

4. Προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα Γαδουρά

4.1 Αντικείμενο του κεφαλαίου

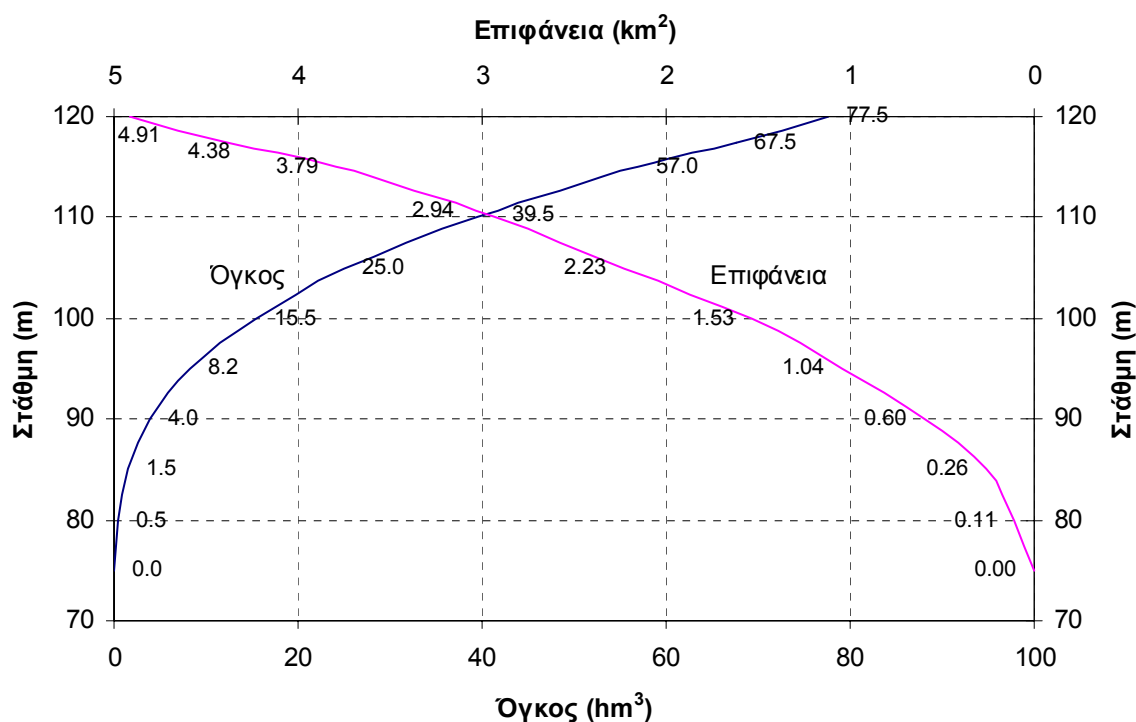
Αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι η προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα Γαδουρά για ένα σύνολο σεναρίων εισροής, ιστορικών και συνθετικών. Στόχος της προσομοίωσης είναι η εκτίμηση του εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού του ταμιευτήρα, ή αλλιώς, της εγγυημένης απόληψης από τον ταμιευτήρα Γαδουρά για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας (ή ισοδύναμα για δεδομένη πιθανότητα αστοχίας).

4.2 Γενικά δεδομένα και βασικές αρχές της προσομοίωσης

4.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα

Τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα που ενδιαφέρουν στην προσομοίωση είναι τα ακόλουθα:

1. Η καμπύλη στάθμης-όγκου (ή στάθμης-ολικού αποθέματος) που περιγράφεται από μια συνάρτηση της μορφής $V = f(z)$, όπου z η στάθμη στον ταμιευτήρα. Η συνάρτηση $f()$ περιγράφεται από μια ακολουθία συντεταγμένων (z_i, V_i) μέσω της οποίας είναι δυνατή η εκτίμηση του όγκου για οποιαδήποτε στάθμη, χρησιμοποιώντας λογαριθμική παρεμβολή. Η καμπύλη του ταμιευτήρα Γαδουρά δίνεται στο Σχ. 4.1.
2. Η καμπύλη στάθμης-επιφάνειας που περιγράφεται από μια συνάρτηση της μορφής $A = g(z)$, όπου z η στάθμη στον ταμιευτήρα. Η συνάρτηση $g()$ περιγράφεται και πάλι από μια ακολουθία συντεταγμένων (z_i, A_i) μέσω της οποίας είναι δυνατή η εκτίμηση της επιφάνειας για οποιαδήποτε στάθμη, χρησιμοποιώντας λογαριθμική παρεμβολή. Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω συναρτήσεις μπορεί να προκύψει η επιφάνεια A αν είναι γνωστός ο όγκος V . Η καμπύλη του ταμιευτήρα Γαδουρά δίνεται στο Σχ. 4.1.
3. Η κατώτατη στάθμη λειτουργίας z_{\min} , η οποία αντιστοιχεί σε ελάχιστο όγκο $A = f(z_{\min})$. Αν καθοριστεί το μέγεθος A , ορίζεται το ωφέλιμο απόθεμα του ταμιευτήρα $S = V - A$. Στην περίπτωση του ταμιευτήρα Γαδουρά εξετάζονται δύο εναλλακτικές τιμές της κατώτατης στάθμης: $z_{\min} = +90$ m με $A = 4.0$ hm³ και $z_{\min} = +95$ m με $A = 8.2$ hm³.
4. Η ανώτατη (κανονική) στάθμη λειτουργίας z_{\max} , η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστο όγκο $V = f(z_{\max})$ και αντίστοιχο ωφέλιμο απόθεμα (ή *ωφέλιμη χωρητικότητα*) $K = f(z_{\max}) - A$. Στην περίπτωση του ταμιευτήρα Γαδουρά η ανώτατη στάθμη ορίζεται ίση με $z_{\max} = +117.5$ m, οπότε από το Σχ. 4.1 προκύπτει ότι για $z_{\min} = +90$ m η ωφέλιμη χωρητικότητα είναι $K = 63.5$ hm³. αντίστοιχα, για $z_{\min} = +95$ m, $K = 59.3$ hm³.



Σχ. 4.1 Καμπύλες στάθμης-όγκου και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Γαδουρά.

4.2.2 Δυναμική συστήματος

Το σύστημα που εξετάζουμε αποτελείται από ένα μεμονωμένο ταμιευτήρα, ο οποίος τροφοδοτείται από φυσικές εισροές και τροφοδοτεί δύο χρήσεις νερού: την κύρια χρήση, πρωτίστως υδρευτική, και τη χρήση για περιβαλλοντική διατήρηση. Με τις προϋποθέσεις αυτές, η δυναμική του ταμιευτήρα περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση, συνέπεια της διατήρησης μάζας:

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_t - SP_t - LE_t \quad (4.1)$$

όπου ο δείκτης t συμβολίζει το χρόνο (σε διακριτή μορφή με κατάλληλο βήμα διακριτοποίησης, που στην προκειμένη περίπτωση έχει θεωρηθεί ένας μήνας) και τα υπόλοιπα σύμβολα έχουν τις ακόλουθες σημασίες:

S : το ωφέλιμο απόθεμα του ταμιευτήρα, σε μονάδες όγκου (εδώ hm^3).

I : η καθαρή εισροή στον ταμιευτήρα, σε μονάδες όγκου.

R : η συνολική απόληψη από τον ταμιευτήρα, σε μονάδες όγκου.

SP : η υπερχειλίση από τον ταμιευτήρα, σε μονάδες όγκου.

LE : η υπόγεια διαφυγή από τον ταμιευτήρα, σε μονάδες όγκου (στον ταμιευτήρα που μελετάται θεωρείται αμελητέα).

Η απόληψη από τον ταμιευτήρα αναλύεται σε δύο συνιστώσες:

$$R_t = RM_t + RE_t \quad (4.2)$$

όπου

RM: η κύρια εκροή κατάντη του ταμιευτήρα για υδρευτική και αρδευτική χρήση, σε μονάδες όγκου·

RE: η άμεση εκροή κατάντη του ταμιευτήρα για κάλυψη αναγκών περιβαλλοντικής διατήρησης, σε μονάδες όγκου.

