

# **ΞΗΡΑΣΙΑ: ΦΥΣΙΚΕΣ, ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΤΥΧΕΣ – ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

*Νίκος Μαμάσης και Δημήτρης Κουτσογιάννης*

## **1. Εισαγωγή**

### *1.1. Ορισμοί*

Ο όρος ξηρασία χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια μακρά χρονική περίοδο, όπου η παρουσία του γλυκού νερού σε μια γεωγραφική περιοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αναμενόμενη, όπως αυτή έχει προσδιοριστεί με βάση το κλιματικό καθεστώς αλλά και τις απαιτήσεις νερού για την κάλυψη των τοπικών αναγκών. Η είσοδος του γλυκού νερού σε μια περιοχή γίνεται με τη διεργασία της κατακρήμνισης (βροχόπτωση, χιονόπτωση κλπ), ενώ στη συνέχεια το νερό μετασχηματίζεται σε παροχή των ποταμών και πηγών, ή αποθηκεύεται προσωρινά ως εδαφική υγρασία ή απόθεμα στις φυσικές και τεχνητές λίμνες και τους υπόγειους υδροφορείς, μέχρι να εξατμιστεί ή να καταλήξει στη θάλασσα. Από την άλλη πλευρά οι απαιτήσεις νερού περιλαμβάνουν την άρδευση καλλιεργειών, την ύδρευση ανθρώπων και ζώων, την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη λειτουργία της βιομηχανίας, την παροχή για τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος, την αναψυχή και την ναυσιπλοΐα σε ποτάμια και λίμνες. Συνεπώς, η εκδήλωση της ξηρασίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ενός φυσικού φαινομένου (λιγότερη βροχή από την αναμενόμενη και κατά συνέπεια μικρότερη παρουσία νερού) με τη λειτουργία των υδατικών συστημάτων από τον άνθρωπο, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε νερό.

Σε μια γεωγραφική περιοχή η μείωση της βροχόπτωσης για μια μεγάλη χρονική περίοδο οδηγεί στη μείωση της διαθεσιμότητας νερού, αλλά όχι απαραίτητα και στην εμφάνιση ξηρασίας, η οποία είναι συνυφασμένη με την έλλειψη νερού για τις ανθρώπινες δραστηριότητες αλλά και τις ανάγκες του οικοσυστήματος. Συνεπώς, σε περιοχές που δεν υπάρχουν ανθρώπινες δραστηριότητες ή τα οικοσυστήματα είναι ασήμαντα, η μείωση της διαθεσιμότητας του νερού, ακόμη και αν είναι σημαντική, δεν θα γίνει αντιληπτή ως ξηρασία. Η ξηρασία μπορεί να καθυστερήσει ή και να αποφευχθεί με την κατασκευή ταμιευτήρων που θα ικανοποιούν τις υδατικές ανάγκες, με νερό που έχει αποθηκευτεί σε προηγούμενες βροχερές περιόδους. Αντίθετα, εφόσον δεν υπάρχουν ταμιευτήρες ή δεν γίνεται ορθολογική διαχείριση των αναγκών σε νερό, είναι δυνατή η εμφάνιση συνθηκών ξηρασίας ακόμη και αν η βροχόπτωση κυμαίνεται σε κανονικά επίπεδα, λαμβάνοντας υπόψη τις αναμενόμενες κλιματικές διακυμάνσεις. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η μείωση της βροχόπτωσης για ορισμένες χρονικές περιόδους είναι ένα φυσιολογικό και επαναλαμβανόμενο χαρακτηριστικό

του κλίματος. Η μείωση αυτή είναι μη προβλέψιμη δεδομένου ότι συνδέεται με την κυκλοφορία των μετεωρολογικών συστημάτων η οποία παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά.

Δεδομένου ότι η ξηρασία είναι ένα περιστασιακό φαινόμενο, διαφέρει από τη ξηρότητα που αφορά στις περιοχές όπου η μικρή βροχόπτωση είναι μόνιμο χαρακτηριστικό του κλίματός τους. Για τα περισσότερα μέρη στον κόσμο παραμένει μια απειλή που μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρή ή καθόλου προειδοποίηση, οποιαδήποτε χρονική περίοδο. Όμως η ξηρασία είναι ένα αναπόφευκτο φαινόμενο, και για αυτό δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται μόνο με τη λήψη έκτακτων μέτρων (ως αιφνίδια φυσική καταστροφή), αλλά με προληπτικά μέτρα όπως η κατασκευή έργων και η ορθή διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

Η ξηρασία διαφέρει από τις άλλες φυσικές καταστροφές σε τρία βασικά σημεία.

1. Πλήττει πολύ περισσότερους ανθρώπους από κάθε άλλη φυσική καταστροφή. Μόνο κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα υπήρξαν εκατομμύρια νεκροί ως συνέπεια δεκάδων μεγάλων ξηρασιών που συνέβησαν στην Ασία και την Αφρική.
2. Είναι φαινόμενο που εξελίσσεται σιωπηλά και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η αρχή και το τέλος του. Ο επιδράσεις του συσσωρεύονται αργά μέσα σε μεγάλο χρονικό διάστημα και μπορεί να παραμείνουν για αρκετά χρόνια μετά τη λήξη του. Για το λόγο αυτό και δεδομένης της απουσίας διεθνώς αναγνωρισμένου ορισμού, συνήθως προκαλείται σύγχυση μέχρι να προσδιοριστεί η ξηρασία και η έντασή της.
3. Οι κοινωνικές επιδράσεις είναι λιγότερο ορατές και εκτείνονται σε πολύ μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές από ότι οι άλλες φυσικές καταστροφές (πλημμύρες, σεισμοί). Δεδομένου ότι η ξηρασία σπάνια καταλήγει σε καταστροφή των υποδομών, είναι πολύ πιο δύσκολη η ποσοτικοποίηση των επιδράσεών της και η πρόβλεψη αρωγής στους πληγέντες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί ορισμοί για την ξηρασία οι οποίοι στηρίζονται σε μετεωρολογικές, υδρολογικές, βιολογικές, οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους. Οι ορισμοί αυτοί ομαδοποιούνται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες που αφορούν στη μετεωρολογική-κλιματική, στη γεωργική, στην υδρολογική και στην κοινωνικοοικονομική ξηρασία.(π.χ. Heim, 2002)

Η **μετεωρολογική-κλιματική ξηρασία** ορίζεται με βάση την απόκλιση της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, αριθμός ημερών βροχής) από την αναμενόμενη, με βάση το κλίμα της περιοχής. Είναι γνωστό ότι το βροχομετρικό καθεστώς μιας περιοχής εξαρτάται από την ευρύτερη ατμοσφαιρική κυκλοφορία η οποία εξελίσσεται δημιουργώντας καταστάσεις που συνδέονται με την ξηρασία ή τη βροχόπτωση. Κατά συνέπεια μεγάλης κλίμακας διαταραχές στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία (όπως η παρουσία ενός μεγάλου πεδίου υψηλών πιέσεων

που συνδέεται με την απουσία βροχής) μπορούν να επηρεάσουν το βροχομετρικό καθεστώς για μεγάλη χρονική περίοδο και να προκαλέσουν ξηρασία σε μια περιοχή.

Η **γεωργική ξηρασία** ορίζεται με βάση τις επιδράσεις που έχει στη γεωργία η μετεωρολογική ξηρασία, και είναι πάντα αποτέλεσμα της ανεπάρκειας της εδαφικής υγρασίας να καλύψει τις ανάγκες διαπνοής των φυτών, ώστε να ξεκινήσει ή να συνεχιστεί η ανάπτυξή τους. Οι ανάγκες σε νερό των φυτών εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, τα βιολογικά χαρακτηριστικά κάθε είδους, το στάδιο ανάπτυξης που βρίσκονται και τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Η κύρια παράμετρος που εξετάζεται για τον προσδιορισμό της γεωργικής ξηρασίας είναι η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Υπενθυμίζεται ότι ο όρος δυνητική εξατμοδιαπνοή περιγράφει το σύνολο των απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999).

Η **υδρολογική ξηρασία** σχετίζεται με τα αποτελέσματα της μειωμένης βροχόπτωσης στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή του νερού και εκδηλώνεται με τη μείωση της εδαφικής υγρασίας, της παροχής των ποταμών και πηγών, της στάθμης λιμνών και ταμιευτήρων και των αποθεμάτων των υπόγειων νερών. Η υδρολογική ξηρασία έχει χρονική υστέρηση σε σχέση με τη μετεωρολογική και την γεωργική. Το έλλειμμα βροχόπτωσης επιδρά άμεσα στην εδαφική υγρασία και κατά συνέπεια στις καλλιέργειες, σταδιακά στην παροχή των ποταμών, στη στάθμη των λιμνών και των ταμιευτήρων και τέλος στα αποθέματα των υπόγειων νερών. Όταν η βροχόπτωση ξαναρχίσει, η σειρά αυτή επαναλαμβάνεται για την επαναφόρτιση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτινων σωμάτων. Οι παραπάνω διεργασίες διαρκούν από μερικές ώρες μέχρι και πολλά χρόνια (για την διακίνηση του νερού στους υπόγειους υδροφορείς) και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης και τα υδρολογικά, υδρογεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Η **κοινωνικοοικονομική ξηρασία** ουσιαστικά εκφράζει την τρωτότητα της κοινωνίας στην έλλειψη νερού. Συνδέει όλες τη μείωση της διαθεσιμότητας νερού από φυσικούς λόγους με την προσφορά και ζήτηση αγαθών που σχετίζονται με τη χρήση νερού, όπως το πόσιμο νερό, τα γεωργικά προϊόντα και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία συμβαίνει όταν η ζήτηση για αυτά τα αγαθά ξεπερνά την προσφορά ως αποτέλεσμα της έλλειψης νερού, όμως η εμφάνισή της εξαρτάται σημαντικά και από τις κοινωνικές και οικονομικές διαδικασίες προσφοράς και ζήτησης των παραπάνω αγαθών. Ακόμη, μπορεί να προκληθεί και μέσα από πολιτικές διαδικασίες, όπως οι διαμάχες μεταξύ κρατών και κοινωνικών ομάδων για τη χρήση του νερού ή η μετακίνηση μεγάλων πληθυσμών σε άνυδρες περιοχές.

Στον ελληνικό χώρο η μετεωρολογική ξηρασία έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανιστεί στις περιοχές όπου η μεταβλητότητα της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη και συνήθως αυτές είναι οι περιοχές με τα μικρότερα ύψη βροχής (ανατολική Ελλάδα και ειδικότερα Αττική και νησιά κεντρικού Αιγαίου). Η γεωργική ξηρασία μπορεί να πλήξει καλλιεργούμενες περιοχές όπου η βροχόπτωση είναι μικρή ενώ οι απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό μεγάλες (π.χ. Θεσσαλία, Κωπαΐδα, Αργολίδα). Η υδρολογική ξηρασία εμφανίζεται σε μικρές λεκάνες απορροής ή σε περιοχές που δεν τροφοδοτούνται από ταμιευτήρες ή υπόγειους υδροφορείς (π.χ. νησιά). Τέλος η κοινωνικοοικονομική ξηρασία μπορεί να εμφανιστεί σε περιοχές όπου μεταφέρεται νερό και εκδηλώνεται είτε με την αύξηση της τιμής του νερού και των εξαρτώμενων από αυτό προϊόντων είτε με διαμάχες μεταξύ κοινωνικών ομάδων σχετικά με τη μεταφορά και κατανομή του (π.χ. νησιά, Θεσσαλία).

## 1.2. Εκτίμηση του μεγέθους της ξηρασίας

Οι παράμετροι που αξιολογούνται για να εκτιμηθεί το μέγεθος μιας ξηρασίας είναι η ένταση, η χρονική διάρκεια, η γεωγραφική έκταση και η καταστροφικότητα.

