Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων
Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Κεφάλαιο 13ο: Ξηρασία

Φ. Π. Μάρης
Αναπλ. Καθηγητής

Κεφάλαιο 13ο : Ξηρασία

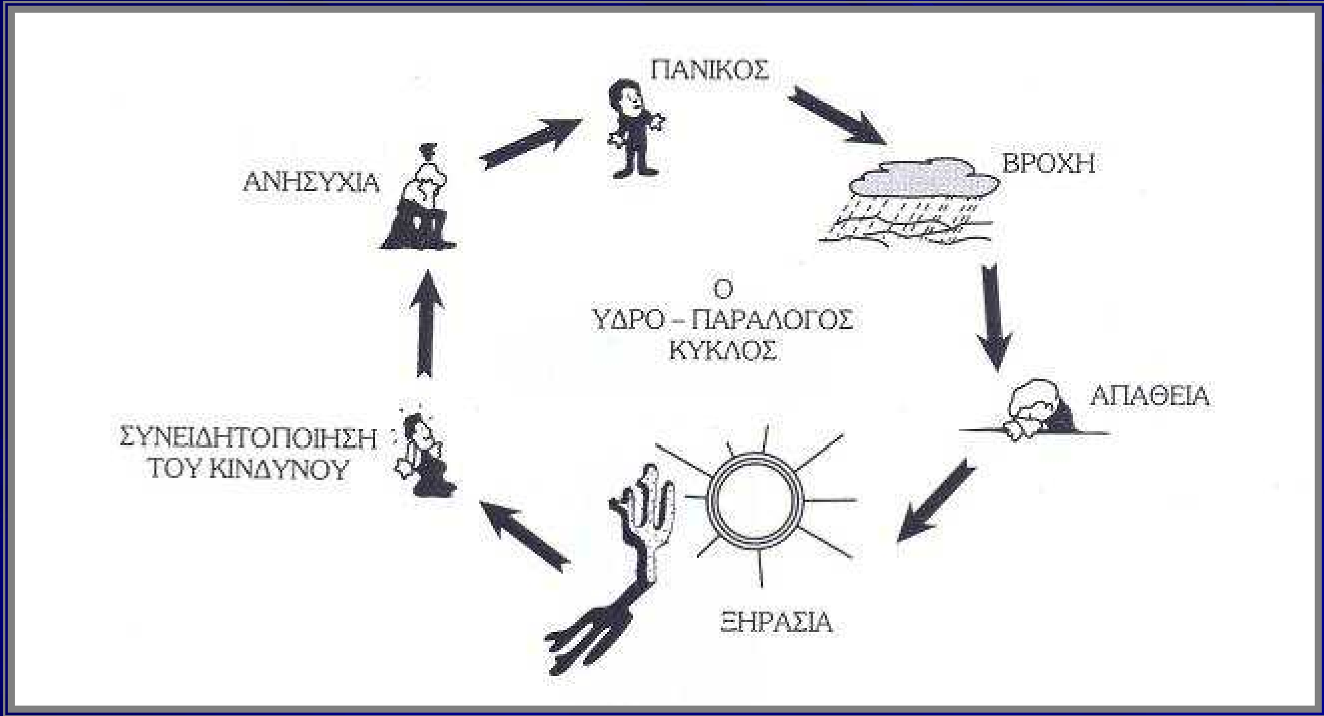
13.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της ξηρασίας άρχισε πρόσφατα να απασχολεί το ευρύ κοινό λόγο της λειψυδρίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη χώρα μας αλλά και σε μεγάλο βαθμό την υπόλοιπη Ευρώπη.

Είναι γεγονός ότι η ξηρασία είναι ένα ακραίο γεγονός που έχει διάφορες εκφράσεις ανάλογα με την παράμετρο με την οποία εκφράζεται και ανάλογα με το κλίμα της περιοχής που αναφέρεται. Ουσιαστικά το κρίσιμο επίπεδο της μεταβλητής με την οποία εκφράζεται η ξηρασία διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.

Σύμφωνα με ένα γενικό ορισμό ξηρασία για ένα υδατικό σύστημα είναι το φαινόμενο κατά τη διάρκεια εμφάνισης του οποίου το υδατικό σύστημα βρίσκεται κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο σε σχέση με την κανονική του λειτουργία. Μ’ αυτόν το γενικό ορισμό θέματα όχι μόνο της προσφοράς του νερού θίγονται αλλά και εκείνα της ζήτησης και της αποθήκευσης.

Το φαινόμενο της ξηρασίας σε αντίθεση με άλλα ακραία γεγονότα όπως πλημμύρες, καταιγίδες κλπ, έχει συνήθως μεγάλη χρονική διάρκεια.



Σχ. 13.1: *Ο "υδροπαράλογος" κύκλος της ξηρασίας.*

Ιδιαίτερα το φαινόμενο της ξηρασίας αναγκάζει συνήθως τις κυβερνήσεις να ανακοινώσουν μέτρα για τον περιορισμό της κατανάλωσης αλλά και να αναγγείλουν νέα έργα για την καλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων. Επειδή η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που εντάσσεται στη γενικότερη διακύμανση του κλίματος μιας περιοχής πολλά από τα μέτρα που αναγγέλλονται κατά τη διάρκεια της ξηρασίας ξεχνιούνται μόλις έρθουν οι βροχές. Είναι χαρακτηριστικό το σκίτσο του Σχ. 13.1 (Wilhite, 1993) που παρουσιάζει τον "υδρο - παράλογο" κύκλο.

Ως άμεση επίπτωση μιας παρατεταμένης ξηρασίας έχει πολλές επιπτώσεις στα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα, στο περιβάλλον και σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Η ανάλυση των επιπτώσεων της ξηρασίας είναι ένα διεπιστημονικό αντικείμενο μεγάλης σπουδαιότητας και ξεφεύγει από την "υδρολογική/μετεωρολογική" προσέγγιση αυτού του βιβλίου.

Η "ξηρασία" δεν πρέπει να συγχέεται με την "ξηρότητα του κλίματος" μιας περιοχής (aridity). Η ξηρότητα σε αντίθεση με την ξηρασία αναφέρεται στα μόνιμα μετεωρολογικά / υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Σύμφωνα με την ταξινόμηση της UNESCO (1979) η κλιματική ξηρότητα μπορεί να παρουσιασθεί με τον Δείκτη ξηρότητας που είναι το πηλίκο του μέσου ετήσιου ύψους βροχής προς το μέσο ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (P/PET). Με βάση αυτόν τον δείκτη μια περιοχή μπορεί να χαρακτηρισθεί:

Πίν. 13.1: *Χαρακτηρισμός κλίματος μιας περιοχής με βάση το δείκτη ξηρότητας*

Χαρακτηρισμός κλίματος	*P/ PET*
Υπερβολικά ξηρή	*< 0.03*
Ξηρή	*0.03 -0.20*
Ημίξηρή	*0.20- 0.50*
Υφυγρή	*0.50 - 0.75*
Υφυγρή	*> 0.75*

Η επιστημονική προσέγγιση του φαινομένου της ξηρασίας περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης, που στηρίζονται σε διαφορετικές παραδοχές και ορισμούς.

Σε κάθε περίπτωση, η προσομοίωση του φαινομένου στο σύνολο του είναι δύσκολο εγχείρημα. Σε γενικές γραμμές, η μελέτη των ξηρασιών περιλαμβάνει τόσο την ανάλυση συχνοτήτων ελαχίστων τιμών χαρακτηριστικών υδρολογικών μεταβλητών για μεγάλο χρονικό διάστημα (βροχόπτωση, απορροή κλπ.), όσο και τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεικτών που αποτελούν μέτρο ποσοτικής εκτίμησης μιας ξηρασίας (υδατικό έλλειμμα, ελλειμματική επιφάνεια, ένταση κλπ.). Οι δείκτες αυτοί, μπορεί να συσχετισθούν με διάφορα χαρακτηριστικά της "περιοχής μελέτης".

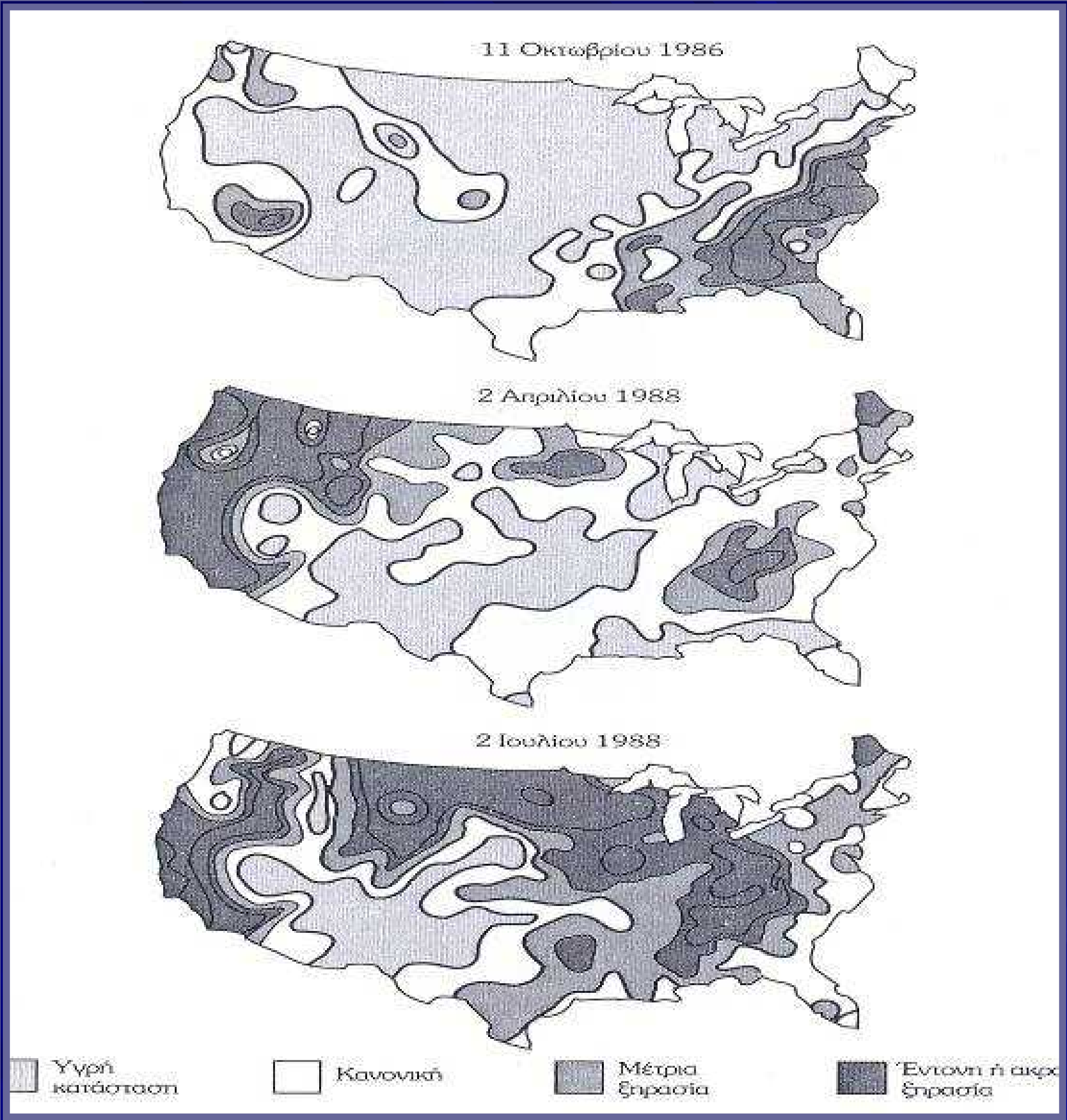
Ως περιοχή μελέτης του φαινομένου, νοείται είτε μια σχετικά εκτεταμένη περιοχή (π.χ. υδρολογική λεκάνη), είτε ένα σύνολο "σημειακών πηγών" που συνιστούν ένα σύστημα (π.χ. ένας ή περισσότεροι ταμιευτήρες αποθήκευσης νερού που εξυπηρετούν τις υδρευτικές ανάγκες μιας μεγαλούπολης όπως για παράδειγμα το σύστημα Μόρνος -Υλική - Μαραθώνας, είτε τέλος ένα μόνο "σημείο" (π.χ. μετεωρολογικός σταθμός).