Αντίστοιχα, η καθαρή εισροή στον ταμιευτήρα αναλύεται σε τρεις συνιστώσες: την επιφανειακή απορροή της λεκάνης (θετική), τη βροχόπτωση στον ταμιευτήρα (θετική) και την εξάτμιση από τον ταμιευτήρα (αρνητική). Συμβολικά:

$$I_t = IR_t (F - A_{t-1}) - (E_t - P_t) A_{t-1} \quad (4.3)$$

όπου

A : το εμβαδό της επιφάνειας του ταμιευτήρα (μεταβαλλόμενο με τη στάθμη)·

F : το εμβαδό της λεκάνης που τροφοδοτεί με απορροή τον ταμιευτήρα (στον υπό μελέτη ταμιευτήρα ίσο με 147.7 km^2)·

IR: το ισοδύναμο ύψος απορροής της λεκάνης·

P : το ύψος βροχής στον ταμιευτήρα·

E : το ύψος εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Το μέγεθος $E_t - P_t$ που υπεισέρχεται στην (4.3) παρακάτω αποκαλείται καθαρή εξάτμιση. Το χρονικό βήμα διακριτοποίησης θεωρείται αρκετά μικρό ώστε στη διάρκεια ενός βήματος να μη μεταβάλλεται πολύ η επιφάνεια του ταμιευτήρα. Αυτή η προϋπόθεση επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση (4.3) η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο προηγούμενο χρονικό βήμα (A_{t-1}), πράγμα που διευκολύνει τους υπολογισμούς. Εάν το βήμα διακριτοποίησης είναι μεγάλο τότε μπορεί να γίνει υπολογιστική υποδιαίρεσή του, σε τρόπο ώστε να ικανοποιείται σε ικανοποιητικό βαθμό η εν λόγω προϋπόθεση.

Τα παραπάνω μεγέθη υπόκεινται σε μια σειρά φυσικών περιορισμών που διατυπώνονται ως εξής:

- Απόθεμα

$$-A \leq S_t \leq K \quad (4.4)$$

όπου K είναι η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα και A ο όγκος που αντιστοιχεί στην κατώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα. Από λειτουργική άποψη το κατώτατο όριο του αποθέματος είναι ίσο με 0, αλλά, ωστόσο, από φυσική άποψη, η στάθμη είναι δυνατό να γίνει μικρότερη από την κατώτατη στάθμη (αν υπάρχει εξάτμιση χωρίς καμιά εισροή) οπότε το φυσικό κατώτατο όριο είναι το $-A$.

- Κύρια εκροή

$$0 \leq RM_t \leq CM_t \quad (4.5)$$

όπου CM_t ο μέγιστος όγκος νερού που μπορεί να διέλθει κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος από τον αγωγό, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η εκροή. Ειδικότερα, η κύρια εκροή μηδενίζεται, όταν η στάθμη στον ταμιευτήρα κατεβεί κάτω από τη στάθμη υδροληψίας.

- Εκροή περιβαλλοντικής διατήρησης:

$$0 \leq RE_t \leq CE_t \quad (4.6)$$

όπου CE_t η παροχετευτικότητα του αγωγού, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η εκροή, που μπορεί να είναι διαφορετικός από τον αγωγό κύριας εκροής.

- Υπερχείλιση:

$$SP_t = \begin{cases} 0, & S_t < K \\ S_{t-1} + I_t - R_t - SP_t - LE_t - K, & S_t = K \end{cases} \quad (4.7)$$

Η σειρά αυτή των φυσικών περιορισμών συμπληρώνεται και από ένα λειτουργικό περιορισμό, ο οποίος αφορά στη συνολική απόληψη από τον ταμιευτήρα και γράφεται:

$$R_t = \begin{cases} D_t, & S_{t-1} + I_t - D_t - LE_t > 0 \\ S_{t-1} + I_t - LE_t, & S_{t-1} + I_t - D_t - LE_t < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

όπου D_t η συνολική ζήτηση (ή αλλιώς στόχος απόληψης) για την κύρια και περιβαλλοντική χρήση στο χρονικό διάστημα t .

4.2.3 Αξιοπιστία ταμιευτήρα

Η αξιοπιστία (reliability) ενός μεμονωμένου ταμιευτήρα ως προς την κάλυψη ενός δεδομένου στόχου ορίζεται με διάφορους τρόπους. Οι συνηθέστεροι απ' αυτούς είναι οι εξής:

1. Επίπεδο αξιοπιστίας σε ετήσια βάση:

$$\alpha_T = P(R_T = D_T) \quad (4.9)$$

όπου α_T το επίπεδο αξιοπιστίας, R_T η πραγματική απόληψη (θεωρούμενη ως τυχαία μεταβλητή) στην περίοδο T ενός έτους και D_T η ζήτηση στην ίδια περίοδο, ενώ με $P(\cdot)$ συμβολίζεται η πιθανότητα. Πρακτικά, με τον παραπάνω ορισμό η αξιοπιστία είναι ίση με την πιθανότητα κάλυψης της ζήτησης σε χρονική βάση ίση με T . Εμπειρικά η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως ο λόγος k'/k όπου k' είναι ο αριθμός των ετήσιων περιόδων στις οποίες ικανοποιείται η ζήτηση και k ο συνολικός αριθμός των περιόδων προσομοίωσης.

2. Επίπεδο αξιοπιστίας σε βάση χρονικού βήματος (μηνιαία):

$$\alpha_t = P(R_t = D_t) \quad (4.10)$$

όπου α_t το επίπεδο αξιοπιστίας, R_t η πραγματική απόληψη (θεωρούμενη ως τυχαία μεταβλητή) στην περίοδο t ενός υπολογιστικού χρονικού βήματος (στην προκειμένη περίπτωση,

μήνα) και D_t η ζήτηση στην ίδια περίοδο. Πρακτικά, με τον παραπάνω ορισμό η αξιοπιστία είναι ίση με την πιθανότητα κάλυψης της ζήτησης σε χρονική βάση ίση με t . Εμπειρικά η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως ο λόγος n'/n όπου n' είναι ο αριθμός των χρονικών βημάτων στα οποία ικανοποιείται η ζήτηση και n ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων προσομοίωσης.

3. Ογκομετρική έκφραση αξιοπιστίας:

$$a_R = E[R_T] / D_T \quad (4.11)$$

όπου a_R το επίπεδο αξιοπιστίας, R_t η πραγματική απόληψη (θεωρούμενη ως τυχαία μεταβλητή) στην περίοδο t ενός υπολογιστικού χρονικού βήματος (στην προκειμένη περίπτωση, μήνα) και D_t η ζήτηση στην ίδια περίοδο, ενώ με $E[.]$ συμβολίζεται η αναμενόμενη τιμή. Εμπειρικά αυτή υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των πραγματικών απολήψεων στο συνολικό αριθμό των ετήσιων περιόδων προσομοίωσης.

Προφανώς ισχύει $a_T \leq a_t \leq a_R$ δεδομένου ότι η μη ικανοποίηση της ζήτησης σε ένα έτος, δε σημαίνει ότι εκτείνεται σε όλη τη διάρκεια του έτους, και ακόμα, κατά την περίοδο που δεν ικανοποιείται η ζήτηση, η απόληψη δεν είναι μηδενική αλλά $0 \leq R \leq D$.

Αντί των παραπάνω εκφράσεων της αξιοπιστίας μπορούν ισοδύναμα να χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα μέτρα αστοχίας:

1. Πιθανότητα αστοχίας σε ετήσια βάση:

$$\beta_T = 1 - a_T = P(R_T < D_T) \quad (4.12)$$

Εμπειρικά υπολογίζεται ως ο λόγος k'/k όπου k' είναι ο αριθμός των ετήσιων περιόδων στις οποίες δεν ικανοποιείται η ζήτηση και k ο συνολικός αριθμός των περιόδων προσομοίωσης.

2. Πιθανότητα αστοχίας σε βάση χρονικού βήματος:

$$\beta_t = 1 - a_t = P(R_t < D_t) \quad (4.13)$$

Εμπειρικά υπολογίζεται ως ο λόγος n''/n όπου n'' είναι ο αριθμός των χρονικών βημάτων (μηνών) στα οποίες δεν ικανοποιείται η ζήτηση και n ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων προσομοίωσης.

3. Ογκομετρικό μέτρο αστοχίας:

$$\beta_R = 1 - a_R = 1 - E[R_T] / D_T \quad (4.14)$$

Συχνά στις μελέτες ταμειυτήρων χρησιμοποιείται και το μέγεθος *περίοδος επαναφοράς εκκένωσης* (recurrence time of emptiness) που ορίζεται από τη σχέση

$$T_E = \frac{1}{\beta_T} = \frac{1}{1 - a_T} \quad (4.15)$$

Είναι προφανές ότι, για δεδομένα υδρολογικά χαρακτηριστικά εισροών, η αξιοπιστία συναρτάται άμεσα με την ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμειυτήρα K και με τη ζήτηση D .

