



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΧΑΡΙΛΑΟΥ ΒΑΓΓΕΛΗ**

Διπλωματούχου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού Ε.Μ.Π.  
Διπλωματούχου Δ.Π.Μ.Σ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΤΣΑΚΙΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2012







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ  
ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ  
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΧΑΡΙΛΑΟΥ ΒΑΓΓΕΛΗ**

Διπλωματούχου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού Ε.Μ.Π.  
Διπλωματούχου Δ.Π.Μ.Σ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΤΣΑΚΙΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2012





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΧΑΡΙΛΑΟΥ ΒΑΓΓΕΛΗ**

Διπλωματούχου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού Ε.Μ.Π.  
Διπλωματούχου Δ.Π.Μ.Σ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ  
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Γ. ΤΣΑΚΙΡΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)
2. Σ. ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ι. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ  
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Γ. ΤΣΑΚΙΡΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)
2. Σ. ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ι. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Α. ΛΟΥΚΑΣ, Καθ. Παν. Θεσσαλίας
5. Β. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ, Καθ. Δ.Π.Θ.
6. Ν. ΔΑΛΕΖΙΟΣ, Καθ. Παν. Θεσσαλίας
7. Ε. ΠΑΛΛΙΟΛΟΓΟΣ, Αν. Καθ.  
Πολυτεχνείου Κρήτης

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2012

---

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

---

Στη Μαίρη, στην Αλίκη,  
στη φύση, στη γη,  
στις μητέρες.





## πρόλογος

Έλλειψη...

Οι άνθρωποι που έχουν βιώσει την “έλλειψη” σε οποιαδήποτε μορφή, καταλαβαίνουν τη σκληρότητα αυτής της έννοιας, που περιγράφει ίσως καλύτερα από οποιαδήποτε άλλη λέξη την ξηρασία. Η έλλειψη νερού που προκαλεί η ξηρασία είναι μια από τις μεγαλύτερες πιέσεις που μπορεί να δεχτεί η φύση. Η ξηρασία στην ταλαιπωρημένη ζώνη Sahel της Αφρικής φτάνει πέρα από την ανοχή του ανθρώπινου μυαλού. Λειψυδρία, Λιμός, Εξαθλίωση, μαζικές μετακινήσεις πληθυσμού και χιλιάδες νεκροί.

Με την επιφάνεια της γης να καλύπτεται κατά 71% από νερό και το ανθρώπινο σώμα να αποτελείται κατά 2/3 από νερό, η ξηρασία κρατά στα χέρια το μακρύλαιμο δρεπάνι (scythe) και φορά στους ώμους τη σκοτεινή κάπα του θανάτου.

Ευτυχώς η φύση είναι μητέρα.

Η διατριβή αυτή δεν θα μπορούσε να “ζορκίσει το κακό”, ευελπιστεί απλά να προσθέσει ένα κόκκο άμμου στον αμμόλοφο της επιστήμης, βοηθώντας την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και την πιο γρήγορη αντίδραση των ανθρώπων για την αντιμετώπισή του.

Η διδακτορική διατριβή διεξήχθη και ολοκληρώθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη και ανάλυση του φαινομένου της ξηρασίας, που στηρίζεται σε δύο βασικούς άξονες, την

αναγνώριση και το χαρακτηρισμό της ξηρασίας, την εκτίμηση δηλαδή της σφοδρότητας της και το Σχεδιασμό Αντιμετώπισής της. Μέσα από μια διαδικασία ανάλυσης του φαινομένου της ξηρασίας ως μονοδιάστατο φαινόμενο (από τρισδιάστατο), η έμφαση σχετικά με το χαρακτηρισμό του φαινομένου μεταφέρεται στην εκτίμηση της έντασης των γεγονότων ξηρασίας. Η προσέγγιση αυτή είναι πρωτότυπη και η υιοθέτησή της αλλάζει ουσιαστικά τον τρόπο ανάλυσης της ξηρασίας. Η διδακτορική διατριβή αντιμετωπίζει τελικά το φαινόμενο της ξηρασίας με τέτοιον τρόπο ώστε να συνεισφέρει στην κατανόησή του, να συμβάλει στην απλοποίηση της προσομοίωσής του και να δημιουργήσει ένα πλαίσιο αντιμετώπισής του στηριζόμενη στη φιλοσοφία του Προληπτικού Σχεδιασμού. Έμφαση δίνεται στην ανάλυση των επιπτώσεων και στις συμμετοχικές διαδικασίες για τη λήψη των αποφάσεων αντιμετώπισης της ξηρασίας.

Παράλληλα, η διδακτορική διατριβή αναπτύσσει έναν καινοτόμο δείκτη ξηρασίας, τον Reconnaissance Drought Index (RDI), ο οποίος με την ισχυρή θεωρητική του βάση μπορεί να αποτελέσει την μοναδική παράμετρο στο πλαίσιο της μονοδιάστατης ανάλυσης της ξηρασίας. Ο RDI, ως ένας απλός δείκτης ξηρασίας που ενσωματώνει ωστόσο δύο κλιματικές παραμέτρους (αθροιστική βροχοπτώση και δυνητική εξατμισοδιαπνοή), μπορεί να αποτελέσει και τον κατάλληλο δείκτη διερεύνησης της ξηρασίας στο πλαίσιο της αναμενόμενης κλιματικής αστάθειας.

