

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού φραγμάτων και εφαρμογή στο φράγμα Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Ι.Γ. Ευθυμιάτος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εταιρεία Υδροσύστημα Ε.Π.Ε.

Ι.Σ. Δαούτης

Πολιτικός Μηχανικός, Εταιρεία Υδροσύστημα Ε.Π.Ε.

Λέξεις κλειδιά: φράγμα, βελτιστοποίηση, ταμιευτήρας, απορροή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία περιγράφεται αναλυτικά μία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του τύπου και του ύψους φραγμάτων ούτως ώστε να ικανοποιούνται με την μέγιστη πιθανότητα επιτυχίας και την βέλτιστη σχέση κόστους-οφέλους οι μηνιαίες ανάγκες της κατανάλωσης νερού σε αντίθεση με την τεχνική να προσδιορίζεται ως ύψος φράγματος εκείνο που αντιστοιχεί σε όγκο αποθηκεύσεως του ταμιευτήρα ίσο με την μέση ετήσια απορροή του ποταμού. Με την προτεινόμενη μεθοδολογία επιλογής του μεγέθους του ταμιευτήρα ρυθμίζονται οι ανομοιομορφίες των μηνιαίων και ετησίων απορροών του ποταμού.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα βασικά θέματα που καλείται να αντιμετωπίσει ο σύγχρονος σχεδιασμός ενός φράγματος είναι ο προσδιορισμός του βέλτιστου όγκου αποθηκεύσεως του ταμιευτήρα του και κατά συνέπεια του ύψους του φράγματος και της αντίστοιχης δαπάνης κατασκευής του. Ως γνωστόν, από τα τοπογραφικά σχέδια της λεκάνης του ταμιευτήρα του φράγματος προσδιορίζεται άμεσα η σχέση μεταξύ του όγκου αποθηκεύσεως στον ταμιευτήρα και του υψόμετρου συγκρατήσεως του νερού, το οποίο συμπίπτει με το υψόμετρο της στέψεως του έργου υπερχειλίσεως του φράγματος. Η σχέση αυτή, όπως και η αντίστοιχη συνάρτηση της επιφάνειας κατακλύσεως του ταμιευτήρα προς το υψόμετρο συγκρατήσεως νερού συνήθως αποτυπώνονται σε αντίστοιχα διαγράμματα.

Είναι προφανές ότι η τεχνική, να προσδιορίζεται ως ύψος ενός φράγματος εκείνο που, με βάση την ανωτέρω σχέση, αντιστοιχεί σε όγκο αποθηκεύσεως του ταμιευτήρα ίσο με την μέση ετήσια απορροή του ποταμού, όπως αυτή προκύπτει από την Υδρολογική Μελέτη, δεν είναι ορθή. Με την ανωτέρω τεχνική οι πηγαίες παροχές των Άλπεων, που είναι σχεδόν σταθερές κατά τους διάφορους μήνες του έτους με ετήσια όμως απορροή που συχνά υπερβαίνει το $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ και με την οποία υδρεύονται πόλεις σχεδόν σταθερής κατανάλωσης κατά την διάρκεια του έτους, θα απαιτούσαν ταμιευτήρα με τεράστια αποθήκευση, ενώ ουσιαστικά δεν χρειάζεται καν η κατασκευή φράγματος.

Συνεπώς, κατόπιν των ανωτέρω προκύπτει ότι το μέγεθος ενός ταμιευτήρα και κατ' ακολουθία το ύψος του αντίστοιχου φράγματος πρέπει να προσδιορίζονται, όχι με βάση την μέση ετήσια απορροή, αλλά με τέτοια ρύθμιση ώστε παρά τις κατά την διάρκεια του έτους καθώς και τις υπερετήσεις ανομοιομορφίες των απορροών του ποταμού να ικανοποιούνται οι μηνιαίες ανάγκες της κατανάλωσης.

Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά μία μεθοδολογία για τον τεχνικοοικονομικά βέλτιστο, προσδιορισμό του ύψους ενός φράγματος, η οποία επιτυγχάνει με την μέγιστη πιθανότητα επιτυχίας την ικανοποίηση των μηνιαίων αναγκών της κατανάλωσης, ρυθμίζοντας επαρκώς με την δημιουργία του καταλλήλου ταμιευτήρα τις ετήσιες και υπερετήσεις ανομοιομορφίες των απορροών του ποταμού. Παράλληλα, παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου στο υπό μελέτην φράγμα Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων.

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 1

Για την εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης απαιτείται η ύπαρξη μιας πολυετούς αλληλουχίας μηνιαίων και ετήσιων απορροών του ποταμού που προέρχεται είτε από παρατηρήσεις είτε από επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων, η γνώση της μηνιαίας κατανομής της ετήσιας κατανάλωσης νερού, τα διαγράμματα ύψους-όγκου και ύψους-επιφάνειας του ταμιευτήρα καθώς και τα γεωμετρικά και τα στοιχεία κόστους του υπό μελέτη φράγματος για διάφορα ύψη. Με βάση τα στοιχεία αυτά, η μέθοδος επιτρέπει την μαθηματική προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα, τον προσδιορισμό της πιθανότητας ικανοποίησης της ζήτησης και οδηγεί στον καθορισμό του καταλληλότερου τύπου φράγματος και τον προσδιορισμό του βέλτιστου ύψους.