Στόχος της προσομοίωσης είναι ο προσδιορισμός της σχέσης των τριών μεγεθών, δηλαδή της αξιοπιστίας (ή, ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας), της ωφέλιμης χωρητικότητας και της ζήτησης. Λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας του προβλήματος, η σχέση αυτή δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί με αναλυτικές μεθόδους· έτσι, η μέθοδος της προσομοίωσης παραμένει η αποτελεσματικότερη μέθοδος αριθμητικού προσδιορισμού αυτής της σχέσης. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι η προσομοίωση χρειάζεται να επεκταθεί σε διάστημα εκατοντάδων ή και χιλιάδων ετών, διάστημα το οποίο εξαρτάται από το επίπεδο αξιοπιστίας ή το μέτρο αστοχίας. Στην προκειμένη περίπτωση είναι επιθυμητός ο προσδιορισμός της εν λόγω σχέσης για επίπεδα αστοχίας που φτάνουν μέχρι την τιμή $a_T = 99\%$ ή για πιθανότητες αστοχίας μέχρι την τιμή $\beta_T = 1\%$. Με αυτό το δεδομένο εκτιμήθηκε ότι το διάστημα της προσομοίωσης πρέπει να φτάνει τα 1000 χρόνια, ώστε να εμφανιστεί ένας αριθμός αστοχιών περίπου ίσος με 10 στο συνολικό διάστημα της προσομοίωσης. Με εφαρμογή της στατιστικής μπορεί να δείχτεί ότι, με αυτά τα δεδομένα, η προσέγγιση στην εκτίμηση (μέσω της προσομοίωσης) του β_T είναι μικρότερη από $\pm 0.5\%$ (σε απόλυτο μέγεθος) για συντελεστή εμπιστοσύνης 90%. Είναι προφανές ότι υπό τις προϋποθέσεις αυτές απαιτείται η παραγωγή συνθετικών υδρολογικών χρονοσειρών μεγέθους 1000 ετών, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με μεθόδους της στοχαστικής υδρολογίας, όπως αναλυτικότερα περιγράφεται στο εδάφιο 4.3.2.

4.3 Υδρολογική προσομοίωση

4.3.1 Υδρολογικά χαρακτηριστικά - Σενάρια απορροής

Σε άλλο κεφάλαιο της παρούσας μελέτης έχει παραχθεί μια μηνιαία χρονοσειρά απορροών της λεκάνης Γαδουρά, χρησιμοποιώντας το απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite. Η καταφυγή στη μέθοδο αυτή ήταν αναπόφευκτη, δεδομένου ότι στη λεκάνη δεν υπήρχαν επαρκή υδρομετρικά δεδομένα. Οι υπολογισμοί έγιναν με βάση δεδομένα βροχής και εξάτμισης για το διάστημα 1950-51 έως 1996-97 (47 χρόνια). Οι μέσες τιμές του ύψους απορροής που εκτιμήθηκαν φαίνονται στον Πίν. 4.1 για κάθε μήνα ξεχωριστά και για το σύνολο του έτους.

Πίν. 4.1. Μέσα μηνιαία ύψη απορροής στη λεκάνη Γαδουρά, όπως υπολογίστηκαν με το απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite.

| Μήνας | Οκτ | Νοε | Δεκ | Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μαι | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ | Έτος |
|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| Απορροή (mm) | 4.08 | 4.93 | 18.47 | 49.57 | 56.82 | 45.41 | 23.23 | 11.61 | 5.81 | 2.90 | 1.45 | 0.73 | 225.0 |
| Ποσοστό (%) | 1.8 | 2.2 | 8.2 | 22.0 | 25.3 | 20.2 | 10.3 | 5.2 | 2.6 | 1.3 | 0.6 | 0.3 | 100.0 |

Όπως ασφαλώς είναι γνωστό (βλ. π.χ. Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997) το μοντέλο Thornthwaite δεν αποδίδει καλά τη μηνιαία κατανομή της απορροής, πολύ δε περισσότερο δεν είναι κατάλληλο για την εκτίμηση άλλων, πέραν των μέσων τιμών, στατιστικών χαρακτηριστικών της μηνιαίας απορροής, όπως των τυπικών αποκλίσεων και των

συντελεστών αυτοσυσχέτισης. (Για παράδειγμα, οι μηνιαίοι συντελεστές αυτοσυσχέτισης που εκτιμώνται από τη χρονοσειρά απορροής του μοντέλου Thornthwaite την περίοδο Απρίλιος-Σεπτέμβριος έχουν τιμή ίση με 1, η οποία βεβαίως είναι εξωπραγματική και πρέπει να αποκλειστεί). Για το λόγο αυτό αποφύγαμε να χρησιμοποιήσουμε άλλα μηνιαία στατιστικά χαρακτηριστικά από τη χρονοσειρά των απορροών, πέραν των μέσων τιμών.

Έτσι, αντί του υπολογισμού των μηνιαίων τυπικών αποκλίσεων και συντελεστών αυτοσυσχέτισης από τη χρονοσειρά απορροής, υιοθετήσαμε μια αρκετά απλουστευμένη αλλά πιο ρεαλιστική μέθοδο, στηριγμένη σε παραδοχές που φαίνεται να ισχύουν με ικανοποιητική προσέγγιση, όπως προκύπτει από μετρήσεις απορροής σε λεκάνες της Κρήτης (Πλακιώτισσα, Φανερωμένη) που έχουν παρόμοιο μέγεθος και παραπλήσιες κλιματικές συνθήκες (Κωνσταντινίδης και Κουτσογιάννης, 1986, 1988). Συγκεκριμένα υποθέσαμε ότι (α) η στοχαστική δομή των μηνιαίων υψών απορροής είναι Μαρκοβιανή και (β) οι συντελεστές μεταβλητότητας και αυτοσυσχέτισης παραμένουν πρακτικώς σταθεροί σε όλους τους μήνες. Με αυτές τις υποθέσεις, και αν δεχτούμε τις μέσες τιμές του Πίν. 4.1 για κάθε μήνα και για το έτος, καθώς και τον ετήσιο συντελεστή μεταβλητότητας που προσδιορίζεται από τη χρονοσειρά της απορροής και έχει τιμή ίση με 0.64, καταλήγουμε σε μια εξίσωση που συνδέει το μηνιαίο συντελεστή μεταβλητότητας με το μηνιαίο συντελεστή αυτοσυσχέτισης. Αυτό σημαίνει ότι αν καθορίσουμε το ένα από τα δύο μεγέθη, μπορούμε να υπολογίσουμε το άλλο από την εν λόγω εξίσωση. Εν προκειμένω, υποθέσαμε δύο εναλλακτικές τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας, ίσες με 0.90 και 0.80, οπότε από την εξίσωση προέκυψαν τιμές του συντελεστή αυτοσυσχέτισης ίσες με 0.62 και 0.76, αντιστοίχως (βλ Πίν. 4.2, σενάρια A1 και B1). Με βάση την εμπειρία μας κρίνουμε ότι τα μεγέθη αυτά είναι αρκετά ρεαλιστικά, ίσως και υπερεκτιμημένα. Το ενδεχόμενο της υπερεκτίμησης προκύπτει από τη σημαντικά μεγάλη τιμή του ετήσιου συντελεστή μεταβλητότητας (0.64). Έτσι, κρίναμε σκόπιμο να εισαγάγουμε και ένα τρίτο, πιο «αισιόδοξο» σενάριο, το οποίο συνδυάζει τις μικρότερες τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας και αυτοσυσχέτισης (0.80 και 0.62, αντιστοίχως) και οδηγεί σε μικρότερη τιμή του ετήσιου συντελεστή μεταβλητότητας, ίση με 0.57 (βλ Πίν. 4.2, σενάριο Γ1).

Ασφαλώς, οι σημαντικές αβεβαιότητες που απορρέουν από την έλλειψη μετρήσεων παροχής δεν μπορούν να καλυφθούν από τα παραπάνω τρία σενάρια. Για το λόγο αυτό εισάγουμε έξι ακόμη σενάρια (βλ Πίν. 4.2, σενάρια A2, A3, B2, B3, Γ2, Γ3), τα οποία προκύπτουν από τα τρία παραπάνω βασικά σενάρια (A1, B1, Γ1) με εφαρμογή ενός συντελεστή αναγωγής της ετήσιας μέσης τιμής, στον οποίο δίνουμε την τιμή 1.10 για τα σενάρια A2, B2 και Γ2, και την τιμή 0.90 για τα σενάρια A3, B3 και Γ3. Έτσι, ο αριθμός των υδρολογικών σεναρίων που εξετάζουμε ανέρχεται σε εννιά.

