

2.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ (ΕΕΥΔ)

2.5.1 Γενικά

Το εκμεταλλεύσιμο επιφανειακό υδατικό δυναμικό (ΕΕΥΔ) ορίστηκε στο υποκεφάλαιο 2.1 ως το τμήμα εκείνο του θεωρητικού επιφανειακού υδατικού δυναμικού (ΘΕΥΔ) που είναι δυνατόν να αποληφθεί πραγματικά με βάση όλα τα υφιστάμενα (ή μελετηθέντα σε οποιοδήποτε στάδιο) έργα στην εξεταζόμενη λεκάνη. Από τον ορισμό αυτό προκύπτουν τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό του ΕΕΥΔ:

α) Το ΘΕΥΔ δηλαδή η απορροή της λεκάνης, όπως ορίστηκε προηγουμένως.

β) Δεδομένα σχετικά με τα έργα που επιτρέπουν την απόληψη νερού (υδροληπτικά έργα).

Η ταυτόχρονη θεώρηση των υδροληπτικών έργων και των φυσικών διεργασιών στην εξεταζόμενη λεκάνη εισάγει δυσκολίες στον υπολογισμό του ΕΕΥΔ καθόσον

α) η εκτίμηση εξαρτάται απόλυτα από ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των έργων,

β) η εκτίμηση εξαρτάται και από τον τρόπο λειτουργίας των έργων, και

γ) η λειτουργία των έργων εισάγει πρόσθετες φυσικές διεργασίες οι οποίες, με τη σειρά τους, δημιουργούν πρόσθετες απώλειες και αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα (π.χ., απώλειες εξάτμισης και υπόγειων διαφυγών από τα μινιούρα).

Μέχρι στιγμής, δεν υφίσταται μεθοδολογία εκτίμησης του ΕΕΥΔ που να τυχάνει γενικής εφαρμογής σε κάθε περίπτωση. Η ποικιλία των μεθοδολογιών που προτάθηκαν είναι εξαιρετικά μεγάλη. Αυτές εντάσσονται στο επιστημονικό πεδίο που είναι γνωστό ως ανάλυση συστημάτων (Loucks κ.ά., 1981, Mays και Tung, 1996).

Για την εκτίμηση ενός μεγίστου του ΕΕΥΔ θεωρείται ότι η λεκάνη απορροής διαθέτει (υποθετικά) έναν ταμιευτήρα μεγάλων διαστάσεων στην έξοδό της. Με την ύπαρξη του ταμιευτήρα αυτού προκύπτει το μέγιστο ΕΕΥΔ της λεκάνης απορροής. Πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις προκύπτουν με βάση τα έργα που είναι δυνατόν να κατασκευασθούν στη λεκάνη και συνήθως υπολείπονται του μεγίστου ΕΕΥΔ.

Η εκτίμηση του ΕΕΥΔ είναι ένα σχετικά δύσκολο θέμα. Τυπικές απλές περιπτώσεις είναι:

1. Λεκάνη απορροής με έργο υδροληψίας χωρίς ταμίευση στην έξοδό της.
2. Λεκάνη απορροής με έναν ταμιευτήρα στην έξοδό της.

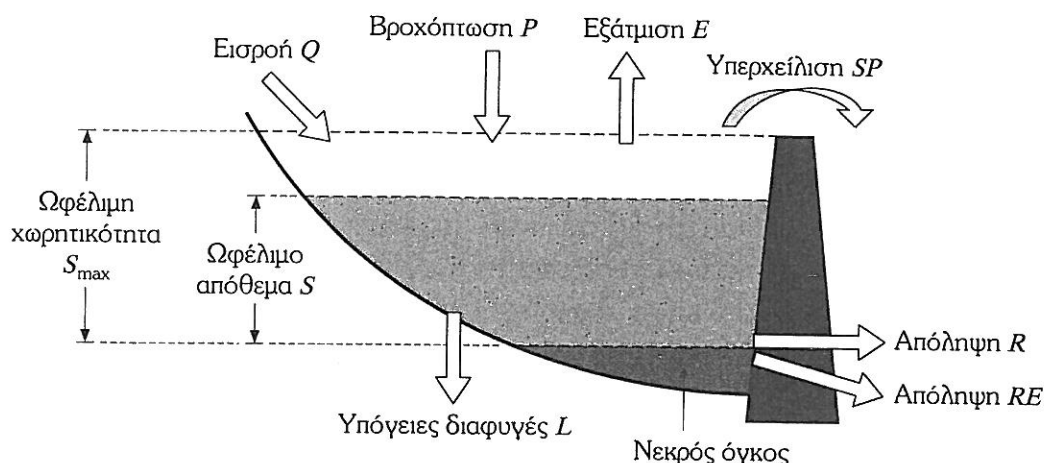
Εδώ θα εξετάσουμε διεξοδικά μόνο την περίπτωση λεκάνης απορροής με έναν ταμιευτήρα στην έξοδό της.

2.5.2 Εκτίμηση του ΕΕΥΔ Λεκάνης Απορροής με Ταμιευτήρα στην Έξοδό της

Έστω μια λεκάνη απορροής στην έξοδο της οποίας έχει κατασκευαστεί το φράγμα και ο ταμιευτήρας του Σχήματος 2.4. Στη σύγχρονη εποχή, ένας ταμιευτήρας εξυπηρετεί πολλαπλές χρήσεις νερού οι οποίες είναι:

- Καταναλωτικές χρήσεις (ύδρευση, άρδευση).
- Μη καταναλωτικές χρήσεις (παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, ι-χθυοκαλλιέργεια, αναψυχή, ναυσιπλοΐα, αντιπλημμυρική προστασία, διατήρηση ποτάμιων οικοσυστημάτων).

