (8) δίνουν, αντίστοιχα, την περίοδο επαναφοράς T δεδομένης τιμής της παροχής $x \equiv Q$ ή την παροχή x που αντιστοιχεί σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς T . Και οι δύο εξισώσεις ισχύουν για χρονικές κλίμακες αναφοράς d από 1 έως 10 ημέρες. Για την αριθμητική εφαρμογή των εξισώσεων αυτών υπενθυμίζεται ότι $c = x_m = 0.413 \text{ m}^3/\text{s}$ και $F^*(c) = 0.5$, καθώς και ότι τα μεγέθη T και d πρέπει να εκφράζονται στις ίδιες μονάδες (π.χ. ημέρες).

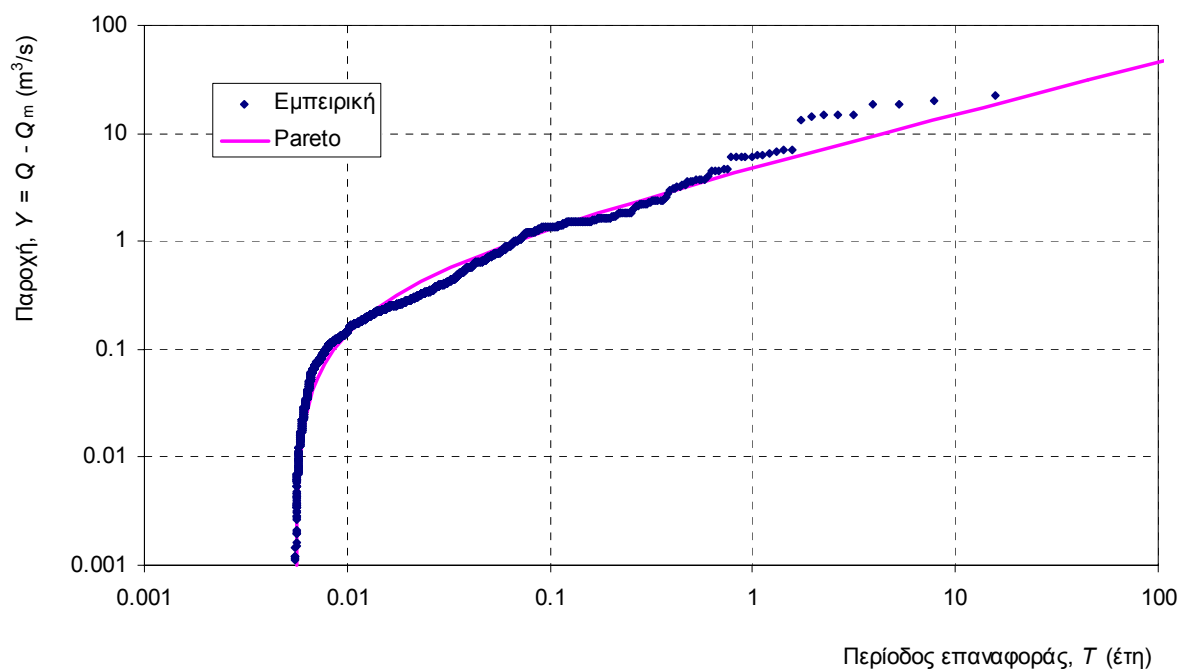
Σύγκριση της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής Pareto με την αντίστοιχη εμπειρική συνάρτηση κατανομής δίνεται στα Σχ. 4-8, για χρονικές κλίμακες 1-10 ημέρες. Σε όλα τα σχήματα έχει απεικονιστεί σε διπλή λογαριθμική κλίμακα η περίοδος επαναφοράς T συναρτήσει της διαφοράς $Y = X - c = Q - Q_m$. Για δεδομένη τιμή της Y , η θεωρητική περίοδος επαναφοράς προκύπτει από την εξίσωση (7), ενώ για την εμπειρική εκτίμησή της χρησιμοποιήθηκε η σχέση Weibull, ήτοι