Πίν. 4.2. Σενάρια χαρακτηριστικών απορροής της λεκάνης Γαδουρά.

| Σενάριο | Ετήσια απορροή | | | | Μηνιαία απορροή | |
|---------|----------------------|----------------------------|----------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Συντελεστής αναγωγής | Συντελεστής μεταβλητότητας | Μέση τιμή (mm) | Τυπική απόκλιση (mm) | Συντελεστής αυτοσυσχέτισης | Συντελεστής μεταβλητότητας |
| A1 | 1.0 | 0.64 | 225.0 | 144.0 | 0.62 | 0.90 |
| A2 | 1.1 | 0.64 | 247.5 | 158.4 | 0.62 | 0.90 |
| A3 | 0.9 | 0.64 | 202.5 | 129.6 | 0.62 | 0.90 |
| B1 | 1.0 | 0.64 | 225.0 | 144.0 | 0.76 | 0.80 |
| B2 | 1.1 | 0.64 | 247.5 | 158.4 | 0.76 | 0.80 |
| B3 | 0.9 | 0.64 | 202.5 | 129.6 | 0.76 | 0.80 |
| Γ1 | 1.0 | 0.57 | 225.0 | 128.3 | 0.62 | 0.80 |
| Γ2 | 1.1 | 0.57 | 247.5 | 141.1 | 0.62 | 0.80 |
| Γ3 | 0.9 | 0.57 | 202.5 | 115.4 | 0.62 | 0.80 |

4.3.2 Στοχαστικό μοντέλο απορροής

Ως βάση για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών απορροής στη λεκάνη Γαδουρά χρησιμοποιήθηκε το στοχαστικό μοντέλο GAR (Gamma-autoregressive· Lawrance and Lewis, 1981· Lawrance, 1982· Fernadez and Salas, 1990). Το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιο με το αυτοπαλινδρομικό μοντέλο AR(1) με τη διαφορά ότι παράγει τυχαίες τιμές αυστηρά με κατανομή γάμα (δύο ή τριών παραμέτρων), αντί κανονικών τυχαίων τιμών. Στην προκειμένη περίπτωση, αν και δεν έχουμε στατιστικά δείγματα μετρήσεων απορροής, από την εμπειρία μας σε ανάλογες λεκάνες αναμένουμε ότι η κατανομή της μηνιαίας απορροής θα προσεγγίζει την κατανομή γάμα δύο παραμέτρων. Υπενθυμίζεται ότι το βασικό πλεονέκτημα αυτής της κατανομής είναι ότι ορίζεται μόνο για θετικές τιμές της τυχαίας μεταβλητής, σε αντίθεση π.χ. με την κανονική κατανομή που δεν αποκλείει τις αρνητικές τιμές (οι οποίες βεβαίως δεν έχουν φυσικό νόημα).

Αν X_t παριστάνει μια στάσιμη στοχαστική ανέλιξη με κατανομή γάμα δύο παραμέτρων, ή, ισοδύναμα, με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f_X(x) = \frac{\lambda^\kappa x^{\kappa-1} \exp(-\lambda x)}{\Gamma(\kappa)} \quad (4.16)$$

όπου κ η παράμετρος σχήματος και λ η παράμετρος κλίμακας της κατανομής, και με συντελεστή αυτοσυσχέτισης ρ (για βήμα 1) τότε το μοντέλο GAR διατυπώνεται ως

$$X_t = \rho X_{t-1} + W_t \quad (4.17)$$

όπου

$$W_t = \begin{cases} 0, & M = 0 \\ \sum_{j=1}^M Y_j \rho^{U_j}, & M > 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

ενώ τα σύμβολα στην (4.18) έχουν τις ακόλουθες σημασίες:

- M : ακέραια τυχαία μεταβλητή με κατανομή Poisson και μέση τιμή $-\kappa \ln \rho$.
 Y_j : ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με εκθετική κατανομή και μέση τιμή $1 / \lambda$.
 U_j : ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $(0, 1)$.

Παρατηρούμε ότι το παραπάνω στάσιμο μοντέλο GAR, που κατ' αρχήν είναι κατάλληλο για τη γέννηση ετήσιων απορροών, εύκολα μπορεί να αναχθεί σε μη στάσιμο, κατάλληλο για τη γέννηση μηνιαίων απορροών, αλλά κάτω από δύο προϋποθέσεις και συγκεκριμένα (α) για ενιαίο συντελεστή αυτοσυσχέτισης ρ για όλους τους μήνες και (β) για ενιαίο συντελεστή μεταβλητότητας C_V (ή ισοδύναμα, για ενιαία τιμή της παραμέτρου κ) για όλους τους μήνες. Επειδή οι προϋποθέσεις αυτές ισχύουν στην περίπτωση που εξετάζουμε (βλ. εδάφιο 4.3.1) η αναγωγή είναι εφικτή και γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: (α) υποθέτουμε μια αυθαίρετη ενιαία μέση τιμή για το σύνολο των μηνών· (β) με βάση τους συντελεστές μεταβλητότητας και αυτοσυσχέτισης των μηνιαίων απορροών (Πίν. 4.2, δύο τελευταίες στήλες) υπολογίζουμε τις παραμέτρους της (4.16)· (γ) εφαρμόζουμε το μοντέλο που περιγράφεται από τις εξισώσεις (4.17) και (4.18) και παράγουμε $n = 12 k$ μηνιαίες τιμές (όπου στην προκειμένη περίπτωση, όπως προαναφέραμε, $k = 1000$ χρόνια)· (δ) καθεμιά από τις τιμές αυτές την πολλαπλασιάζουμε επί το λόγο της πραγματικής μέσης τιμής του μήνα στον οποίο ανήκει, προς την αυθαίρετη τιμή που υποτέθηκε αρχικά (βήμα (α)).

4.3.3 Εξάτμιση και βροχόπτωση

Στα προηγούμενα εδάφια αναφερθήκαμε στην κύρια υδρολογική συνιστώσα, την απορροή. Ωστόσο, όπως είδαμε στο εδάφιο 4.2.2, στην προσομοίωση υπεισέρχονται ακόμη η εξάτμιση από την ελεύθερη επιφάνεια του ταμιευτήρα και η βροχόπτωση σε αυτή. Ασφαλώς, η επίδραση αυτών των δύο μεταβλητών στην όλη επίδοση του συστήματος είναι πολύ μικρότερη από αυτή της απορροής, αλλά δεν είναι αμελητέα.

Δεδομένου ότι η διακύμανση της εξάτμισης από έτος σε έτος για τον ίδιο μήνα είναι αρκετά μικρή, για τις ανάγκες της μελέτης μπορεί να αγνοηθεί η υπερετήσια και να ληφθεί υπόψη μόνο η μηνιαία διακύμανση της εξάτμισης. Η τελευταία φαίνεται στον Πίν. 4.3. Η εκτίμηση της εξάτμισης έγινε με τη μέθοδο Penman με βάση δεδομένα θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου του σταθμού Ρόδου (υψόμετρο +12 m) που δημοσιεύονται από τον Φαντίδη (1997). Για την αναγωγή της θερμοκρασίας στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης (+260 m) έγινε δεκτή θερμοβαθμίδα ίση με $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$.

Πίν. 4.3. Μέσα μηνιαία ύψη εξάτμισης στον ταμιευτήρα Γαδουρά, όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Penman.

| Μήνας | Οκτ | Νοε | Δεκ | Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μαι | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ | Έτος |
|---------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Εξάτμιση (mm) | 97.8 | 52.0 | 41.3 | 44.9 | 58.0 | 93.7 | 131.6 | 180.6 | 230.5 | 259.4 | 234.8 | 168.6 | 1593.1 |

Είναι γνωστό ότι η εξάτμιση δεν έχει στατιστικά σημαντική συσχέτιση με την απορροή. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με τη βροχόπτωση, που είναι θετικά συσχετισμένη με την απορροή (ιδίως τους χειμερινούς μήνες). Γι' αυτό η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί στην προσομοίωση με τον ίδιο τρόπο, όπως η εξάτμιση. Είναι πολύ ακριβέστερο να θεωρηθεί ότι για δεδομένο ύψος απορροής IR_t στο μήνα t , η αντίστοιχη βροχόπτωση P_t δίνεται από τη γραμμική σχέση

$$P_t = a_t + b_t IR_t \quad (4.19)$$

όπου a_t και b_t συντελεστές παλινδρόμησης. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίστηκαν από τα δεδομένα βροχής και απορροής σε μηνιαία βάση και δίνονται στον Πίν. 4.4. Διευκρινίζεται ότι στους μήνες που ο συντελεστής συσχέτισης απορροής-βροχής βρέθηκε να μην είναι στατιστικά σημαντικός (Απρίλιος-Σεπτέμβριος), η σχέση (4.19) απλοποιήθηκε θέτοντας $b_t = 0$ και a_t ίσο με τη μέση τιμή της βροχής για το συγκεκριμένο μήνα. Με δεδομένους τους συντελεστές της (4.19) που δίνονται στον Πίν. 4.4, κατά την προσομοίωση η εκτίμηση της βροχής για κάθε συγκεκριμένο βήμα γίνεται από την (4.19).

Πίν. 4.4. Συντελεστές a_t και b_t της εξίσωσης (4.19) για την εκτίμηση του ύψους βροχής P_t συναρτήσει του ύψους απορροής IR_t .

| Μήνας (t) | Οκτ | Νοε | Δεκ | Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μαι | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ |
|------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Συντελεστής a_t (mm) | 46.1 | 75.9 | 120.9 | 59.2 | 31.7 | 19.7 | 17.8 | 13.8 | 1.1 | 0.2 | 0.3 | 3.2 |
| Συντελεστής b_t | 4.87 | 1.15 | 1.22 | 1.53 | 1.19 | 1.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

4.4 Χαρακτηριστικά της ζήτησης

Σε άλλο τεύχος της μελέτης έχει προσδιοριστεί η ποσοστιαία κατανομή της ζήτησης ανά μήνα, όπως φαίνεται στον Πίν. 4.5, η οποία εδώ θεωρείται δεδομένη και σταθερή για όλα τα έτη. Διευκρινίζεται ότι στα ποσοστά του Πίν. 4.5 συμπεριλαμβάνεται τόσο η κύρια απόληψη, όσο και η περιβαλλοντική.