Ιδιαίτερη σημασία απέκτησε κατά τα τελευταία χρόνια η απαίτηση για διατήρηση του υδάτινου περιβάλλοντος του θεωρούμενου υδατορεύματος. Η απαίτηση αυτή εκφράζεται συνήθως υπό τη μορφή της λεγόμενης «οικολογικής παροχής» που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα νερού που εξασφαλίζει τη διατήρηση του οικοσυστήματος (αβιοτικού και βιοτικού) κατόπιν του ταμιευτήρα σε καλή κατάσταση.* Στο ίδιο πλαίσιο εγγράφεται και η σύγχρονη τάση για όσο το δυνατό ηπιότερη εκμετάλλευση των υδατικών πόρων και όσο το δυνατό μικρότερη διαταραχή της φυσικής διαίτας του νερού (π.χ., κατασκευή φραγμάτων μικρής χωρητικότητας).



Σχ. 2.4: Ταμιευτήρας και μεγέθη που υπεισέρχονται στην εκτίμηση του ΕΕΥΔ.

* Σημειώνεται ότι ο όρος «οικολογική παροχή» δεν είναι ακριβής γιατί το μέγεθος αυτό θα έπρεπε να είχε προκύψει από τις ελάχιστες απαιτήσεις διατήρησης του κατόπιν οικοσυστήματος. Επειδή αυτό συνήθως δεν γίνεται, αντί του όρου «οικολογική παροχή» μπορούμε να χρησιμοποιούμε τον όρο «ελάχιστη απαιτούμενη παροχή διέλευσης».

Η ταυτόχρονη εξέταση όλων των παραπάνω χρήσεων νερού για την εκτίμηση του ΕΕΥΔ απαιτεί ένα υψηλό επίπεδο ανάλυσης η πολυπλοκότητα του οποίου δυσχεραίνει την εισαγωγή στο θέμα. Γι' αυτό, επιλέξαμε να εξετάσουμε μια απλή σχετικά περίπτωση ταμιευτήρα με μια μόνο καταναλωτική χρήση με ετήσια ζήτηση νερού D και οικολογική παροχή με σταθερή τιμή ανά μήνα του έτους.

Η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα (όγκος από τη στάθμη υδροληψίας μέχρι την ανώτατη κανονική στάθμη, συνήθως τη στάθμη υπερχειλίσσης) είναι ίση με S_{\max} .

Σε ένα χρονικό διάστημα διάρκειας Δt , από το χρόνο t έως το χρόνο $t + \Delta t$, στο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα συμβάλλουν τα παρακάτω μεγέθη:

Εισροές

- Συνολική απορροή υδατορευμάτων που εισρέουν στον ταμιευτήρα Q_t σε όρους όγκου νερού στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$
- Βροχόπτωση πάνω στην επιφάνεια του νερού του ταμιευτήρα P_t , σε όρους ύψους νερού στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$.

Εκροές

- Εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα E_t , σε όρους ύψους νερού στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$
- Υπόγεια διαφυγή L_t , σε όρους όγκου νερού στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$
- Παροχή διέλευσης RE_t για διατήρηση του κατάντη οικοσυστήματος σε όρους όγκου νερού στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$
- Απόληψη R_t για καταναλωτική χρήση σε όρους όγκου νερού στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$
- Υπερχειλίση SP_t σε όρους όγκου στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$.

Ωφέλιμο απόθεμα νερού: 0.0 στην κατώτατη και S_{\max} στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας (Ανώτατη κανονική στάθμη = Στάθμη στέψης του υπερχειλιστή)

- Στην αρχή του χρονικού διαστήματος $[t, t + \Delta t]$, S_t
- Στο τέλος του χρονικού διαστήματος $[t, t + \Delta t]$, $S_{t + \Delta t}$

Αγνοώντας τις υπόγειες διαφυγές η εξίσωση συνέχειας γράφεται

$$S_{t + \Delta t} = S_t + Q_t + \gamma P_t A_t - \gamma E_t A_t - R_t - RE_t - SP_t \quad (2.11)$$

όπου γ συντελεστής μετατροπής μονάδων και A_t είναι το εμβαδόν της επιφάνειας (καθρέφτη) του ταμιευτήρα στο χρόνο t . Στην εξίσωση αυτή υπάρχουν τέσσερα άγνωστα μεγέθη: $S_{t + \Delta t}$, R_t , RE_t και SP_t . Συνεπώς, απαιτούνται τρεις ακόμη εξισώσεις και, γι' αυτό, γίνονται παραδοχές. Πρώτα θεωρείται ότι εισρέει το νερό της απορροής και της βροχόπτωσης, πραγ-

ματοποιείται η εξάτμιση και, έτσι, το προσωρινά διαθέσιμο νερό για κάθε χρήση είναι

$$SA_t = S_t + Q_t + \gamma P_t A_t - \gamma E_t A_t \quad (2.12)$$

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η απόληψη για τη διατήρηση του κατάντη οικοσυστήματος σύμφωνα με ορισμένο κανόνα που λέγεται «κανόνας λειτουργίας». Στη βιβλιογραφία έχει προταθεί ποικιλία τέτοιων κανόνων (π.χ., Nalbantis και Koutsoyiannis, 1997, ReVelle, 1999). Συνήθης είναι η χρήση του τυπικού κανόνα λειτουργίας που βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- α) Εφόσον το νερό στον ταμιευτήρα επαρκεί, λαμβάνεται ποσότητα ακριβώς ίση με τη ζήτηση νερού για διατήρηση του κατάντη οικοσυστήματος q_t .
- β) Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβάνεται όλο το διαθέσιμο νερό.

Ο κανόνας γράφεται ως εξής

$$RE_t = \min(SA_t, q_t) \quad (2.13)$$

Στη συνέχεια γίνεται απόληψη για καταναλωτική χρήση σύμφωνα με τον ίδιο κανόνα:

- α) Εφόσον το νερό στον ταμιευτήρα επαρκεί, λαμβάνεται ποσότητα ακριβώς ίση με τη ζήτηση νερού D_t .
- β) Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβάνεται όσο νερό είναι διαθέσιμο.

Ο κανόνας γράφεται ως εξής

$$R_t = \min(SA_t - RE_t, D_t) \quad (2.14)$$

Με βάση το νερό που απομένει, γίνεται ο έλεγχος της ενδεχόμενης υπερχειλίσης. Αν $SA_t - R_t - RE_t > S_{\max}$ ή αλλιώς $SA_t - R_t - RE_t - S_{\max} > 0$ η ποσότητα που υπερβαίνει τη χωρητικότητα υπερχειλίζει. Αλλιώς η υπερχειλίση είναι μηδενική.