13.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Η ξηρασία αποτελεί ίσως το περισσότερο δύσκολο στην κατανόηση του υδρολογικού φαινομένου. Η πλήρης κατανόηση του ξεφεύγει και από αυτά τα πλαίσια της υδρολογίας. Πρόκειται δηλαδή για ένα φαινόμενο που μπορεί να αναλυθεί σε βάθος μόνο με διεπιστημονική προσέγγιση.

Οι πιο γνωστοί ορισμοί της ξηρασίας είναι (Grigg και Vlachos, 1989):

- Μετεωρολογική ξηρασία που είναι μια περίοδος χωρίς αρκετή βροχή (σύμφωνα με τα ερμηνευτικά λεξικά).
- Υδρολογική ξηρασία που είναι η περίοδος υδρολογικού ελλείμματος (π.χ. στην απορροή, στην αποθήκευση σε ταμιευτήρες, στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα).
- Γεωργική ξηρασία που εξαρτάται από τα επίπεδα εδαφικής υγρασίας και επάρκειας του νερού για την ανάπτυξη των καλλιεργειών.
- Κοινωνικό - οικονομική ξηρασία που αναφέρεται σε ελλείμματα υδατικών πόρων που συνήθως οφείλονται στην υπερκατανάλωση την ανεπαρκή υποδομή και προετοιμασία και λιγότερο στις μειωμένες βροχοπτώσεις ή στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.



Σχ 3.2: *Χάρτες του Δείκτη Palmer για τις ΗΠΑ σε χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές της περιόδου 1986-88*

13.3 ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΞΗΡΑΣΙΑ

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η βασική διάκριση των ξηρασιών γίνεται με βάση το "χώρο μελέτης" του φαινομένου.

Στη γενική περίπτωση, είναι ένα σημείο μιας περιοχής όπου γίνεται συστηματική καταγραφή μετεωρολογικών / υδρολογικών μεγεθών (π.χ. υψών βροχής, τιμών θερμοκρασίας, κλπ.).

- Για να οριστεί πλήρως μια ξηρασία σε ένα σημείο σταθμό, πέρα από την υδρολογική μεταβλητή και το χρονικό βήμα μελέτης (ημέρα, μήνας, κλπ.), χρειάζεται μια επιπλέον παράμετρος. Συνήθως λαμβάνεται ένα ελάχιστο όριο ή κρίσιμη τιμή της επιλεγείσας υδρολογικής μεταβλητής (κατώφλι), που μπορεί να είναι σταθερά ή συνάρτηση του χρόνου. Συνήθεις τιμές της κρίσιμης μεταβλητής μπορεί να είναι, ανάλογα με τη χρονική βάση αναφοράς, ο μέσος όρος μιας σειράς ημερών, μηνών ή ετών.

- Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μελέτη μιας ξηρασίας στηρίζεται στην ανάλυση χρονοσειρών υψών βροχής.

- *Ως σημειακή ξηρασία*, ορίζεται η χρονική περίοδος κατά την οποία η υδρολογική μεταβλητή "ύψος βροχής", *δεν* υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή της, που είναι χαρακτηριστική για τον υπόψη σταθμό.

Ως χαρακτηριστική μεταβλητή μπορεί να θεωρηθεί στην περίπτωση αυτή, ο αποθηκευμένος όγκος νερού σε μια "πηγή". Ως κρίσιμη τιμή της μεταβλητής αυτής, μπορεί να θεωρηθεί ένας "ελάχιστος" όγκος νερού (π.χ. εκείνος που αντιστοιχεί στη μέση στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα).

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

(i) περίπτωση ενός ταμιευτήρα: Ως *σημειακή* ξηρασία ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο, ο αποθηκευμένος όγκος νερού *δεν* υπερβαίνει τον κρίσιμο.

(ii) περίπτωση πολλών ταμιευτήρων: για να οριστεί η ξηρασία *συστήματος*, απαιτείται, πέρα από τον κρίσιμο αποθηκευμένο όγκο σε κάθε ταμιευτήρα, ένας κρίσιμος αριθμός ταμιευτήρων, των οποίων σε δεδομένη χρονική στιγμή, ο αποθηκευμένος όγκος δεν θα υπερβαίνει τον κρίσιμο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ξηρασία συστήματος ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο αριθμός “πηγών” του συστήματος, είναι μεγαλύτερος ή ίσος του κρίσιμου.

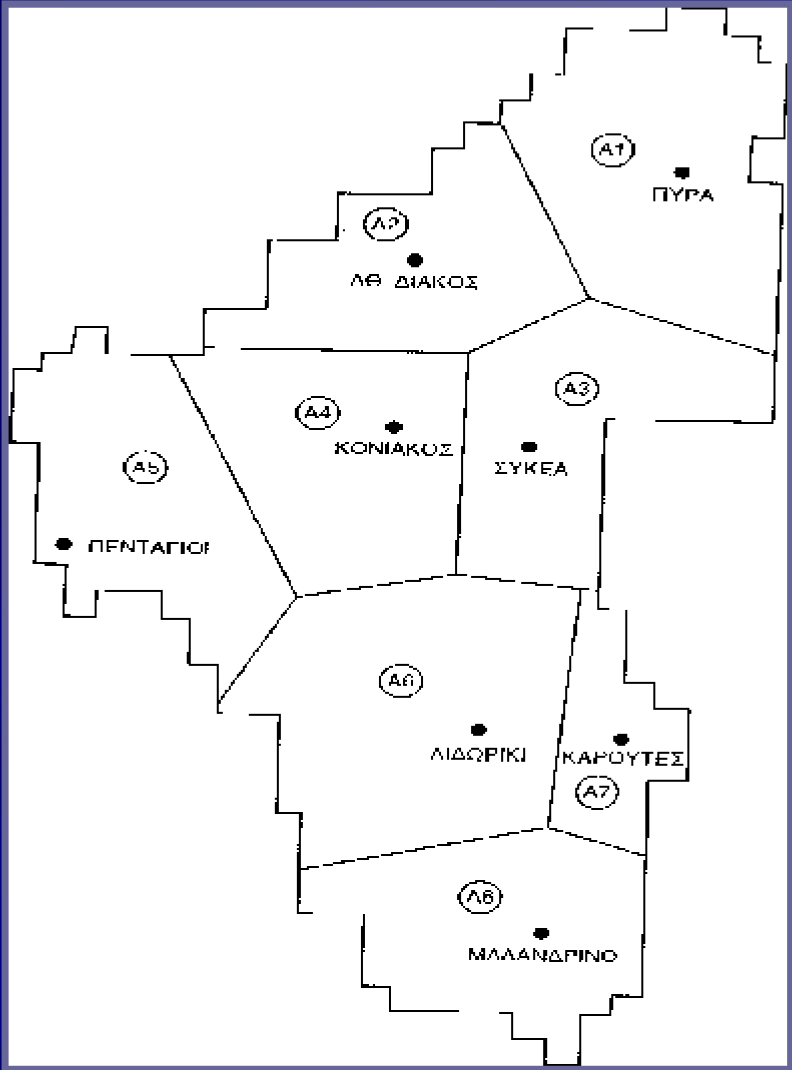
Στην περίπτωση που η μελέτη του φαινομένου γίνεται σε μια εκτεταμένη περιοχή (π.χ. λεκάνη απορροής), χρησιμοποιείται το σύνολο τη υδρολογικής πληροφορίας των σταθμών σημείων που βρίσκονται στο εσωτερικό της περιοχής αυτής. Προσπορίζετε για κάθε σταθμό ένας συντελεστής επιρροής, που συνήθως εκφράζεται ως το ποσοστό του συνόλου της επιφάνειας της περιοχής μελέτης. Για τον ορισμό της επιφανειακής ξηρασίας, πέρα από την κρίσιμη τιμή της υδρολογικής μεταβλητής σε κάθε σταθμό, χρησιμοποιείται μια επιπλέον παράμετρος : η κρίσιμη ελλειμματική επιφάνεια που εκφράζετε επίσης ως ποσοστό του συνόλου της επιφανείας της περιοχής μελέτης.

Στην ανάλυση που ακολουθεί η μελέτη του προβλήματος της επιφανειακής ξηρασίας περιλαμβάνει δύο στάδια.

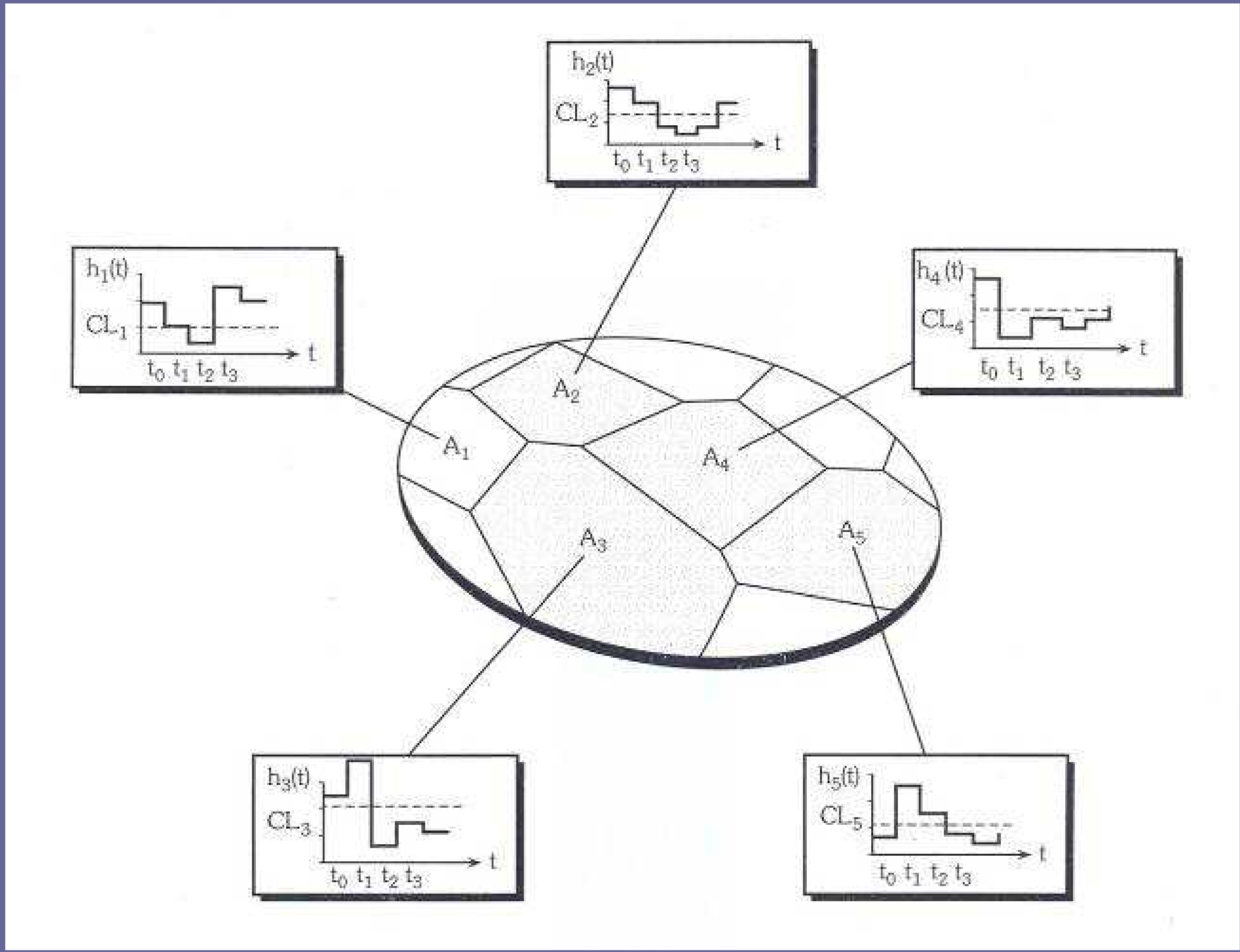
- **Πρώτο Στάδιο** : Ο ορισμός των ποσοτικών δεικτών, " υδατικό έλλειμμα" και " ελλειμματική επιφάνεια" και διερεύνηση της μεταβολής του ως συνάρτηση του χρόνου.