Πίν. 4.5. Ποσοστιαία κατανομή των απολήψεων ανά μήνα

| Μήνας | Οκτ | Νοε | Δεκ | Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μαι | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ | Έτος |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-------|
| Απόληψη (%) | 8.3 | 6.4 | 4.5 | 4.4 | 4.2 | 5.0 | 10.4 | 12.1 | 8.8 | 13.0 | 13.7 | 9.2 | 100.0 |

4.5 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων

Προσομοιώσεις της λειτουργίας του ταμιευτήρα έγιναν τόσο με βάση τα ιστορικά δεδομένα απορροής και βροχής (47 χρόνια) όσο και με τα συνθετικά δεδομένα (1000 χρόνια) για τα 9 σενάρια που καταρτίστηκαν (βλ. εδάφιο 4.3.1 και Πίν. 4.2). Για κάθε σενάριο εισροών πραγματοποιήθηκε ένας αριθμός προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές της ζήτησης που κυμαίνονται στο διάστημα από 16 μέχρι 24 hm³ ετησίως. Ως βάση για τις προσομοιώσεις υιοθετήθηκε η περίπτωση που η κατώτατη στάθμη του ταμιευτήρα είναι στα +90 m. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για την περίπτωση που η κατώτατη στάθμη ανεβαίνει στα +95 m, με βάση τόσο τα ιστορικά δεδομένα, όσο και τα συνθετικά σενάρια B1 και Γ1.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται σε μια σειρά πινάκων, στους οποίους για κάθε δοκιμαστική τιμή της ζήτησης παρατίθενται στοιχεία του μέσου ετήσιου υδρολογικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα (απορροή, καθαρή εξάτμιση, πραγματική απόληψη, υπερχείλιση) όσο και τα μέτρα αστοχίας, όπως αυτά ορίστηκαν στο εδάφιο 4.2.3. Πιο συγκεκριμένα:

- στον Πίν. 4.6 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα ιστορικά δεδομένα·
- στον Πίν. 4.7 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα συνθετικά δεδομένα των σεναρίων A1-A3·
- στον Πίν. 4.8 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα συνθετικά δεδομένα των σεναρίων B1-B3·
- στον Πίν. 4.9 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα συνθετικά δεδομένα των σεναρίων Γ1-Γ3·

Πίν. 4.6. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του ταμιευτήρα Γαδουρά με βάση τις ιστορικές χρονοσειρές (47 χρόνια).

| Στόχος ετήσιας απόληψης (hm ³) | Μέση ετήσια απορροή (hm ³) | Καθαρή μέση ετήσια εξάτμιση (hm ³) | Μέση ετήσια απόληψη (hm ³) | Μέση ετήσια υπερχείλιση (hm ³) | Πιθανότητα αστοχίας (%) | | | |
|---|---|---|---|--|-------------------------|---------|------------------|--|
| | | | | | Ετήσια | Μηνιαία | Ογκο- μετρική | |
| <i>Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | | |
| 24 | 32.49 | 3.33 | 23.63 | 5.53 | 6.38 | 1.60 | 1.52 | |
| 23 | 32.47 | 3.43 | 22.80 | 6.23 | 4.26 | 0.89 | 0.86 | |
| 22 | 32.44 | 3.52 | 21.92 | 7.01 | 4.26 | 0.71 | 0.38 | |
| 21.7 | 32.44 | 3.55 | 21.65 | 7.24 | 2.13 | 0.53 | 0.24 | |
| 21 | 32.42 | 3.61 | 21.00 | 7.81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| <i>Κατώτατη στάθμη + 95 m</i> | | | | | | | | |
| 24 | 32.52 | 3.20 | 23.51 | 5.90 | 10.64 | 2.48 | 2.06 | |
| 23 | 32.50 | 3.27 | 22.70 | 6.61 | 6.38 | 1.42 | 1.32 | |
| 22 | 32.48 | 3.35 | 21.86 | 7.34 | 4.26 | 0.89 | 0.63 | |
| 21 | 32.46 | 3.43 | 20.97 | 8.12 | 2.13 | 0.35 | 0.13 | |
| 20 | 32.45 | 3.49 | 20.00 | 9.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |

Πίν. 4.7. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του ταμιευτήρα Γαδουρά με βάση συνθετικές χρονοσειρές (1000 χρόνια) για τα σενάρια εισροών Α1-Α3.

| Στόχος ετήσιας απόληψης (hm ³) | Μέση ετήσια απορροή (hm ³) | Καθαρή μέση ετήσια εξάτμιση (hm ³) | Μέση ετήσια απόληψη (hm ³) | Μέση ετήσια υπεχείλιση (hm ³) | Πιθανότητα αστοχίας (%) | | Ογκο- μετρική |
|--|---|---|---|---|-------------------------|---------|------------------|
| | | | | | Ετήσια | Μηνιαία | |
| <i>Περίπτωση Α1 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.0 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 31.73 | 3.19 | 23.51 | 5.03 | 9.30 | 2.66 | 2.03 |
| 23.25 | 31.71 | 3.28 | 22.91 | 5.52 | 6.50 | 1.82 | 1.47 |
| 23 | 31.70 | 3.31 | 22.69 | 5.69 | 5.80 | 1.61 | 1.33 |
| 22 | 31.67 | 3.44 | 21.81 | 6.42 | 3.80 | 1.06 | 0.87 |
| 21 | 31.65 | 3.55 | 20.89 | 7.21 | 2.50 | 0.68 | 0.54 |
| 20 | 31.62 | 3.64 | 19.93 | 8.06 | 1.50 | 0.39 | 0.36 |
| 19 | 31.60 | 3.72 | 18.95 | 8.93 | 1.20 | 0.27 | 0.24 |
| 18 | 31.59 | 3.78 | 17.97 | 9.83 | 1.10 | 0.18 | 0.14 |
| 17 | 31.57 | 3.83 | 16.99 | 10.75 | 0.40 | 0.06 | 0.05 |
| <i>Περίπτωση Α2 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.1 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 34.83 | 3.38 | 23.78 | 7.68 | 4.20 | 1.12 | 0.93 |
| 23.25 | 34.82 | 3.45 | 23.08 | 8.28 | 3.40 | 0.88 | 0.71 |
| 23 | 34.81 | 3.47 | 22.85 | 8.49 | 3.20 | 0.82 | 0.65 |
| 22 | 34.79 | 3.55 | 21.90 | 9.34 | 1.70 | 0.51 | 0.44 |
| 21 | 34.77 | 3.61 | 20.93 | 10.22 | 1.40 | 0.36 | 0.31 |
| 20 | 34.75 | 3.67 | 19.96 | 11.12 | 1.10 | 0.23 | 0.21 |
| 19 | 34.74 | 3.72 | 18.98 | 12.04 | 1.00 | 0.16 | 0.13 |
| 18 | 34.72 | 3.77 | 17.99 | 12.96 | 0.40 | 0.07 | 0.04 |
| 17 | 34.71 | 3.81 | 17.00 | 13.91 | 0.10 | 0.01 | 0.00 |
| <i>Περίπτωση Α3 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 0.9 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 28.63 | 2.90 | 22.95 | 2.78 | 18.20 | 5.43 | 4.36 |
| 23.25 | 28.61 | 3.00 | 22.46 | 3.15 | 14.20 | 4.28 | 3.41 |
| 23 | 28.60 | 3.04 | 22.28 | 3.28 | 12.80 | 3.88 | 3.12 |
| 22 | 28.57 | 3.19 | 21.52 | 3.86 | 8.70 | 2.64 | 2.16 |
| 21 | 28.54 | 3.33 | 20.71 | 4.50 | 6.40 | 1.73 | 1.40 |
| 20 | 28.51 | 3.48 | 19.84 | 5.20 | 4.00 | 1.01 | 0.81 |
| 19 | 28.48 | 3.61 | 18.91 | 5.96 | 2.10 | 0.57 | 0.46 |
| 18 | 28.46 | 3.72 | 17.95 | 6.79 | 1.40 | 0.32 | 0.29 |
| 17 | 28.44 | 3.81 | 16.97 | 7.65 | 1.00 | 0.18 | 0.16 |

Πίν. 4.8. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του ταμιευτήρα Γαδουρά με βάση συνθετικές χρονοσειρές (1000 χρόνια) για τα σενάρια εισροών B1-B3.