Σε αναλυτική μορφή:

$$SP_t = \max(SA_t - R_t - RE_t - S_{\max}, 0) \quad (2.15)$$

Η εξίσωση (2.11) γράφεται ως εξής

$$S_{t+\Delta t} = SA_t - R_t - RE_t - SP_t \quad (2.16)$$

Οι εξισώσεις (2.12), (2.13), (2.14), (2.15) και (2.16) έχουν πέντε άγνωστα μεγέθη (SA_t , RE_t , R_t , SP_t και $S_{t+\Delta t}$) και η διαδοχική εφαρμογή τους αρκεί για τον υπολογισμό των αγνώστων. Αυτή ακριβώς η διαδικασία

θα αναφέρεται στο εξής ως προσομοίωση λειτουργίας του ταμιευτήρα. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι τα υδρολογικά μεγέθη Q_t , P_t , E_t καθώς και η έκταση του ταμιευτήρα A_t συναρτήσει του αποθέματος S_t . Διευκρινίζεται ότι το μέγεθος E_t είναι η *δυναμική εξάτμιση* από ελεύθερη επιφάνεια νερού.

Για την εκτίμηση του εκμεταλλεύσιμου επιφανειακού υδατικού δυναμικού (ΕΕΥΔ) απαιτούνται, γενικά, μακρές χρονοσειρές των μεγεθών Q_t , P_t , και E_t . Πολλές φορές, χρησιμοποιούνται ιστορικές χρονοσειρές (από μετρήσεις) αλλά, όπως σχολιάζεται παρακάτω αυτές δεν αρκούν για ασφαλείς στατιστικές εκτιμήσεις. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ολόκληρος κλάδος της υδρολογίας που ασχολείται με την ανάλυση χρονοσειρών (Time Series Analysis) και την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους (Box και Jenkins, 1970).

Θεωρούμε ότι η ετήσια ζήτηση νερού από τον ταμιευτήρα είναι ίση την άγνωστη τιμή D . Η κατανομή της στους μήνες του έτους θεωρείται ότι εξαρτάται αποκλειστικά από το είδος και τη σύνθεση των χρήσεων νερού που αντιστοιχούν στη ζήτηση. Η ζήτηση νερού το μήνα j ($j = 1, 2, \dots, 12$) είναι

$$D_j = \lambda_j D \quad (2.17)$$

όπου λ_j ο συντελεστής ανισοκατανομής της ετήσιας ζήτησης του μήνα j .

Σημειώνεται ότι αν η καταναλωτική χρήση αναφέρεται κυρίως σε κάλυψη αρδευτικών αναγκών η κατανομή της ζήτησης του νερού είναι εντελώς ανομοιομορφη με τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο να αντιπροσωπεύουν σχεδόν ολόκληρη τη ζήτηση.

Για μηνιαίο χρονικό βήμα, είναι βολικό ο χρόνος t να εκφράζεται με δύο δείκτες που χωρίζονται με κόμμα:

- ο πρώτος δείκτης i αντιπροσωπεύει συγκεκριμένο υδρολογικό έτος, ενώ
- ο δεύτερος δείκτης j αντιπροσωπεύει το μήνα j εντός του έτους i .

Έτσι, η πραγματική απόληψη το μήνα j του έτους i είναι $R_{i,j}$. Αν από τη λειτουργία του ταμιευτήρα προκύπτει ότι $R_{i,j} = D_j$ τότε έχουμε πλήρη κάλυψη της ζήτησης το συγκεκριμένο μήνα.

Πλήρης κάλυψη της ζήτησης σε ένα ολόκληρο υδρολογικό έτος i σημαίνει

$$\sum_{j=1}^{12} R_{i,j} = D \quad (2.18)$$

Η τυχαιότητα των υδρολογικών μεγεθών που υπεισέρχονται στη λειτουργία του ταμιευτήρα δεν επιτρέπει την πλήρη κάλυψη της ζήτησης στο 100% του χρόνου.

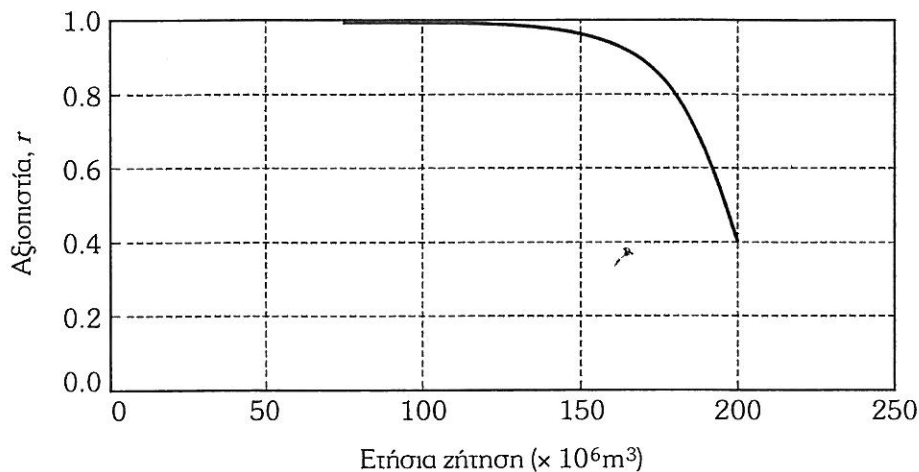
Ορίζεται ως αξιοπιστία ταμιευτήρα (reservoir reliability) το μέγεθος

$$r = P \left(\sum_{j=1}^{12} R_{i,j} = D \right) \quad (2.19)$$

όπου $P(\cdot)$ σημαίνει πιθανότητα, δηλαδή ως η πιθανότητα πλήρους κάλυψης της ζήτησης σε ετήσια βάση.