$$T = \frac{\delta (n + 1)}{i} \quad (9)$$

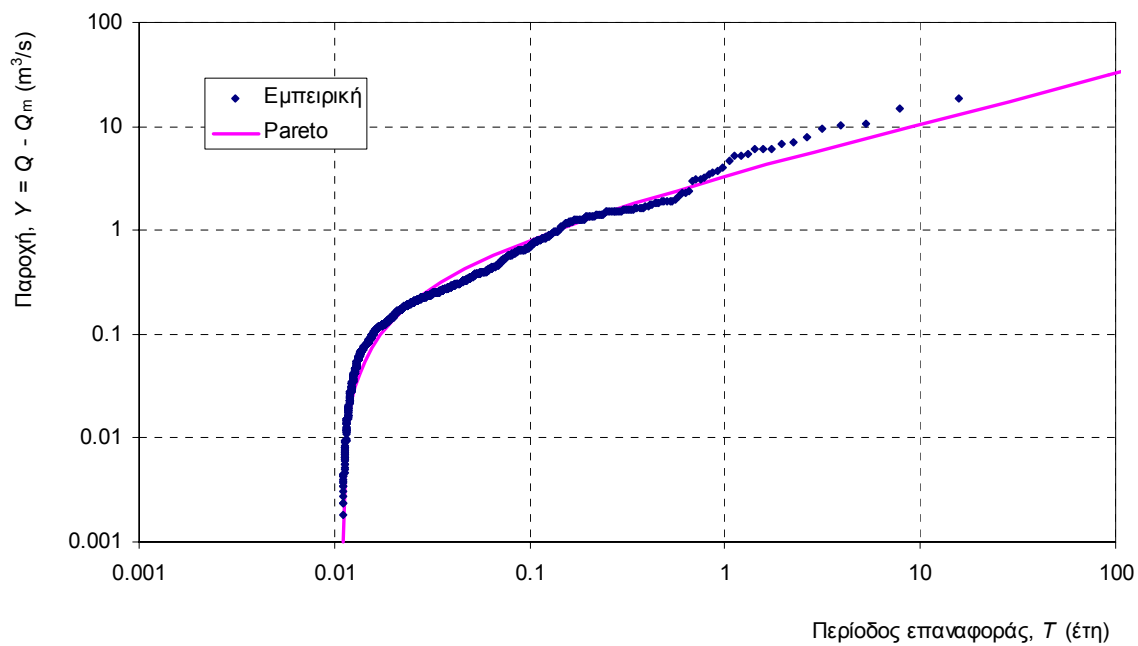
όπου n το μέγεθος του δείγματος και i ο αριθμός των τιμών στο δείγμα που είναι μεγαλύτερες ή ίσες με τη δεδομένη τιμή της Y . Από τις συγκριτικές απεικονίσεις προκύπτει καλή

συμφωνία εμπειρικών και θεωρητικών κατανομών για μικρές και ενδιάμεσες τιμές της παροχής (για $Y \leq 1-2 \text{ m}^3/\text{s}$), ενώ για μεγάλες παροχές είναι εμφανής η υπεκτίμηση της παροχής από την κατανομή Pareto. Ωστόσο, με δεδομένες τις παρατηρήσεις που έγιναν στο κεφάλαιο 5 σχετικά με την αξιοπιστία των μετρήσεων και την αναντιστοιχία εκτιμημένων παροχών και παροχεταιυκτότητας της τάφρου Σουλού, η εν λόγω υπεκτίμηση στην προκειμένη περίπτωση είναι μάλλον επιθυμητή, αφού τείνει να μειώσει τις όχι δικαιολογημένες υψηλές τιμές της παροχής.

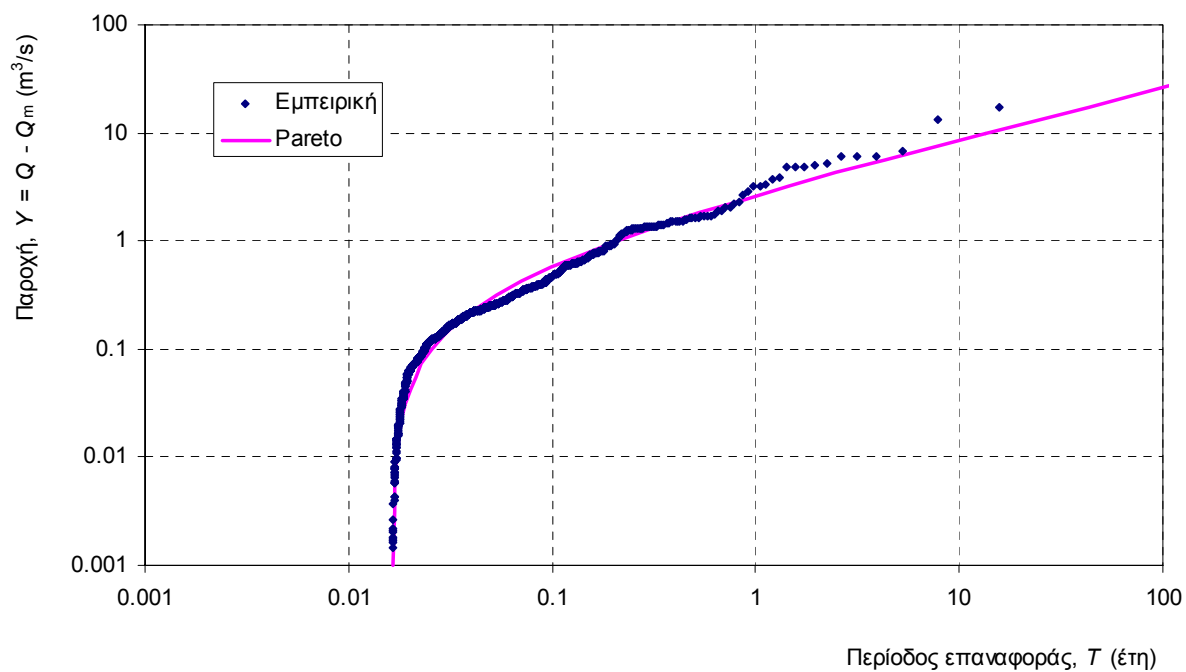
Τα Σχ. 4-8 αναφέρονται στην παροχή του Σουλού στη θέση μέτρησης της Γέφυρας Λιπτόλ. Για την αναγωγή στη θέση εκτροπής αρκεί ο πολλαπλασιασμός των παραμέτρων c και λ_0 με το λόγο 0.75. Οι τελικές παράμετροι της εξίσωσης (8) είναι, κατά συνέπεια, $c = 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$, $\lambda_0 = 0.173 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-0.065}$, $= 0.48$, $\theta = 4 \text{ d}$, $\eta = 0.065$ και $F^*(c) = 0.5$. Τιμές της παροχής του Σουλού στη θέση εκτροπής, υπολογισμένες από την εξίσωση (8), για χαρακτηριστικές τιμές της χρονικής κλίμακας d και της περιόδου επαναφοράς T δίνονται στον Πίν. 1 και το Σχ. 9.