2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΙΑΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΜΗΝΙΑΙΩΝ ΚΑΙ ΕΤΗΣΙΩΝ ΑΠΟΡΡΟΩΝ ΕΝΟΣ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ 1000 ΕΤΩΝ

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην Εισαγωγή, για τον προσδιορισμό της βέλτιστης στάθμης εκμεταλλεύσεως ενός ταμιευτήρα (και του αντίστοιχου ύψους φράγματος) βασικό λόγο έχει η δημιουργία μιας συνθετικής (στοχαστικής) σειράς μηνιαίων και ετήσιων απορροών του ποταμού στην θέση του φράγματος, όσο το δυνατό μεγαλύτερας διάρκειας, π.χ. 1000 ετών {3}, {5}, {8}. Η σειρά αυτή απαιτείται για την απεικόνιση μιας μακράς αλληλουχίας των φαινομένων (π.χ. αλληλουχία ξηρών και υγρών μηνών και ετών, κ.λπ.) και όχι για τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας απορροής του ποταμού, που είναι ήδη γνωστή από την επεξεργασία των υφισταμένων υδρολογικών παρατηρήσεων. Είναι προφανές ότι τα βασικά στατιστικά μεγέθη (μέσοι όροι, μέσες τετραγωνικές αποκλίσεις, κ.λπ.) της στοχαστικής σειράς θα πρέπει να προσεγγίζουν τα αντίστοιχα μεγέθη που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις. Από την προσέγγιση αυτή κρίνεται και ο βαθμός επιτυχίας της στοχαστικής σειράς που δημιουργήθηκε. Το μαθηματικό ομοίωμα για την δημιουργία της στοχαστικής σειράς μπορεί να βασίζεται σε κάποια από τις γνωστές μεθόδους αυτοαναδρομικότητας, κινητού μέσου όρου 1^{ης} τάξεως (Autocovariance model), που μπορεί ενδεχομένως να χρησιμοποιεί τις σειρές του Markov {10}.

Στην περίπτωση που σε ένα ποταμό δεν διατίθενται μετρήσεις παροχών ή οι υπάρχουσες δεν είναι αξιόπιστες, η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας στοχαστικής σειράς μηνιαίων και ετησίων βροχοπτώσεων 1000 ετών, δεδομένου ότι διατίθενται πάντα βροχομετρικές παρατηρήσεις. Στην συνέχεια με ένα «αιτιοκρατικό μαθηματικό ομοίωμα (βροχοπτώσεις-απορροές)» «Modèle déterministe (précipitations-débit)» δημιουργείται η στοχαστική σειρά των μηνιαίων και ετησίων απορροών των 1000 ετών {1}, {9}.

Η αιτιοκρατική μαθηματική προσομοίωση της λεκάνης απορροής προκύπτει με βάση τα μορφολογικά, γεωλογικά, κ.λπ. στοιχεία της και την υποδιαίρεσή της σε ένα ικανό πλήθος υπολεκανών, όπου κάθε μία από αυτές διαθέτει κατά το δυνατό ομοιογενή χαρακτηριστικά (π.χ. κλίσεις εδάφους, γεωλογία, φυτοκάλυψη, κ.λπ.) και θεωρείται ότι δέχεται σε όλα τα σημεία της το αυτό ύψος βροχής. Στην λεκάνη απορροής του φράγματος Νεοχωρίτη λόγω ελλείψεως αξιόπιστων μετρήσεων παροχών του ποταμού χρησιμοποιήθηκε το ανωτέρω αιτιοκρατικό ομοίωμα βροχοπτώσεων-απορροών και προέκυψαν τα ακόλουθα συγκεντρωτικά στοιχεία:

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά στοιχεία απορροής 1000 ετών φράγματος Νεοχωρίτη

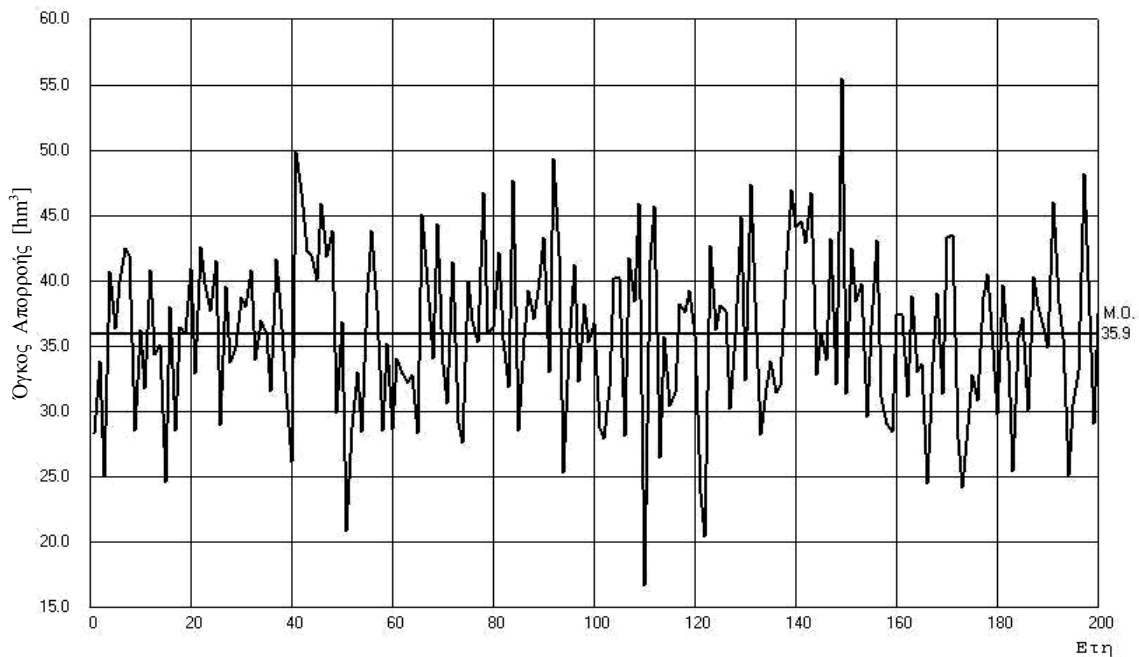
Μέσος ετήσιος όγκος απορροής	35.91 hm ³
Ελάχιστος ετήσιος όγκος απορροής	15.22 hm ³
Μέγιστος ετήσιος όγκος απορροής	55.53 hm ³
Μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής	0.333
Ελάχιστος συντελεστής απορροής	0.215
Μέγιστος συντελεστής απορροής	0.393

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 2

Στο Διάγραμμα 1 απεικονίζεται η συνάρτηση των ετησίων όγκων απορροής της λεκάνης Νεοχωρίτη για τα πρώτα 200 από τα 1000 συνολικά έτη της στοχαστικής σειράς.