Η **ένταση** συναρτάται με την απόκλιση της βροχόπτωσης και άλλων παραμέτρων που συνδέονται με την εξάτμιση (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία) από τις αναμενόμενες κλιματικές τιμές. Η ποσοτικοποίηση της έντασης μπορεί να γίνει με τη χρήση στατιστικής, μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί η πιθανότητα εμφάνισης των συγκεκριμένων τιμών των μετεωρολογικών μεταβλητών ή με τη χρήση δεικτών που ενσωματώνουν τις κλιματικές παραμέτρους.

Η **χρονική διάρκεια** είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αφού υπάρχει αβεβαιότητα για τη χρονική στιγμή αρχής και τέλους του φαινομένου. Η ξηρασία εξελίσσεται αργά και επιδρά αθροιστικά όσο η έλλειψη βροχόπτωσης εμμένει για μήνες ή χρόνια, ενώ οι επιδράσεις συνεχίζονται και μετά την έναρξη της βροχόπτωσης αφού η επαναφόρτιση όλων των υδάτινων σωμάτων (ιδίως των υπόγειων) απαιτεί χρόνο.

Η **γεωγραφική έκταση** κάθε ξηρασίας συναρτάται άμεσα με τα μετεωρολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και τα υπάρχοντα έργα μεταφοράς νερού. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση τεχνολογικά τροποποιημένων υδατικών συστημάτων που τροφοδοτούνται με νερό από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (π.χ. μέσω έργων εκτροπής ποταμών) οι οποίες απέχουν σημαντικά μεταξύ τους. Στα συστήματα αυτά, η γεωγραφική έκταση της ξηρασίας είναι παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική, αφού μπορεί να επηρεάσει μόνο ένα τμήμα των υδατικών πόρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας που τροφοδοτείται από τις πλούσιες σε βροχοπτώσεις λεκάνες του Μόρνου και του Ευήνου (δυτική Ελλάδα) και από τις σχετικά ξηρότερες λεκάνες του Β. Κηφισού και του Χαράδρου (ανατολική Ελλάδα). Η ανάλυση που έγινε στα δεδομένα εμφάνισης των τύπων ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και των υψών βροχής που καταγράφηκαν

σε σταθμούς των παραπάνω περιοχών σταθμών, έδειξε ότι η διαφοροποίηση των τύπων κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε έτη που είναι υγρά για τη δυτική περιοχή και ξηρά για την ανατολική ή το αντίστροφο (Μαμάσης 1997). Συγκεκριμένα από τα 20 έτη που μελετήθηκαν, σε δύο έτη η βροχόπτωση ήταν αυξημένη κατά 17% στη δυτική περιοχή και μειωμένη κατά 25% στην ανατολική, ενώ σε δύο άλλα έτη η κατάσταση ήταν ανεστραμμένη, αφού η βροχόπτωση ήταν μειωμένη κατά 15% στη δυτική περιοχή και αυξημένη κατά 15% στην ανατολική.

Η **καταστροφικότητα** της ξηρασίας εκφράζει την επίδραση του φυσικού φαινομένου στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Εξαρτάται από την ένταση, τη διάρκεια και την έκταση της ξηρασίας, τη χρονική κατανομή της βροχής, τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων και τη εξέλιξη της ζήτησης. Έτσι η εκδήλωση των βροχών σε σχέση με τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών, ο αριθμός των επεισοδίων βροχής και η έντασή τους, η παρουσία τεχνητών ταμιευτήρων και η δυνατότητα μείωσης των υδατικών αναγκών, συνδέονται άμεσα με την αποτελεσματικότητα της βροχής να καλύψει τις ανθρώπινες ανάγκες και κατά συνέπεια με την καταστροφικότητα της ξηρασίας.

## **2. Παράμετροι ξηρασίας**

Η ξηρασία είναι φαινόμενο που μπορεί να συμβεί σχεδόν σε όλες τις κλιματικές ζώνες της γης, αλλά τα χαρακτηριστικά του διαφέρουν σημαντικά από τη μία περιοχή στην άλλη. Η εκδήλωση μετεωρολογικής ξηρασίας (μείωση της βροχόπτωσης) δεν σημαίνει απαραίτητα και την εμφάνιση ελλείμματος υδατικών πόρων σε μια περιοχή. Αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (που τελικά πραγματοποιείται) και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής, τα χαρακτηριστικά της περιοχής (γεωμορφολογία, ταμιευτήρες), τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων και τέλος μια σειρά από κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές παραμέτρους. Η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στην εμφάνιση ξηρασίας (κάθε κατηγορίας) είναι ένα αρκετά πολύπλοκο θέμα το οποίο εξετάζεται στη συνέχεια ξεχωριστά για κάθε παράμετρο.

### *2.1 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης*

Το ετήσιο ύψος βροχής και η χρονική και χωρική κατανομή του αποτελούν θεμελιώδη κλιματικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν σημαντικά στις διάφορες περιοχές της γης. Με βάση τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά έχουν κατά κανόνα προσαρμοστεί η τοπική χλωρίδα και πανίδα και διαμορφωθεί οι σχετικές με το νερό ανθρώπινες δραστηριότητες.

Τα μεγαλύτερα ετήσια ύψη βροχής (άνω των 1500 mm) πραγματοποιούνται στις τροπικές περιοχές γύρω από τον ισημερινό, ενώ τα μικρότερα (κάτω των 300 mm) στις μεγάλες ερήμους (συνήθως βρίσκονται σε γεωγραφικά πλάτη γύρω στις 30°) και τους

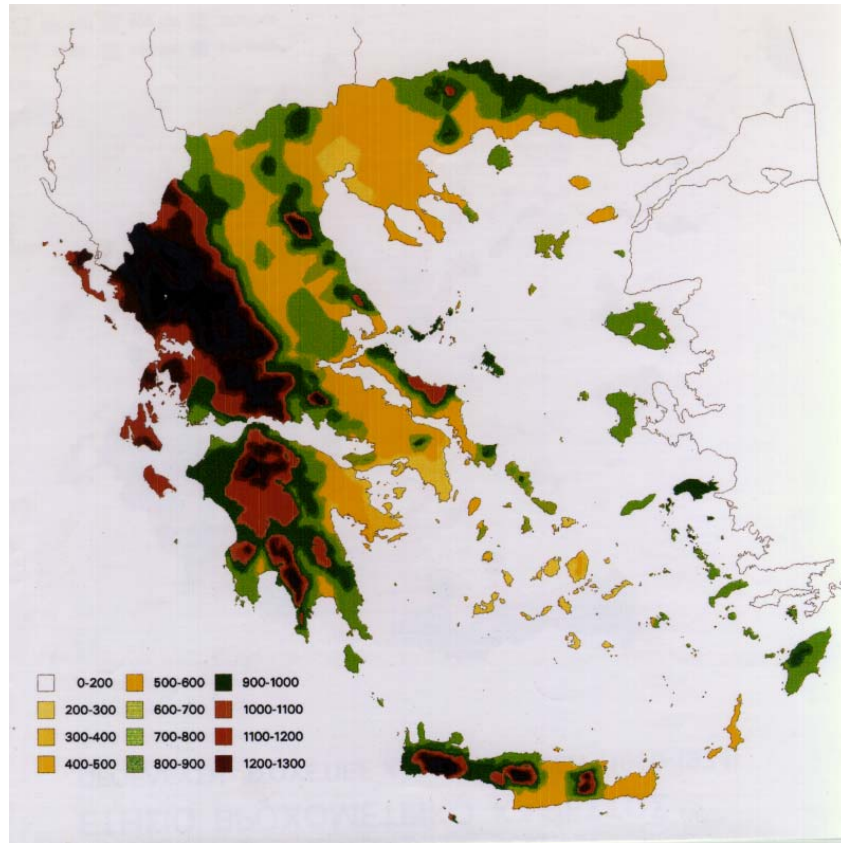
πόλους. Στις τροπικές περιοχές η βροχόπτωση παρουσιάζει ισοκατανομή στους μήνες, σε αντίθεση με τις ερήμους, όπου είναι δυνατόν να μην πραγματοποιηθεί βροχή για δύο χρόνια και σε μια ξαφνική νεροποντή να καταγραφεί βροχόπτωση διπλάσια από τη μέση ετήσια τιμή. Στις υπόλοιπες περιοχές της γης, η βροχόπτωση διαφέρει ανάλογα με την εποχή του έτους και συνήθως υπάρχουν μία ή περισσότερες ξηρές περίοδοι μερικών μηνών.

Η χρονική κατανομή της βροχής είναι εξίσου σημαντική με την ποσότητα για την ανάπτυξη της βλάστησης. Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές κοντά στον ισημερινό, όπου επικρατεί μια διαχωρισμένη ξηρή περίοδος μεγαλύτερη των δύο μηνών, όταν οι περιοχές αυτές είναι κάτω από την επίδραση των υποτροπικών αντικυκλώνων. Αν και το ετήσιο ύψος βροχής είναι μεγαλύτερο των 1000 mm, δεν συντηρείται το τροπικό δάσος που απαιτεί βροχόπτωση όλο το έτος, αλλά επικρατεί υψηλό σκληρό χορτάρι Σαβάνας με διασκορπισμένα, χαμηλά φυλλοβόλα δένδρα, ανθεκτικά σε αυτή την ολιγόμηνη 'ξηρασία'.

Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης σε μια γεωγραφική περιοχή εξαρτάται από τα κλιματικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά και μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Ως παράδειγμα παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή της ετήσιας βροχόπτωσης στον ελληνικό χώρο (Σχήμα 1), περιοχή που κατατάσσεται σε μία κλιματική ζώνη. Η σημαντικότερη παρατήρηση που προκύπτει από το Σχήμα είναι ότι η δυτική Ελλάδα είναι πλουσιότερη σε βροχοπτώσεις από την ανατολική. Έτσι ενώ στη δυτική Ελλάδα η μέση ετήσια βροχόπτωση ξεπερνά τα 1200 mm (και τοπικά τα 1500 mm) στην Αττική και τις Κυκλάδες αυτή φτάνει μόλις τα 400 mm. Η διαφοροποίηση στο βροχομετρικό καθεστώς του ελληνικού χώρου οφείλεται στο ότι (α) η περιοχή βρίσκεται μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 30° και 60° Βόρειο όπου η ατμοσφαιρική κυκλοφορία έχει κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά και (β) στην παρουσία της οροσειράς της Πίνδου στο δυτικό μέρος της χώρας με κατεύθυνση βορρά-νότο. Αποτέλεσμα του συνδυασμού των δύο παραπάνω παραγόντων είναι ότι οι αέριες μάζες που έρχονται από τα δυτικά συναντούν την οροσειρά της Πίνδου, ανυψώνονται και ενισχύουν τη βροχόπτωση στη δυτική Ελλάδα δημιουργώντας ομβροσκιά στην ανατολική.

## Σχήμα 1

Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Ελλάδα (σε χιλιοστά)



Πηγή: ΥΠΙΑΝ, ΕΜΠ, ΓΓΜΕ, και ΚΕΠΕ, 2003

Η μετεωρολογική ξηρασία συναρτάται άμεσα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά και είναι προφανές ότι είναι αδύνατον να υπάρξει ποσοτικός ορισμός αφού οι παράμετροι που εξετάζονται έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στις διάφορες κλιματικές περιοχές της γης. Έτσι για παράδειγμα πέντε μήνες χωρίς βροχή είναι καταστροφική ξηρασία για τον Αμαζόνιο, φυσιολογικό φαινόμενο για την Αθήνα και κλιματικό δεδομένο για τη Σαουδική Αραβία. Αντίστοιχα, θερινοί μήνες χωρίς βροχή είναι ιδιαίτερα ασυνήθιστο για την περιοχή της Πίνδου και φυσιολογικό φαινόμενο για τις Κυκλάδες. Πάντως σε γενικές γραμμές η ξηρασία είναι συχνή και καταστροφική σε ημιάνυδρα κλίματα, είναι λιγότερο συχνή σε υγρά κλίματα, ενώ δεν έχει πρακτικό νόημα σε ερήμους.