  Για το σκοπό αυτό, επιλέγεται σε πρώτη φάση, η κατάλληλη υδρολογική μεταβλητή, (π.χ. το ύψος βροχής). Για τον πλήρη προσδιορισμό παραπάνω δεικτών απαιτούνται επίσης δύο επιπλέον μεταβλητές, που αποτελούν τα χαρακτηριστικά μιας ξηρασίας : ένα κρίσιμο ύψος (κατώφλι βροχής), πέραν του οποίου δημιουργείται το υδατικό έλλειμμα, καθώς και μια ελάχιστη τιμή της έκτασης της πληττόμενης επιφάνειας (κρίσιμη ελλειμματική επιφάνεια) (Σχ. 13.4 και 13.5).

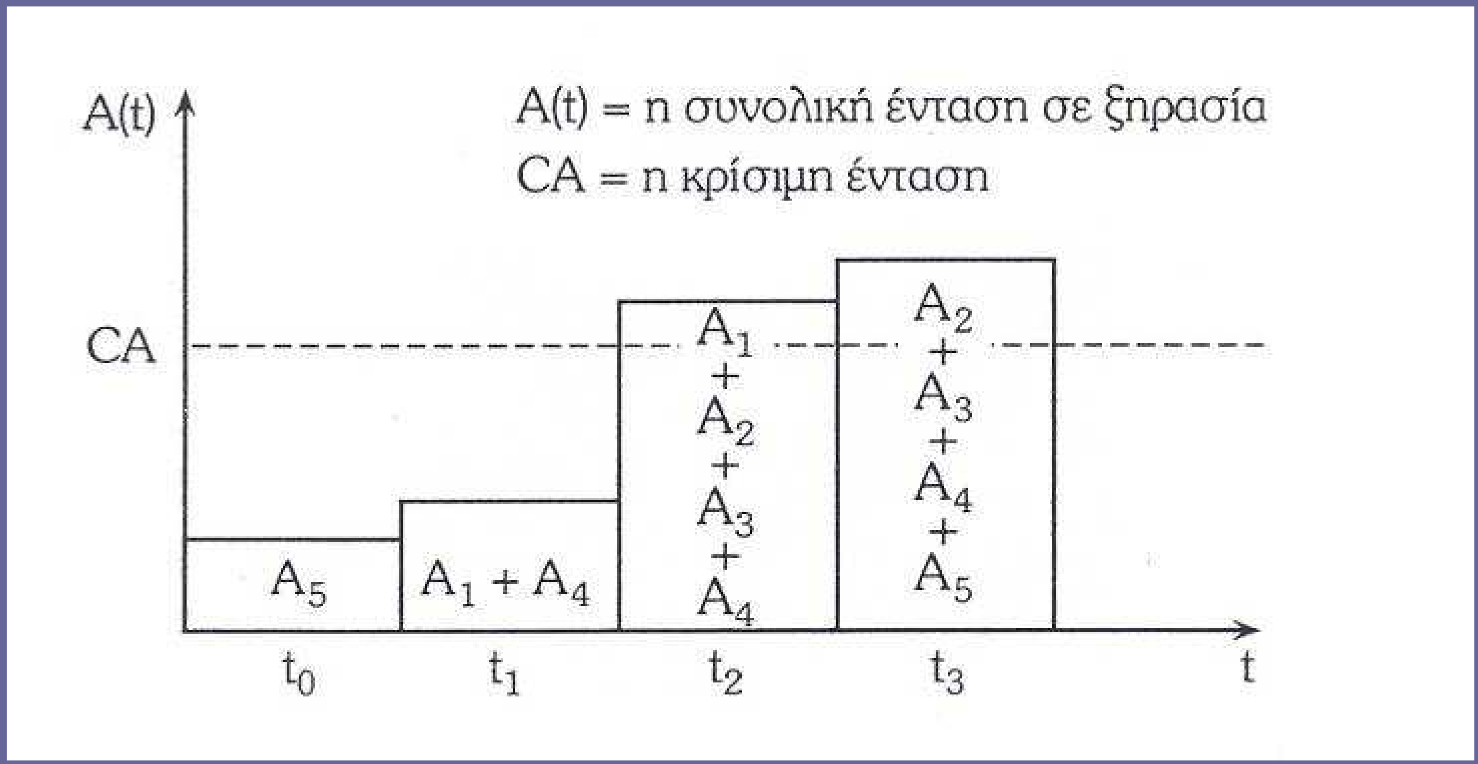
- **Δεύτερο στάδιο** : Ανάλυση επικινδυνότητας μιας ξηρασίας με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση αυτή, εξετάζονται οι συναρτήσεις επικινδυνότητας (drought risk), επαναφοράς (resilience)και ευπάθειας (vulnerability), που χαρακτηρίζουν αντίστοιχα, το βαθμό επικινδυνότητας, το χρόνο επαναφοράς, καθώς και την ευπάθεια του συστήματος από την εξάπλωση μιας ξηρασίας (Hashimoto κ.ά.,1982, Duckstein κ.α., 1984).



Σχ. 13.3: Οι μετεωρολογικοί σταθμοί και οι εκτάσεις επιρροής τους στην υδρολογική λεκάνη του Μόρνου (Πολύγωνο Thiessen - Διακριτοποίηση ορίων με βήμα 1 Km)



Σχ. 13.4 : *Σταθμοί και εκτάσεις επιρροής που βρίσκονται σε ξηρασία. (Παράδειγμα για την περίοδο t3).*



Σχ. 13.5: *Η συνολική έκταση σε ξηρασία με βάση τα δεδομένα του Σχήματος 13.*

$A_{s(i)} = \sum_{k=1}^{n} a_k I[h(i,k)],$

13.3.1 Δείκτες Ξηρασίας

α) Στιγμιαία Ελλειμματική Επιφάνεια, As

Είναι το μέρος της επιφάνειας μιας περιοχής, συνολικής έκτασης S που πλήττεται από ξηρασία. Ο όρος "στιγμιαία", εκφράζει τη χρονική βάση μελέτης της ξηρασίας (π.χ. το υδρολογικό έτος) που φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις):

$$A_{s(i)} = \sum_{k=1}^{n} a_k I[h(i,k)],$$

όπου:

- $A_{s(i)}$ είναι η ελλειμματική επιφάνεια για την i περίοδο (υδρολογικό έτος),
- a_k είναι ο συντελεστής επιρροής του βροχομετρικού σταθμού k

Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως: $a_k = S_k/S$,

Όπου :

- S_k είναι η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο βροχομετρικό σταθμό k, (1,…….,η)
- S η συνολική έκταση της περιοχής στην οποία γίνεται η ανάλυση,
- I είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση που μπορεί να πάρει τιμές 0 ή 1, ανάλογα με την ετήσια τιμή του βροχομετρικού ύψους h(i,k) του σταθμού k, που αντιστοιχεί στο υδρολογικό έτος i.

Συγκεκριμένα:

Αν $h(i, k) < CL$, τότε $I[h(i,k)]=1$

Αν $h(i, k) \leq CL$, τότε $I[h(i, k)] = 0$

όπου:

CL ένα κρίσιμο ύφος βροχής (κατώφλι βροχής), για το βροχομετρικό σταθμό k

Η τιμή αυτή, στη γενικότερη περίπτωση, μπορεί να ληφθεί από τη συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής h, για δεδομένη πιθανότητα μη υπερβάσεως.

β) Επιφανειακή Ξηρασία

Ως επιφανειακή ξηρασία μπορεί να οριστεί το γεγονός κατά τη διάρκεια του οποίου, η στιγμιαία ελλειμματική επιφάνεια As, υπερβαίνει ή είναι ίση με μια κρίσιμη τιμή CA, που είναι χαρακτηριστική για την υπό μελέτη περιοχή, δηλαδή $As \geq CA$.

γ) Διάρκεια Ξηρασίας, L

Ως διάρκεια ξηρασίας μπορεί να οριστεί το χρονικό διάστημα κατά το οποίο, το φαινόμενο της ξηρασίας επηρεάζει την υπό μελέτη περιοχή. Συγκεκριμένα με τη χρήση διακριτών τιμών χρόνου (π.χ. έτη)

$$L = t_e - t_0 + l, \qquad (13.2)$$

όπου:

t_0 είναι χρονική στιγμή τέτοια ώστε: $As(t_0) \geq CA$ και $As(t_0 - 1) < CA$, ενώ για τη χρονική στιγμή t_e ισχύει: $As(t_e) \geq CA$ και $As(t_e + 1) < CA$.

δ) Στιγμιαίο Υδατικό Έλλειμμα, Ds

Ο ποσοτικός αυτός δείκτης ορίζεται από την εξίσωση:

$$D_s(i) = \Sigma\, a_k[CL-h(i,k)]\; I\, [h(i,k)], \qquad (13.3)$$

όπου οι μεταβλητές που εμφανίζονται στην εξίσωση αυτή έχουν οριστεί προηγούμενα. Οι τιμές της ποσότητας I[h(i,k)]είναι όπως στην Εξ. 13.1.

Το στιγμιαίο υδατικό έλλειμμα αντιπροσωπεύει την ένταση του φαινομένου της ξηρασίας.

ε) Μέση Ελλειμματική επιφάνεια, A

Είναι η μέση τιμή της "στιγμιαίας" ελλειμματικής επιφάνειας που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα (t_0, t_e):

$$\overline{A} = \frac{\sum_{t_0}^{t_e} A_s(t)}{L} \qquad (13.4)$$

Ισχύει: $A_s(t) \geq CA$, $t_0 \leq t \leq t_e$.

Η μέση ελλειμματική επιφάνεια, A, αποτελεί το δείκτη της χωρικής εξάπλωσης της ξηρασίας.

στ) Αθροιστικό Υδατικό Έλλειμμα, D

Είναι το άθροισμα των "στιγμιαίων τιμών" του υδατικού ελλείμματος κατά τη διάρκεια της ξηρασίας. Συγκεκριμένα:

$$D = \sum_{t_0}^{t_e} D_s(t), \qquad (13.5)$$

Το αθροιστικό υδατικό έλλειμμα αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης του συνολικού μεγέθους του φαινομένου της ξηρασίας.

13.3.2 Εκτίμηση της Επικινδυνότητας μιας Ξηρασίας

α) Βαθμός Επικινδυνότητας

Το τυχαίο γεγονός μιας ξηρασίας, θεωρείται δυσμενής κατάσταση για το υπό μελέτη σύστημα (π.χ. υδρολογική λεκάνη). Η πιθανότητα να συμβεί ξηρασία σε οποιοδήποτε υδρολογικό έτος, ορίζεται ως βαθμός επικινδυνότητας και δίνεται από την πιθανότητα της μη υπέρβασης:

$$P(H< h)=1 / T$$

όπου:

- **$P(H<h)$ είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης της τιμής h της τυχαίας μεταβλητής H που είναι το ετήσιο ύψος βροχής, και**
- **T είναι η περίοδος επαναφοράς σε έτη.**

Η Εξ. 13.6 αναφέρεται σε ανάλυση ελαχίστων και συνεπώς είναι αντίστροφη της εξίσωσης για τα μέγιστα.*

Είναι προφανές ότι επειδή το φαινόμενο της ξηρασίας είναι πολυδιάστατο (ένταση, έκταση, διάρκεια) για την εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας η πρέπει η έκταση και η διάρκεια να καθοριστούν στην αρχή είτε η ανάλυση να γίνει για αντιπροσωπευτικά της έκτασης μεγέθη (π.χ. δεδομένα του πιο αντιπροσωπευτικού σταθμού στην περιοχή).