Διάγραμμα 1. Στοχαστική σειρά απορροών λεκάνης απορροής Νεοχωρίτη

3 ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΙ ΕΤΗΣΙΑ ΑΠΟΛΗΨΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΕΝΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Ο στόχος της δημιουργίας ενός ταμιευτήρα φράγματος είναι η ρύθμιση της ανομοιομορφίας των μηνιαίων και ετήσιων απορροών ενός ποταμού, ώστε να πραγματοποιείται με υψηλή πιθανότητα επιτυχίας (p) μία ετήσια απόληψη (D), ικανοποιώντας το σύνολο των μηνιαίων αναγκών καταναλώσεως όπως π.χ. ύδρευσης, άρδευσης, βιομηχανικής χρήσης, ηλεκτρικής ενέργειας, οικολογικών παροχών κ.λπ. Επομένως παρίσταται η ανάγκη του κατ' αρχήν προσδιορισμού της κατανομής $k(t)$ της ετήσιας ζήτησης (D) ανά μήνα. Στην περίπτωση του ταμιευτήρα του φράγματος Νεοχωρίτη ο οποίος θα ικανοποιεί κυρίως αρδευτικές ανάγκες και ελάχιστες υδρευτικές, καθώς και οικολογική παροχή ίση με το 30% της μέσης παροχής του ποταμού κατά τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο (62000 m^3 ανά μήνα), ελήφθη υπόψη η κάτωθι κατανομή (Πίν. 2).

Πίνακας 2. Κατανομή ετήσιας ζήτησης ανά μήνα $k(t)$

Μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
$k(t) \%$	1	1	2	8	11	18	23	22	7	5	1	1

Στην κατανομή $k(t)$ του Πίνακα 2 ελήφθη υπόψη η δυσμενέστερη περίπτωση για τη διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα, που είναι η ικανοποίηση αρδευτικών αναγκών κατά την θερινή ξηρή περίοδο. Αντίθετα, για την υγρή περίοδο των μηνών Νοέμβριος – Φεβρουάριος ελήφθη μία ελάχιστη απόληψη ανά μήνα ίση με 1% της ετήσιας κατανάλωσης, για τις ανάγκες της οικολογικής παροχής και της ύδρευσης στην αντίστοιχη χρονική περίοδο (359000 m^3).

Είναι προφανές ότι κάθε άλλη περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή $k(t)$, που θα προερχόταν από αύξηση είτε της οικολογικής παροχής, είτε του ποσοστού της ύδρευσης, σε βάρος της

I. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Διάγραμμα 1. Στοχαστική Σειρά Απορροών Λεκάνης Απορροής Νεοχωρίτη

Σελ. 3

κατανάλωσης για τις αρδεύσεις, θα είναι πολύ ευνοϊκότερη για τη διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα, δεδομένου ότι αυτή θα μειώνει τις πιθανότητες των χειμερινών υπερχειλίσεων και τις απολήψεις κατά την ξηρή θερινή περίοδο.

4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΤΥΧΟΥΣ ΑΠΟΛΗΨΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΕΝΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Για τον προσδιορισμό της πιθανότητας (p) μιας επιτυχούς ετήσιας απόληψης νερού (D), από ένα συγκεκριμένο ταμιευτήρα φράγματος καθοριζόμενο από την στάθμη συγκρατήσεως του νερού, δηλαδή από το υψόμετρο της στέψεως του υπερχειλιστή του φράγματος (Z_{max}) απαιτείται η μαθηματική προσομοίωση της λειτουργίας του υπόψη ταμιευτήρα για διάρκεια της «ιδεατής» εκμεταλλεύσεως $T_{max} = 12 \times 1000 = 12,000$ μηνών {2}, {4}, {11}.

Την προσομοίωση της λειτουργίας αυτής παριστά η ακόλουθη εξίσωση συνεχείας για μεταβολή της στάθμης του ταμιευτήρα dZ σε χρονικό διάστημα dt :

$$\begin{aligned} \text{Όγκος εισροών } Q_e(t).dt &= \text{Όγκος αποθηκεύσεως } A(Z).dZ + \\ &+ \text{Όγκος απολήψεων } D.k(t).dt + \text{Όγκος απωλειών από εξάτμιση } A(Z).E(t).dt. \end{aligned}$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφεί με την ισοδύναμη μορφή.

$$dZ/dt = [Q_e(t) - D \cdot k(t) - A(Z) \cdot E(t)] / A(Z) \quad (1)$$

όπου:

Z = η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα για κάθε χρονική στιγμή t της εκμεταλλεύσεως (t σε μήνες)

Τα όρια μεταβολής του Z είναι: $Z_{min} \leq Z \leq Z_{max}$ όπου:

Z_{min} = η ελάχιστη στάθμη υδροληψίας που αντιστοιχεί στο νεκρό όγκο των φερτών υλών στον ταμιευτήρα

Z_{max} = το υψόμετρο στέψεως του υπερχειλιστή, που αντιστοιχεί στη στάθμη συγκρατήσεως του νερού στον ταμιευτήρα

Ο χρόνος t μεταβάλλεται από (0) μέχρι (T_{max}) που, όπως αναφέρθηκε ήδη, ισούται με $T_{max} = 12 \times 1000 = 12,000$ μήνες.