### 2.2 Χαρακτηριστικά δυνητικής εξατμοδιαπνοής

Η δυνητική εξατμοδιαπνοή εξαρτάται από τις τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα ανέμου αλλά το τμήμα που αφορά στη διαπνοή των φυτών συναρτάται άμεσα από τις βιολογικές λειτουργίες του συγκεκριμένου είδους, στις συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Η δυνητική εξατμοδιαπνοή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ανέμου, ενώ μειώνεται με την αύξηση της

σχετικής υγρασίας. Κατά συνέπεια είναι μεγάλη στις θερμές περιοχές και μικρή στις ψυχρές, ενώ είναι ιδιαίτερα χαμηλή στις πολικές αφού οι χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν στην αύξηση της σχετικής υγρασίας για δεδομένη ποσότητα νερού στον αέρα και στη δημιουργία ενός ‘υγρού’ περιβάλλοντος. Έτσι αν πραγματοποιηθούν 400 mm ετήσιας βροχής σε ένα ζεστό κλίμα θα υποστηρίξουν μόνο αραιή βλάστηση αλλά σε ένα ψυχρό κλίμα μπορούν να συντηρήσουν ένα δάσος. Συγκεκριμένα, δάση κωνοφόρων (taiga) επιβιώνουν σε ψυχρές περιοχές (Καναδάς, Αλάσκα, Νορβηγία, Σιβηρία), οι οποίες έχουν σχετικά χαμηλή βροχόπτωση (μικρότερη από 500 mm ανά έτος). Βορειότερα, σε πολικές περιοχές με ελάχιστη βροχόπτωση (μικρότερη από 200 mm ανά έτος) συντηρείται η βλάστηση της τούνδρας που αποτελείται από φυτά με πολύ μικρή περίοδο ανάπτυξης (βρούα, λειχήνες), πολύ μικρά δένδρα και διασκορπισμένη ξυλώδη χαμηλή βλάστηση). Αντίθετα, σε θερμές περιοχές κοντά στην ισημερινό, η διατήρηση τροπικού δάσους απαιτεί υψηλή βροχόπτωση (μεγαλύτερη από 1500 mm ανά έτος), ενώ ακόμη και περιοχές με βλάστηση σαβάνας (χορτάρι, χαμηλά και διασκορπισμένα δένδρα) δέχονται περίπου 1000 mm ετήσιας βροχόπτωσης.

Η γεωργική ξηρασία εξαρτάται άμεσα από τη χρονική εξέλιξη της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής αφού με τα ίδια μεγέθη (βροχής και εξάτμισης) μπορεί μια περιοχή να είναι ξηρή αν η περισσότερη βροχή πραγματοποιείται την θερμή περίοδο όπου η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη ή υγρή αν συμβαίνει το αντίθετο. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Αθήνας, όπου παρά την ιδιαίτερα μικρή ετήσια βροχόπτωση (κάτω των 400 mm) το κλίμα δεν κατατάσσεται ως ξηρό, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της βροχής πραγματοποιείται την ψυχρή περίοδο και επιτρέπει την ανάπτυξη πολλών ειδών βλάστησης. Ακόμη, η γεωργική ξηρασία εξαρτάται από τη χρονική εξέλιξη της διαφοράς μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής σε σχέση με την ευπάθεια των φυτών στα διάφορα στάδια ανάπτυξης. Για παράδειγμα αν στο στάδιο της φύτευσης υπάρχει έλλειμμα εδαφικής υγρασίας τότε θα βλαστήσει μικρός αριθμός φυτών και όσο μεγάλη και αν είναι η βροχόπτωση στη συνέχεια η παραγωγή θα είναι μειωμένη σε σχέση με μια άλλη χρονιά όπου η βροχόπτωση θα είναι ευνοϊκότερα κατανομημένη στο χρόνο.

### *2.3 Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής*

Η βροχόπτωση και η εξάτμιση σε ένα υδατικό σύστημα καθορίζουν την ποσότητα αλλά όχι και τη χρονική εξέλιξη της επιφανειακής ή υπόγειας απορροής, αφού η τελευταία εξαρτάται από τα γεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης και την παρουσία υδραυλικών έργων που ταμιεύουν ή μεταφέρουν νερό. Οι παράμετροι αυτές επιδρούν σημαντικά στο συντελεστή απορροής δηλαδή στο ποσοστό βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε άμεση επιφανειακή απορροή και εξέρχεται στο ίδιο χρονικό βήμα από το σύστημα, χωρίς να συκρατηθεί στο έδαφος, στις φυσικές και τεχνητές λίμνες και στους υπόγειους



υδροφορείς. Τα αποθέματα νερού που συγκρατούνται στο σύστημα χρησιμοποιούνται ή απορρέουν σταδιακά, χωρίς να είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί νέα βροχόπτωση. Ο συντελεστής απορροής μιας περιοχής μπορεί να αυξηθεί με την αλλαγή των χρήσεων γης (αστικοποίηση, πυρκαγιές) ή να μειωθεί με τη κατασκευή ταμιευτήρων, έργων επαναφόρτισης υπόγειων υδροφορέων ή αναδάσωσης. Η αύξηση του συντελεστή απορροής μειώνει τα διαθέσιμα αποθέματα στο υδατικό σύστημα και κάνει πιο πιθανή την εμφάνιση υδρολογικής ξηρασίας. Ακόμη, μειώνει τη χρονική υστέρηση που έχει η υδρολογική ξηρασία σε σχέση με τη μετεωρολογική.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η λειτουργία έργων ταμίευσης και μεταφοράς νερού που μπορούν να ρυθμίσουν την ξηρασία χωροχρονικά, σε κατάντη ή γειτονικές περιοχές για μήνες ή χρόνια. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να αποσοβηθεί η υδρολογική ξηρασία, απελευθερώνοντας νερό σε ξηρές περιόδους ή αντίθετα να προκληθεί (ακόμη και σε υγρές περιόδους) δεσμευόντάς το. Η δεύτερη περίπτωση είναι ιδιαίτερα επίκαιρη στις περιπτώσεις που υπάρχουν ανταγωνιστικές χρήσεις στην ίδια περιοχή ή υδρολογικά συστήματα που ανήκουν σε περισσότερες από μία χώρες. (Εβρος, Νείλος, Τίγρης).

#### *2.4 Διαχείριση των υδατικών συστημάτων*

Η διαχείριση των υδατικών συστημάτων (που περιλαμβάνει και την κατασκευή υδραυλικών έργων), έχει στόχο την εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης νερού στο χώρο και το χρόνο. Σε ορισμένες γεωγραφικές ζώνες, όπως στην αρκτική, τις ορεινές περιοχές ή τις απέραντες ακατοίκητες εκτάσεις του πλανήτη, όπου η προσφορά νερού είναι πάντοτε πολύ μεγαλύτερη από τη ζήτηση, η διαχείριση συχνά σχετίζεται με τη μεταφορά νερού σε άλλες περιοχές. Σε άλλες ζώνες, όπως στη Μεσόγειο, η φυσική προσφορά νερού είναι, σε πολλές περιπτώσεις, μεγαλύτερη από τη ζήτηση οπότε και είναι απαραίτητη η ταμίευση του νερού για τη μετέπειτα χρήση του. Τέλος, υπάρχουν και περιοχές, όπως για παράδειγμα η πόλη της Αθήνας, όπου η φυσική προσφορά είναι πάντοτε πολύ μικρότερη από τη ζήτηση οπότε και είναι απαραίτητη η μεταφορά νερού από γειτονικά υδατικά συστήματα.

Η διαχείριση των υδατικών συστημάτων προϋποθέτει τη μελέτη του ισοζυγίου μεταξύ της ζήτησης νερού (και των τάσεών της) και της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων (και της αβεβαιότητάς της). Ακόμη, περιλαμβάνει τη μελέτη των οικονομικών παραμέτρων που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος (κόστος μεταφοράς νερού) αλλά και τη σχέση των τιμολογίων και της ζήτησης νερού.

Οι τρόποι και μεθοδολογίες διαχείρισης των υδατικών συστημάτων αναφέρονται πρωτίστως στις δυνατότητες ελέγχου τους και εξειδικεύονται στη ρύθμιση της λειτουργίας των ταμιευτήρων, στον επιμερισμό της απόληψης νερού ανά κύρια, δευτερεύουσα ή εφεδρική πηγή, και στη μεταφορά νερού μέσω του δικτύου εξωτερικών υδραγωγείων. Μπορεί επίσης

να αναφέρονται και σε πρόσθετα έργα για την ενίσχυση του συστήματος, εφόσον αυτά απαιτούνται.

### *2.5 Άλλες παράμετροι*

Η κατασκευή υδραυλικών έργων και η ορθολογική διαχείριση των υδατικών συστημάτων μπορούν να αποτρέψουν προσωρινά τη γεωργική και την υδρολογική ξηρασία εφόσον έχει εκδηλωθεί μετεωρολογική ξηρασία. Δεν μπορούν όμως να αποτρέψουν πάντα την κοινωνικοοικονομική ξηρασία, η οποία εξαρτάται από άλλες κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές διαδικασίες. Για παράδειγμα η κατασκευή ταμιευτήρων σε μια χώρα που είναι εξαρτημένη από την υδροηλεκτρική ενέργεια, θα αποσοβήσει την κοινωνικοοικονομική ξηρασία (αδυναμία κάλυψης της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος) σε μια ξηρή περίοδο. Ακόμη, η βέλτιστη διαχείριση ενός υδατικού συστήματος με πολλές και ανταγωνιστικές μεταξύ τους χρήσεις (ύδρευση, άρδευση, ενέργεια, οικολογική παροχή, αναψυχή, ναυσιπλοΐα, συγκράτηση πλημμυρών) μπορεί σε περίοδο ξηρασίας να συμβιβάσει τις διαμάχες που προκύπτουν μεταξύ κοινωνικών ομάδων ή γειτονικών περιοχών για τη χρήση του νερού. Όμως, ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού, η κατά κεφαλή κατανάλωση αγαθών, η επιλογή των καλλιεργειών, η μετακίνηση ή μεταφορά πληθυσμών για πολιτικούς λόγους, είναι διαδικασίες που επιδρούν στην εμφάνιση της κοινωνικοοικονομικής ξηρασίας. Επιπλέον, η υπερίσχυση μιας κοινωνικής ομάδας, που συνδέεται μια χρήση νερού, έναντι άλλων ομάδων με ανταγωνιστική χρήση, ή ακόμη η εισαγωγή νέων χρήσεων ή επαύξηση υφιστάμενων (π.χ. με κατασκευή νέων ταμιευτήρων) από μια χώρα που ελέγχει διακρατικό ποταμό, μπορούν να οδηγήσουν τις ομάδες ή χώρες ανταγωνιστικών χρήσεων σε κοινωνικοοικονομική ξηρασία. Η αδυναμία διαχείρισης των προηγούμενων παραγόντων, πολλές φορές έχει πολλαπλασιάσει το μέγεθος μιας μετεωρολογικής ξηρασίας οδηγώντας στην πείνα και το θάνατο εκατομμύρια ανθρώπους. Ακόμη, μπορεί μελλοντικά να οδηγήσει σε εκτεταμένες κοινωνικές συγκρούσεις ή και πολέμους με αιτία την ανταγωνιστική χρήση συγκεκριμένων υδατικών πόρων.

### **3. Διαχείριση της ξηρασίας**

Όπως παρουσιάστηκε και στην εισαγωγή, η εκδήλωση της ξηρασίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ενός φυσικού φαινομένου με τη διαχείριση των υδατικών πόρων ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε νερό. Η διαχείριση αυτή περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια (Turton and Ohlsson, 1999) που σχετίζονται με το ισοζύγιο φυσικής προσφοράς και ζήτησης του νερού.