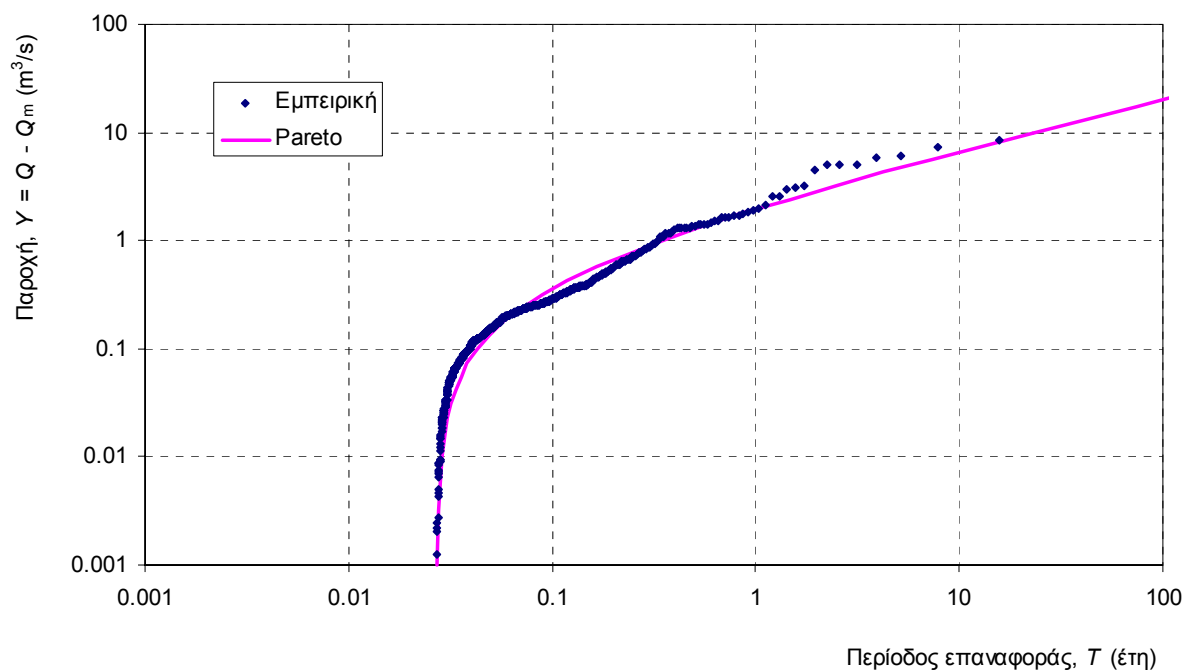
Σχ. 4 Εμπειρική συνάρτηση κατανομής της ημερήσιας παροχής του ρέματος Σουλού στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ και προσαρμοσμένη θεωρητική συνάρτηση κατανομής Pareto.