Για την εκτίμηση της αξιοπιστίας, προσομοιώνεται η λειτουργία του ταμιευτήρα (με βάση τις εξισώσεις 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 και 2.16) για μια σειρά N υδρολογικών ετών και εντοπίζεται το πλήθος των ετών N' με πλήρη κάλυψη της ζήτησης. Η εκτίμηση της αξιοπιστίας \hat{r} είναι:*

$$\hat{r} = \frac{N'}{N} \quad (2.20)$$



Σχ. 2.5: Παράδειγμα της σχέσης αξιοπιστίας - ζήτησης νερού σε μεμονωμένο ταμιευτήρα.

Σε κάθε τιμή ζήτησης νερού D , αντιστοιχεί μια τιμή της αξιοπιστίας r . Η σχέση $r = r(D)$ είναι φθίνουσα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η σχέση αυτή δίνει το εκμεταλλεύσιμο επιφανειακό υδατικό δυναμικό (ΕΕΥΔ) της λεκάνης. Συνήθως, όμως, το ΕΕΥΔ δεν δίνεται από την πλήρη σχέση $r = r(D)$ αλλά μόνο ως μια μεμονωμένη τιμή D^* για μια συγκεκριμένη τιμή της αξιοπιστίας r^* (π.χ., $r^* = 0.95$). Συνεπώς, για δεδομένη επιθυμητή αξιοπιστία r^* είναι απαραίτητο να επιλυθεί η εξίσωση

$$r(D) - r^* = 0 \quad (2.21)$$

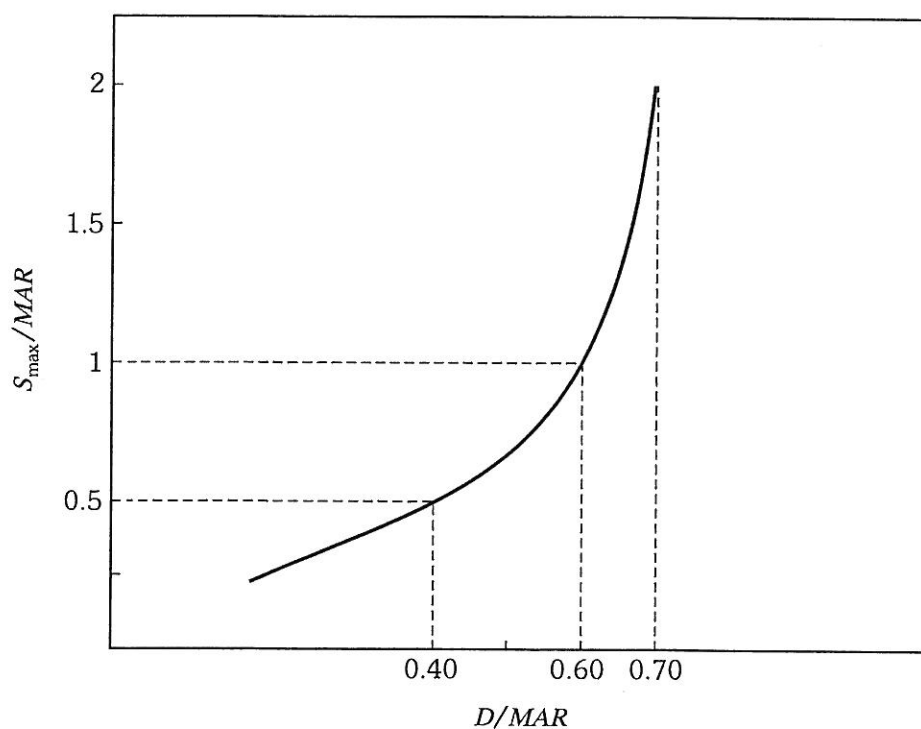
της οποίας η ρίζα D^* θα είναι μια εκτίμηση του ΕΕΥΔ. Προσεκτικότερη εξέταση της εξίσωσης αυτής δείχνει ότι, όποια μέθοδος και αν εφαρμοστεί για την επίλυσή της, θα απαιτηθούν πολλαπλές προσομοιώσεις της λειτουργίας του ταμιευτήρα. Για την ασφαλή εκτίμηση της αξιοπιστίας απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός ετών προσομοίωσης (αρκετών χιλιάδων) που είναι, σε κάθε περίπτωση, πολύ μεγαλύτερος του μήκους της διαθέσιμης ι-

* Αντί του όρου αξιοπιστίας (r) αναφέρεται πολλές φορές η πιθανότητα αστοχίας (a). Σημειώνεται ότι $r = 1 - a$.

στορικής χρονοσειράς. Για το λόγο αυτό, γίνεται παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών που είναι στατιστικά όμοιες με την αρχική, δηλαδή διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της αρχικής χρονοσειράς (π.χ. μέση τιμή, τυπική απόκλιση κ.λπ.). Με το αντικείμενο αυτό ασχολείται ιδιαίτερος κλάδος της υδρολογίας που αναφέρεται ως Στοχαστική Υδρολογία.

Η παραπάνω ανάλυση για τον υπολογισμό του D^* στηρίζεται στη δυνατότητα κατασκευής ταμιευτήρα στην έξοδο της λεκάνης με δεδομένη χωρητικότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την όσο γίνεται μεγαλύτερη απόληψη (και επομένως το μέγιστο εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό) απαιτείται όσο γίνεται μεγαλύτερη χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Όμως από μια χωρητικότητα και πάνω η απόληψη με συγκεκριμένη πιθανότητα αστοχίας δεν αυξάνει παρά την αύξηση της χωρητικότητας. Η οριακή αυτή τιμή της απόληψης D αποτελεί το μέγιστο εκμεταλλεύσιμο δυναμικό για συγκεκριμένη πιθανότητα αστοχίας που αναφέρθηκε γενικά πιο πάνω. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα λεκάνης με ταμιευτήρα στην έξοδό της και η σχέση των αδιάστατων ποσοτήτων S_{max}/MAR και D/MAR που αντιπροσωπεύουν τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα / μέσου ετήσιου ύψους απορροής με την απόληψη από τον ταμιευτήρα / μέσου ετήσιου ύψους απορροής. Όπως φαίνεται από το παράδειγμα του σχήματος αλλά και πολλές εφαρμογές στον Ελλαδικό χώρο η μέγιστη απολήψιμη ποσότητα (δηλαδή το μέγιστο εκμεταλλεύσιμο δυναμικό) είναι τάξης μεγέθους 50-70% της



Σχ. 2.6: Τυπική σχέση της «αδιάστατης» απόληψης D με την «αδιάστατη» χωρητικότητα S_{max} του ταμιευτήρα.