1. Στο πρώτο στάδιο η φυσική προσφορά υπερβαίνει κατά πολύ τη ζήτηση (αφθονία νερού) και η διαχείριση περιορίζεται στη διανομή των υδατικών πόρων.

2. Στο δεύτερο στάδιο η φυσική προσφορά είναι μικρότερη από τη ζήτηση (σπανιότητα νερού) και είναι απαραίτητη η αύξηση της φυσικής προσφοράς νερού με τεχνικά έργα.
3. Στο τρίτο στάδιο η φυσική προσφορά παραμένει μικρότερη από τη ζήτηση (έλλειμμα νερού), παρά τα συμβατικά τεχνικά έργα. Σε αυτό το στάδιο αναπόφευκτα η προσπάθεια στρέφεται στον έλεγχο της ζήτησης και την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, εφόσον η εναλλακτική λύση είναι η κατασκευή εξαιρετικά ακριβών ή εξεζητημένων τεχνικών έργων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι κύριοι στόχοι της διαχείρισης είναι η αύξηση του διαθέσιμου νερού, η μείωση των υδατικών αναγκών και η βέλτιστη λειτουργία των υδατικών συστημάτων (ως προς τις φυσικές, και κυρίως, τις τεχνητές συνιστώσες τους).

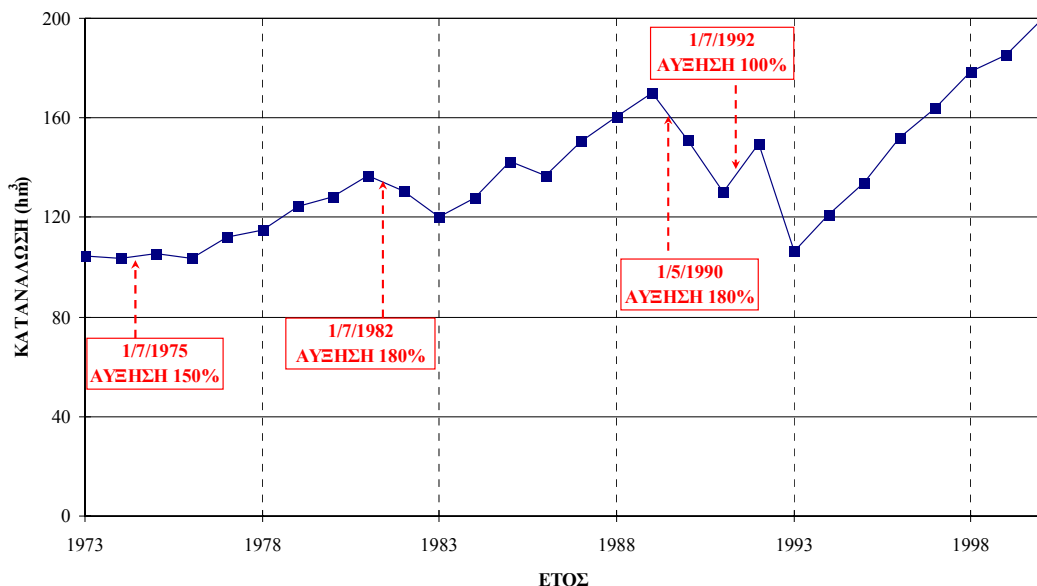
**Η αύξηση του διαθέσιμου νερού** συνήθως γίνεται με την κατασκευή έργων άντλησης υπόγειων υδροφορέων, ταμίευσης επιφανειακών υδάτων (ώστε να είναι διαθέσιμα τις ξηρές περιόδους) και μεταφοράς νερού από γειτονικές περιοχές. Εναλλακτικά, υπάρχουν οι τεχνικές της αφαλάτωσης θαλάσσιου ή υφάλμυρου νερού και της τροποποίησης καιρού (τεχνητή βροχή). Όμως, η αφαλάτωση έχει σχετικά μεγάλο κόστος, ενώ η τεχνητή βροχή έχει αμφίβολα αποτελέσματα και έτσι οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

**Η μείωση των υδατικών αναγκών** στα περισσότερα υδατικά συστήματα αφορά στην πιο αποδοτική χρήση του νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση και ύδρευση, τις κυρίαρχες δηλαδή καταναλωτικές χρήσεις του νερού. Οι ανάγκες άρδευσης εξαρτώνται από το είδος των καλλιεργειών, το είδος και την κατάσταση των αρδευτικών δικτύων και τις απώλειες των υδραγωγείων. Η μείωση του αρδευτικού νερού μπορεί να επιτευχθεί με την ανακατανομή των καλλιεργειών, την εφαρμογή οικονομικότερων σε νερό αρδευτικών δικτύων και τη συντήρηση των έργων μεταφοράς και διανομής νερού. Οι ανάγκες ύδρευσης εξαρτώνται από τη διακύμανση της οικιακής χρήσης, το βαθμό ανάπτυξης των άλλων χρήσεων νερού (βιομηχανικές, δημόσιες, δημοτικές κλπ), τα έκτακτα περιστατικά, τις απώλειες των δικτύων μεταφοράς στα διυλιστήρια και στα δίκτυα διανομής μέσα στις πόλεις. Η οικιακή χρήση, που είναι η κυριότερη, καθορίζεται από τον υδρευόμενο πληθυσμό συμπεριλαμβανομένων των τουριστών και των μεταναστών, και το βιοτικό επίπεδο που επιδρά στην κατά κεφαλή κατανάλωση. Η μείωση του υδρευτικού νερού μπορεί να επιτευχθεί με την μείωση της κατά κεφαλή κατανάλωσης και την επισκευή των δικτύων. Η κατά κεφαλή κατανάλωση εξαρτάται σημαντικά από τα πολιτισμικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των χρηστών αλλά στα σύγχρονα υδρευτικά συστήματα, όπου υπάρχει εύκολη πρόσβαση στο νερό, εμπεριέχει και μια σημαντική συνιστώσα που σχετίζεται την αλόγιστη χρήση που θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί χωρίς να αλλάξει το βιοτικό επίπεδο του χρήστη. Έτσι η συνήθης πολιτική που ακολουθείται για τη μείωση της κατά κεφαλή κατανάλωσης είναι η ενημερωτική εκστρατεία για την αποτελεσματική χρήση του νερού και η αύξηση της τιμής του. Στο Σχήμα 2 είναι

φανερή η επίδραση που είχε η πολιτική τιμολόγησης του νερού στην κατανάλωση νερού της Αθήνας τα τελευταία 30 χρόνια.

Σχήμα 2

Επίδραση της τιμής του νερού στην κατανάλωση της πόλης των Αθηνών



Πηγή: Κουτσογιάννης κ.ά., 2003

Η βέλτιστη λειτουργία των υδατικών συστημάτων προϋποθέτει την μελέτη ορθολογικών, αποδοτικών και βιώσιμων τρόπων και μεθοδολογιών λειτουργίας με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη της ζήτησης, μέσω της κατάλληλης αξιοποίησης των υδατικών πόρων που διατίθενται για την κάλυψη της ζήτησης αυτής. Ειδικότερα για τη μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων είναι απαραίτητη η χρήση εργαλείων πληροφορικής μέσω των οποίων προσδιορίζονται τα σημεία προσφοράς και ζήτησης νερού και πραγματοποιείται η μαθηματική προσομοίωση του υδατικού συστήματος. Οι αναζητούμενοι τρόποι διαχείρισης θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα (δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι), αποδοτικότητα (δηλαδή να αξιοποιούν τους υδατικούς πόρους στο μέγιστο δυνατό βαθμό), και βιωσιμότητα (δηλαδή να μη δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των αναγκών του σήμερα). Το αποτέλεσμα της βέλτιστης λειτουργίας είναι η κάλυψη της ζήτησης να γίνεται με αξιοπιστία (μείωση της πιθανότητας μη κάλυψης της ζήτησης νερού σε αποδεκτά επίπεδα), με νερό ασφαλούς ποιότητας, με μεθόδους που δεν δημιουργούν προβλήματα στο περιβάλλον (οικοσυστήματα) και με οικονομικά πρόσφορο τρόπο (Κουτσογιάννης κ.α, 2002). Ειδικότερα η έννοια της αξιοπιστίας αναφέρεται πρωτίστως στη μείωση της αβεβαιότητας που προκαλεί η μεταβλητότητα της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων (ξηρασίες) αλλά περιλαμβάνει και

άλλες πηγές αβεβαιότητας, όπως τα δυσμενή έκτακτα περιστατικά (βλάβες) στα έργα του συστήματος.