β) Επαναφορά

Η συνάρτηση επαναφοράς (resilience) αποτελεί μέτρο εκτίμησης του χρόνου αποκατάστασης του συστήματος, μετά από ένα γεγονός ξηρασίας.

Ορίζεται ως η συνάρτηση κατανομής του χρόνου επαναφοράς του συστήματος, μετά από διαφορετικά γεγονότα ξηρασίας. Θεωρούνται δύο πιθανές περιπτώσεις:

i) ο χρόνος επαναφοράς του συστήματος ισούται με τη διάρκεια της ξηρασίας που προηγήθηκε,

ii) ο χρόνος επαναφοράς είναι μεγαλύτερος από τη διάρκεια της ξηρασίας.

Στη δεύτερη περίπτωση, ο χρόνος επαναφοράς *tr,* υπολογίζεται ως εξής:

Θεωρείται η συνάρτηση:

$$e(t)=h(t)-RL, \quad RL<h(t) \quad (13.7α)$$

$$e(t)=0, \quad RL \geq h(t) \quad (13.7β)$$

όπου:

- *e(t)* είναι το υδατικό πλεόνασμα στο χρόνο *t* (υδρολογικό έτος i), μετά το πέρας της ξηρασίας *te, επίσης,*
- *RL* είναι το βροχομετρικό ύψος επαναφοράς (recovery level), που μπορεί να ληφθεί ίσο ή μεγαλύτερο με το κρίσιμο βροχομετρικό ύψος *CL.*

$$E(t)= \Sigma e(t) \quad (mm), \quad (13.8)$$

όπου:

- *E(t)* είναι το αθροιστικό υδατικό πλεόνασμα της περιόδου (re, r).

Το ποσοστό του αθροιστικού υδατικού ελλείμματος *D (Εξ* 13.5), που χρειάζεται να καλυφθεί, ονομάζεται ποσοστό επαναπληρώσεως AR (recovery rate). Επομένως ο χρόνος επαναφοράς του συστήματος *tr* μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$t_r = \min[(t-t_e): E(t)/D \geq AR] \quad (13.9)$$

γ) Ευπάθεια

Η σοβαρότητα των συνεπειών μιας ξηρασίας εκτιμάται με τη συνάρτηση ευπάθειας του συστήματος. Συνήθως ορίζεται μια συνάρτηση απωλειών, όπως η ακόλουθη εξίσωση (Correia, κ.ά., 1986):

$$L_f = -1/K(ln[1-D/D_{max}]) \quad (13.10)$$

όπου:

- L_f η συνάρτηση απωλειών,
- D το αθροιστικό υδατικό έλλειμμα και
- D_{max} μια οριακή τιμή του D, που αντιστοιχεί σε μια ιδιαίτερη καταστροφική ξηρασία.
- Τέλος, K είναι μια παράμετρος που προσδιορίζει πόσο γρήγορα η τιμή του *D* προσεγγίζει την οριακή τιμή D_{max}.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς τον βαθμό επικινδυνότητας αποκτά η παρατεταμένη ξηρασία και επομένως η πιθανότητα να συμβεί ξηρασία για ένα συνεχόμενο αριθμό ετών. Σύμφωνα με τη θεωρία πιθανοτήτων για τις ελάχιστες τιμές η πιθανότητα αυτή για *(η)* συνεχόμενα έτη υπολογίζεται:

$$P(H<h)n = I - (I - 1/T)$$

Βέβαια για την εκτίμηση των συνεπειών μιας ξηρασίας απαιτείται πολύ βαθύτερη ανάλυση του χώρου και των δραστηριοτήτων που υπάρχουν σ’ αυτόν που δεν μπορούν να περιγραφούν με μια εξίσωση όπως η 13.10 Η 13.10 παρουσιάζεται εδώ κυρίως ως παράδειγμα για την κατανόηση της έννοιας της "ευπάθειας".

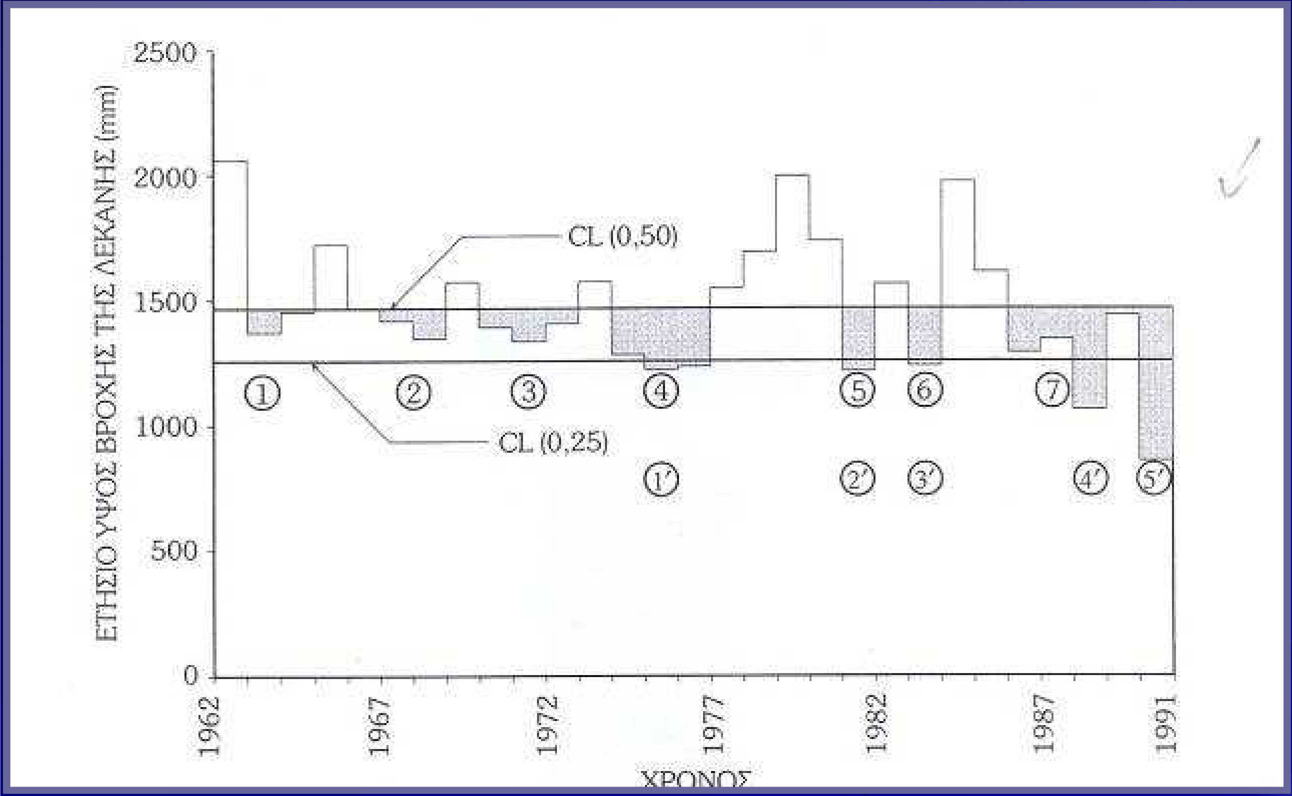
Εφαρμογή

Ως παράδειγμα για την εφαρμογή της μεθόδου εκτίμησης των μεγεθών της ξηρασίας λήφθηκε η υδρολογική λεκάνη του Μόρνου με συνολική έκταση ανάντι του φράγματος 571 Km^2 και μέσο υψόμετρο 1082 m (από 350 ελάχιστη τιμή έως 2400 m) (Tsakiris, κ.ά., 1993).

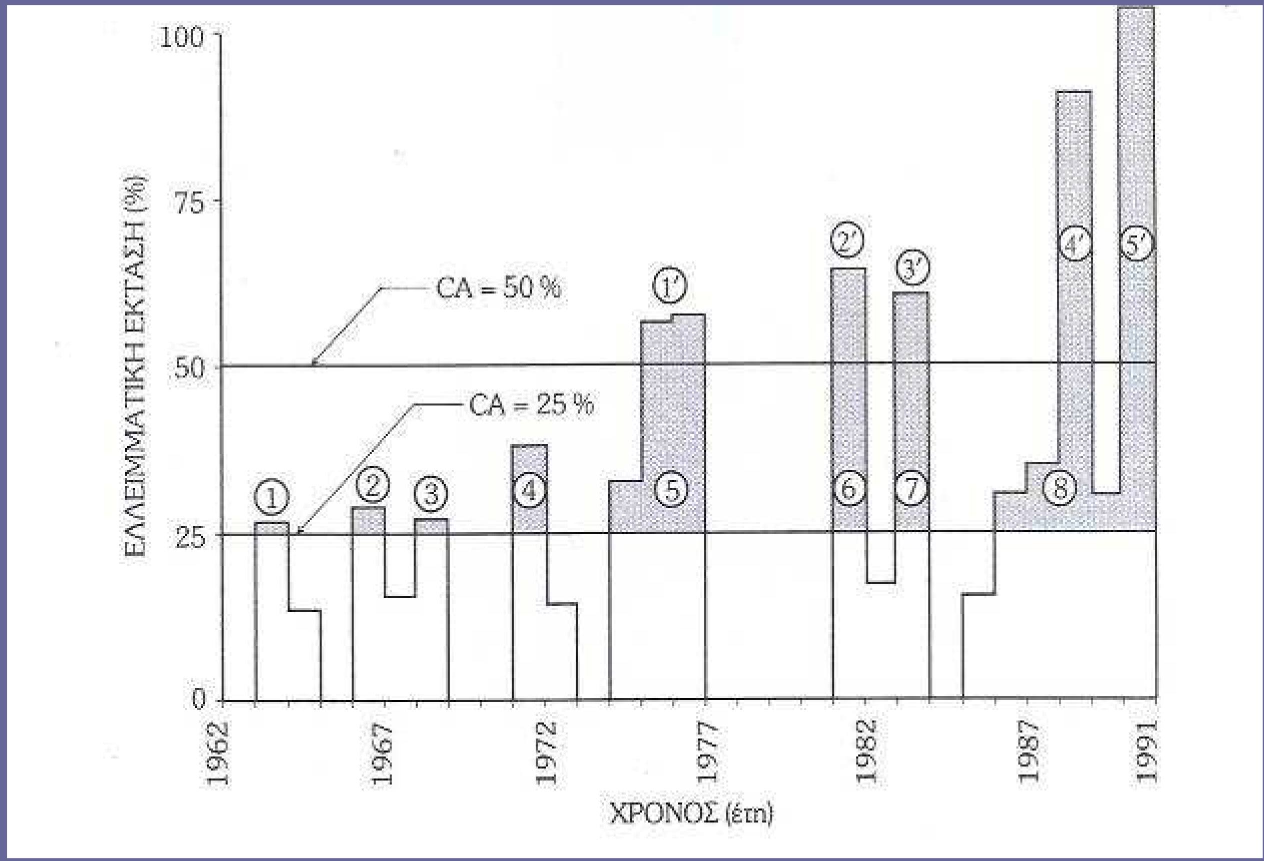
Μετά τους κατάλληλους υπολογισμούς (Thiessen, αναγωγή στο μέσο υψόμετρο) προέκυψε το ετήσιο ύψος βροχής της υδρολογικής λεκάνης για κάθε έτος από τα 25 έτη που υπήρχαν στο δείγμα.