$Q_e(t)$ = η παροχή των αποθηκευμένων εισροών σε κάθε ταμιευτήρα, που προσδιορίζεται, ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \text{για το } Z \leq Z_{max} & \quad Q_e(t) = Q_a(t) \\ Z > Z_{max} & \quad Q_e(t) = 0, \text{ δεδομένου ότι η εισρέουσα παροχή δεν αποθηκεύεται αλλά υπερχειλίζει} \end{aligned}$$

$Q_a(t)$ = οι απορροές του ποταμού ανά μήνα και έτος για τους 12,000 μήνες στη θέση του φράγματος

D = η ετήσια απόληψη, που βέβαια δεν έχει καμία σχέση με τον μέγιστο αποθηκευόμενο όγκο νερού στον ταμιευτήρα

$k(t)$ = η συνάρτηση κατανομής της ζητήσεως ανά μήνα

$A(Z)$ = η συνάρτηση επιφάνειας κατακλύσεως-υψομέτρου συγκρατήσεως νερού για κάθε ταμιευτήρα, που αναφέρθηκε ήδη στην Εισαγωγή

$E(t)$ = οι μέσες τιμές ανά μήνα του ύψους των απωλειών από εξάτμιση

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 4

Επειδή οι απορροές του ποταμού $Q_a(t)$ δίνονται ανά μήνα (12,000 τιμές), είναι προφανές ότι το βήμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης της διαφορικής εξίσωσης είναι $\Delta t=1$ μήνας και για τον προσδιορισμό της p απαιτούνται 12,000 βήματα.

Για ένα δεδομένο ζεύγος τιμών (Z_{\max} , D) δηλαδή

- ένα δεδομένο ταμιευτήρα φράγματος καθοριζόμενο από την στάθμη συγκρατήσεως (υψόμετρο στέψεως υπερχειλιστή) Z_{\max} και
- μία ετήσια απόληψη νερού D

θα προκύψουν ενδεχομένως κατά την επίλυση της ανωτέρω διαφορικής εξίσωσης, ορισμένοι μήνες συνολικού πλήθους T_a , κατά τους οποίους η στάθμη στο ταμιευτήρα δεν θα υπερβαίνει την στάθμη Z_{\min} (του κατωφλίου της υδροληψίας), δηλαδή θα παρουσιάζεται αποτυχία για την κάλυψη της ζήτησεως στους συγκεκριμένους μήνες.

Ο λόγος $T_a/12,000$ αποτελεί την πιθανότητα αποτυχίας της εκμεταλλεύσεως του υπόψη ταμιευτήρα ο οποίος καθορίζεται από το συγκεκριμένο Z_{\max} για τη δεδομένη απόληψη D .

Αντίθετα η πιθανότητα επιτυχίας (p), δηλαδή η πιθανότητα ο υπόψη ταμιευτήρας να μπορεί να ικανοποιήσει την ετήσια απόληψη D ισούται με:

$$p = 1 - T_a / 12,000 \quad (2)$$

Επομένως για ένα δεδομένο ύψος φράγματος Z_{\max} με τον υπολογισμό της πιθανότητας επιτυχίας (p) για την ετήσια απόληψη (D), προκύπτει μία τριάδα τιμών (Z_{\max} , D , p).

Με την μεταβολή του αρχικού ζεύγους τιμών δηλαδή

- του ύψους του φράγματος που προσδιορίζεται από το Z_{\max} και
- της ετήσιας απόληψης D

προκύπτει μετά την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης νέα τριάδα τιμών (Z_{\max} , D , p).

Συνήθως στη πράξη ένα βήμα μεταβολής της Z_{\max} ίσο με $\Delta Z_{\max} = \pm 0,20\text{m}$ και της D ίσο με $\Delta D = \pm 0,20 \text{ hm}^3$ δημιουργεί ένα πλήθος της τάξεως των 3000 έως 3500 ζευγών (D, Z_{\max}) από το οποίο προκύπτουν πάντα ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις p . Τελικά θα δημιουργηθούν 3000 έως 3500 τριάδες (Z_{\max} , D , p).

Με σύστημα συντεταγμένων τους άξονες : $x = Z_{\max}$, $y = D$, $z = p$ οι ανωτέρω τριάδες παριστούν γεωμετρικά ένα τρισδιάστατο στερεό, που έχει την μορφή ενός τεταρτημορίου μιας κολουροκωνικής επιφάνειας μη κυκλικής διατομής. Με την τομή της επιφάνειας αυτής με τα οριζόντια επίπεδα $p= 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99 \%$ και την προβολή των οριζόντιων αυτών τομών σε οριζόντιο επίπεδο είναι δυνατή η παράσταση των ανωτέρω σε αντίστοιχα διαγράμματα.

Η χρήση των διαγραμμάτων αυτών είναι πολύτιμη επίσης για τον χαρακτηρισμό ενός φράγματος ως «υπερδιαστασιολογημένου» ή μη. Πράγματι, έχει παρατηρηθεί στην πράξη ότι οι καμπύλες των ίσων πιθανοτήτων απολήψεως τείνουν ασυμπτωτικά προς την οριζοντία γραμμή, όσο αυξάνεται η στάθμη Z_{\max} συγκρατήσεως και κατά συνέπεια το ύψος του φράγματος. Επομένως η αύξηση της στάθμης συγκρατήσεως και κατά συνέπεια του ύψους του φράγματος πέραν ενός ορίου επιφέρει αμελητέα αύξηση του όγκου ετήσιας απόληψης για όλες τις πιθανότητες p . Το φράγμα στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί ως «υπερδιαστασιολογημένο».

5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Για μία δεδομένη προς αξιοποίηση λεκάνη απορροής με βάση κατ' αρχήν τα τοπογραφικά, γεωλογικά και υδρολογικά δεδομένα προεπιλέγονται μία ή και περισσότερες πιθανές θέσεις κατασκευής φράγματος.