#### **4. Η περίπτωση της ύδρευσης της Αθήνας**

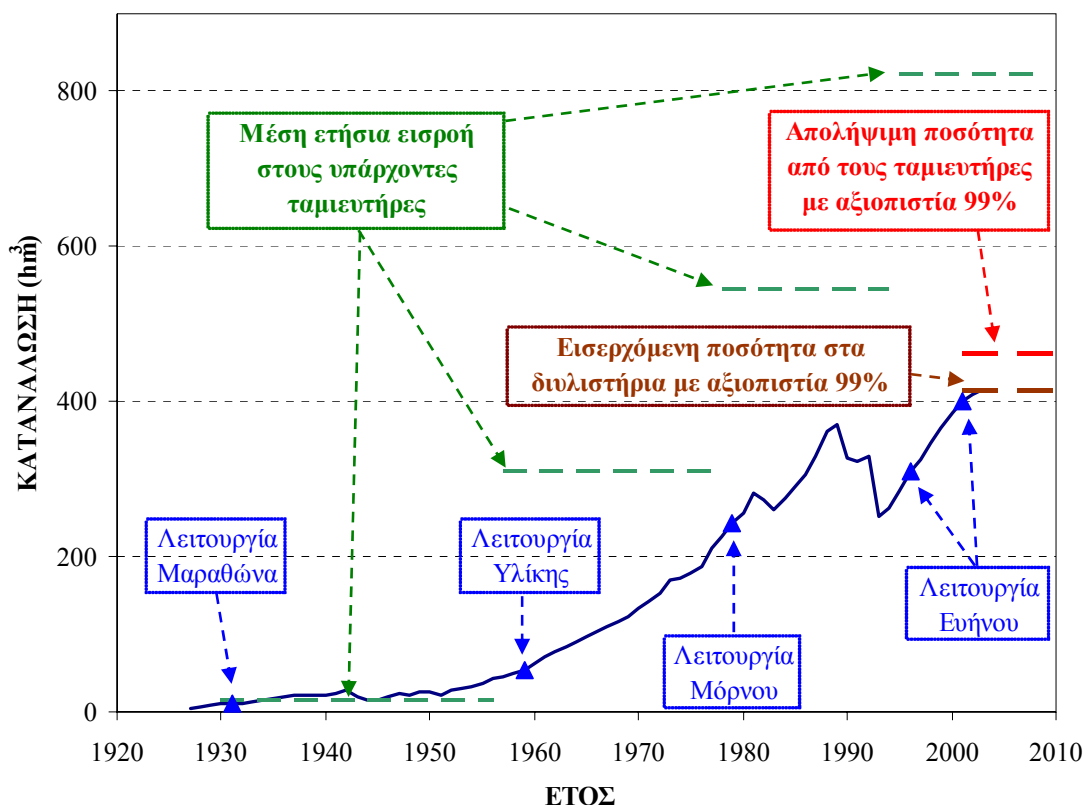
##### *4.1 Ιστορική αναδρομή*

Το κλίμα της Αττικής, όπως και των περισσότερων περιοχών της Ελλάδας, χαρακτηρίζεται από ήπιους υγρούς χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια. Όμως, το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της Αττικής σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές είναι το ιδιαίτερα χαμηλό ετήσιο ύψος βροχής που τον τελευταίο αιώνα είναι κατά μέσο όρο μικρότερο από 400 mm (στοιχεία Αστροσκοπείου Αθηνών). Δεδομένου ότι στην περιοχή άνθισε ένας από τους σημαντικότερους αρχαίους πολιτισμούς υπάρχουν αρκετές πληροφορίες που μπορούν να δώσουν μια διαχρονική εικόνα για το κλίμα αλλά και για τον τρόπο που αρχαίοι Αθηναίοι αντιλαμβάνονταν αυτό που σήμερα λέγεται διαχείριση υδατικών πόρων (Koutsoyiannis and Angelakis, 2003). Στην ακμή του πολιτισμού της πόλης, κατά τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., ο πληθυσμός ξεπερνούσε τα 200.000 άτομα και η φυσική προσφορά νερού από τα ποτάμια και τις κοντινές πηγές ήταν πολύ μικρότερη από τη ζήτηση (αφού και τότε το κλίμα περιγράφεται ως θερμό με λίγες βροχοπτώσεις). Για την ικανοποίηση των αναγκών σε νερό είχε αναπτυχθεί ένα σύστημα που περιλάμβανε ιδιωτικά και δημόσια πηγάδια, κρήνες και πηγές, υδραγωγεία που μετέφεραν το νερό από τις ορεινές περιοχές γύρω από την Αθήνα και δεξαμενές για τη συλλογή βρόχινου νερού. Ακόμη, είχαν επιβληθεί κανόνες για τη χρήση του νερού (οι περισσότεροι έγιναν από το Σόλωνα το 594). Οι κανόνες ήταν ακριβείς και διασφάλιζαν την πρόσβαση όλων των πολιτών σε νερό, τη συντήρηση των σχετικών υποδομών και την προστασία από τη ρύπανση των υδατικών πόρων. Εντεταλμένοι δημόσιοι υπάλληλοι ήταν επιφορτισμένοι με την επίβλεψη της τήρησης των κανόνων ώστε να εξασφαλίζεται η δίκαιη κατανομή του νερού στους πολίτες (Xenos et. al. 2002). Το 2<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. κατά τη διάρκεια της Ρωμαϊκής περιόδου κατασκευάστηκε το Αδριάνειο υδραγωγείο μήκους 25 km που μετέφερε νερό από την Πάρνηθα, στην πόλη των Αθηνών. Το υδραγωγείο αυτό στην πορεία των αιώνων καταστράφηκε και επισκευάστηκε στη διάρκεια του 19<sup>ου</sup> αιώνα, ενώ ήταν σε χρήση ακόμη μέχρι το 1931, όπου ολοκληρώθηκε το φράγμα και το υδραγωγείο Μαραθώνα. Εκείνη την εποχή η κατανάλωση της πόλης ήταν περίπου 12 εκατομμύρια m<sup>3</sup> κυβικά και ο πληθυσμός περίπου 800.000 κάτοικοι (Σχήμα 3). Η αφθονία νερού που πρόσφερε το νέο φράγμα (χωρητικότητας 30 εκατομμυρίων m<sup>3</sup>) είχε αποτέλεσμα το διπλασιασμό της κατανάλωσης σε δέκα μόλις χρόνια με αντίστοιχη αύξηση του πληθυσμού μόνο 40%. Το 1958 όταν λειτούργησε το υδραγωγείο Υλίκης που μετέφερε νερό από την ομώνυμη φυσική λίμνη, η κατανάλωση νερού ήταν 49 εκατομμύρια m<sup>3</sup>. Από το σημείο αυτό αρχίζει η σημαντική αύξηση της κατανάλωσης που σε ένα βαθμό συνδέεται με την αύξηση του

πληθυσμού και του βιοτικού επιπέδου αλλά και το αίσθημα αφθονίας νερού. Έτσι η κατανάλωση τετραπλασιάζεται από το 1961 έως το 1981 (71 και 282 εκατομμύρια m<sup>3</sup> αντίστοιχα), ενώ η αύξηση του πληθυσμού το ίδιο διάστημα ήταν περίπου 65%. Ήδη από το 1979 για την αντιμετώπιση της ζήτησης έχει λειτουργήσει ο ταμιευτήρας του Μόρνου μεταφέροντας νερό από τον ομώνυμο ποταμό που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 200 km από την Αθήνα. Η κατανάλωση συνέχιζε να αυξάνεται όλη τη δεκαετία του 1980 χωρίς να υπάρχει αύξηση του πληθυσμού (1981-1991 αύξηση 1.5%). Βέβαια αυτό εν μέρει οφείλεται και στην επέκταση της υδροδότησης σε νέες περιοχές. Το έτος 1989 καταγράφεται η μεγαλύτερη μέχρι τότε ετήσια κατανάλωση (376 εκατομμύρια m<sup>3</sup>), ενώ ήδη από την προηγούμενη χρονιά παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των εισροών στους ταμιευτήρες, η οποία σηματοδότησε την αρχή μιας ξηρής περιόδου που θα κρατήσει περίπου επτά χρόνια. Η ξηρασία αυτή θα φέρει το σύστημα στα όρια του και θα καταστήσει αναγκαστική τη μείωση της κατανάλωσης, η οποία και θα επιτευχθεί μετά από την εφαρμογή νέων τιμολογήσεων και την πραγματοποίηση ενημερωτικής εκστρατείας. Έτσι η κατανάλωση το 1993 θα φτάσει τα 252 εκατομμύρια m<sup>3</sup> μειωμένη κατά 33% σε σχέση με αυτήν του 1989. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 οι εισροές επανέρχονται στα κανονικά επίπεδα, ενώ ταυτόχρονα ενισχύεται ο ταμιευτήρας του Μόρνου με τα νερά του Ευήνου (με εκτροπή το 1996 και με τη λειτουργία του ταμιευτήρα το 2001). Η επάρκεια νερού θα φέρει νέα ευφορία και η κατανάλωση θα αγγίξει τα 400 εκατομμύρια m<sup>3</sup> στο τέλος του 20<sup>ου</sup> αιώνα και θα τα ξεπεράσει τα επόμενα έτη μέχρι σήμερα. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της κατανάλωσης της Αθήνας τα τελευταία 80 έτη καθώς και οι χρόνοι που εισέρχονταν οι ταμιευτήρες στο σύστημα. Σχετικά με τη σημερινή κατάσταση μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 3 ότι ενώ η μέση ετήσια αναμενόμενη εισροή στους ταμιευτήρες είναι διπλάσια από την ετήσια κατανάλωση, η απολήψιμη ποσότητα στα διυλιστήρια με αξιοπιστία 99% (έχουν αφαιρεθεί οι απώλειες των εξωτερικών υδραγωγείων) είναι περίπου ίση με τη σημερινή κατανάλωση.

Σχήμα 3

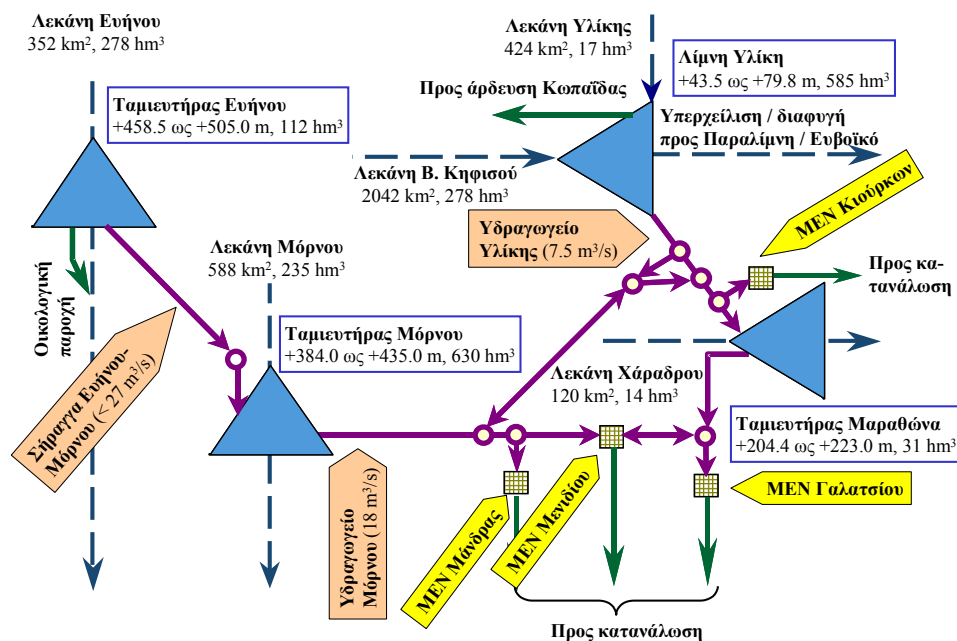
Εξέλιξη της κατανάλωσης και των έργων υδροδότησης της Αθήνας



Σήμερα το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας είναι εκτεταμένο και σύνθετο (στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται απλουστευτικά οι κύριες συνιστώσες του συστήματος). Αναπτύσσεται σε μια περιοχή 4000 km<sup>2</sup> και περιλαμβάνει 4 φράγματα, περισσότερες από 100 γεωτρήσεις σε τρεις κύριους υπόγειους υδροφορείς, 350 km κύρια υδραγωγεία, 15 αντλητικά συγκροτήματα για τη μεταφορά νερού και 4 διυλιστήρια. Το πολύπλοκο αυτό σύστημα χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων, τόσο ως προς τους υδατικούς πόρους, όσο και ως προς τις διαδρομές μεταφοράς. Οι εναλλακτικές λύσεις, συμβάλλουν θετικά στην αξιοπιστία του συστήματος, και στις συνήθειες συνθήκες λειτουργίας αλλά και στην κάλυψη περιπτώσεων έκτακτων αναγκών, είτε αυτές οφείλονται σε ξηρασία είτε σε άλλους λόγους, όπως τα περιστατικά βλαβών. Από την άλλη πλευρά, η δυνατότητα εναλλακτικών λύσεων εγείρει την ανάγκη ορθής επιλογής της καλύτερης κάθε φορά λύσης και συνακόλουθα της χρήσης προχωρημένων μεθόδων διαχείρισης βασισμένων σε τεχνικές βελτιστοποίησης.

## Σχήμα 4

### Σχηματοποίηση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας



Πηγή: Κουτσογιάννης κ.α, 2003

#### 4.2 Η έμμονη ξηρασία της περιόδου 1988-994.

Με την πλήρη λειτουργία του ταμιευτήρα του Μόρνου στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η Αθήνα για πρώτη φορά στην ιστορία της κατάφερε να έχει αφθονία νερού, ενώ το 1985 ο ταμιευτήρας του Μόρνου υπερχείλισε. Η κατανάλωση νερού αυξανόταν σημαντικά ενώ το 1985 θεσμοθετήθηκε η διάθεση νερού από τη λίμνη Υλίκη για αρδευτικούς σκοπούς. Στη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 η κατανάλωση αυξανόταν, ενώ τα αποθέματα μειώνονταν συνεχώς. Στα τέλη της δεκαετίας ξεκίνησε ένα έντονο φαινόμενο υδρολογικής ξηρασίας που κράτησε μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990. Αυτή χρονική περίοδος χαρακτηρίζεται από μειωμένες τιμές της απορροής και στις δύο λεκάνες (Μόρνου, Β. Κηφισού) αισθητά μικρότερες του ιστορικού μέσου όρου. Ειδικότερα το έτος 1989-90 οι απορροές ήταν οι μικρότερες που είχαν καταγραφεί ποτέ, ενώ και τα έτη 1991-92 και 1992-93 ήταν μικρότερες από το 50% των ιστορικών μέσων τιμών.