μέσης ετήσιας απορροής (MAR) στη θέση του υποτιθέμενου φράγματος. Το μέγεθος αυτό είναι χρήσιμο σε αναγνωριστικές και προκαταρκτικές εκτιμήσεις του εκμεταλλεύσιμου δυναμικού μιας λεκάνης απορροής και εξαρτάται εκτός από τη δυνητική εξάτμιση και από τη διασπορά των εισροών στον ταμιευτήρα. Εισροές με μεγάλο συντελεστή μεταβλητότητας $c_v = (\hat{\sigma}/\bar{x})$ συντελούν σε μεγέθη απόληψης στο κάτω όριο του διαστήματος 50-70% του MAR .

2.5.3 Αριθμητικό Παράδειγμα Εκτίμησης του ΕΕΥΔ Λεκάνης Απορροής με Ταμιευτήρα στην Έξοδο της

Δίνεται λεκάνη απορροής στην έξοδο της οποίας διατίθεται η χρονοσειρά μηνιαίας απορροής του Πίνακα 2.7. Αυτή προέκυψε από μετρήσεις. Στην έξοδο της λεκάνης έχει κατασκευαστεί ταμιευτήρας ωφέλιμης χωρητικότητας $77.11 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το εμβαδόν καθρέφτη του ταμιευτήρα A δίνεται σε km^2 συναρτήσει του αποθέματος S ($\times 10^6 \text{ m}^3$) από την πολυωνυμική σχέση

$$A = -0.00003 S^2 + 0.0235 S + 1.4406 \quad (2.22)$$

Ακόμη, στον Πίνακα 2.6, δίνονται οι συντελεστές ανισοκατανομής της ζήτησης λ_j ανά μήνα j ($j = 1, 2, \dots, 12$) και οι μέσες μηνιαίες τιμές της ωρική μέσης βροχόπτωσης (P_j) και της δυνητικής εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού στον ταμιευτήρα E_j . Για τα μεγέθη αυτά θα γίνει η παραδοχή ότι αρκεί η χρήση μέσων μηνιαίων τιμών. Ζητείται η τιμή της ετήσιας απόληψης νερού D που αντιστοιχεί σε αξιοπιστία 0.80. Η τιμή αυτή εκφράζει και το εκμεταλλεύσιμο επιφανειακό υδατικό δυναμικό (ΕΕΥΔ) για την παραπάνω τιμή της αξιοπιστίας.

Για εκτίμηση της αξιοπιστίας με σχετική ακρίβεια απαιτούνται συνθετικές χρονοσειρές μεγάλου μήκους της τάξης τουλάχιστον χιλίων ετών. Το μήκος πρέπει να είναι ιδιαίτερα μεγάλο όταν η απαιτούμενη αξιοπιστία είναι μεγάλη (π.χ., 0.99). Το αρχικό απόθεμα στον ταμιευτήρα είναι γενικά άγνωστο σε προσομοιώσεις για την εκτίμηση του ΕΕΥΔ και γι' αυτό, λαμβάνεται ίσο με μια μικρή αλλά αυθαίρετη τιμή ή μηδέν. Στην περίπτωση που γίνεται προσομοίωση με βάση συνθετικές χρονοσειρές μεγάλου μήκους της τάξης των χιλίων ετών και άνω, η επίδραση του αρχικού αποθέματος στο αποτέλεσμα δεν αναμένεται να είναι σημαντική. Επειδή, όμως, είναι συνήθης πρακτική να μη λαμβάνεται ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός ετών προσομοίωσης ενώ ζητείται και υψηλή αξιοπιστία, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της τιμής του αρχικού αποθέματος. Μία λύση είναι αυτό να λαμβάνεται ίσο με μηδέν ή πολύ μικρό μέγεθος και να μη λαμβάνονται υπόψη οι ενδεχόμενες αστοχίες το πρώτο ή τα δύο πρώτα έτη στην αρχή της προσομοίωσης σε ό,τι αφορά τον υπολογισμό της αξιοπιστίας. Στο παράδειγμα που ακολουθεί λαμβάνεται αυθαίρετα ως αρχικό απόθεμα στην

αρχή του Οκτωβρίου του πρώτου έτους $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τα πρώτα δύο έτη από τα 12 έτη προσομοίωσης δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς της αξιοπιστίας. Το αρχικό αυτό απόθεμα αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό λίγο περισσότερο του 10% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα.

Πίν. 2.6: Συντελεστές ανισοκατανομής της ζήτησης λ_j ανά μήνα j ($j = 1, 2, \dots, 12$) και μέσες μηνιαίες τιμές της χωρικά μέσης βροχόπτωσης (P_j) και δυναμικής εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού (E_j).