| Στόχος ετήσιας απόληψης (hm ³) | Μέση ετήσια απορροή (hm ³) | Καθαρή μέση ετήσια εξάτμιση (hm ³) | Μέση ετήσια απόληψη (hm ³) | Μέση ετήσια υπεχείλιση (hm ³) | Πιθανότητα αστοχίας (%) | | Ογκο- μετρική |
|---|---|---|---|---|-------------------------|---------|------------------|
| | | | | | Ετήσια | Μηνιαία | |
| <i>Περίπτωση B1 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.0 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 31.79 | 3.10 | 22.99 | 5.70 | 16.00 | 5.16 | 4.22 |
| 23.25 | 31.77 | 3.17 | 22.44 | 6.16 | 13.90 | 4.28 | 3.49 |
| 23 | 31.77 | 3.20 | 22.25 | 6.32 | 13.40 | 3.99 | 3.26 |
| 22 | 31.75 | 3.29 | 21.46 | 7.00 | 9.10 | 3.00 | 2.45 |
| 21 | 31.72 | 3.38 | 20.62 | 7.73 | 7.30 | 2.18 | 1.82 |
| 20 | 31.70 | 3.47 | 19.74 | 8.50 | 5.50 | 1.56 | 1.29 |
| 19 | 31.69 | 3.55 | 18.84 | 9.30 | 3.50 | 1.07 | 0.86 |
| 18 | 31.67 | 3.63 | 17.90 | 10.14 | 2.10 | 0.68 | 0.56 |
| 17 | 31.65 | 3.70 | 16.94 | 11.00 | 1.50 | 0.38 | 0.33 |
| 16 | 31.64 | 3.77 | 15.97 | 11.90 | 0.80 | 0.20 | 0.18 |
| <i>Περίπτωση B2 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.1 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 34.92 | 3.22 | 23.36 | 8.33 | 11.00 | 3.24 | 2.66 |
| 23.25 | 34.90 | 3.28 | 22.75 | 8.88 | 8.40 | 2.66 | 2.17 |
| 23 | 34.90 | 3.30 | 22.53 | 9.06 | 7.90 | 2.47 | 2.02 |
| 22 | 34.88 | 3.37 | 21.67 | 9.83 | 6.10 | 1.83 | 1.51 |
| 21 | 34.86 | 3.45 | 20.78 | 10.63 | 4.60 | 1.30 | 1.07 |
| 20 | 34.84 | 3.52 | 19.86 | 11.46 | 2.80 | 0.89 | 0.72 |
| 19 | 34.82 | 3.58 | 18.91 | 12.33 | 1.80 | 0.58 | 0.48 |
| 18 | 34.81 | 3.65 | 17.95 | 13.22 | 1.40 | 0.38 | 0.30 |
| 17 | 34.79 | 3.70 | 16.97 | 14.12 | 0.80 | 0.21 | 0.19 |
| 16 | 34.78 | 3.75 | 15.98 | 15.04 | 0.70 | 0.13 | 0.10 |
| <i>Περίπτωση B3 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 0.9 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 28.67 | 2.88 | 22.42 | 3.37 | 21.90 | 7.68 | 6.60 |
| 23.25 | 28.65 | 2.97 | 21.93 | 3.75 | 18.50 | 6.71 | 5.68 |
| 23 | 28.64 | 3.00 | 21.76 | 3.88 | 17.80 | 6.37 | 5.39 |
| 22 | 28.62 | 3.12 | 21.07 | 4.44 | 15.50 | 5.08 | 4.24 |
| 21 | 28.60 | 3.23 | 20.33 | 5.04 | 12.20 | 3.92 | 3.20 |
| 20 | 28.58 | 3.34 | 19.54 | 5.70 | 9.00 | 2.83 | 2.31 |
| 19 | 28.55 | 3.45 | 18.69 | 6.41 | 6.50 | 1.94 | 1.61 |
| 18 | 28.53 | 3.55 | 17.80 | 7.18 | 4.60 | 1.35 | 1.08 |
| 17 | 28.51 | 3.65 | 16.89 | 7.98 | 2.40 | 0.83 | 0.67 |
| 16 | 28.50 | 3.74 | 15.93 | 8.82 | 1.80 | 0.49 | 0.41 |
| <i>Περίπτωση B1α - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.0 - Κατώτατη στάθμη + 95 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 31.82 | 2.96 | 22.89 | 5.97 | 17.00 | 5.61 | 4.62 |
| 23.25 | 31.81 | 3.02 | 22.35 | 6.43 | 14.90 | 4.70 | 3.86 |
| 23 | 31.80 | 3.04 | 22.17 | 6.59 | 14.40 | 4.43 | 3.63 |
| 22 | 31.78 | 3.12 | 21.40 | 7.26 | 11.20 | 3.37 | 2.75 |
| 21 | 31.76 | 3.20 | 20.57 | 7.99 | 7.90 | 2.50 | 2.06 |
| 20 | 31.74 | 3.29 | 19.70 | 8.75 | 6.00 | 1.77 | 1.49 |
| 19 | 31.73 | 3.36 | 18.81 | 9.55 | 4.50 | 1.25 | 1.01 |
| 18 | 31.71 | 3.44 | 17.88 | 10.39 | 2.40 | 0.81 | 0.66 |
| 17 | 31.69 | 3.51 | 16.93 | 11.26 | 1.60 | 0.47 | 0.41 |
| 16 | 31.68 | 3.57 | 15.96 | 12.15 | 0.80 | 0.25 | 0.23 |

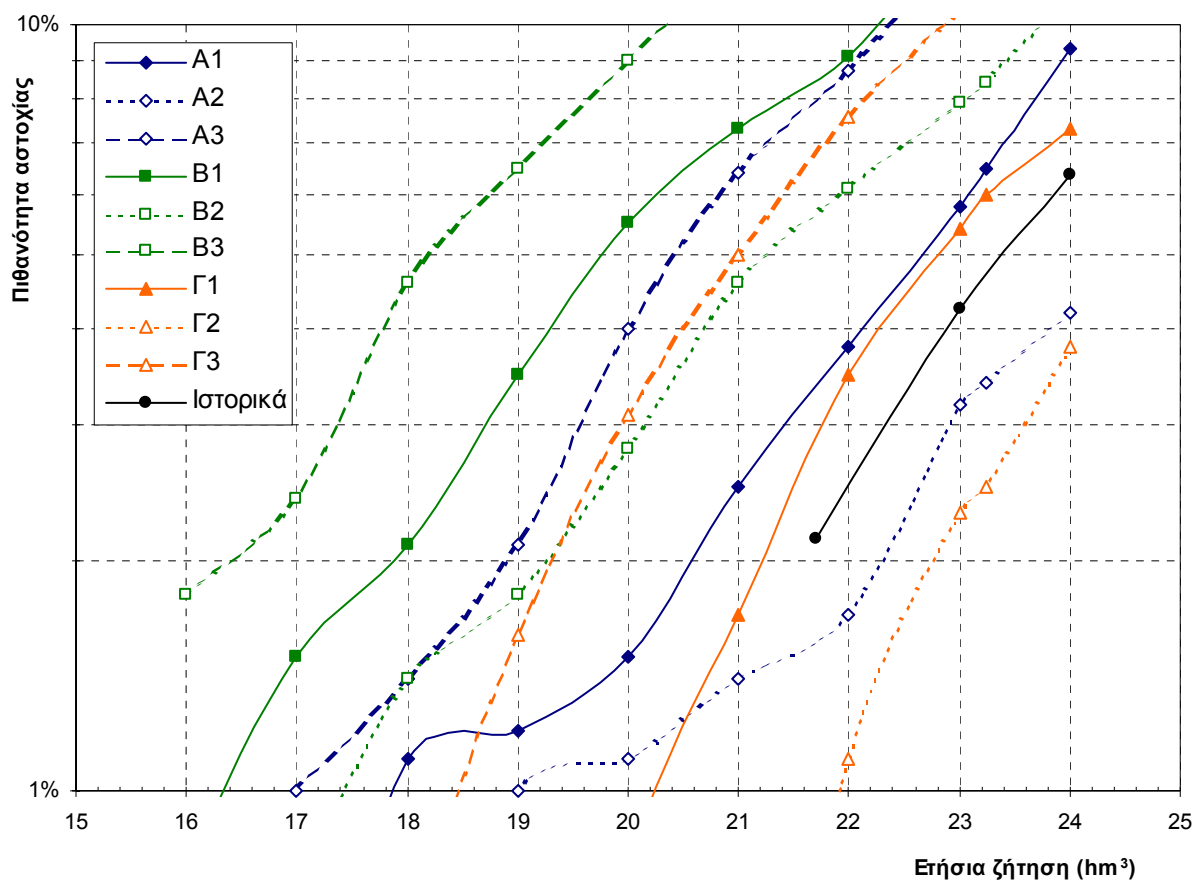
Πίν. 4.9. Αποτελέσματα της προσομοίωσης του ταμιευτήρα Γαδουρά με βάση συνθετικές χρονοσειρές (1000 χρόνια) για τα σενάρια εισροών Γ1-Γ3.