Στις αρχές του 1990 η κατανάλωση είχε φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα (το 1989 πραγματοποιήθηκε η μεγαλύτερη μέχρι τότε κατανάλωση), ενώ λόγω των μικρών εισροών στους ταμιευτήρες τα αποθέματα συνεχώς μειώνονταν. Το αποτέλεσμα ήταν στα μέσα του 1990 το διαθέσιμο νερό να επαρκεί για διάστημα μικρότερο του ενός έτους. Την εποχή αυτή λήφθηκαν άμεσα μέτρα που για τον περιορισμό της κατανάλωσης (εκστρατεία εξοικονόμησης νερού, αύξηση τιμής) που ήταν σχετικά επιτυχή και σε συνδυασμό με τις σχετικά υψηλές απορροές του έτους 1990-91 η κατάσταση βελτιώθηκε αφού τα αποθέματα



νερού αυξήθηκαν και επαρκούσαν για περισσότερο από ένα έτος. Στη συνέχεια όμως δύο συνεχόμενα πολύ ξηρά έτη (1991-92 και 1992-93) και ένα λιγότερο ξηρό (1993-94), επανέφεραν την κατάσταση στα δραματικά επίπεδα του 1990 με τα αποθέματα νερού να επαρκούν εκ νέου για λιγότερο από ένα έτος. Την περίοδο αυτή η ΕΥΔΑΠ εκτός από την προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης, επεξεργάστηκε διάφορες λύσεις που όλες είχαν στόχο την αύξηση του διαθέσιμου νερού. Έτσι αντλήθηκε νερό από γειτονικούς υπόγειους υδροφορείς, κατασκευάστηκαν πλωτά αντλιοστάσια στους δύο ταμιευτήρες ώστε να αξιοποιηθούν και τα τελευταία αποθέματα, μελετήθηκαν λύσεις μεταφοράς νερού με δεξαμενόπλοια, εντατικοποιήθηκαν τα έργα κατασκευής του ταμιευτήρα Ευήνου ώστε να ενισχυθεί ο Μόρνος και τέλος έγινε προσπάθεια ενίσχυσης της φυσικής βροχής στη λεκάνη του Μόρνου (με την τεχνική της σποράς νεφών). Στις αρχές του 1994 τα αποθέματα ήταν στο χαμηλότερο σημείο τους και η ΕΥΔΑΠ ήταν έτοιμη να θέσει σε λειτουργία το πλωτό αντλιοστάσιο στον ταμιευτήρα του Μόρνου, ώστε να αντληθεί νερό από τον νεκρό όγκο του φράγματος. Τότε ξεκίνησαν οι βροχοπτώσεις που συνεχίστηκαν με φυσιολογικούς ρυθμούς τα επόμενα έτη προκαλώντας την άνοδο των εισροών στα κανονικά τους επίπεδα. Η μερική εκτροπή των νερών του Ευήνου το 1996 και η πλήρης λειτουργία του φράγματος το 2001 στη συνέχεια απομάκρυναν το φάσμα της λειψυδρίας.

Η παρουσίαση της κατάστασης κατά την περίοδο της λειψυδρίας γίνεται στη συνέχεια μέσα από τα Σχήματα 4-8 και τον Πίνακα 1 που κατασκευάστηκαν με βάση τα κυριότερα διαχειριστικά και υδρολογικά δεδομένα του υδροδοτικού συστήματος και συγκεκριμένα:

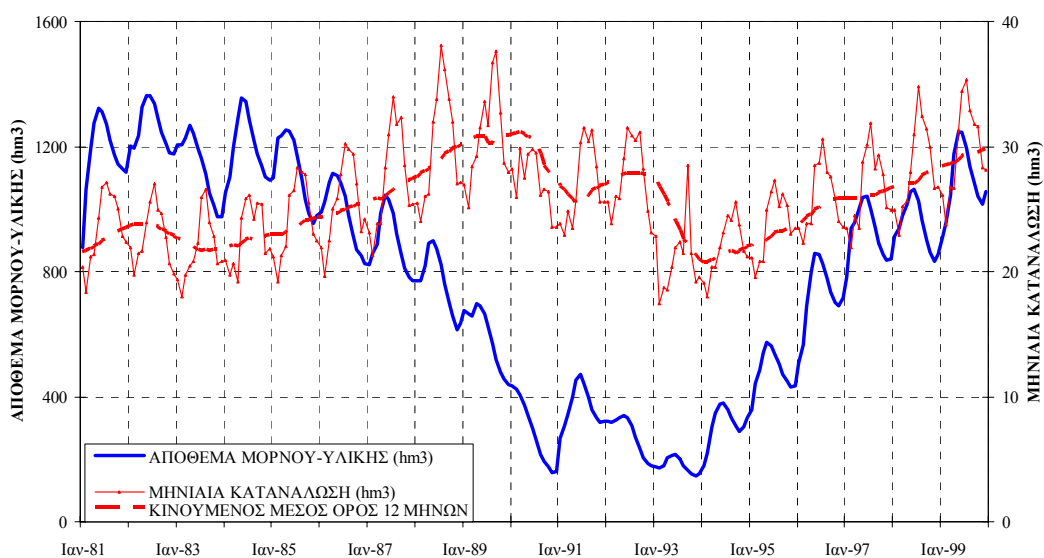
- Τα μηνιαία αποθέματα νερού του συστήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μηνιαία χρονοσειρά του αθροίσματος των αποθεμάτων των ταμιευτήρων Μόρνου και Υλίκης, η οποία αποτελεί σχεδόν το σύνολο των αποθεμάτων του συστήματος (δεν περιλαμβάνει τον Μαραθώνα που η συμβολή του είναι πολύ μικρή και τα υπόγεια νερά που θεωρούνται εφεδρικοί πόροι).
- Η μηνιαία κατανάλωση νερού από τους ταμιευτήρες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μηνιαία χρονοσειρά κατανάλωσης νερού στα διυλιστήρια που είναι περίπου 10% μικρότερη, αφού δεν περιλαμβάνει τις απώλειες μεταφοράς νερού από τους ταμιευτήρες στα διυλιστήρια. Ακόμη, με βάση τη χρονοσειρά αυτή υπολογίστηκε και η χρονοσειρά κινούμενου μέσου όρου 12 μηνών.
- Οι μηνιαίες και ετήσιες εισροές στους ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης. Η εισροή στο Μόρνο σχεδόν ταυτίζεται με την απορροή του ποταμού Μόρνου, ενώ η εισροή στην Υλίκη αναπαρίσταται από την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού που αποτελεί το 95% των εισροών στη λίμνη.
- Οι μηνιαίες και ετήσιες βροχοπτώσεις στις λεκάνες απορροής Μόρνου και Βοιωτικού Κηφισού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες και ετήσιες χρονοσειρές δύο

βροχομετρικών σταθμών που διαθέτουν τα πιο πολλά χρόνια παρατηρήσεων. Πρόκειται για τους σταθμούς Λιδορίκι και Αλιάρτο που αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά το βροχομετρικό καθεστώς των λεκανών Μόρνου και Βοιωτικού Κηφισού αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των μηνιαίων αποθεμάτων των ταμιευτήρων του συστήματος (αριστερός άξονας), της μηνιαίας κατανάλωσης νερού και του κινούμενου μέσου όρου 12 μηνών (δεξιός άξονας) για την περίοδο 1981-2000. Από το Σχήμα προκύπτει η διαρκής αύξηση της κατανάλωσης μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980, όπου και άρχισε η εμφανής μείωση των αποθεμάτων νερού. Στη συνέχεια και παρά τη μείωση της κατανάλωσης (αποτέλεσμα των μέτρων εξοικονόμησης νερού) τα αποθέματα συνέχισαν να μειώνονται εξαιτίας της περιόδου ξηρασίας στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Αν και από το 1994 τα αποθέματα άρχισαν να αυξάνονται, μόνο η είσοδος του ταμιευτήρα Ευήνου στο σύστημα έφερε ουσιαστική ανάκαμψη των διαθέσιμων αποθεμάτων νερού. Είναι χαρακτηριστικό ότι την ίδια περίοδο, που ο κίνδυνος λειψυδρίας φάνηκε να απομακρύνεται, η κατανάλωση νερού άρχισε να αυξάνεται με ρυθμούς αντίστοιχους με τα προ της ξηρασίας επίπεδα, αύξηση που συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

**Σχήμα 5**

*Χρονική εξέλιξη αποθεμάτων ταμιευτήρων και κατανάλωσης Αθήνας*



Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται για κάθε μήνα το πηλίκo του αποθέματος προς το μέσο όρο κατανάλωσης των τελευταίων 12 μηνών. Το πηλίκo αυτό πρακτικά εκφράζει τον αριθμό των μηνών που μπορεί το υπάρχον απόθεμα να καλύψει τη μηνιαία ζήτηση, όπως αυτή εκτιμάται από τη μέση τιμή των τελευταίων 12 μηνών. Από το σχήμα είναι εμφανής η κρισιμότητα της

κατάστασης κατά την περίοδο 1990-1994, όπου τα διαθέσιμα αποθέματα επαρκούσαν για λιγότερο από ένα χρόνο και σε ορισμένες περιπτώσεις για μόλις έξι μήνες.

**Σχήμα 6**

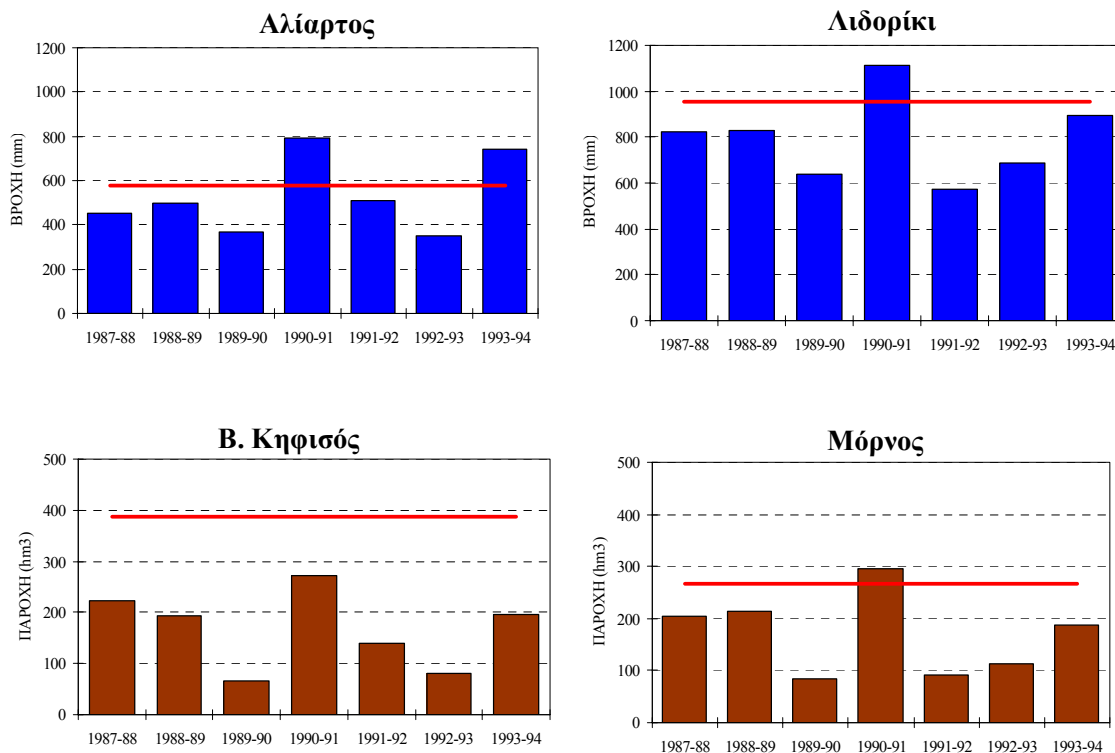
*Χρονική εξέλιξη ανηγμένου αποθέματος (αριθμός μηνών που μπορεί να καλύψει την κατανάλωση*