	Οκτ.	Νοεμ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρτ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπτ.
$q_j (\times 10^6 \text{ m}^3)$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
λ_j	0.084	0.074	0.074	0.069	0.063	0.071	0.073	0.083	0.090	0.137	0.094	0.088
P_j (mm)	106.8	200.7	235.0	152.6	143.9	103.9	94.2	59.8	22.2	14.9	7.0	14.7
E_j (mm)	69.9	36.7	23.3	28.5	39.3	72.7	108.0	156.6	196.9	221.9	197.6	134.3

Πίν. 2.7: Δεδομένα μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης ($\times 10^6 \text{ m}^3$).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέμ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρτ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπτ.
1	8.2	22.5	36.6	0.6	0.0	21.9	29.7	20.8	10.2	5.0	3.2	13.9
2	8.1	17.7	15.9	49.2	61.1	28.8	36.6	18.6	6.6	4.2	3.5	3.0
3	7.6	4.3	89.3	49.1	51.3	14.4	19.1	18.5	8.0	4.2	3.1	2.6
4	2.7	10.9	115.1	45.8	65.7	37.4	44.7	23.4	17.3	8.5	5.0	3.4
5	2.9	51.2	65.1	6.7	32.5	30.3	32.0	22.6	8.4	5.1	4.4	4.1
6	7.6	32.1	73.5	61.3	28.3	24.9	27.5	11.0	4.5	3.4	2.4	1.7
7	21.5	34.5	60.9	47.3	59.8	22.2	23.3	12.5	6.1	3.2	2.8	2.0
8	11.5	41.4	12.7	43.7	48.5	30.5	57.9	36.8	9.7	5.2	3.3	2.3
9	6.1	44.3	42.8	30.8	56.0	20.7	36.3	20.0	6.0	4.3	3.1	2.2
10	1.5	49.5	78.2	47.3	20.3	63.6	52.6	22.6	9.0	4.7	3.0	2.5
11	1.9	38.1	31.5	74.7	74.2	71.1	33.8	33.8	9.3	5.2	5.5	3.6
12	2.1	12.7	31.3	28.6	64.1	32.1	20.0	15.5	6.3	4.6	4.0	2.9

Η εύρεση της ετήσιας ζήτησης γίνεται με δοκιμαστική εφαρμογή των εξισώσεων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του ταμιευτήρα και διάφορες τιμές του D . Υπενθυμίζεται ότι, κανονικά, απαιτείται μεγάλος αριθμός ετών προσομοίωσης. Εδώ, όμως, για λόγους διευκόλυνσης της κατανόησης της μεθοδολογίας, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει εφαρμογή για ένα μικρό αριθμό ετών. Εκτιμήθηκε, τελικά, η τιμή $D = 162.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Οι αριθμητικές τιμές όλων των μεγεθών που υπεισέρχονται στην προσομοίωση λειτουργίας του ταμιευτήρα σε μηνιαία χρονική κλίμακα για το πρώτο έτος προσομοίω-

σης με την τελική τιμή της ετήσιας ζήτησης νερού δίνονται στον Πίνακα 2.8. Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται συνοπτικά αποτελέσματα της λειτουργίας του ταμιευτήρα για όλα τα έτη προσομοίωσης. Στον πίνακα αυτόν φαίνεται χαρακτηριστικά η αδυναμία κάλυψης της ετήσιας ζήτησης νερού στο 3ο και το 10ο έτος της προσομοίωσης. Δεδομένου ότι τα δύο πρώτα έτη αγνοούνται, η αξιοπιστία είναι $8/10 = 0.80$.

Πίν. 2.8: Προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα σε μηνιαία χρονική κλίμακα για το πρώτο έτος προσομοίωσης με την τελική τιμή της ετήσιας ζήτησης νερού.

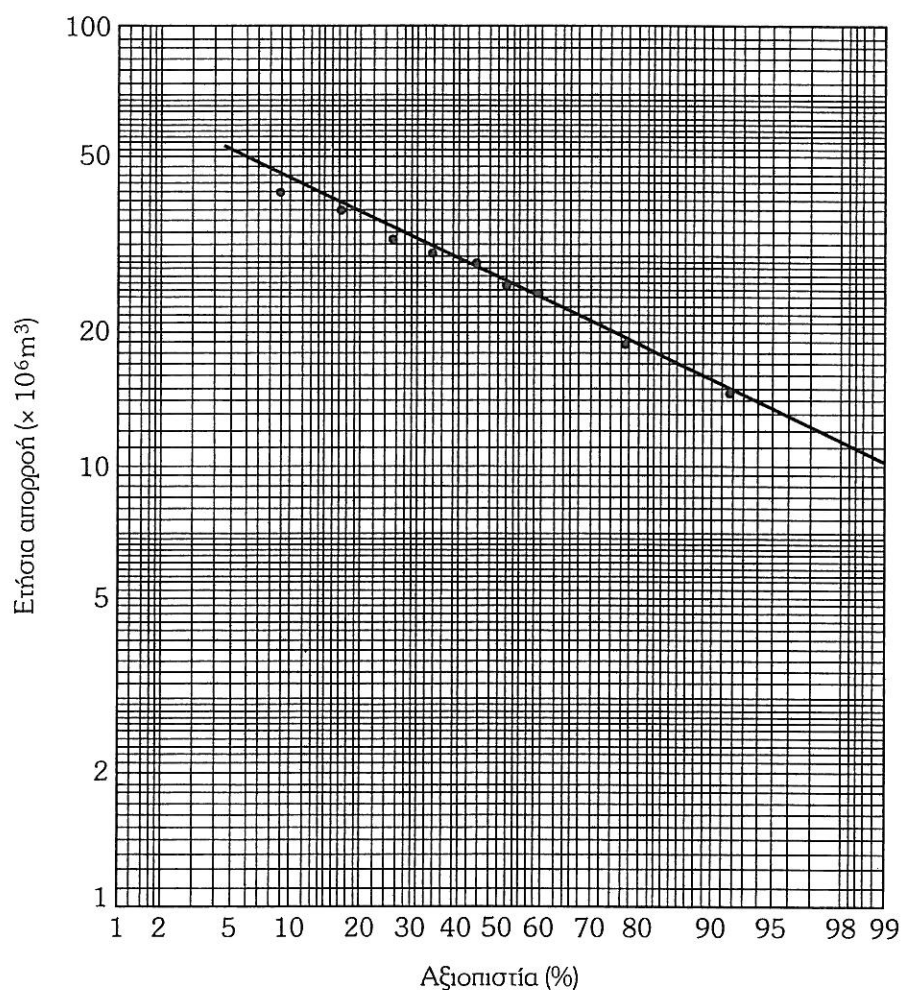
i	j	$Q_{i,j}$	$P_{i,j}$	$E_{i,j}$	$q_{i,j}$	$\lambda_{i,j}$	$D_{i,j}$	$S_{i,j}$	$A_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$RE_{i,j}$	$R_{i,j}$	$SP_{i,j}$	$\Sigma_j R_{i,j}$
1	1	8.2	106.8	69.9	3.0	0.1	13.7	10.0	1.7	18.2	3.0	13.7	0.0	
1	2	22.5	200.7	36.7	3.0	0.074	12.1	1.6	1.5	24.3	3.0	12.1	0.0	
1	3	36.6	235.0	23.3	3.0	0.074	12.1	9.2	1.7	46.1	3.0	12.1	0.0	
1	4	0.6	152.6	28.5	3.0	0.069	11.2	31.0	2.1	31.8	3.0	11.2	0.0	
1	5	0.0	143.9	39.3	3.0	0.063	10.3	17.7	1.8	17.8	3.0	10.3	0.0	
1	6	21.9	103.9	72.7	3.0	0.071	11.6	4.6	1.5	26.6	3.0	11.6	0.0	
1	7	29.7	94.2	108.0	3.0	0.073	11.8	12.0	1.7	41.6	3.0	11.8	0.0	
1	8	20.8	59.8	156.6	3.0	0.08	13.5	26.8	2.0	47.4	3.0	13.5	0.0	
1	9	10.2	22.2	196.9	3.0	0.09	14.6	30.9	2.1	40.8	3.0	14.6	0.0	
1	10	5.0	14.9	221.9	3.0	0.14	22.2	23.2	2.0	27.8	3.0	22.2	0.0	
1	11	3.2	7.0	197.6	3.0	0.09	15.2	2.6	1.5	5.5	3.0	2.5	0.0	
1	12	13.9	14.7	134.3	3.0	0.09	14.3	0.0	1.4	13.7	3.0	10.7	0.0	146.2