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 5

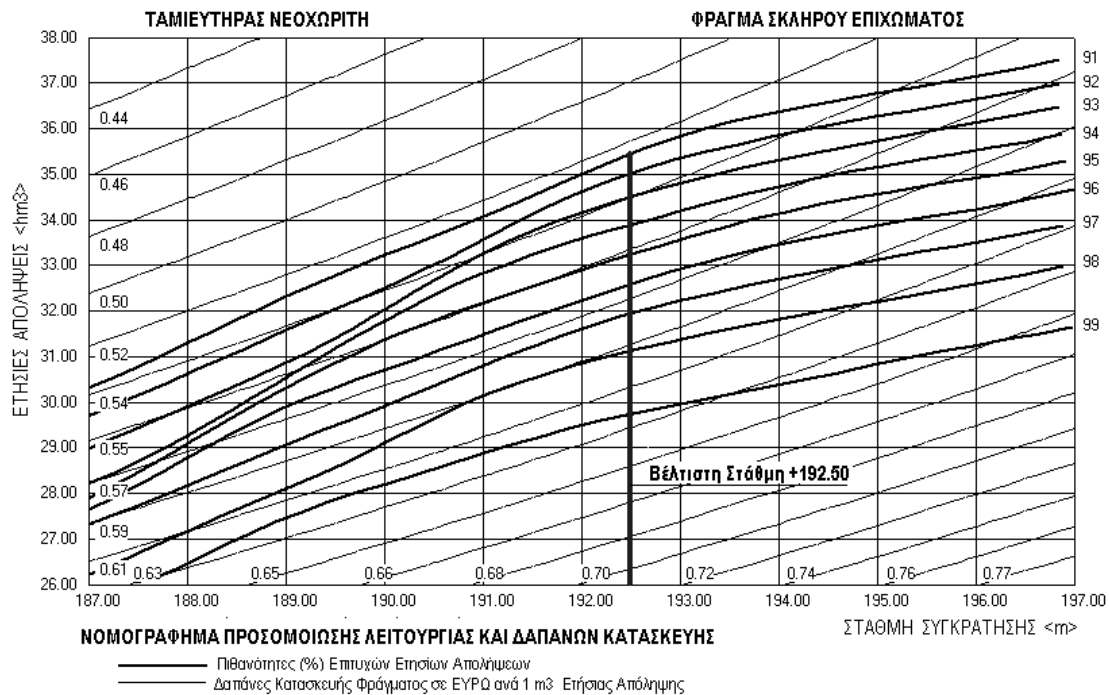
Ακολουθώς για τις προεπιλεγείσες αυτές θέσεις και με βάση τα ανωτέρω γεωλογικά στοιχεία και τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής προσδιορίζονται οι κατά αρχήν αποδεκτοί τύποι φράγματος όπως π.χ.

- φράγμα τοξωτό
- φράγμα βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Rollcrete)
- φράγμα βαρύτητας από σκληρό επίχωμα (Hardfill)
- φράγμα λιθόρριπτο
- γεώφραγμα
- φράγμα μικτού τύπου, από συνδυασμό δύο ή και περισσότερων εκ των ανωτέρω τύπων φραγμάτων κ.λπ.

Για την περίπτωση του φράγματος Νεοχωρίτη οι κατά αρχήν αποδεκτοί τύποι φράγματος ήταν οι ακόλουθοι τρεις:

- Φράγμα από σκληρό επίχωμα
- Γεώφραγμα
- Φράγμα λιθόρριπτο

Για τους ανωτέρω τρεις (3) τύπους φραγμάτων εφαρμόστηκαν τα αναφερόμενα στο Κεφ. 4 και προσδιορίστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα προσομοίωσης της λειτουργίας τους από τις τριάδες των τιμών (Z_{max} , D , ρ) τα οποία δίνονται στα διαγράμματα 2, 3 και 4).



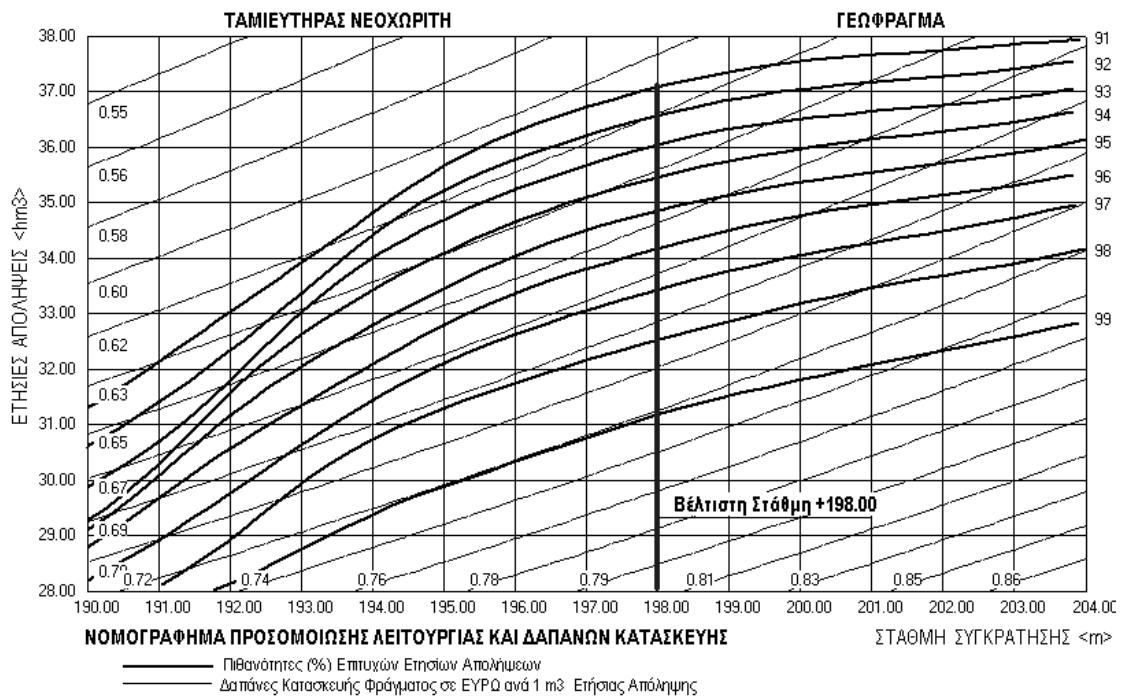
Διάγραμμα 2. Φράγμα Σκληρού Επίχωματος – Προσομοίωση Λειτουργίας και Δαπανών Κατασκευής