Στα Σχήματα 7α-δ παρουσιάζονται οι τιμές βροχόπτωσης και απορροής των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Μόρνου για τα έτη της ξηρής περιόδου 1987-88 έως 1993-94 και οι μέσες ετήσιες τιμές κάθε μεγέθους, όπως υπολογίστηκε από την επεξεργασία των ιστορικών δειγμάτων (που το μήκος τους σε όλες τις περιπτώσεις υπερβαίνει τα 30 χρόνια). Ακόμη, στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται για κάθε μεταβλητή και υδρολογικό έτος το ποσοστό της τιμής ως προς τη ιστορική μέση ετήσια τιμή. Από τα δεδομένα των σχημάτων και του πίνακα είναι εύκολο να εξηγηθεί η λειψυδρία στην Αθήνα, αφού οι απορροές των δύο ποταμών που τροφοδοτούσαν το υδροδοτικό σύστημα της πόλης είναι αισθητά μικρότερες του ιστορικού μέσου όρου των προηγούμενων ετών. Ειδικότερα, στο υδρολογικό έτος 1989-90 έχουμε την εμφάνιση μιας εξαιρετικά μικρής ποσότητας απορροής στο Βοιωτικό Κηφισό, η οποία φτάνει μόλις το 17% της μέσης ετήσιας τιμής και αποτελεί το απόλυτο ελάχιστο που έχει παρατηρηθεί από το 1907 που υπάρχουν μετρήσεις. Αντίστοιχα, το ίδιο έτος πραγματοποιείται η απολύτως ελάχιστη παρατηρημένη τιμή απορροής του Μόρνου η οποία φτάνει το 32% της μέσης ετήσιας τιμής. Όμως και τα έτη 1991-92 και 1992-93 ήταν ιδιαίτερα φτωχά από πλευράς απορροών, αφού οι τιμές στα δύο ποτάμια αντιστοιχούν σε 36% και 21% για τον Βοιωτικό Κηφισό και 34% και 43% για το Μόρνο. Συνολικά στην επταετία οι απορροές των δύο ποταμών αντιστοιχούσαν στο 41% και 62% των αναμενόμενων τιμών με βάση τα ιστορικά δεδομένα.

### Σχήμα 7

Χρονική εξέλιξη ετησίων βροχοπτώσεων (α) Αλίαρτος, (β) Λιδορίκι και απορροών (γ) Βοιωτικός Κηφισός και (δ) Μόρνος κατά την επταετία 1987-88 έως 1993-94. Με τις συνεχείς γραμμές οι μέσες ετήσιες τιμές



### Πίνακας 1

Ποσοστά βροχόπτωσης και απορροής ως προς τις μέσες ετήσιες τιμές.

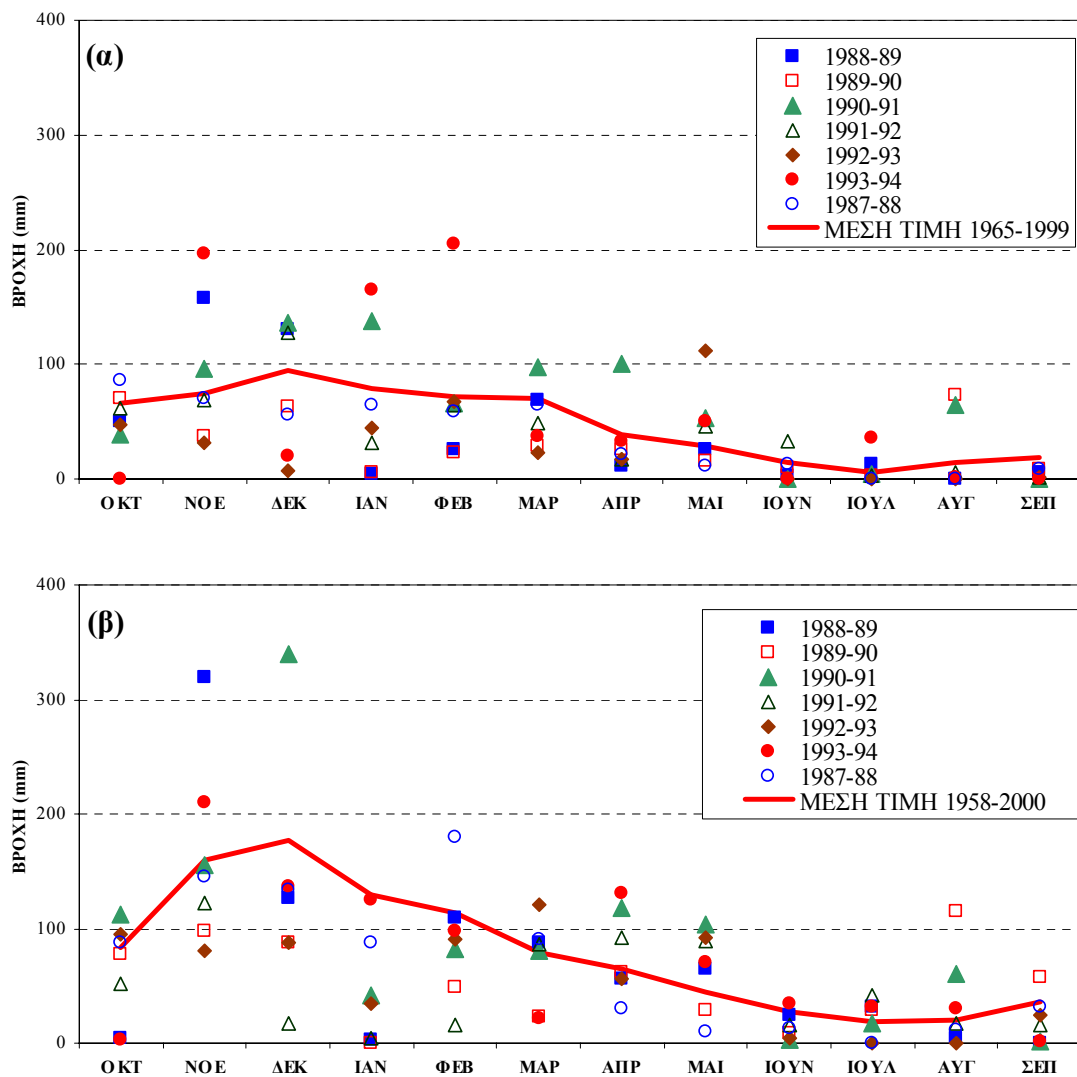
	Λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού		Λεκάνη Μόρνου	
	Βροχή (Αλίαρτος)	Απορροή	Βροχή (Λιδορίκι)	Απορροή
1987-88	79	58	86	77
1988-89	86	50	87	80
1989-90	63	17	67	32
1990-91	138	70	117	111
1991-92	89	36	60	34
1992-93	61	21	72	43
1993-94	129	51	94	71
<b>Μέση τιμή</b>	<b>92</b>	<b>43</b>	<b>83</b>	<b>64</b>

Από τα δεδομένα των Σχημάτων 7 και του Πίνακα 1 διαπιστώνεται ότι οι ιδιαίτερα χαμηλές ετήσιες απορροές των δύο λεκανών κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου δεν εξηγούνται επαρκώς από τις τιμές των αντιστοιχών βροχοπτώσεων στις δύο λεκάνες.

Πράγματι ακόμη και τα ιδιαίτερα ξηρά έτη από πλευράς απορροών (1989-90, 1991-92, 1992-93) οι βροχοπτώσεις στις δύο λεκάνες κυμαίνονταν από 61 έως 89% των μέσων ετήσιων τιμών, ενώ τα υπόλοιπα έτη οι βροχοπτώσεις ήταν σε συνήθη επίπεδα. Συνολικά στην επταετία οι βροχοπτώσεις στις δύο λεκάνες αντιστοιχούσαν στο 92% και 83% των αναμενόμενων τιμών με βάση τα ιστορικά δεδομένα. Έτσι διαπιστώνεται ότι, ενώ οι ετήσιες βροχοπτώσεις στις λεκάνες του υδροσυστήματος μειώθηκαν κατά περίπου 10%, οι απορροές μειώθηκαν κατά περίπου 50%. Για τη διερεύνηση της παραπάνω φαινομενικά παράδοξης διαπίστωσης παρουσιάζονται οι μηνιαίες βροχοπτώσεις κατά τα έξι υδρολογικά έτη στα Σχήματα 8α (Αλίαρτος) και 8β (Λιδορίκι) σε σύγκριση με τις μέσες μηνιαίες τιμές των διατιθέμενων ιστορικών δειγμάτων.

**Σχήμα 8**

*Συγκριτική εικόνα των μηνιαίων βροχοπτώσεων της επταετίας 1987-88 έως 1993-94 σε σχέση με τις ιστορικές μέσες τιμές της περιόδου (α) Αλίαρτος, (β) Λιδορίκι*



Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων διαπιστώνεται ότι στις δύο λεκάνες απορροής κατά τη συγκεκριμένη επταετία η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης μέσα στη διάρκεια του υδρολογικού έτους είναι αισθητά διαφοροποιημένη, σε σχέση με το μέσο καθεστώς της. Συγκεκριμένα:

- Το μήνα Ιανουάριο έχουμε σχεδόν μηδενικές βροχοπτώσεις κατά τα έτη 1988-89 και 1989-90 και στις δύο λεκάνες, ενώ και κατά τα υπόλοιπα έτη η βροχόπτωση το μήνα αυτό παρουσιάζεται ιδιαίτερα μειωμένη
- Το μήνα Φεβρουάριο οι βροχοπτώσεις και στις δύο λεκάνες είναι αρκετά μικρότερες από τις αναμενόμενες και για τα επτά υδρολογικά έτη (με εξαίρεση το 1994 για την Αλίαρτο και το 1988 για το Λιδορίκι)
- Τους μήνες Οκτώβριο, Δεκέμβριο και Μάρτιο στα περισσότερα υδρολογικά έτη και στις δύο λεκάνες, οι βροχοπτώσεις είναι μικρότερες από τις αναμενόμενες.
- Τους μήνες Μάιο, Ιούλιο και Αύγουστο οι βροχοπτώσεις είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες στα περισσότερα υδρολογικά έτη και στις δύο λεκάνες.
- Το ξηρότερο από πλευράς απορροής υδρολογικό έτος 1989-90 χαρακτηρίζεται από ελάχιστη βροχόπτωση τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο και ισχυρότατες βροχοπτώσεις τον Αύγουστο και στις δύο λεκάνες. Τα ίδια περίπου χαρακτηριστικά έχει και το έτος 1991-92 με τη διαφορά ότι οι ισχυρές βροχοπτώσεις πραγματοποιούνται το Μάιο.

Από τις παραπάνω διαπιστώσεις προκύπτει ότι το χαρακτηριστικό σχήμα της μηνιαίας κατανομής της βροχής, αντί να παρουσιάζει τη συνήθη περίπτωση κωδωνοειδή εικόνα με μια αιχμή γύρω στο Δεκέμβριο, εμφανίζει σημαντική πτώση τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο με μια δεύτερη αιχμή το Μάρτιο και μια μικρότερη τρίτη αιχμή τον Αύγουστο. Μια τέτοια κατανομή, στην οποία διακόπτεται η ομαλή εξέλιξη των χειμερινών βροχοπτώσεων έχει συνέπεια τη σημαντική μείωση της απορροής όχι μόνο τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο, αλλά και τους επόμενους μήνες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στους ιδιαίτερα πολύπλοκους και ευαίσθητους ως προς την κατανομή της βροχής μηχανισμούς μετατροπής της βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή. Συγκεκριμένα ο μετασχηματισμός της βροχόπτωσης σε απορροή είναι μη γραμμικός και επηρεάζεται από παράγοντες, όπως η δίαιτα της εδαφικής υγρασίας, η συσσώρευση/τήξη χιονιού η εξατμοδιαπνοή και η κατάσταση των υπογείων υδροφορέων και έτσι είναι δυνατό η μείωση της χειμερινής βροχόπτωσης να επιφέρει μεγαλύτερη μείωση της συνολικής απορροής (Ναλμπάντης κ.α, 1994).