Πίν. 2.9: Συνοπτικά αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας του ταμιευτήρα για όλα τα έτη προσομοίωσης με την τελική τιμή της ετήσιας ζήτησης νερού ($D = 162.5 \times 10^6 \text{ m}^3$).

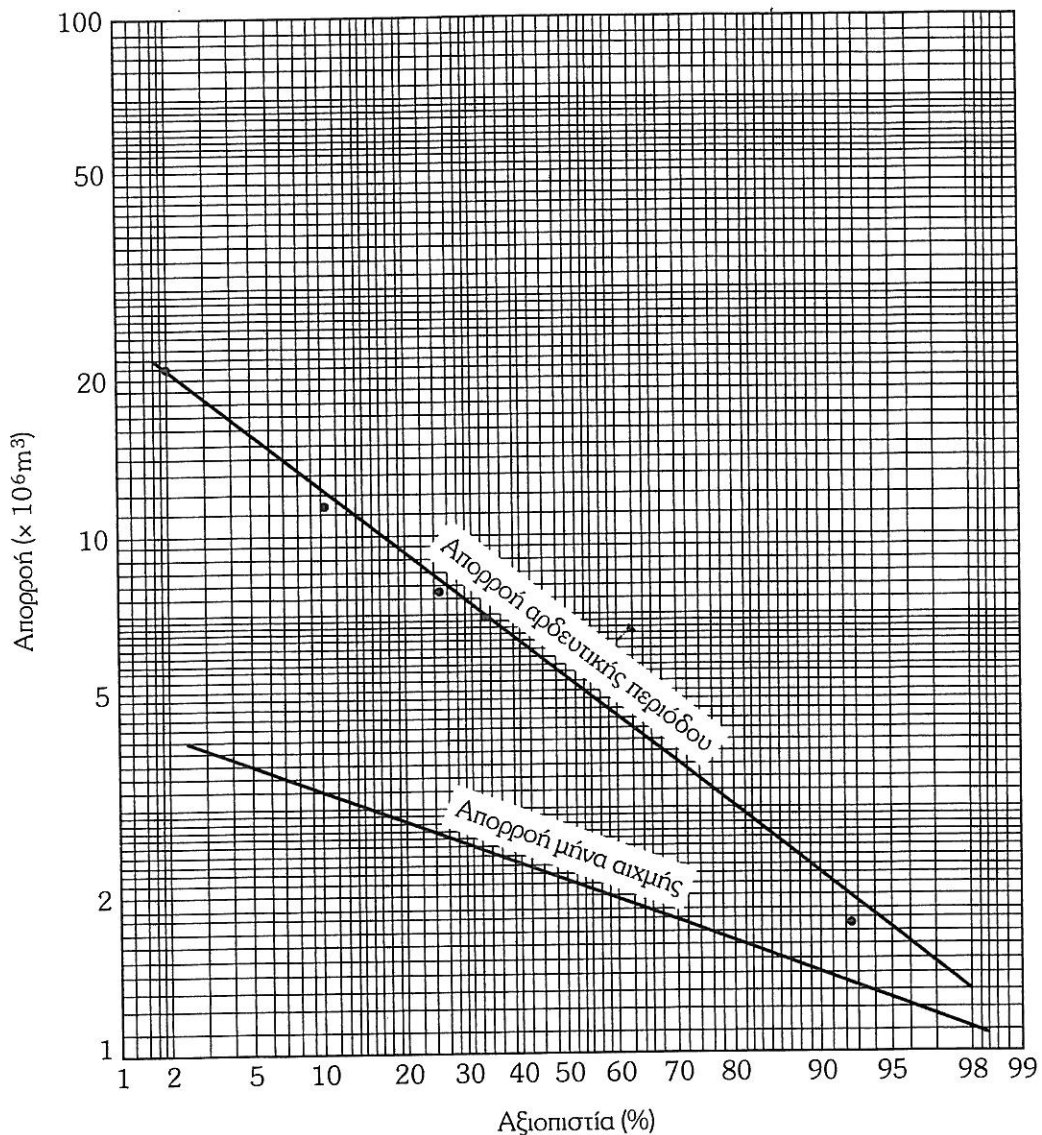
Υδρ. έτος	Ετήσια απόληψη (10^6 m^3)	Πλήρης κάλυψη ζήτησης
1	152.2	OXI
2	154.5	OXI
3	160.3	OXI
4	162.5	ΝΑΙ
5	162.5	ΝΑΙ
6	162.5	ΝΑΙ
7	162.5	ΝΑΙ
8	162.5	ΝΑΙ
9	162.5	ΝΑΙ
10	162.4	OXI
11	162.5	ΝΑΙ
12	162.5	ΝΑΙ