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

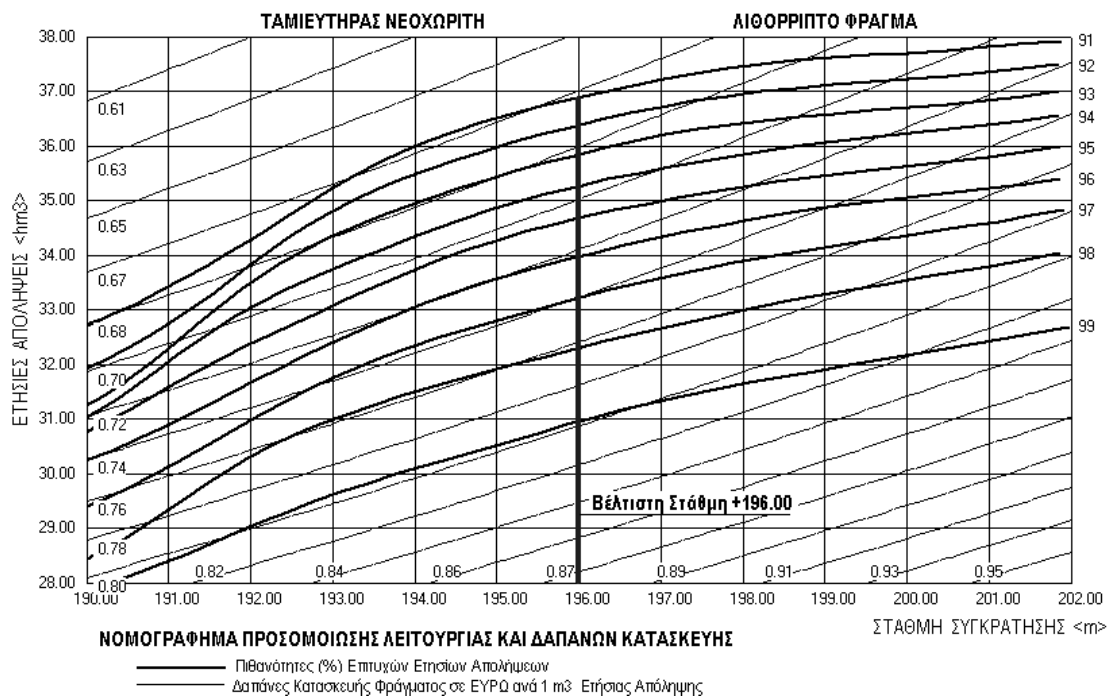
Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Διάγραμμα 2. Φράγμα Σκληρού Επιχώματος – Προσομοίωση Λειτουργίας και Δαπανών Κατασκευής

Σελ. 6



Διάγραμμα 3. Γεώφραγμα – Προσομοίωση Λειτουργίας και Δαπανών Κατασκευής



Διάγραμμα 4. Λιθόρριπτο Φράγμα – Προσομοίωση Λειτουργίας και Δαπανών Κατασκευής

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Διάγραμμα 3. Γεώφραγμα – Προσομοίωση Λειτουργίας και Δαπανών Κατασκευής

Διάγραμμα 4. Λιθόρριπτο Φράγμα – Προσομοίωση Λειτουργίας και Δαπανών Κατασκευής

Σελ. 7

Από τα διαγράμματα αυτά είναι δυνατό να προσδιορισθούν τα ανώτατα όρια της στάθμης συγκρατήσεως πέραν των οποίων το φράγμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως «υπερδιαστασιοποιημένο».

Τα ανώτατα αυτά όρια για το φράγμα Νεοχωρίτη είναι τα κάτωθι:

- Φράγμα από Σκληρό Επίχωμα Μέγιστο όριο στάθμης συγκρατήσεως +197
- Γεώφραγμα Μέγιστο όριο στάθμης συγκρατήσεως +204
- Λιθόρριπτο Μέγιστο όριο στάθμης συγκρατήσεως +202

Όμως το μέγιστο όριο της στάθμης συγκρατήσεως για ένα φράγμα, προκειμένου να μη χαρακτηριστεί αυτό ως «υπερδιαστασιοποιημένο», δεν αποτελεί κατ' ανάγκη και την βέλτιστη τεχνικοοικονομικά λύση. Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά στάθμης και κατ' επέκταση του βέλτιστου ύψους ενός φράγματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η δαπάνη κατασκευής του φράγματος και των συναφών του έργων.

Για τον σκοπό αυτό και με την χρήση απλών προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιούνται για τις προμετρήσεις και τον προσδιορισμό της δαπάνης φραγμάτων και συναφών έργων γίνεται για κάθε τύπο φράγματος μία μαθηματική προσομοίωση του φράγματος και των συναφών του έργων. Από την εφαρμογή της προσομοιώσεως προκύπτει η προμέτρησή του φράγματος και στη συνέχεια η συνολική δαπάνη του (Δ) ως συνάρτηση της στάθμης συγκρατήσεως Z_{max} , δηλ. $\Delta = f(Z_{max})$.

Ο λόγος $\delta = \frac{\Delta}{D} = \frac{f(Z_{max})}{D}$ δίνει την δαπάνη κατασκευής του φράγματος και των συναφών του

έργων ανά m^3 ετήσιας απόληψης.

Για την περίπτωση Νεοχωρίτη τελικά προκύπτουν εκτός από τις τριάδες (Z_{max} , D , p) και 3000 ως 3.500 τριάδες τιμών (Z_{max} , D , δ).

Με σύστημα συντεταγμένων, όπως προηγουμένως, τους άξονες: $x = Z_{max}$, $y = D$, $z = \delta$ οι τριάδες που προκύπτουν παριστούν γεωμετρικά ένα τρισδιάστατο στερεό της μοναδιαίας δαπάνης (δ), που έχει την μορφή ενός τεταρτημορίου μιας ανεστραμμένης κολουροκωνικής επιφάνειας, μη κυκλικής διατομής, που είναι αντιδιαμετρικό του στερεού των πιθανοτήτων (Κεφ. 4).

Με την τομή της επιφάνειας αυτής με τα οριζόντια επίπεδα $\delta = 0.50, 0.52, \dots, 0.84$ € ανά m^3 ετήσιας απόληψης και την προβολή των οριζόντιων αυτών τομών στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με αυτό των πιθανοτήτων (p), προκύπτουν οι καμπύλες κόστους ανά m^3 απόληψης στα αντίστοιχα διαγράμματα (Διαγρ. 2, 3, 4).