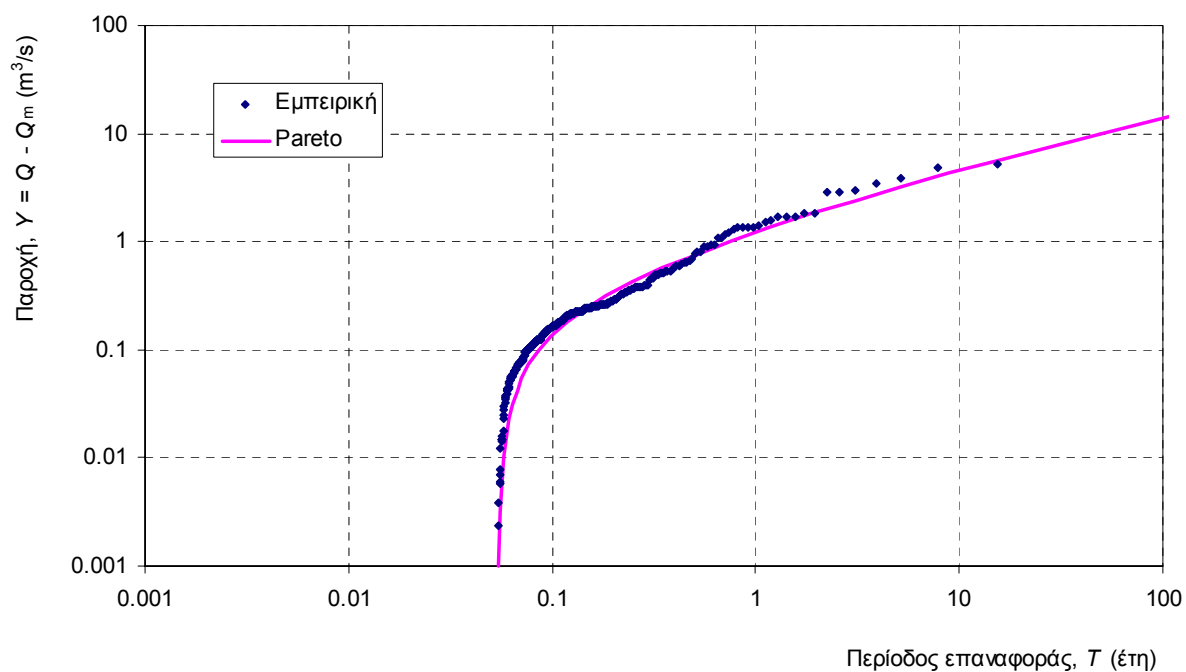
Σχ. 5 Εμπειρική συνάρτηση κατανομής της μέσης παροχής διημέρου του ρέματος Σουλού στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ και προσαρμοσμένη θεωρητική συνάρτηση κατανομής Pareto.



Σχ. 6 Εμπειρική συνάρτηση κατανομής της μέσης παροχής τριημέρου του ρέματος Σουλού στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ και προσαρμοσμένη θεωρητική συνάρτηση κατανομής Pareto.



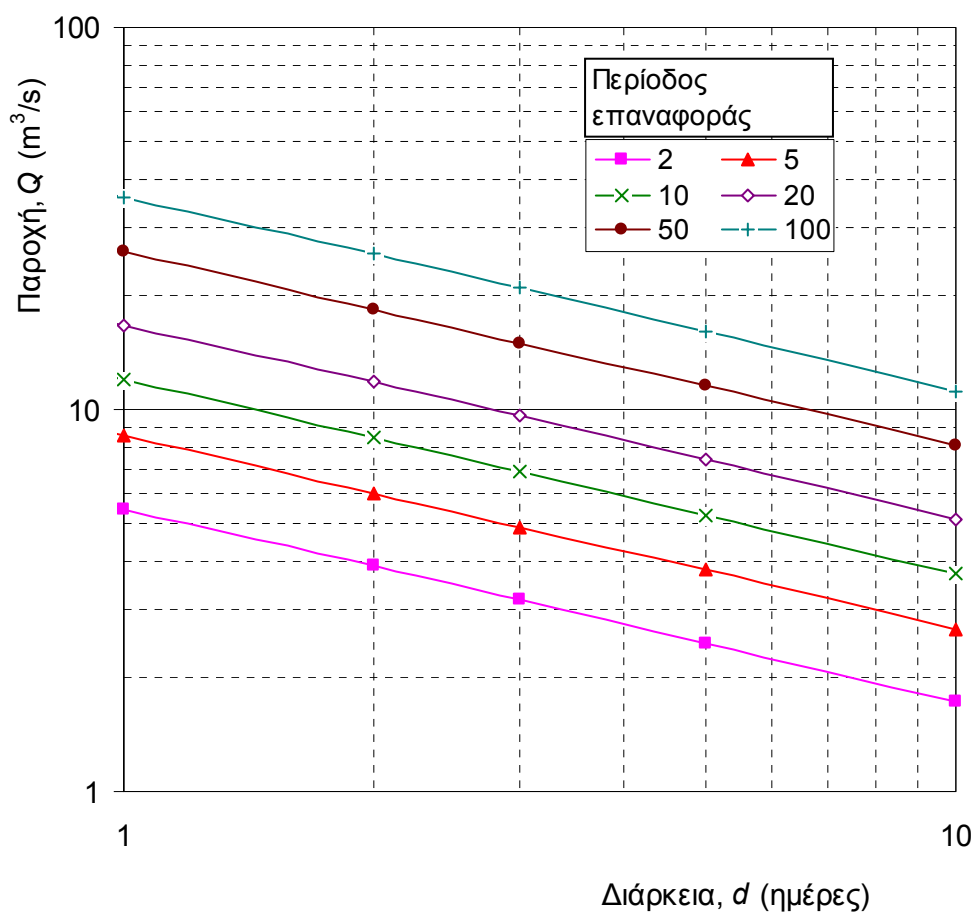
Σχ. 7 Εμπειρική συνάρτηση κατανομής της μέσης παροχής πενθημέρου του ρέματος Σουλού στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ και προσαρμοσμένη θεωρητική συνάρτηση κατανομής Pareto.