2.6 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΧΩΡΙΣ ΤΑΜΙΕΥΣΗ

Σε περίπτωση αδυναμίας κατασκευής έργων ταμίευσης, το ΕΕΥΔ εκτιμάται με υδρολογική προσομοίωση σε λεπτή χρονική κλίμακα (π.χ., ωριαία ή λεπτότερη) σε συνδυασμό με λεπτομερή μοντελοποίηση της υδραυλικής λειτουργίας των έργων υδροληψίας. Η εκτενής παρουσίαση της μεγάλης ποικιλίας περιπτώσεων που παρουσιάζονται και της αντίστοιχης μεθοδολογίας ξεφεύγει από τα όρια του παρόντος βιβλίου. Σε αρκετές περιπτώσεις, σε αναγνωριστικό στάδιο μελέτης αρκεί μια εκτίμηση του μέγιστου ΕΕΥΔ. Το μέγιστο ΕΕΥΔ σε ετήσια βάση εκτιμάται για συγκεκριμένη αξιοπιστία από διαγράμματα όπως αυτό που ακολουθεί και έχει προκύψει από την κατάταξη των ετήσιων μεγεθών απορροής σε φθίνουσα κατά μέγεθος σειρά και υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης $m/(N+1)$ όπου m η σειρά του μεγέθους στη φθίνουσα σειρά συνολικής διάρκειας N ετών. Στο παράδειγμα του Σχήματος 2.7 για $r = 0.90$ ο όγκος της απορροής είναι $15 (\times 10^6 \text{ m}^3)$. Στο Σχήμα 2.8 δίνεται παράδειγμα για μικρότερες χρονικές κλίμακες.



Σχ. 2.7: Παράδειγμα εκτίμησης της σχέσης ετήσιας απορροής (σε λεκάνη χωρίς ταμίευση) και αξιοπιστίας.



Σχ. 2.8: Παράδειγμα εκτίμησης της σχέσης απορροής και αξιοπιστίας για την αρδευτική περίοδο (π.χ. Μάϊος, Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος) και το μήνα αιχμής (π.χ. Ιούλιος), αντίστοιχα.

2.7 ΣΧΟΛΙΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η εκτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού είναι ένα καίριο ζήτημα στα πλαίσια της διαχείρισης υδατικών πόρων και του προγραμματισμού έργων αξιοποίησης καθόσον αφορά στη διαθέσιμη ποσότητα νερού για ποικιλία χρήσεων νερού στις οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως επιφανειακά νερά (π.χ. άρδευση). Η εκτίμηση γίνεται μέσα σε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που συνίσταται στα εξής:

- Η χωρική ενότητα στην οποία αναφέρεται το επιφανειακό υδατικό δυναμικό είναι η λεκάνη απορροής.

- Το υδρολογικό μέγεθος που εκφράζει το δυναμικό είναι η απορροή. Το μέγεθος αυτό αναφέρεται ως θεωρητικό επιφανειακό υδατικό δυναμικό (ΘΕΥΔ). Πολλές φορές, είναι βολικό η πληροφορία για την απορροή να συμπυκνώνεται στη μέση ετήσια απορροή (MAR).
- Η εκτίμηση του ΘΕΥΔ προϋποθέτει μακρές χρονοσειρές δεδομένων απορροής από μετρήσεις. Επειδή, όμως, σπάνια διατίθενται τέτοιες χρονοσειρές, γίνεται εκμετάλλευση πληροφορίας για άλλα υδρολογικά μεγέθη που διατίθενται συνήθως για μακρότερες χρονικές περιόδους (π.χ., βροχόπτωση). Τα εργαλεία γι' αυτό είναι τα μαθηματικά μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής. Έτσι, η εκτίμηση του ΘΕΥΔ καταλήγει σε εκτεταμένη χρήση αυτών των μοντέλων.
- Τα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία διαθέτουν ποικιλία χαρακτηριστικών σε ότι αφορά την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών και η επιλογή ενός ικανοποιητικού μοντέλου προϋποθέτει γνώση των υδρολογικών συνθηκών στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής που εξετάζεται, γνώση των διαθέσιμων δεδομένων, κατανόηση της συμπεριφοράς του μοντέλου και των συνθηκών χρήσης του καθώς και ευχέρεια στην εφαρμογή γενικών κανόνων μοντελοποίησης.
- Το στάδιο εκτίμησης του ΘΕΥΔ ακολουθεί η εκτίμηση του εκμεταλλεύσιμου επιφανειακού υδατικού δυναμικού (ΕΕΥΔ) που είναι και η πραγματικά απολήψιμη ποσότητα νερού για διάφορες χρήσεις. Η εκτίμηση του ΕΕΥΔ απαιτεί, παράλληλα με τη θεώρηση του ΘΕΥΔ, την προσομοίωση της λειτουργίας των έργων και των διαχειριστικών μέτρων που είναι γνωστό ότι μπορούν να υλοποιηθούν στη θεωρούμενη λεκάνη απορροής. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν πολλαπλά έργα (πολλαπλοί ταμιευτήρες σε σειρά), ή έργα απ' ευθείας υδροληψίας από το υδατόρευμα. Η ποικιλία των συνθηκών που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι εξαιρετικά μεγάλη. Παρ' όλα αυτά, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να καταρτιστούν σχετικά γενικευμένα μαθηματικά μοντέλα ή συστοιχίες μοντέλων που έχουν υλοποιηθεί σε εμπορικά πακέτα λογισμικού. Επισημαίνεται και πάλι η σημασία που έχει η γνώση των συνθηκών της περιοχής μελέτης για την επιτυχή εφαρμογή τέτοιων πακέτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbot, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J., 1986. «An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européenne, SHE, 1. History and philosophy of a physically-based distributed modelling system», *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.