#### *4.3 Η σημερινή διαχείριση του υδροσυστήματος της Αθήνας.*

Με τη λήξη της περιόδου της έμμονης ξηρασίας, η οποία ήταν μια έντονη δοκιμασία για το σύστημα και τη διαχείρισή του, την ένταξη των έργων μεταφοράς νερού από τον Εύηνο στο σύστημα και τη διακοπή της πολιτικής μείωσης της κατανάλωσης από πλευράς ΕΥΔΑΠ, η

κατανάλωση ξεπέρασε κατά πολύ τα προ της ξηρασίας επίπεδα, παρουσιάζοντας εντονότερες αυξητικές τάσεις. Το 1999 η ΕΥΔΑΠ συνεργασία με τον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ υλοποίησε ένα Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ) με σκοπό τη διαχείριση υδατικών της πόρων και τον καθορισμό λεπτομερών κανόνων λειτουργίας του υδροσυστήματος με σκοπό τη βελτιστοποίηση των απολήψεων με παράλληλη διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος (Koutsoyiannis et. al, 2003).

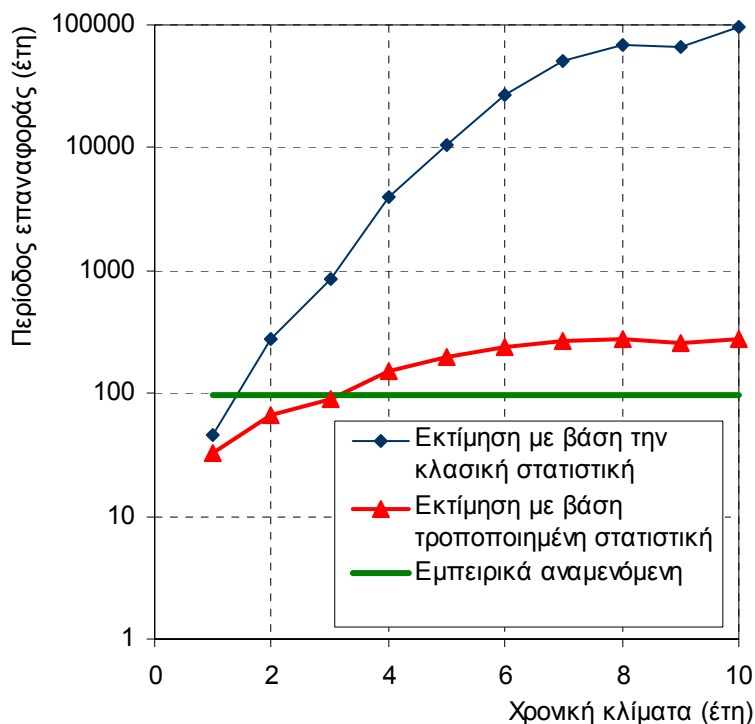
Η συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης του υδροδοτικού συστήματος, μέσω των δυνατοτήτων που παρέχει το ΣΥΑ, καθώς και η προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασής του σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του (η οποία γίνεται σε ορίζοντα τουλάχιστον μιας δεκαετίας), επιτρέπει την καλύτερη αντιμετώπιση ανάλογων περιστατικών ξηρασίας στο μέλλον. Έτσι, το ΣΥΑ που άρχισε να λειτουργεί από το 2000, μας δίνει μεγαλύτερη εμπιστοσύνη για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος ακόμη και κάτω από ακραίες συνθήκες, χωρίς βέβαια να μπορεί να εξαλείψει τον κίνδυνο αστοχίας του συστήματος υδροδότησης. Η όλη λογική με την οποία λειτουργεί το σύστημα είναι πιθανοτική και θεωρείται ανεκτή μια αστοχία στα 100 χρόνια, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Εννοείται ότι σε περίπτωση επερχόμενης αστοχίας θα ληφθούν πρόσθετα μέτρα έκτακτης ανάγκης, οπότε θα μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας ακόμη περισσότερο.

## **5. Επίλογος-συζήτηση**

Ένα προφανές ερώτημα που δημιουργεί η εμπειρία της πρόσφατης έμμονης ξηρασίας είναι: Πόσο πιθανό είναι να επαναληφθεί στο μέλλον ένα επεισόδιο ανάλογης έντασης και διάρκειας (ή ακόμη μεγαλύτερης); Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι καθοριστική και για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση του συστήματος στα πλαίσια του ΣΥΑ που περιγράφηκε παραπάνω. Ένα τέτοιο ερώτημα πρέπει να απαντηθεί με βάση τη θεωρία πιθανοτήτων και σχετικούς κλάδους της στατιστικής και των στοχαστικών ανελίξεων. Η κλασική στατιστική, η οποία στηρίζεται στην παραδοχή ανεξαρτησίας των συνθηκών σε διαδοχικά έτη, μπορεί εύκολα να δώσει την απάντηση. Η απάντηση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 9 για διάφορες χρονικές κλίμακες. Στην κλίμακα του έτους, η περίοδος επαναφοράς της ξηρασίας, που αριθμητικά ταυτίζεται με το αντίστροφο της πιθανότητας, είναι κάτω από 100 χρόνια. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι έχοντας διαθέσιμο ένα δείγμα μετρήσεων 100 ετών, εμπειρικά θα περιμέναμε η ελάχιστη ετήσια ξηρασία να έχει περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Άρα, σε ετήσια κλίμακα, η ξηρασία που συνέβη δεν ήταν εξαιρετικά ακραία. Όμως, αν προσχωρήσουμε σε κλίμακα διετίας, τριετίας, έως και δεκαετίας, παρατηρούμε ότι η περίοδος επαναφοράς αυξάνεται σημαντικά, αναδεικνύοντας έτσι το στοιχείο της εμμονής στην υπόψη ιστορική ξηρασία. Βλέπουμε λοιπόν ότι σε κλίμακα δεκαετίας η περίοδος επαναφοράς φτάνει τα 100.000 χρόνια, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επανάληψη της ίδιας ξηρασίας στο μέλλον έχει πιθανότητας μία φορά στις 100.000.

Σχήμα 9

Περίοδοι επαναφοράς της ελάχιστης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού για χρονικές κλίμακες 1-10 ετών



Ωστόσο υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι το συμπέρασμα αυτό που βγήκε με την κλασική στατιστική είναι εσφαλμένο. Οι υδροκλιματικές αλλά και όλες οι γεωφυσικές διεργασίες είναι αρκετά πολύπλοκες και δεν μπορούν να περιγραφούν από το κλασικό στατιστικό μοντέλο της ανεξαρτησίας των διαδοχικών γεγονότων. Η εμμονή είναι ένα στοιχείο πανταχού παρόν στη φύση. Παρατηρείται σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας της γης και εκφράζει τη φυσική τάση των ξηρασιών (αλλά και των πλημμυρών, η γενικά των ομοειδών καταστάσεων) να ομαδοποιούνται στο χρόνο. Ο Άγγλος μηχανικός Hurst (1951) ήταν ο πρώτος που το μελέτησε (στα πλαίσια του σχεδιασμού του φράγματος Aswan στο Νείλο) και προς τιμήν του η συμπεριφορά αυτή των φυσικών διεργασιών είναι γνωστή ως φαινόμενο Hurst. Ο μαθηματικός Mandelbrot (1977) ονόμασε την ίδια συμπεριφορά «φαινόμενο Ιωσήφ» παραπέμποντας στη βιβλική ιστορία των επτά παχιών και των επτά ισχνών αγελάδων. Παρ' όλο που το φαινόμενο έχει μελετηθεί αρκετά, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, αλλά φαίνεται ότι έχει σχέση με τη φυσική και μαθηματική αρχή της μέγιστης εντροπίας (Koutsoyiannis, 2005).

Αν, λοιπόν, στη θέση των μεθόδων της κλασικής στατιστικής, χρησιμοποιήσουμε κατάλληλα τροποποιημένες μεθόδους που παίρνουν υπόψη αυτό το φαινόμενο (Koutsoyiannis, 2003) τότε η απάντηση που παίρνουμε στο πιο πάνω ερώτημα, σχετικά με την πιθανότητα επανάληψης της ξηρασίας, είναι πολύ διαφορετική. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, για κλίμακα 10 ετών, η περίοδος επαναφοράς από 100.000 χρόνια πέφτει σε κάτω από 300 χρόνια και η πιθανότητα πλησιάζει το 0.4%. Έτσι, η έμμονη αυτή ξηρασία δεν είναι



πια εξαιρετικά απίθανη και άρα σε ανάλογης σημασίας υδροσυστήματα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την κατάρτιση μακροχρόνιας διαχειριστικής πολιτικής. Η υπόθεση της κλιματικής αλλαγής και η μεγαλύτερη αβεβαιότητα που αυτή συνεπάγεται μπορεί να καταστήσει ακόμη πιο πιθανό το ενδεχόμενο έμμονης ξηρασίας. Η όλη στάση μας απέναντι σε αυτό μπορεί να συνοψιστεί στα εξής: (α) συμφιλίωση με την αβεβαιότητα και προσαρμοστικότητα στις φυσικές συνθήκες· (β) προγραμματισμός και κατασκευή κατάλληλων έργων για περιοχές ελλειμματικές και τρωτές στην ξηρασία· και (γ) ανάπτυξη και εφαρμογή ορθολογικών διαχειριστικών προγραμμάτων που θα ελαχιστοποιούν τη διακινδύνευση και τις επιπτώσεις της ξηρασίας.

## **Βιβλιογραφία**

- Μαμάσης, Ν., *Ανάλυση βροχοπτώσεων κατά τύπο καιρού*, Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Κουτσογιάννης Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Χ. Καρόπουλος, Α. Νασίκας, Ε. Νεστορίδου, και Α. Νικολόπουλος, *Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας — Έτος 2002–2003*, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 14, 215 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2002.
- Ναλμπάντης, Ι., Ν. Μαμάσης, Δ. Κουτσογιάννης, Ε. Μπαλάς, Μ. Αφτιάς, Μ. Μιμίκου, και Θ. Ξανθόπουλος, *Υδρολογικά χαρακτηριστικά της λειψυδρίας, Πρακτικά της ημερίδας: Το υδροδοτικό πρόβλημα της Αθήνας*, Αθήνα, 13-28, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- ΥΠΙΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ, και ΚΕΠΕ, *Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων-ΕΜΠ, 549 σελίδες, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Ιανουάριος 2003.
- Heim Jr. R.R., *A review of twentieth-century drought indices used in the United States*, Bulletin of the American Meteorological Society, 83(8): 1149-1165, 2002.
- Hurst, H.E., *Long term storage capacities of reservoirs*, Trans ASCE, 116, 776-808, 1951.
- Koutsoyiannis, D., *Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics*, Hydrological Sciences Journal, 48(1), 3-24, 2003.
- Koutsoyiannis, D., *Uncertainty, entropy, scaling and hydrological stochasticity, 2, Time dependence of hydrological processes and time scaling*, Hydrological Sciences Journal, 50(3), 405-426, 2005.

- Koutsoyiannis, D., and A. N. Angelakis, *Hydrologic and hydraulic science and technology in ancient Greece*, The Encyclopedia of Water Science, edited by B. A. Stewart and T. Howell, 415-417, Dekker, New York, 2003.
- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, *A decision support system for the management of the water resource system of Athens*, Physics and Chemistry of the Earth, 28(14-15), 599-609, 2003.
- Mandelbrot, B.B., *The Fractal Geometry of Nature*, 248, Freeman, New York, 1977.
- Turton, A.R. and L. Ohlsson, *Water scarcity and social stability: towards a deeper understanding of the key concepts needed to manage water scarcity in developing countries*, in Proceedings of the ninth Stockholm water conference, 24 pp, Stockholm, Sweden, 1999
- Xenos, D., I. Passios, S. Georgiades, E. Parlisis, and D. Koutsoyiannis, *Water demand management and the Athens water supply*, Proceedings of the 7th BNAWQ Scientific and Practical Conference "Water Quality Technologies and Management in Bulgaria", Sofia, Sofia, 2002.