Σχ. 8 Εμπειρική συνάρτηση κατανομής της μέσης παροχής δεκαημέρου του ρέματος Σουλού στη θέση Γέφυρα Λιπτόλ και προσαρμοσμένη θεωρητική συνάρτηση κατανομής Pareto.

Πίν. 1 Παροχή του Σουλού στη θέση εκτροπής για χαρακτηριστικές τιμές της χρονικής κλίμακας d και της περιόδου επαναφοράς T .

Περίοδος επαναφοράς T (έτη)	Χρονική κλίμακα d (ημέρες)					
	0.5	1	2	3	5	10
2	7.7	5.5	3.9	3.2	2.4	1.7
5	12.0	8.5	6.1	4.9	3.8	2.7
10	16.7	11.9	8.4	6.9	5.3	3.7
20	23.4	16.6	11.8	9.6	7.4	5.2
50	36.3	25.8	18.3	14.9	11.5	8.0
100	50.6	36.0	25.5	20.8	16.0	11.2



Σχ. 9 Παροχή του Σουλού στη θέση εκτροπής συναρτήσει της χρονικής κλίμακας d για χαρακτηριστικές τιμές της περιόδου επαναφοράς T .

7 Εκτίμηση των μεγεθών σχεδιασμού

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, ο σχεδιασμός του συστήματος αντλιοστασίου-ταμιευτήρα ανάσχεσης έχει πρωτίστως οικονομική διάσταση, ενώ περιλαμβάνει δύο κύρια μεγέθη προς διαστασιολόγηση, την παροχευτικότητα του αντλιοστασίου και τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανάσχεσης. Τα δύο μεγέθη είναι ανταγωνιστικά, με την έννοια ότι, όσο αυξάνεται η παροχευτικότητα τόσο μπορεί να μειωθεί η χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Ο ορθολογικός σχεδιασμός του συστήματος θα προϋπέθετε να έχουν εκτιμηθεί

τα κατασκευαστικά και λειτουργικά κόστη. Επειδή τα κόστη δεν είναι γνωστά, ακολουθείται μια εμπειρική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, επιλέγεται η παροχτευτικότητα της αντλίας ώστε να αντιστοιχεί στην πλημμυρική παροχή διετίας για τη χρονική κλίμακα τριμήρου. Σύμφωνα με τις τιμές που δίνονται στον Πίν. 1, η εν λόγω παροχή είναι $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ή, μετά από στρογγύλευση, $3 \text{ m}^3/\text{s}$.