Στο Σχ. 13.6 παρουσιάζεται το ετήσιο ύψος βροχής στη λεκάνη του Μόρνου και τα δυο επίπεδα κρίσιμου ύψους πιθανότητας μη υπέρβασης 0.50 και 0.25. Όπως είναι φανερό για κάθε επίπεδο κρίσιμου βροχομετρικού ύψους προκύπτουν διαφορετικά γεγονότα ξηρασίας. Για το δείγμα που εξετάσθηκε βρέθηκαν 7 και 5 γεγονότα ξηρασίας αντίστοιχα.

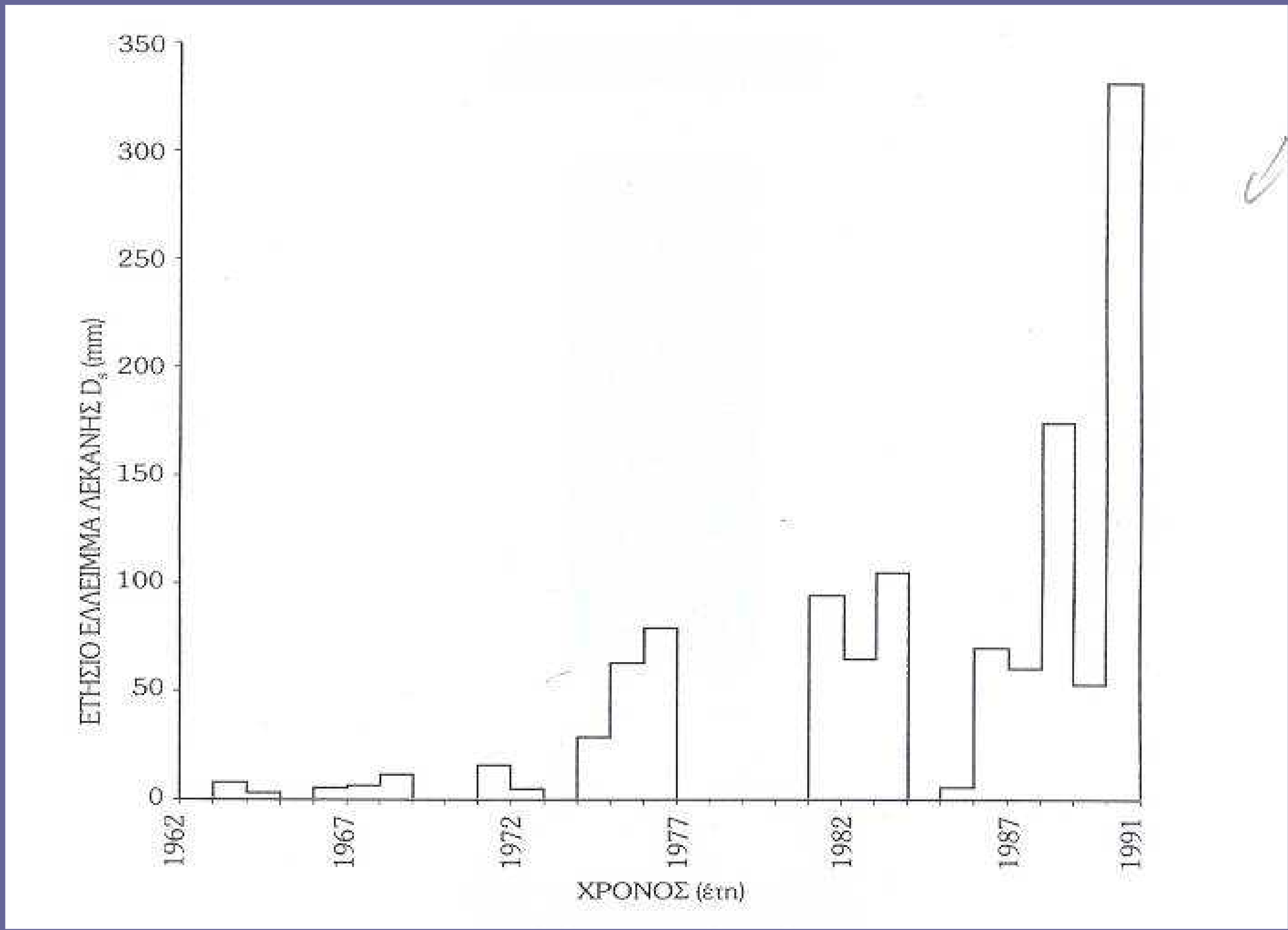
Κρατώντας το αυστηρότερο όριο του κρίσιμου βροχομετρικού ύψους (πιθανότητα μη υπέρβασης 0.25) υπολογίστηκε η ελλειμματική έκταση για κρίσιμα επίπεδα 25% και 50% της συνολικής έκτασης. Στο Σχ. 13.7 παρουσιάζονται τα έτη στα οποία το φαινόμενο της ξηρασίας είχε πάρει μεγάλη έκταση.



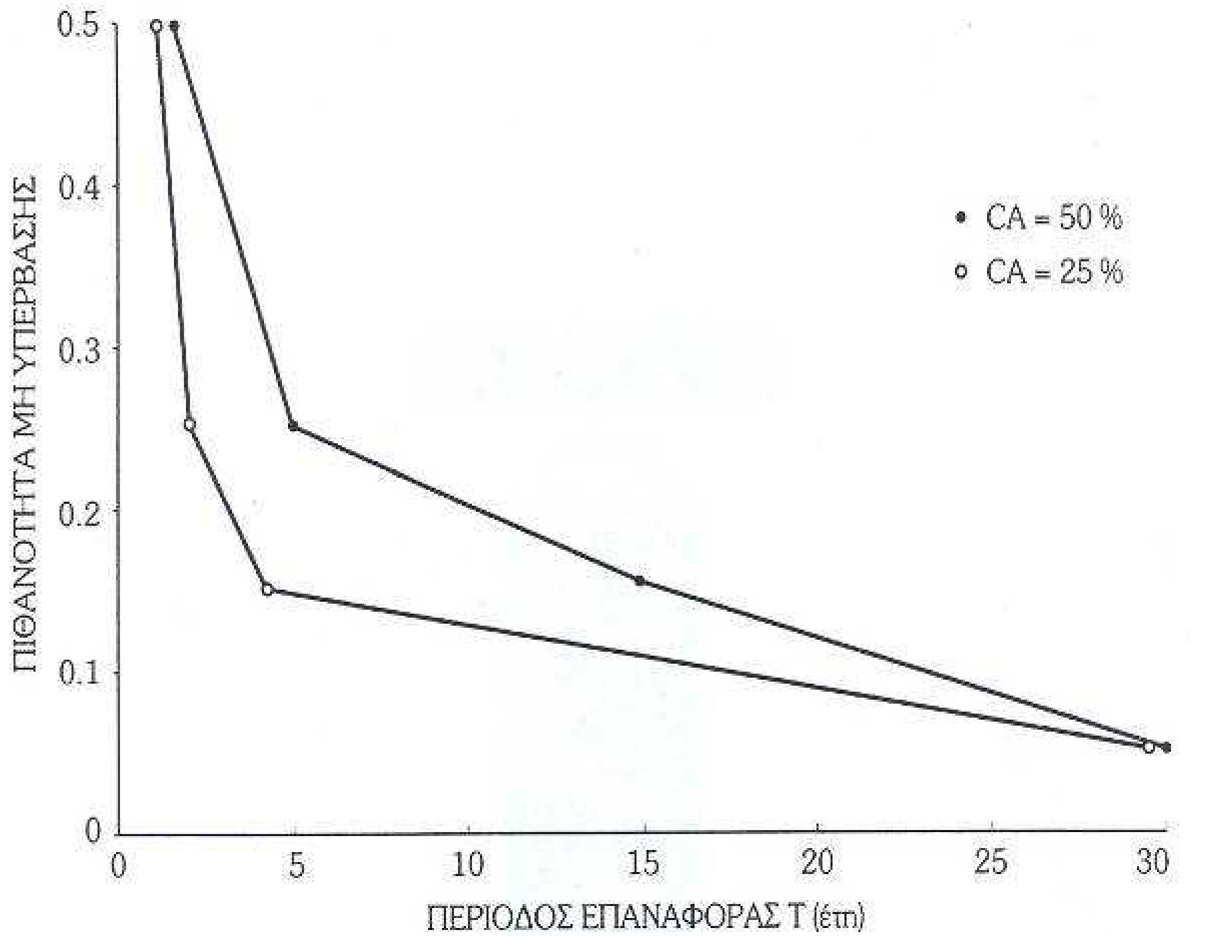
Σχ. 13.6: ***Γεγονότα ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη του Μόρνου για δύο επίπεδα κρίσιμου ετήσιου βροχομετρικού ύψους με πιθανότητα μη υπέρβασης 0.50 και 0.25 αντίστοιχα***



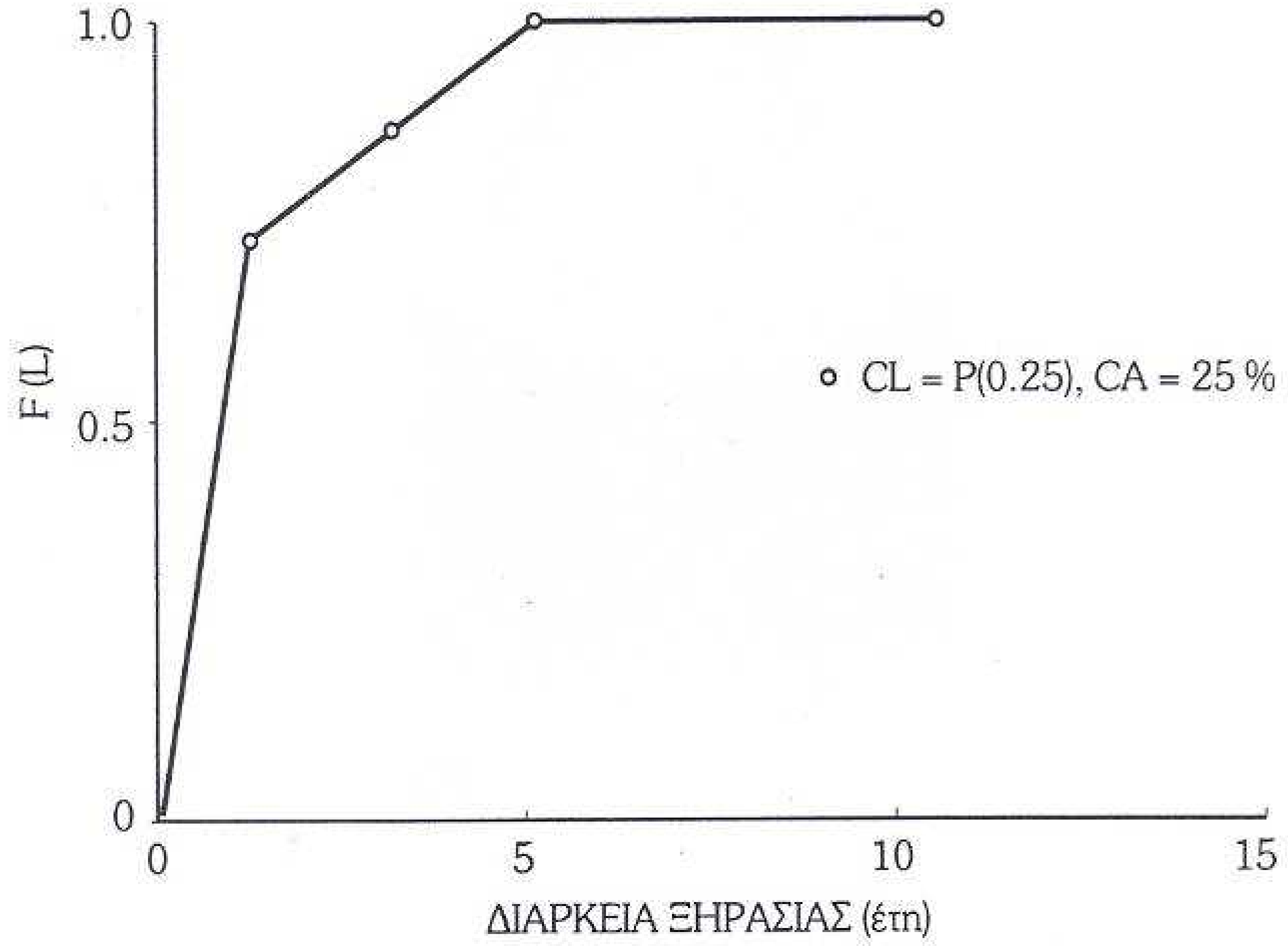
Σχ. 13.7 Ελλειμματική έκταση για κρίσιμο βροχομετρικό ύψος πιθανότητας μη υπέρβασης 0.25 και κρίσιμη έκταση 50% και 25% αντίστοιχα