| Στόχος ετήσιας απόληψης (hm ³) | Μέση ετήσια απορροή (hm ³) | Καθαρή μέση ετήσια εξάτμιση (hm ³) | Μέση ετήσια απόληψη (hm ³) | Μέση ετήσια υπεχείλιση (hm ³) | Πιθανότητα αστοχίας (%) | | |
|---|---|---|---|---|-------------------------|---------|------------------|
| | | | | | Ετήσια | Μηνιαία | Ογκο- μετρική |
| <i>Περίπτωση Γ1 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.0 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 31.91 | 3.28 | 23.65 | 4.99 | 7.30 | 1.87 | 1.48 |
| 23.25 | 31.89 | 3.36 | 23.00 | 5.53 | 6.00 | 1.48 | 1.08 |
| 23 | 31.89 | 3.39 | 22.78 | 5.72 | 5.40 | 1.29 | 0.97 |
| 22 | 31.86 | 3.49 | 21.87 | 6.50 | 3.50 | 0.84 | 0.59 |
| 21 | 31.84 | 3.58 | 20.94 | 7.32 | 1.70 | 0.40 | 0.31 |
| 20 | 31.82 | 3.67 | 19.98 | 8.17 | 0.80 | 0.18 | 0.11 |
| 19 | 31.80 | 3.75 | 19.00 | 9.05 | 0.20 | 0.03 | 0.01 |
| 18.9 | 31.80 | 3.75 | 18.90 | 9.14 | 0.10 | 0.02 | 0.01 |
| <i>Περίπτωση Γ2 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.1 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 35.05 | 3.42 | 23.85 | 7.78 | 3.80 | 0.88 | 0.63 |
| 23.25 | 35.03 | 3.48 | 23.16 | 8.39 | 2.50 | 0.59 | 0.41 |
| 23 | 35.02 | 3.50 | 22.92 | 8.60 | 2.30 | 0.49 | 0.33 |
| 22 | 35.00 | 3.58 | 21.97 | 9.45 | 1.10 | 0.22 | 0.13 |
| 21 | 34.98 | 3.65 | 21.00 | 10.34 | 0.20 | 0.03 | 0.02 |
| 20.8 | 34.98 | 3.66 | 20.80 | 10.52 | 0.10 | 0.01 | 0.00 |
| <i>Περίπτωση Γ3 - Συντελεστής αναγωγής απορροής 0.9 - Κατώτατη στάθμη + 90 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 28.80 | 2.99 | 23.18 | 2.63 | 15.60 | 4.40 | 3.40 |
| 23.25 | 28.78 | 3.10 | 22.65 | 3.03 | 11.50 | 3.40 | 2.60 |
| 23 | 28.77 | 3.14 | 22.46 | 3.18 | 10.40 | 2.99 | 2.36 |
| 22 | 28.74 | 3.29 | 21.66 | 3.79 | 7.60 | 2.03 | 1.56 |
| 21 | 28.71 | 3.43 | 20.80 | 4.48 | 5.00 | 1.28 | 0.98 |
| 20 | 28.68 | 3.55 | 19.89 | 5.24 | 3.10 | 0.81 | 0.57 |
| 19 | 28.65 | 3.66 | 18.94 | 6.05 | 1.60 | 0.37 | 0.30 |
| 18 | 28.63 | 3.76 | 17.98 | 6.89 | 0.60 | 0.14 | 0.10 |
| 17 | 28.61 | 3.84 | 17.00 | 7.77 | 0.10 | 0.02 | 0.01 |
| <i>Περίπτωση Γ1α - Συντελεστής αναγωγής απορροής 1.0 - Κατώτατη στάθμη + 95 m</i> | | | | | | | |
| 24 | 31.95 | 3.12 | 23.59 | 5.24 | 8.80 | 2.22 | 1.69 |
| 23.25 | 31.93 | 3.20 | 22.96 | 5.78 | 6.70 | 1.67 | 1.26 |
| 23 | 31.93 | 3.22 | 22.74 | 5.97 | 6.10 | 1.48 | 1.13 |
| 22 | 31.90 | 3.31 | 21.85 | 6.74 | 4.10 | 0.98 | 0.70 |
| 21 | 31.88 | 3.40 | 20.92 | 7.56 | 2.30 | 0.53 | 0.37 |
| 20 | 31.86 | 3.48 | 19.97 | 8.41 | 1.10 | 0.22 | 0.14 |
| 19 | 31.84 | 3.55 | 19.00 | 9.29 | 0.20 | 0.03 | 0.02 |
| 18.9 | 31.84 | 3.56 | 18.90 | 9.38 | 0.10 | 0.02 | 0.01 |

Επιπλέον, στο Σχ. 4.2 γίνεται γραφική σύγκριση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα για όλες τις προσομοιώσεις που εξετάστηκαν τόσο με τα ιστορικά, όσο και με τα συνθετικά δεδομένα και για κατώτατη στάθμη ταμιευτήρα στα +90 m. Ειδικότερα, στο σχήμα αυτό απεικονίζεται για κάθε σενάριο η μεταβολή της ετήσιας πιθανότητας αστοχίας με τη ζήτηση. Γενικώς παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για τα διάφορα σενάρια αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους, γεγονός που δείχνει τη σημαντικά μεγάλη αβεβαιότητα ως προς τον εισρέοντα και τελικώς τον απολήψιμο όγκο από τον ταμιευτήρα. Αξίζει να αναφερθεί ότι, όπως προκύπτει από το Σχ. 4.2, η διαφοροποίηση της μηνιαίας στοχαστική δομή της απορροής

επηρεάζει σημαντικά την απόληψη, ακόμη και όταν η ετήσια δομή παραμένει σταθερή (βλ. π.χ. τα αποτελέσματα των σεναρίων A1 και B1 που έχουν τα ίδια ετήσια στατιστικά χαρακτηριστικά).

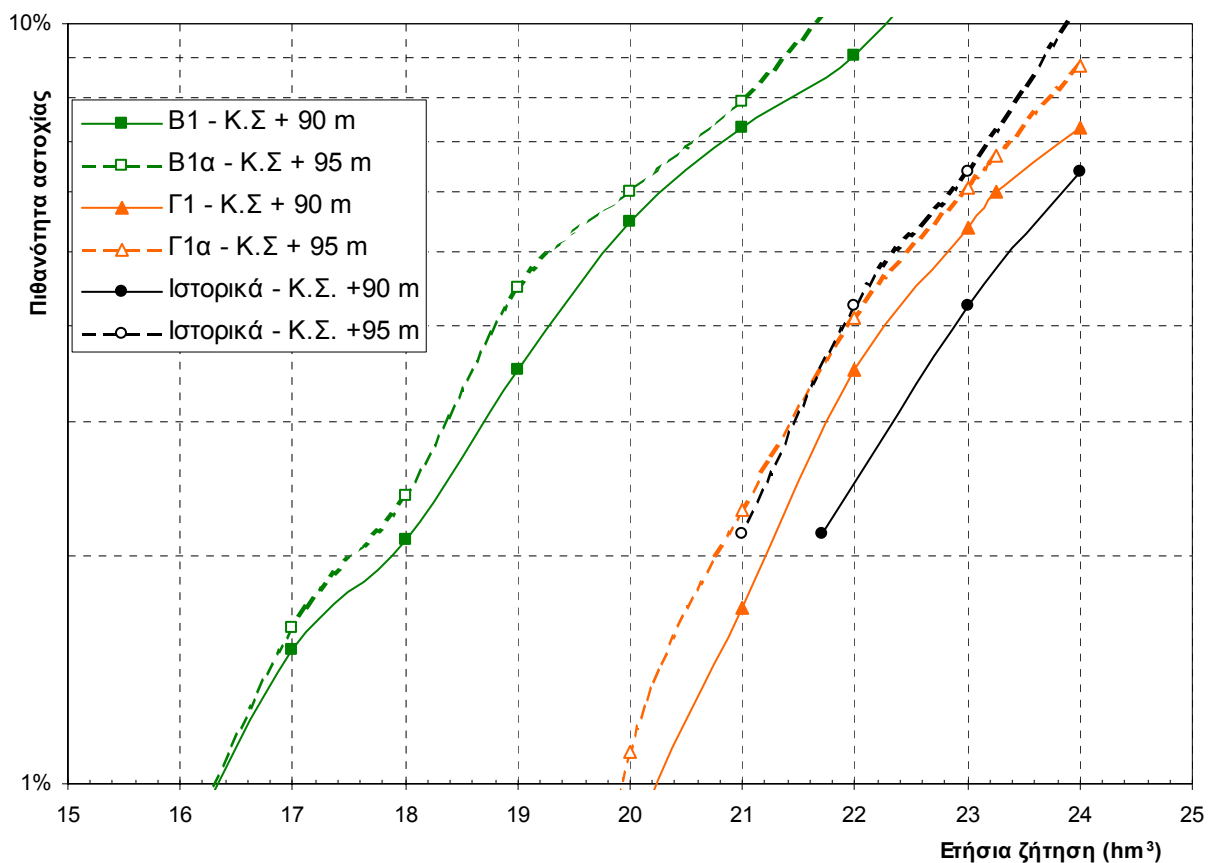
Ως προς τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα ιστορικά δεδομένα σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των συνθετικών σεναρίων, παρατηρούμε ότι τα πρώτα βρίσκονται πλησιέστερα προς αυτά των σεναρίων A1, A2 και Γ1. Βεβαίως, οι προσομοιώσεις με βάση τις μεγαλύτερου μήκους συνθετικές χρονοσειρές επιτρέπουν την πιο αξιόπιστη εκτίμηση των απολήξιμων όγκων, ιδίως στην περιοχή των πολύ μικρών πιθανοτήτων υπέρβασης. Και αυτές όμως υπόκεινται στις αβεβαιότητες που προκύπτουν από την έλλειψη μετρήσεων απορροής.