Η γενέτειρα κατά την οποία εφάπτονται τα δύο ανωτέρω αντιδιαμετρικά στερεά $p = F_1(Z_{max}, D)$ και $\delta = F_2(Z_{max}, D)$ προσδιορίζει σε προβολή στο οριζόντιο επίπεδο την βέλτιστη στάθμη συγκρατήσεως (Z_{β}) για τον αντίστοιχο τύπο φράγματος.

Ο αναλυτικός προσδιορισμός της βέλτιστης στάθμης συγκρατήσεως (Z_{β}) γίνεται ως ακολούθως:

Από την προσομοίωση (Κεφ. 4) προσδιορίζεται αριθμητικά η συνάρτηση $D = F_1(Z_{max}, p)$. (3)

Σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου έχει προσδιορισθεί επίσης αριθμητικά η συνάρτηση της μοναδιαίας δαπάνης $\delta = F_2(Z_{max}, D)$. (4)

Με εφαρμογή των μεθόδων της αριθμητικής ανάλυσης αντικαθίστανται οι τιμές D της συνάρτησης (3) στη συνάρτηση (4) οπότε προκύπτει η συνάρτηση $\delta = F_3(Z_{max}, F_1(Z_{max}, p))$. (5)

Για δεδομένη πιθανότητα (p) η αριθμητική παραγωγή και η αντίστοιχη αριθμητική επίλυση της

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 8

εξίσωσης (5) ως προς Z_{max} , δηλαδή η εξίσωση

$$\frac{d\delta}{dZ_{max}} = \frac{dF_3(Z_{max}, F_1(Z_{max}, p))}{dZ_{max}} = 0 \quad (6)$$

δίνει για κάθε τύπο φράγματος την βέλτιστη στάθμη συγκρατήσεως ($Z\beta$).

Σημειώνεται ότι οι αποδεκτές τιμές των πιθανοτήτων επιτυχούς απολήψεως (p) πρέπει να βρίσκονται στο διάστημα $0.93 \leq p \leq 0.99$ δεδομένου ότι τυχόν μικρότερη πιθανότητα, έστω 0.92, αντιστοιχεί σε αποτυχία 0.08 η οποία έχει τιμή μικρότερη του $1/12 = 0.0833$. Αυτό μπορεί να σημαίνει για την ικανοποίηση της ζήτησης μία μόνιμη αποτυχία ενός μηνός (= 1/12 του χρόνου) για κάθε χρόνο της εκμετάλλευσης πράγμα πολύ δυσμενές, ιδίως για τις περιπτώσεις των αρδεύσεων.

Στο παράδειγμα του φράγματος Νεοχωρίτη για τον υπολογισμό της δαπάνης του κυρίου σώματος του φράγματος ελήφθησαν οι ακόλουθες τιμές:

- Φράγμα από Σκληρό Επίχωμα 18.00 € / m³
- Γεώφραγμα 2.34 € / m³ που αποτελεί μία μεικτή τιμή της αργίλου (μηδενικής απόστασης μεταφοράς) και των σωμάτων στήριξης του φράγματος
- Λιθόρριπτο φράγμα 4.00 € / m³

Επίσης για τον υπολογισμό της δαπάνης του κυρίου σώματος του φράγματος ελήφθη η στάθμη της στέψης του φράγματος που προκύπτει από την στάθμη συγκρατήσεως με την προσθήκη του ύψους υπερχειλίσεως και των περιθωρίων ασφαλείας, όπως αυτά απαιτούνται για κάθε τύπο φράγματος.

Στην περίπτωση του Νεοχωρίτη τα πρόσθετα αυτά ύψη υπερχειλίσεως και περιθωρίων ασφαλείας είναι τα ακόλουθα:

- Φράγμα από Σκληρό Επίχωμα: 4.00 m
- Γεώφραγμα: 5.30 m
- Λιθόρριπτο φράγμα: 5.25 m

Υπολογιστικά προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (Πίν. 3):

Πίνακας 3. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης του φράγματος Νεοχωρίτη

Τύπος Φράγματος	Βέλτιστη Στάθμη Συγκρατήσεως (m)	Βέλτιστη Στάθμη Στέψεως (m)	Δαπάνη (χιλ. €)
Σκληρό Επίχωμα	192.50	196.50	18,573
Γεώφραγμα	198.00	203.30	22,572
Λιθόρριπτο	196.00	201.25	24,646

Τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα δύνανται να προκύψουν με σχετική προσέγγιση και γραφικά από τα αντίστοιχα συνημμένα διαγράμματα.

Η σύγκριση όμως των διαφόρων τύπων φράγματος για τον προσδιορισμό του οικονομικότερου τύπου φράγματος θα πρέπει να γίνει μεταξύ «ισοδύναμων ταμιευτήρων».

Ταμιευτήρες που δημιουργούνται μέσω διαφορετικού τύπου φράγματος καλούνται «ισοδύναμοι» όταν δίνουν για την ίδια πιθανότητα επιτυχίας τους ίδιους όγκους ετήσιας απόληψης.

Σύμφωνα με όσα εκτίθενται ανωτέρω οι «ισοδύναμοι» ταμιευτήρες προσδιορίζονται μαθηματικά ως ακολούθως:

Έστω ο ταμιευτήρας τύπου (1) με βέλτιστη στάθμη συγκρατήσεως ($Z\beta_1$). Στο στερεό που προσδιορίζεται από τις τριάδες των σημείων (Z_{max}, D, p)₁, επιλέγονται τα σημεία τομής του με το

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 9

επίπεδο ($Z_{\beta 1}$), που δίνουν τα ζεύγη σημείων ($D_{\beta 1}, \rho_{\beta 1}$). Τα ζεύγη αυτών των σημείων, τοποθετούνται στο στερεό του ταμειυτήρα τύπου (2) που προσδιορίζεται από τα σημεία (Z_{\max}, D, ρ)₂. Το ($Z_{\max.1\sigma 2}$) προκύπτει από το επίπεδο ($Z_{\max.1\sigma 2}, D_{\beta 1}, \rho_{\beta 1}$)₂.