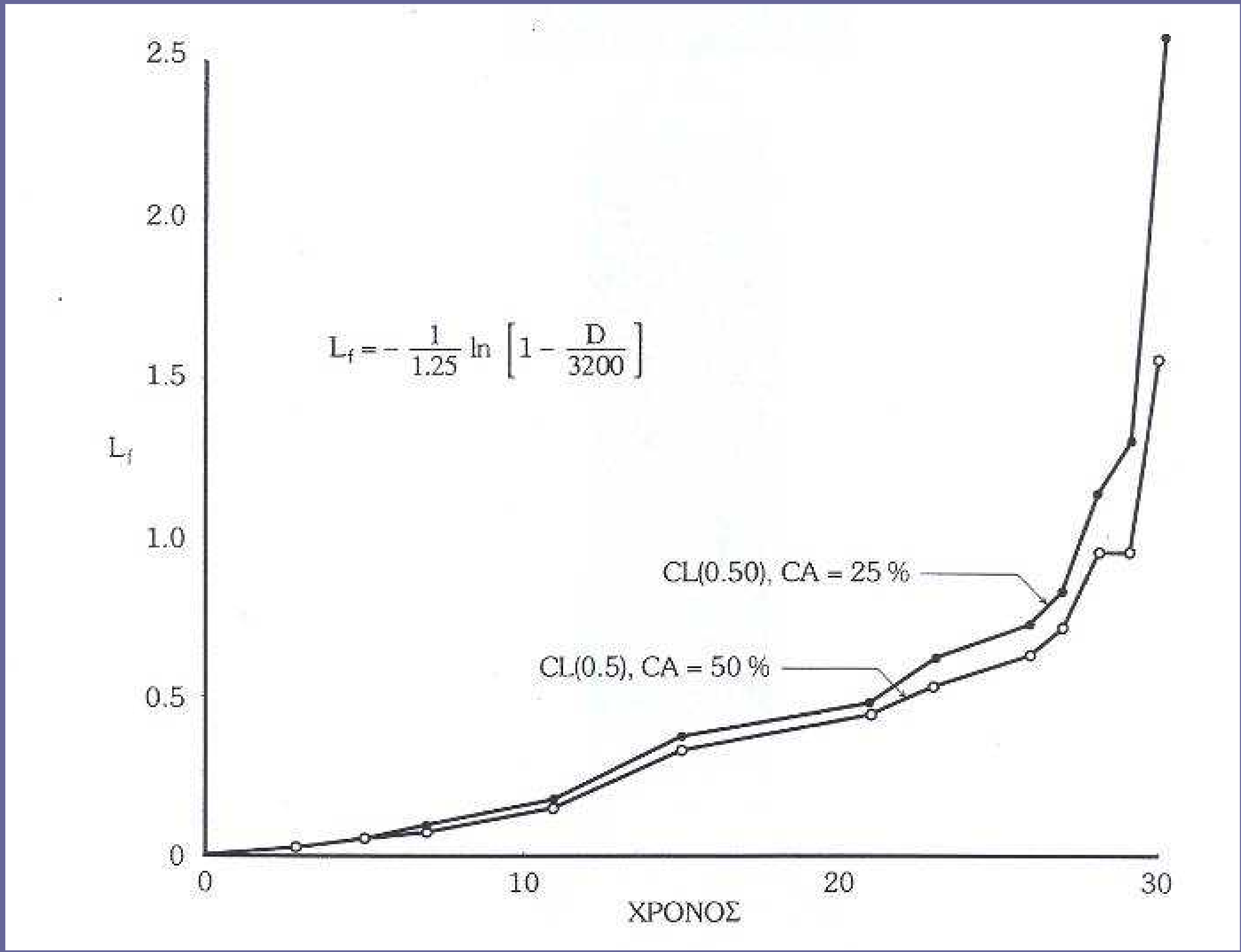
Σχ. 13.8: ***Εξέλιξη του ετήσιου υδατικού ελλείμματος για κρίσιμο ύψος βροχής που αντιστοιχεί σε πιθανότητα μη υπέρβασης 0.25***



Σχ. 13.9: ***Συνάρτηση επικινδυνότητας για κρίσιμη ελλειμματική επιφάνεια CA* = 50 και 25%.**



Σχ. 13.10: ***Συνάρτηση επαναφοράς για χρόνο επαναφοράς ίσο με τη διάρκεια της ξηρασίας, αντίστοιχα για CL (0.25)και CA = 25%.***



Σχ. 13.11: ***Συνάρτηση απωλειών του συστήματος, για κρίσιμη ελλειμματική επιφάνεια 25 και 50 %.***

13.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΧΑΜΗΛΕΣ ΑΠΟΡΡΟΕΣ

13.4.1 Υδρολογική Ξηρασία

Η υδρολογική ξηρασία που επηρεάζει άμεσα τους υδατικούς πόρους και την αξιοποίηση τους δίνει έμφαση στην εμφάνιση χαμηλών παροχών στους επιφανειακούς υδροφορείς (ποταμοί, πηγές, κλπ.) ενώ για τους υπόγειους υδροφορείς χρησιμοποιεί δείκτες που αναφέρονται στη στάθμη του υπόγειου νερού και την ποιότητα του (που σχετίζονται με την υποβάθμιση του λόγω υπεράντλησης).

Είναι γεγονός ότι οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι είναι οι λιγότερο ανθεκτικοί στην περίπτωση της ξηρασίας ενώ οι επιπτώσεις της ξηρασίας στους υπόγειους υδροφορείς έχουν μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης.

Συνηθίζεται λοιπόν ως υδρολογική ξηρασία σε μια περιοχή να χαρακτηρίζεται η κατάσταση που δημιουργείται κατά μια χρονική περίοδο, όπου οι τιμές των παροχών των ποταμών στην περιοχή, παίρνουν ακραίες χαμηλές τιμές. Χαρακτηριστικοί είναι οι θεματικοί χάρτες που συνήθως παρουσιάζονται για να δείξουν την επίπτωση στα επιφανειακά νερά για σημαντικές περιόδους ξηρασίας. Στο Σχ. 13.12 παρουσιάζεται σε μορφή χάρτη η κατανομή των επιφανειακών απορροών στη Βρετανία κατά την περίοδο Σεπτέμβριος 1990 - Αύγουστος 1992. Τα ποσοστά αναφέρονται σε σχέση με τις μέσες τιμές μεγάλης σειράς ετών.

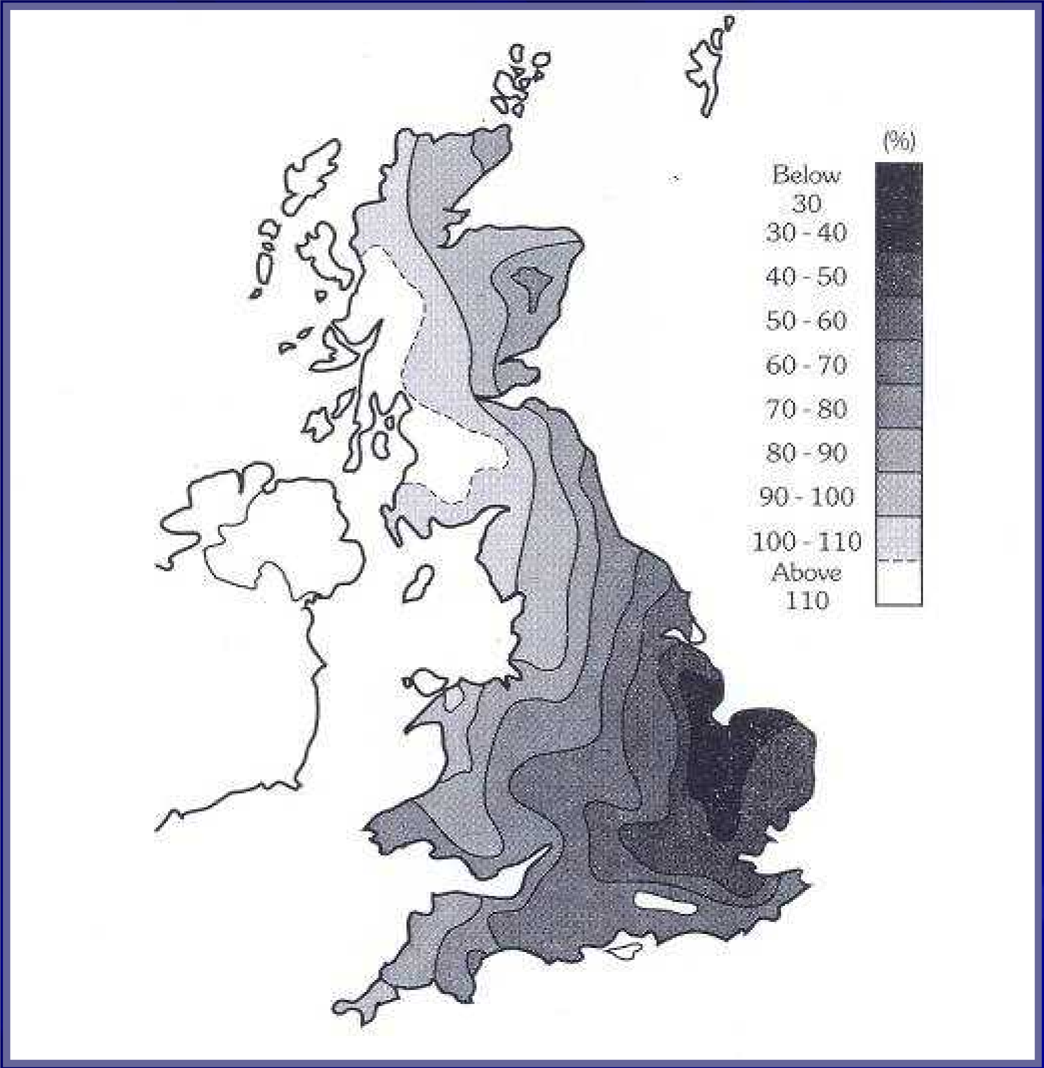
Ένας άλλος συνήθης τρόπος διερεύνησης της υδρολογικής ξηρασίας είναι η κατασκευή διαγράμματος που παρουσιάζει τις αποκλίσεις από τις μέσες τιμές παροχής της αντίστοιχης διάρκειας. Στο Σχ. 13.13 παρουσιάζεται ένα τέτοιο διάγραμμα για το Μόρνο ποταμό στη θέση του φράγματος για ένα δείγμα 228 μηνιαίων τιμών παροχής (Εργαστήριο Αγροτικής Τεχνολογίας, 1991).

Παρά το γεγονός ότι *οι παραπάνω μέθοδοι χαρακτηρισμού της υδρολογικής ξηρασίας* έχουν ποσοτική πληροφορία εντούτοις δεν είναι ακριβείς γιατί δεν προσδιορίζουν το πόσο ακραίες θα πρέπει να είναι οι χαμηλές τιμές της απορροής ώστε να μιλούμε για ξηρασία. Ακόμα όμως και να ήταν ακριβείς δεν θα παρείχαν μονοσήμαντη πληροφορία ως προς τις επιπτώσεις της ξηρασίας.