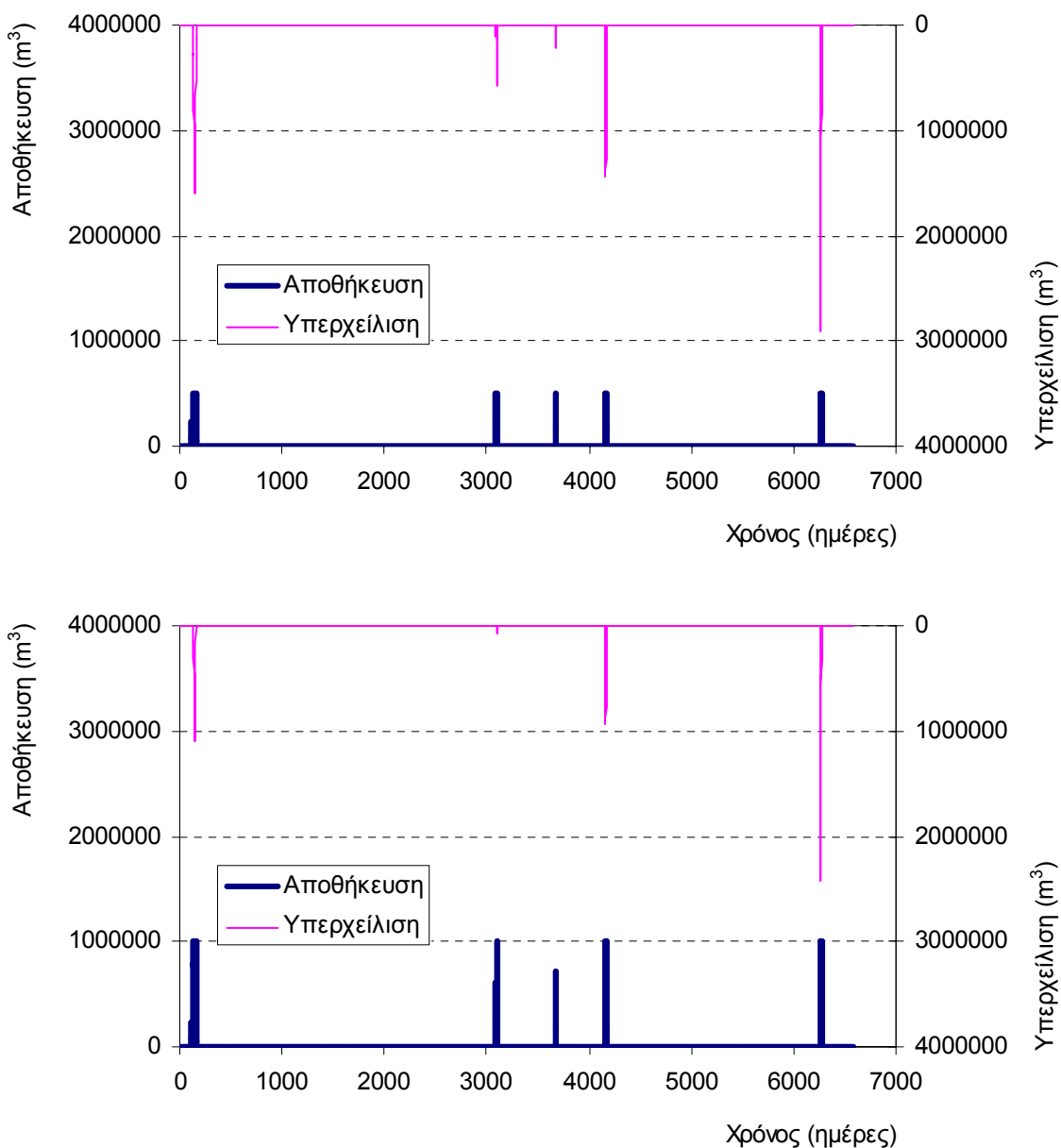
Για δεδομένη την παροχτευτικότητα του αντλιοστασίου Q_a , μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της συνεχούς προσομοίωσης προκειμένου να εκτιμηθεί η συχνότητα λειτουργίας του ταμιευτήρα ανάσχεσης. Ο ταμιευτήρας ανάσχεσης λειτουργεί όταν η παροχή υπερβαίνει την τιμή Q_a . Με βάση το ιστορικό δείγμα, ανηγμένο με το συντελεστή 0.75 που προαναφέρθηκε, η προσομοίωση δείχνει ότι στο σύνολο των 15.7 ετών υπάρχουν 30 ημέρες με παροχή ξεπερνά τα $3 \text{ m}^3/\text{s}$, ομαδοποιημένες σε 7 πλημμυρικά επεισόδια, μέσης διάρκειας $30/7 = 4.3$ ημερών το καθένα. Η περίοδος επαναφοράς ενός τέτοιου πλημμυρικού επεισοδίου είναι $T_{\text{ΠΕ}} = 15.7/7 = 2.2$ έτη.

Αν επιπλέον, καθοριστεί η τιμή της χωρητικότητας του ταμιευτήρα ανάσχεσης K , τότε με την προσομοίωση μπορεί να εκτιμηθούν (α) η περίοδος επαναφοράς υπερχειλίσης του ταμιευτήρα T_Y και (β) ο μέσος ετήσιος όγκος υπερχειλίσης σε απόλυτο μέγεθος (V_Y) και ως ποσοστό του συνολικού όγκου απορροής ($\alpha = V_Y/V_{\text{ολ}}$). Το τελευταίο ποσοστό αποτελεί σημαντική οικονομική παράμετρο δεδομένου ότι εκφράζει το ποσοστό του νερού που θα αντληθεί από μεγάλα βάθη (επειδή θα έχει παγιδευτεί στα βαθύτερα σημεία των ορυχείων) σε σχέση με τη συνολική ποσότητα νερού που θα αντληθεί.