Για την περίπτωση του φράγματος Νεοχωρίτη προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πίν. 4):

Πίνακας 4. Σύγκριση βέλτιστων και ισοδύναμων τύπων φράγματος Νεοχωρίτη

Βέλτιστο Φράγμα από Σκληρό Επίχωμα	18,573 χιλ. € (βέλτιστο σκληρό επίχωμα)	<	21,581 χιλ. € (ισοδύναμο γεώφραγμα)	<	23,734 χιλ. € (ισοδύναμο λιθόρριπτο)
Βέλτιστο Γεώφραγμα	20,068 χιλ. € (ισοδύναμο σκληρό επίχωμα)	<	22,572 χιλ. € (βέλτιστο γεώφραγμα)	<	24,881 χιλ. € (ισοδύναμο λιθόρριπτο)
Βέλτιστο Λιθόρριπτο Φράγμα	19,777 χιλ. € (ισοδύναμο σκληρό επίχωμα)	<	22,391 χιλ. € (ισοδύναμο γεώφραγμα)	<	24,646 χιλ. € (βέλτιστο λιθόρριπτο)

Στο παράδειγμα του φράγματος Νεοχωρίτη με την εφαρμογή της περιγραφόμενης ανωτέρω μεθοδολογίας προέκυψε ότι τον βέλτιστο τεχνικοοικονομικά τύπο φράγματος αποτελεί το φράγμα από σκληρό επίχωμα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Στάθμη στέψεως φράγματος +196.50
- Συνολική δαπάνη 18,573 χιλ. €

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο προσδιορισμός του ύψους ενός φράγματος κατά τρόπον ώστε ο ωφέλιμος όγκος του ταμειυτήρα του να ισούται με την μέση ετήσια απορροή του ποταμού στη θέση του φράγματος δεν είναι ορθός διότι δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε η ανομοιομορφία των μηνιαίων και υπερετήσιων εισροών στον ταμειυτήρα ούτε η ανισοκατανομή των μηνιαίων καταναλώσεων.

Ο προσδιορισμός του τεχνικοοικονομικά βέλτιστου ύψους και τύπου φράγματος μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση σύγχρονων μεθόδων και προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή για την δημιουργία των εξής μαθηματικών προσομοιώσεων (μαθηματικών μοντέλων):

- μαθηματική προσομοίωση της λειτουργίας του υπό μελέτη ταμειυτήρα για μακρά σειρά ετών, που οδηγεί στον προσδιορισμό της πιθανότητας επιτυχούς ικανοποίησης της ζήτησης
- μαθηματική προσομοίωση του κυρίως φράγματος και των συναφών των έργων που οδηγεί στην προμέτρησή και την συνολική δαπάνη τους, ως συνάρτηση του τύπου και του ύψους του φράγματος.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η εφαρμογή της μεθοδολογίας στο φράγμα Νεοχωρίτη Νομού Τρικάλων που βρίσκεται υπό μελέτη.

Θεωρείται βέβαιο ότι η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή του τύπου και του ύψους ενός φράγματος με βάση τεχνικοοικονομικά κριτήρια ώστε να αποφεύγονται άστοχες επενδύσεις λόγω υπερδιαστασιολογήσεως ή υποδιαστασιολογήσεως των έργων.

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 10

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. DEJARDIN, J.M. & P. JOUHET. 1971. «Les Modèles déterministes de transformation de précipitation en débit». Les modèles mathématiques en hydrologie. Actes du Colloque de Varsovie. vol. 2.
2. FERNANDEZ, R. & J. LLAMAS. 1984. «Modélisation stochastique appliquée à la gestion des ressources en eau. Simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique». 52^e Congrès annuel de l' ACFAS, Québec.
3. FIERING, M.E. and B. JACKSON.1971. «Synthetic Streamflow». Water Resources Monograph 1. American Geophysical Union.
4. FLEMING, G. 1975. Computer Simulation Techniques in Hydrology. New York. Elsevier. Environmental Science Series: Biswas, A.K. Editor.
5. KARIM – BHUIYA, K. 1973. Report on the Estimate of Long Term Flow of LA GRANDE COMPLEX. Division hydrologie des services hydrauliques. Hydro – Québec.
6. LETTENMAIER, D.P. & S.J. BURGER. 1977. «Operational Assessment of Hydrologic Models of Long-Term Persistence». W.R.R.. vol.13, n^o1.
7. McLEOD, A.I. & K.W. HIPEL. 1978. «Simulation Procedures for Box – Jenkins Models». W.R.R. vol.14, n^o5.
8. MATALAS, N.C. 1976. «Generation of synthetic flow sequences», in Biswas, A.K. Systems Approach to Water Management. McGraw – Hill.
9. MOUGIN, G., & J.M. DEJARDIN. 1972. «Les Modèles déterministes de transformation précipitation - débit». La Houille blanche. n^o4.
10. RODRIGUEZ – ITURBE, I., J.M. MEJIA & D.R. DAWDY. 1972. «A New Look at Markovian Models Fractional Gaussian Noise and Crossing Theory». W.R.R. vol.8, n^o4.
11. ROCHE, M. 1971. «Les Divers types de modèles déterministes». La Houille blanche. n^o2.

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Σελ. 11

A Method for the optimum design of Dams and application to the design of Neochoritis Dam in Trikala (Thessaly)

By

John G. Eftimiatis

Dr Civil Engineer, Hydrosystems Ltd Consulting Engineers

John S. Daoutis

Civil Engineer, Hydrosystems Ltd Consulting Engineers

ABSTRACT: This paper presents in detail a method of determining the type and the height of dams in order to satisfy the monthly water consumptions with the maximum probability of success and the optimum ratio of cost-benefit. With the proper selection of the reservoir size the regulation of the non uniform monthly and yearly runoffs is obtained.

Ι. Γ. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού Φραγμάτων – Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του φράγματος
Νεοχωρίτη του Ν. Τρικάλων

Αγγλική Περίληψη