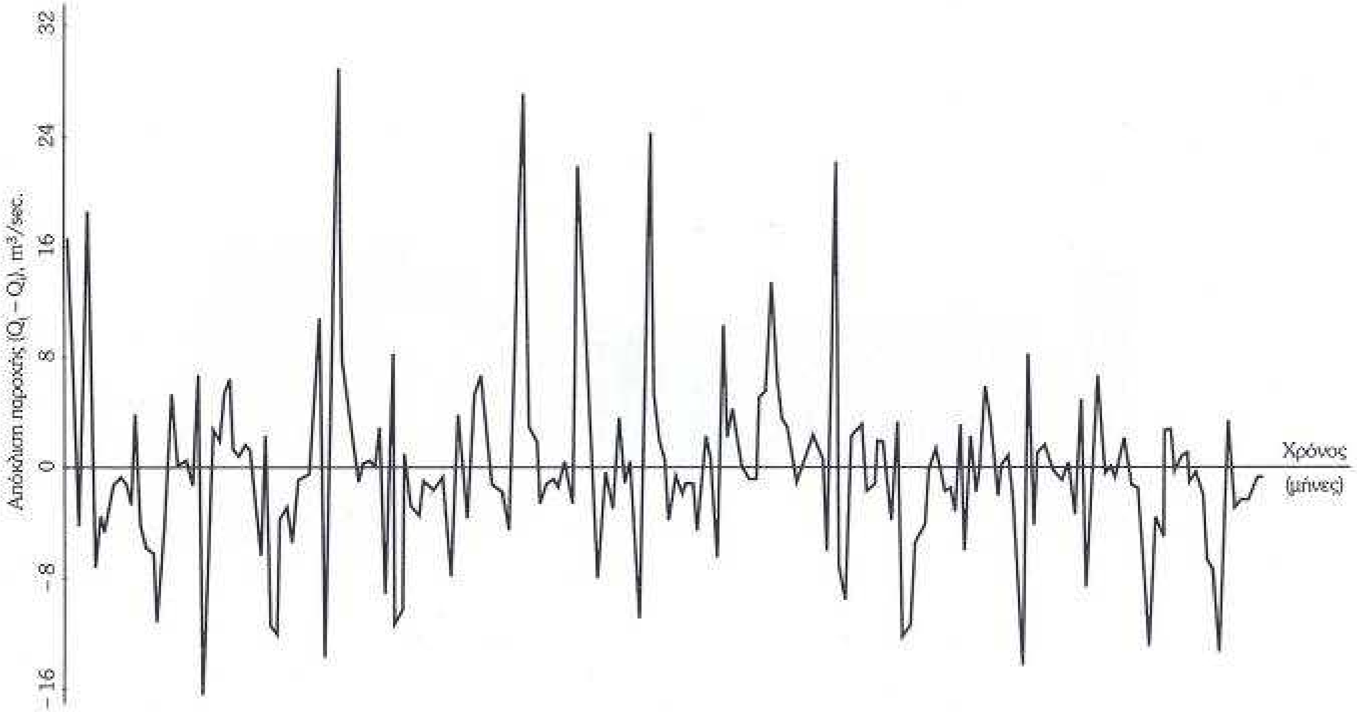
Αυτό συμβαίνει γιατί το ίδιο ποσοστό απόκλισης από το μέσο όρο σημαίνει για διαφορετικές περιοχές και διαφορετικές χρήσεις εντελώς διαφορετικές επιπτώσεις. Ποσοστό π.χ. 20% μείωσης της παροχής του επιφανειακού υδατικού δυναμικού θα σήμαινε ίσως για κάποια περιοχή καταστροφή της φυσικής βλάστησης ενώ σε άλλη οι επιπτώσεις στη βλάστηση δεν θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικές.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι γενικός ορισμός της υδρολογικής ξηρασίας που να καλύπτει τις ιδιαιτερότητες κάθε τόπου είναι ιδιαίτερα δύσκολο αν όχι αδύνατο να διατυπωθεί.

Στις επόμενες παραγράφους θα προσδιορισθούν μεγέθη που μπορούν να αποτελούν χαρακτηριστικούς δείκτες ξηρασίας για απορροές λεκανών, τα επίπεδα των οποίων θα εκλέγονται κατά περίπτωση προκειμένου να αναλυθούν από άποψη συχνότητας εμφάνισης, αποφεύγοντας να ορισθούν τα ακριβή επίπεδα ξηρασίας, πράγμα που δεν θα μπορούσε να γίνει χωρίς της σύμφωνη γνώμη ειδικών επιστημόνων και αρμοδίων τοπικών φορέων.



Σχ. 13.12: ***Η κατανομή της επιφανειακής απορροής (σε σχέση με το μέσο όρο μεγάλης σειράς ετών) στη Βρετανία κατά την περίοδο Σεπτ. 1990-Αύγ. 1992.***



Σχ. 13.13: *Αποκλίσεις από τη μέση τιμή της απορροής στο Μόρνο ποταμό (στη θέση του φράγματος) για ένα δείγμα 228 μηνιαίων τιμών παροχής.*

13.4.2 Δείκτες Ξηρασίας με Βάση την Καμπύλη Διάρκειας των Παροχών Ενός Ποταμού

Για τη μελέτη φαινομένων ξηρασίας σε μια υδρολογική λεκάνη είναι απαραίτητη μια χρονοσειρά παροχών σημαντικής διάρκειας του ποταμού. Στη χρονοσειρά αυτή μπορεί να βασισθεί ανάλυση συχνότητας του κάθε επιπέδου παροχής και πρόβλεψη μελλοντικών παροχών. Η χρονοσειρά αυτή μπορεί επίσης να χρησιμεύσει για κατασκευή καμπυλών παρουσίασης δεδομένων συνολικού όγκου όπως π.χ. οι καμπύλες διάρκειας παροχής και οι αθροιστικές καμπύλες παροχών.

Οι καμπύλες διάρκειας παροχής δείχνουν το ποσοστό του συνολικού χρόνου κατά το οποίο πραγματοποιούνται παροχές ίσες ή μεγαλύτερες από κάποια δεδομένη τιμή παροχής. Επιπρόσθετα, και όταν αναφέρονται σε μεγάλες χρονικές περιόδους χρησιμεύουν για να αποφασισθεί ποιο ποσοστό απορροής θα χρησιμοποιηθεί για καθούμενο σκοπό.

Η καμπύλη διάρκειας παροχής του ποταμού με τις ιδιότητες που περιγράφονται στο κεφάλαιο των απορροών μπορεί να δώσει μια πρώτη ομάδα δεικτών υδρολογικής ξηρασίας. Για παράδειγμα παροχή που ξεπερνιέται τα 95% του χρόνου, ή το ποσοστό του χρόνου που το 1/4 της μέσης παροχής ξεπερνιέται είναι δύο συχνά χρησιμοποιούμενοι δείκτες ξηρασίας. Στο Σχ. 13.14 παρουσιάζεται η καμπύλη διάρκειας του ποταμού Μόρνου.

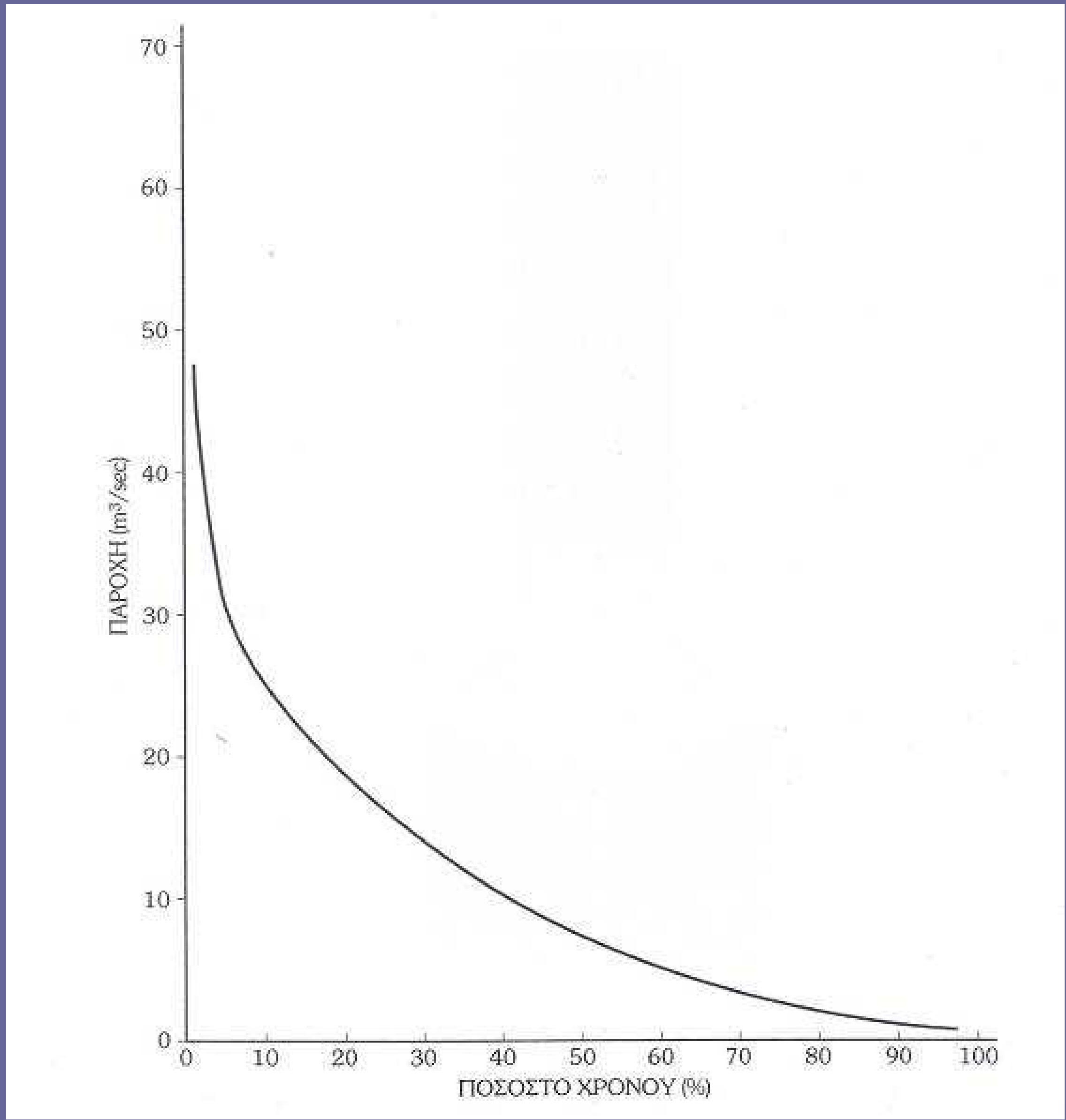
Τέλος οι αθροιστικές καμπύλες παροχών βρίσκουν εφαρμογή στις μελέτες των ταμιευτήρων επειδή μ’ αυτές καθορίζεται εύκολα η αναγκαία χωρητικότητα τους για δεδομένες τιμές απορροής και ζήτησης. Στο Κεφάλαιο των απορροών δίνεται η μεθοδολογία υπολογισμού της χωρητικότητας ενός ταμιευτήρα με την βοήθεια των καμπυλών αυτών.

13.4.3. Δείκτες Ξηρασίας με Βάση τη Διάρκεια των Περιόδων Χαμηλής Παροχής

Παρά τη μεγάλη τους χρησιμότητα, οι δείκτες χαμηλής παροχής της προηγούμενης παραγράφου δε παρέχουν καμία ένδειξη για την κατανομή στο χρόνο μη υπέρβασης κάποιας προκαθορισμένης τιμής (π.χ. Q95) τα διαστήματα (ακολουθίες) των M συνεχών μηνών (προκειμένου για σειρά μηνιαίων τιμών) κάθε ένας από τους οποίους έχει παροχή ≤ Q95.