Γραφική απεικόνιση του προσομοιωμένου όγκου αποθήκευσης και όγκου υπερχειλίσης για δύο εναλλακτικές τιμές της χωρητικότητας του ταμιευτήρα ανάσχεσης δίνεται στο Σχ. 10. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διάφορες εναλλακτικές τιμές της χωρητικότητας του ταμιευτήρα ανάσχεσης δίνονται στον Πίν. 2. Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά α είναι πολύ υψηλά (περίπου 20% ή μεγαλύτερα) αν η χωρητικότητα K είναι κάτω από 1 εκατομμύριο m^3 , και πέφτει κάτω από 10% αν η χωρητικότητα υπερβεί το 1.5 εκατομμύριο m^3 .

Πίν. 2 Αποτελέσματα της συνεχούς προσομοίωσης για διάφορες τιμές της χωρητικότητας του ταμιευτήρα ανάσχεσης σε σύγκριση και με τα αποτελέσματα της μεθόδου της πλημμύρας σχεδιασμού.

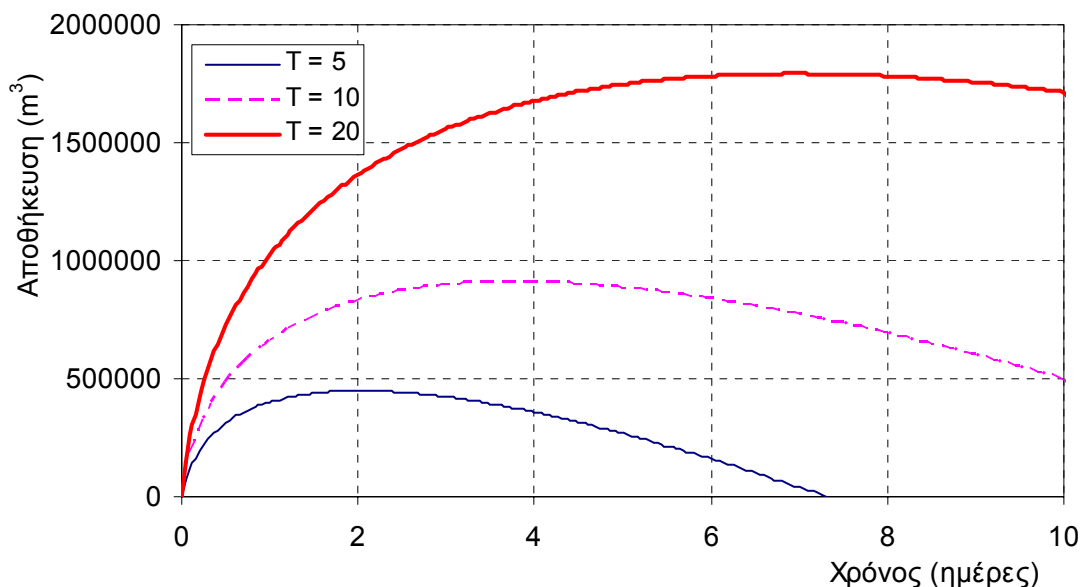
Χωρητικότητα ταμιευτήρα ανάσχεσης, $K (\text{hm}^3)$	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
Περίοδος επαναφοράς υπερχειλίσης ταμιευτήρα, T_Y (έτη)	2.6	2.6	3.9	3.9	5.2	5.2	5.2	7.9
Μέσος ετήσιος αντλούμενος όγκος συνολικά $V_{\text{ολ}} (\text{hm}^3)$	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Μέσος ετήσιος όγκος υπερχειλίσης V_Y (hm^3)	5.1	4	3	2.2	1.6	1.1	0.7	0.4
Ποσοστό $\alpha = V_Y/V_{\text{ολ}}$	41%	32%	24%	18%	13%	9%	6%	2%
Περίοδος επαναφοράς T'_Y με τη μέθοδο της πλημμύρας σχεδιασμού (έτη)	2.8	5	8	11	13	16	19	22



Σχ. 10 Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με βάση το ιστορικό δείγμα για χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανάσχεσης $K = 0.5 \text{ hm}^3$ (πάνω) και $K = 1 \text{ hm}^3$ (κάτω).