Σχ. 4.2. Γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του ταμιευτήρα Γαδουρά με βάση ιστορικές και συνθετικές χρονοσειρές για όλα τα σενάρια εισροών που εξετάστηκαν και για κατώτατη στάθμη ταμιευτήρα +90 m.

Τέλος στο Σχ. 4.3 δίνεται γραφική σύγκριση των προσομοιώσεων για διαφορετικές κατώτατες στάθμες ταμιευτήρα (+90 m και +95 m). Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που η προσομοίωση γίνεται με τα ιστορικά δεδομένα, η διαφορά των απολήψεων στις δύο περιπτώσεις κατώτατης στάθμης είναι της τάξης του 1 hm³ ετησίως. Ωστόσο, αυτή η διαφορά μειώνεται στα 0.2-0.3 hm³ ετησίως όταν χρησιμοποιούνται οι μεγάλης μήκους συνθετικές

χρονοσειρές. Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της τελευταίας περίπτωσης είναι πιο αξιόπιστα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επίπτωση της μετατόπισης της κατώτατης στάθμης από τα +90 m στα +95 m είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με τις υδρολογικές αβεβαιότητες της λεκάνης.



Σχ. 4.3. Γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του ταμιευτήρα Γαδουρά για κατώτατη στάθμη ταμιευτήρα +90 m και +95 m με βάση ιστορικές και συνθετικές χρονοσειρές για τα σενάρια εισροών B1 και Γ1.

4.6 Συμπεράσματα και συγκρίσεις

Το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη λεκάνη δεν υπάρχουν συστηματικές άμεσες μετρήσεις απορροής δημιουργεί μεγάλες αβεβαιότητες ως προς ποσότητες νερού που θα εισρέουν στον ταμιευτήρα. Οι αβεβαιότητες αντιμετωπίστηκαν στην παρούσα μελέτη με την εισαγωγή διάφορων σεναρίων (συνολικά εννιά), τα οποία αναφέρονται στη στοχαστική δομή των μηνιαίων απορροών, αλλά και στο μέσο ετήσιο μέγεθος της απορροής της λεκάνης. Για όλα τα σενάρια απορροής δημιουργήθηκαν μηνιαίες συνθετικές χρονοσειρές μεγέθους 1000 ετών, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν σημαντική αβεβαιότητα ως προς τις τελικώς απολήψιμες ποσότητες νερού από τον ταμιευτήρα, για δεδομένο επίπεδο

αξιοπιστίας ή πιθανότητα αστοχίας (Σχ. 4.2). Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στον Πίν. 4.10.

Πίν. 4.10. Συνοπτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ταμιευτήρα Γαδουρά με βάση ιστορικές και συνθετικές χρονοσειρές για όλα τα σενάρια εισροών που εξετάστηκαν και για κατώτατη στάθμη ταμιευτήρα + 90 m.

| Πιθανότητα αστοχίας (%) | Αξιοπιστία (%) | Απόληψη (hm ³) – Εκτίμηση με βάση: | | | |
|-------------------------|----------------|--|--|--|---------------------------------------|
| | | Ιστορικά δεδομένα | Συνθετικά δεδομένα – Σενάριο A1 (μέσο) | Συνθετικά δεδομένα – Ελάχιστη εκτίμηση | Συνθετικά δεδομένα – Μέγιστη εκτίμηση |
| 1 | 99 | < 21.7 | 17.8 | < 16 | 21.9 |
| 2 | 98 | < 21.7 | 20.5 | 16.5 | 22.7 |
| 5 | 95 | 23.4 | 22.6 | 18.3 | > 24 |
| 10 | 90 | >24 | > 24 | 20.4 | > 24 |

Στην αρχική προμελέτη (Υδροέρρευνα κ.ά, 1979) είχε εκτιμηθεί με τη μέθοδο Pleschow ότι για ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα 60.9 hm³ και για αποκλειστικώς υδρευτική χρήση του νερού η απολήψιμη ποσότητα ανέρχεται σε 25 hm³ ετησίως με αξιοπιστία 90%. Αντίστοιχα, είχε εκτιμηθεί ότι για ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα 60.3 hm³ και για αποκλειστικώς αρδευτική χρήση του νερού (η οποία είναι δυσμενέστερη λόγω εντονότερων διακυμάνσεων) η απολήψιμη ποσότητα νερού ανέρχεται σε 20 hm³ ετησίως με αξιοπιστία 97%. Συγκρίνοντας τα μεγέθη αυτά με εκείνα του Σχ. 4.2, παρατηρούμε ότι υπάρχει γενική συμβατότητα, λαμβάνοντας πάντως υπόψη ότι υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στα πρωτογενή δεδομένα απορροής κατά Thornthwaite που χρησιμοποιήθηκαν, όσο και στην κατανομή των απολήψεων στο έτος. Στην ίδια μελέτη είχε γίνει και άλλη εκτίμηση με χρήση στοχαστικής προσομοίωσης με το μοντέλο Thomas & Fiering, τα αποτελέσματα της οποίας ήταν αρκετά πιο αισιόδοξα και δεν συμβαδίζουν τόσο με αυτά της παρούσας μελέτης.

Εξ άλλου, σε νεότερη μελέτη (Γραφείο Μαχαίρα κ.ά., 1996), χρησιμοποιώντας προσομοίωση με δεδομένα απορροής κατά Thornthwaite 45 ετών αλλά και με την εμπειρική μέθοδο Gould εκτιμήθηκε ότι για ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα 63.5 hm³ η απολήψιμη ποσότητα νερού θα ανέλθει σε 23.25 hm³ ετησίως με αξιοπιστία 98.5%. Ωστόσο, έγινε πρόβλεψη ότι σε μια νέα υδρολογική μελέτη που θα βασίζεται στα νέα υδρολογικά δεδομένα, η καθαρή μέση απόληψη θα μειωνόταν. Η πρόγνωση αυτή αποδείχτηκε ορθή, όπως υποδεικνύουν τα πιο πάνω αποτελέσματα, τα οποία γενικά δίνουν μικρότερες απολήψεις. Ακόμη, τα νεότερα αποτελέσματα, ενόψει και των μεγάλων αβεβαιοτήτων που συζητήθηκαν πιο πάνω, υποδεικνύουν ότι θα ήταν παρακινδυνευμένη η τυχόν μείωση της ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα σε σχέση με τις τιμές που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4.

- Γραφείο Μαχαίρα, Γ. Καφετζόπουλος - Δ. Μπενάκης - Ι. Πριντάτκο, Υδροεξυγιαντική, και Π. Κέρχουλας, Πρόδρομη έκθεση, *Μελέτη Ύδρευσης Ευρύτερης Περιοχής Ρόδου, Υδραγωγείου και Εγκαταστάσεων Καθαρισμού Νερού από το Φράγμα Γαδουρά*, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Αθήνα, 1997.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Κωνσταντινίδης, Δ. και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρολογική μελέτη, *Μελέτη φράγματος Φανερωμένης Μεσαράς Κρήτης*, Οριστική μελέτη, Τεύχος 3, Μελετητής Κωνσταντινίδης & Γραφείο Δοξιάδη, Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα, 1988.
- Κωνσταντινίδης, Δ. και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρολογική μελέτη, Έκθεση, *Μελέτη φράγματος Πλακιώτισσας Μεσαράς Κρήτης*, Οριστική μελέτη, Τεύχος 3, Μελετητής Κωνσταντινίδης & Γραφείο Δοξιάδη, Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα, 1986.
- Υδροέρευνα, Υδροδομική, Λ. Λαζαρίδης – Χ. Καπετανάκης, Υδρολογική έρευνα υδατικού ισοζυγίου, *Προμελέτη Φράγματος Γαδουρά, Μελέτη Υδρεύσεως Ευρύτερας Περιοχής Πόλεως Ρόδου*, Νομαρχιακό Ταμείο Δωδεκανήσου, Ρόδος, 1979.
- Φαντίδης, Θ., *Ανάλυση Μετεωρολογικών Στοιχείων Νομού Δωδεκανήσου*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Δωδεκανήσου, Ρόδος, 1997.
- Fernandez B. and Salas J. D. (1990). Gamma-autoregressive models for stream flow simulation. *J. Hydraul. Eng.*, **116**(11), 1403-1414.
- Lawrance A.J. (1982). The innovation distribution of a gamma distributed autoregressive process. *Scandinavian J. Statistics.*, **9**(4), 234-236.
- Lawrance A. J. and Lewis P. A. W. (1981). A new autoregressive time series model in exponential variables [NEAR(1)]. *Adv. Appl. Prob.*, **13**(4), 826-845.