Αν υπολογισθούν τα διαστήματα αυτά δημιουργείται ιστόγραμμα διαστημάτων M μηνών, πολύ χρήσιμο προκειμένου να αντιμετωπισθεί λύση σε σειρά προβλημάτων όπου η γνώση της διάρκειας των διαστημάτων μαζί με την αντίστοιχη συχνότητα τους είναι απαραίτητη και μπορεί να αποτελέσει μια δεύτερη ομάδα δεικτών ξηρασίας.

Συμπληρωματικός ακόμα δείκτης στον προηγούμενο είναι και ο αριθμός των M ξηρότερων συνεχών μηνών μαζί με το ποσοστό της μέσης παροχής των M αυτών μηνών σε σχέση με τη μέση τιμή όλης της περιόδου της θεωρούμενης χρονοσειράς.



Σχ. 13.14 Καμπύλη διάρκειας παροχής Μόρνου.

13.4.4 Δείκτες Ξηρασίας από την Ανάλυση Συχνότητας Ελαχίστων

Από μια χρονοσειρά ανεξαρτήτων και τυχαίων παροχών μπορεί να προκύψει η συχνότητα υπέρβασης και απ' αυτήν η πιθανότητα υπέρβασης *P* (Χ≥χ), της τιμής χ από την τυχαία μεταβλητή *Χ.* Για το σκοπό αυτό συντάσσεται πίνακας με τα γεγονότα διαταγμένα κατά φθίνουσα τάξη από πλευράς μεγέθους.

Η στατιστική ανάλυση των χαμηλών παροχών ως ακραίων φαινομένων ακολουθεί τις διαδικασίες που αναπτύσσονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο στατιστικής ανάλυσης της υδρολογικής πληροφορίας. Ειδικότερα με τη χρήση των θεωρητικών κατανομών πιθανότητας επιτυγχάνεται η σύνδεση των μεγεθών (στη περίπτωση αυτή των χαμηλών παροχών) με τις αθροιστικές πιθανότητες και την περίοδο επαναφοράς. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεταί και η επέκταση της πληροφορίας και για πιο σπάνια γεγονότα από αυτά που περιέχει το δείγμα των παρατηρήσεων.

Γενικότερα για την κατηγορία αυτή των Δεικτών ξηρασίας ακολουθούνται οι παρακάτω τρεις μέθοδοι :

α. Σε γνωστές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας τις οποίες δεχόμαστε ότι ακολουθούν οι μετρήσεις. Όταν οι παράμετροι μιας τέτοιας συνάρτησης κατανομής που εκλέχτηκε προσδιοριστούν από τις υπάρχουσες μετρήσεις τότε ο προσδιορισμός της τιμής του υδρολογικού φαινομένου ακόμη και για μεγάλες περιόδους επαναφοράς είναι δυνατός με τη χρησιμοποίηση της θεωρητικής κατανομής την οποία οι μετρήσεις ακολουθούν

β. Σε συσχετισμό προς παρατηρήσεις γειτονικών λεκανών απορροής με παρόμοια υδρολογικά χαρακτηριστικά για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις μεγαλυτέρου μήκους ή συσχετίσεις μεταξύ βροχοπτώσεων και απορροών οπού κατά κανόνα οι παρατηρήσεις βροχοπτώσεων είναι μεγαλυτέρου μήκους.

γ. Σε παραγωγή συνθετικών δεδομένων με μαθηματική προσομοίωση χρησιμοποιώντας κατάλληλα στοχαστικά μοντέλα και τεχνικές Έτσι το μήκος των διαθέσιμων παρατηρήσεων εμπλουτίζεται σε βαθμό που οι προβλέψεις για μεγάλες περιόδους επαναφοράς να είναι περισσότερο αξιόπιστες.

Προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση θεωρητικών κατανομών είναι οι παρατηρήσεις να είναι ανεξάρτητες και τυχαίες, πράγμα που δεν θα μπορεί να ισχύει π.χ. για ημερήσιες παροχές επειδή η παροχή μιας ημέρας έχει ισχυρή συσχέτιση με την παροχή της προηγουμένης. Για τις μέσες μηνιαίες παροχές η θεώρηση της ανεξαρτησίας των παρατηρήσεων θα μπορούσε να είναι περισσότερο αποδεκτή αν και πάντα πρέπει να προηγούνται οι αντίστοιχοι έλεγχοι. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό υδραυλικών έργων οι ακραίες τιμές του υδρολογικού φαινομένου (μέγιστες ή ελάχιστες) οι οποίες είναι τυχαίες, αν προέρχονται από δείγμα τυχαίων τιμών.

Οι κατανομές που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη σχετική επέκταση των πιθανοτήτων, που προκύπτουν από την ανάλυση της διαθέσιμης χρονοσειράς περιγράφονται συνοπτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Εδώ παρουσιάζεται μονό η Κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου III γνωστή ως Weibull που χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη στατιστική ανάλυση ελαχίστων Για τον ίδιο σκοπό μπορεί να χρησιμοποιείται και η κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου 1 (Gumbel) για ελάχιστα που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο της Ανάλυσης της Υδρολογικής Πληροφορίας αλλά και σε πολλά ειδικά βιβλία (Haan, 1977, Kite, 1977, Shahin κ.ά., 1993).

Κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου ΙΙΙ (Weibull)

Η κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου ΙΙΙ εφαρμόζεται για ανάλυση ελαχίστων τιμών στις οποίες υπάρχει όριο προς την κατεύθυνση των ακραίων τιμών (ελαχίστων). Το όριο αυτό προκειμένου για παροχές είναι το μηδέν. Η κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου ΙΙΙ με κάτω όριο το 0 είναι διπαραμετρική.

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας είναι:

$$p(x) = ax^{a-1} \;{}^{-\sim} \exp[(-x/\;\;)^{\sim}] \qquad \textbf{(13.11)}$$

Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας είναι:

$$P(x) = 1 - \exp[(-x/\;\;)^{\sim}] \qquad \textbf{(13.12)}$$

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων *α* και *β* ακολουθεί η μεθοδολογία που περιγράφεται πολύ σύντομα πιο κάτω:

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή (Shaw, 1983), απαιτούνται η μέση τιμή, x, του δείγματος των ετήσιων ελαχίστων τιμών και η τυπική απόκλιση, σ, του δείγματος. Ο λόγος x / σ, είναι συνάρτηση της παραμέτρου *α.* Οπότε από πίνακα που δίνει την τιμή του 1 / α ως συνάρτηση του λόγου x / σ, προσδιορίζεται η παράμετρος *α.* Η τιμή της παραμέτρου *β* δίνεται από την εξίσωση:

$$= \frac{\bar{x}}{\Gamma(1 + 1/\sim)} \qquad \textbf{(13.13)}$$

όπου Γ(•) είναι η συνάρτηση γάμα που δίνεται σε πίνακες Μαθηματικών εγχειριδίων.

Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών III (Weibull)

Τέλος δίνεται παρακάτω μια γενικευμένη μορφή για ελάχιστα της Κατανομής Weibull :

$$p(x) = \frac{a}{-C}\left(\frac{x-C}{-C}\right)^{a-1} \exp\left(-\left(\frac{x-C}{-C}\right)^{a-1}\right)$$ **για x ≥ c (13.14)**

$$p(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-C}{-C}\right)^{a}\right)$$ **για x ≥ c (13.15)**

με b > c και a > 0.

Η ανηγμένη μεταβλητή $y = \left(\frac{x - C}{- C}\right)^{a}$ **και επομένως σε παραπάνω εξισώσεις δίνουν:**

g(y) = e-y y>0 (13.16)

G(y)=l-e-y (13.17)

Όπως και στις άλλες κατανομές η τιμή *yT* (με περίοδο επαναφοράς Γ) είναι:

$$y_T = -\ln(1 - \frac{1}{T})$$ **(13.18)**

Για την εκτίμηση των παραμέτρων ο μέσος όρος της κατανομής είναι:

$$« = C + (\quad - C)\Gamma\left(\frac{1}{\sim} + 1\right)$$ **(13.19)**

και η τυπική απόκλιση είναι

$$\pm = \frac{- \quad C}{B_{a}}$$

(13.20)

όπου *B*a είναι

$$B_a = \frac{1}{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\sim}+1\right) - \Gamma^{2}\left(\frac{1}{\sim}+1\right)}}$$

Αν ορίσουμε *A*α ως

$$A_a = \left(1-\Gamma\left(\frac{1}{\sim}+1\right)\right)B_{\sim},$$

(13.22)

ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση μπορούν να γραφούν ως

μ = β - σAα (13.23)

και

$$\pm = \frac{- \quad C}{B_{a}},$$

(13.24)

Ο συντελεστής ασυμμετρίας για την κατανομή Weibull είναι συνάρτηση

$$\text{¥} = \left(\Gamma\left(\frac{3}{\sim}+1\right) - 3\Gamma\left(\frac{2}{\sim}+1\right)\Gamma\left(\frac{1}{\sim}+1\right) + 2\Gamma^{3}\left(\frac{1}{\sim}+1\right)\right)B_{\sim}^{3},$$

(13.25)

Για την επίλυση της τελευταίας εξίσωσης χρησιμοποιείται ο Πιν 13.2 από τον οποίο με γνωστό συντελεστή ασυμμετρίας του δείγματος προκύπτουν τα μεγέθη *a, A*a και *B*a*.* Τέλος

$$= \overline{\text{¡}} + \overline{\pm} A_{\sim}$$

και

$$C = \quad + \pm B_{\sim}$$

Με γνωστές τις παραμέτρους είναι δυνατή η συσχέτιση μεγεθών και περιόδων επαναφοράς.

γ	$1/a$	a	A_a	B_a
−1.08107	0.01	100.	0.44815	78.981
−1.02485	0.02	50.	0.44611	39.989
−0.9707	0.03	33.3333	0.44392	26.9862
−0.91845	0.04	25.	0.4416	20.4808
−0.86.797	0.05	20.	0.43915	16.5744
−0.8191	0.06	16.6667	0.43657	13.9673
−0.77174	0.07	14.2857	0.43386	12.1029
−0.72577	0.08	12.5	0.43104	10.7025
−0.6811	0.09	11.1111	0.4281	9.6114
−0.63764	0.1	10.	0.42504	8.73689
−0.554	0.12	8.33333	0.41861	7.42093
−0.47429	0.14	7.14286	0.41178	6.47613
−0.398	0.16	6.25	0.40456	5.76326
−0.32473	0.18	5.55556	0.397	5.20498
−0.25411	0.2	5.	0.3891	4.7549
−0.18583	0.22	4.54545	0.3809	4.3835
−0.11963	0.24	4.16667	0.37242	4.07108
−0.05527	0.26	3.84615	0.36368	3.80405
0.00746	0.28	3.57143	0.3547	3.57267
0.06874	0.3	3.33333	0.34551	3.36982
0.21665	0.35	2.85714	0.32169	2.95543
0.35863	0.4	2.5	0.29693	2.63389
0.49634	0.45	2.22222	0.27149	2.37443
0.63111	0.5	2.	0.2456	2.15866
0.76404	0.55	1.81818	0.21947	1.97489
0.89605	0.6	1.66667	0.19331	1.81538
1.02793	0.65	1.53846	0.16729	1.67482
1.16039	0.7	1.42857	0.14156	1.54942
1.29407	0.75	1.33333	0.11626	1.43641
1.42955	0.8	1.25	0.09152	1.33375
1.56736	0.85	1.17647	0.06743	1.23987
1.70804	0.9	1.11111	0.04411	1.15355
1.85209	0.95	1.05263	0.02161	1.07385
2.	1.	1.	0.	1.

Πιν. 13.2 Εκτίμηση των a, Aa, και Ba της γενικευμένης εξίσωσης Weibull