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, επειδή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στηρίζονται στο ιστορικό δείγμα, είναι ενδεχόμενο να είναι υπερεκτιμημένα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ένας εναλλακτικός τρόπος εκτίμησης βασισμένος στην πιθανοτική ανάλυση των παροχών (κεφάλαιο 7). Στην περίπτωση αυτή, η συνεχής προσομοίωση δεν μπορεί να εφαρμοστεί (θα χρειαζόταν την ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου), γι' αυτό και περιοριζόμαστε στην εφαρμογή ενός μεμονωμένου πλημμυρικού επεισοδίου σχεδιασμού δεδομένης περιόδου επαναφοράς T'_Y και διάρκειας 10 ημερών, για το οποίο εκτιμάται η απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα K ανάσχεσης προκειμένου να μην υπάρξει υπερχείλιση του ταμιευτήρα (βλ. Σχ. 11). Η σχέση μεταξύ K και T'_Y , όπως προσδιορίζεται

μετά από υπολογισμούς, έχει αποτυπωθεί στον Πίν. 2. Με βάση την τελευταία σειρά αποτελεσμάτων του Πίν. 2, αν δεχτούμε περίοδο επαναφοράς 10 ετών για το πλημμυρικό επεισόδιο που δεν θα οδηγήσει σε υπερχειλίση, θα απαιτηθεί χωρητικότητα K περίπου 1 εκατομμύριο m^3 .



Σχ. 11 Μεταβολή, συναρτήσει του χρόνου, του όγκου που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα ανάσχεσης σύμφωνα με τη μέθοδο του πλημμυρικού επεισοδίου σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

8 Συμπεράσματα και προτάσεις

Οι παραπάνω συστηματικές αναλύσεις, βασισμένες στα ιστορικά δεδομένα παροχών, δείχνουν ότι ένα σύστημα που περιλαμβάνει αντλιοστάσιο και καταθλιπτικό αγωγό με παροχευτικότητα $3 m^3/s$ και ταμιευτήρα ανάσχεσης με χωρητικότητα περί το 1 εκατομμύριο m^3 αποτελεί μια εύλογη λύση για το υπό εξέταση πρόβλημα εκτροπής του ρέματος Σουλού. Πέραν αυτού επισημαίνονται τα ακόλουθα:

1. Η κύρια διάσταση του εξεταζόμενου προβλήματος είναι οικονομική και κατά συνέπεια η ακριβέστερη εκτίμηση των μεγεθών σχεδιασμού θα προϋπέθετε την εκτίμηση του κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους ενός συνόλου εναλλακτικών λύσεων.
2. Λόγω του μικρού (περίπου πενταετούς) χρονικού ορίζοντα των έργων και του καθαρώς αντιπλημμυρικού χαρακτήρα του ταμιευτήρα ανάσχεσης, η όλη κατασκευή μπορεί να είναι αρκετά απλή και οικονομική (π.χ. δεν χρειάζεται να είναι στεγανός ο ταμιευτήρας). Ωστόσο, αν ο ταμιευτήρας προσλάβει μονιμότερο χαρακτήρα, π.χ. με μετατροπή του σε λιμνοδεξαμενή αποθήκευσης αρδευτικού νερού μετά την ολοκλήρωση των λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων στην περιοχή, θα πρέπει να γίνει προσεκτικότερη μελέτη του.

3. Στα πλαίσια των εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων, θα ήταν σκόπιμη και η διερεύνηση λύσεων περιορισμού ή ακόμη και αποφυγής των αντλήσεων που έχουν μεγάλο λειτουργικό κόστος (π.χ. με κατασκευή ανεστραμμένων σιφώνων). Πάντως, αυτή η διερεύνηση ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

Αναφορές

- Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997
- Παπαδήμος, Δ. Λ., *Τα Υδραυλικά Έργα Παρά τους Αρχαίους*, Τόμος Β, ΤΕΕ, Αθήνα, 1975.
- Παπαδόπουλου και Κουμαντάκη (1999)
- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 1, Theoretical investigation, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 575-590, 2004a.
- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 2, Empirical investigation of long rainfall records, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 591-610, 2004b.
- Koutsoyiannis, D., Reliability concepts in reservoir design, *The Encyclopedia of Water*, edited by J. H. Lehr, Wiley, New York, 2005a (in press).
- Koutsoyiannis, D., Stochastic simulation of hydrosystems, *The Encyclopedia of Water*, edited by J. H. Lehr, Wiley, New York, 200b (in press).
- Stedinger, J. R., R. M. Vogel, & E. Foufoula-Georgiou, Frequency analysis of extreme events, Ch. 18 in: *Handbook of Hydrology* (ed. by D. R. Maidment), McGraw-Hill, New York, USA, 1993.
- Turcotte, D. L., Fractal theory and the estimation of extreme floods, *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.*, 99(4), 377-389, 1994.
- Turcotte, D. L. & B. D. Malamud, Applicability of fractal flood-frequency statistics, In: Hydrofractals '03 (Int. Conf. on Fractals in Hydrosiences, Monte Verita, Switzerland, August 2003). ETH Zurich/MIT/Université Pierre et Marie Curie, 2003.