Σε δεύτερο επίπεδο παρουσιάζονται από τη διδακτορική διατριβή καινοτόμες προτάσεις, που αφορούν στον Σχεδιασμό Αντιμετώπισης της ξηρασίας με έμφαση στον Προληπτικό Σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα σύστημα πρόγνωσης της ετήσιας ξηρασίας με βάση τις τιμές του RDI μικρότερων χρονικών περιόδων από την αρχή του υδρολογικού έτους. Επίσης, στο πλαίσιο των επιλογών αντιμετώπισης της ξηρασίας προτείνεται η ορθολογική ιεράρχηση της ικανοποίησης της ζήτησης με την καινοτόμο μεθοδολογία “brick wall” στην περίπτωση διανομής περιορισμένων διαθέσιμων ποσοτήτων νερού σε διάφορες κατηγορίες χρηστών.

Με την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν, ο καθένας με το δικό του άμεσο ή έμμεσο τρόπο, στην αίσια κατάληξη αυτής της μακράς και δύσκολης διαδικασίας.

Τον Καθηγητή Γ. Τσακίρη, επιβλέποντα της διατριβής, χωρίς την υποστήριξη του οποίου θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Ο κ. Τσακίρης υπήρξε πολύ παραπάνω από “μέντορας” σε επιστημονικό και προσωπικό επίπεδο. Εξαιρετικός ακροατής στις προσωπικές δύσκολες στιγμές, αλλά και αυστηρός κριτής στις επιστημονικές προσεγγίσεις. Η ακεραιότητα των

συμβουλών του με απόλυτο σεβασμό στις διαφορετικές ιδέες και απόψεις, μετέτρεπε την επιστημονική διερεύνηση σε μια απολαυστική αναζήτηση. Η ικανότητά του να ανακαλύπτει την ουσία στις διάσπαρτες σκέψεις των συνεργατών του, οδήγησε στα στιβαρά και αξιόλογα αποτελέσματα με τη γνωστή απήχηση στον επιστημονικό κόσμο της ξηρασίας. Πάνω από όλα όμως τον ευχαριστώ για το χέρι βοήθειας στις δύσκολες ανθρώπινες στιγμές, που είχε τη δύναμη να σταματήσει την πτώση και να με επαναφέρει στην πραγματικότητα.

Τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, Επ. Καθηγητές Σ. Γιακουμάκη και Ι. Ναλμπάντη. Ο κ. Γιακουμάκης, σύμβουλός μου από τα πρώτα στάδια της ερευνητικής μου πορείας (διπλωματική εργασία πτυχίου), γνωρίζοντας επί χρόνια τα επιστημονικά μου ενδιαφέροντα με κατεύθυνε με ακρίβεια στο χώρο της υδρολογίας, αποτελώντας πάντα μια προσιτή πηγή ερευνητικών διευκρινήσεων. Ο κ. Ναλμπάντης, με τη συνεργασία μας να ξεκινά πολύ αργότερα, αλλά να γίνεται όλο και πιο έντονη με το πέρασμα του χρόνου, υπήρξε καιρίος παράγοντας για την ολοκλήρωση της διατριβής. Η συνεργασία μας σε επιστημονικές δημοσιεύσεις, με τη βαθιά γνώση του σε λεπτομέρειες του επιστημονικού του αντικειμένου και την ακρίβεια και ορθότητα των διατυπώσεών του, υπήρξε σημαντική για την ολοκλήρωση τμήματος της διατριβής. Η καθημερινή μας επαφή, μου έδωσε τη δυνατότητα να λύσω πλήθος από απορίες και να κατανοήσω επιστημονικά θέματα, που μόνο με τη συνεχή του καθημερινή πολλές φορές καθοδήγηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητές Α. Λουκά, Β. Τοιχριντζή, Ν. Δαλέζιο και τον Αν. Καθηγητή Ε. Παλαιολόγο, με τους οποίους πολλές φορές είχα την τύχη να έρθω σε επαφή κατά τη διάρκεια επιστημονικών συναντήσεων και συνεδρίων. Ιδιαίτερος τους κυρίους Δαλέζιο και Λουκά, που έχουν ασχοληθεί σημαντικά με τον τομέα της ξηρασίας και η μελέτη του έργου τους αλλά και οι προσωπικές τους συμβουλές και παραινέσεις βοήθησαν αισθητά στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους συνεργάτες μου στην έρευνα Δ. Παγκάλου και Δ. Τίγκα, μαζί με τους οποίους προσπαθήσαμε να κατανοήσουμε στο μέτρο του δυνατού το δύσκολο φαινόμενο της ξηρασίας και να συμβάλουμε στην διάγνωση και ανάλυσή του. Μετά από πολλές ώρες συνεργασίας, διαφωνιών αλλά και κατανόησης, όχι μόνο βοηθήσαμε ο ένας τον άλλον στη πρόοδο της σκέψης μας, αλλά γίναμε και εξαιρετικοί φίλοι. Επίσης τον Δρ. Μ. Σπηλιώτη για τη συνεργασία μας κυρίως σε θέματα μαθηματικών προσεγγίσεων. Ιδιαίτερα θα ευχαριστήσω τον κ. Τίγκα και για τις συμβουλές του, τόσο ως προς τη διατύπωση τμημάτων του κειμένου, όσο και ως προς την τελική του εμφάνιση.

Τον Καθηγητή G. Rossi του Πανεπιστημίου της Catania (Università degli

Studi di Catania, Italy) για τις εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές του σε κάθε ευκαιρία συνεργασίας μας, αλλά κυρίως γιατί πρώτος διαπίστωσε την ιδιαιτερότητα του δείκτη ξηρασίας RDI στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής. Επίσης τους συνεργάτες του και αγαπητούς μου φίλους Prof. A. Cancelliere, Dr. B. Bonaccorso και Dr. V. Nicolosi που πρώτοι χρησιμοποίησαν τον δείκτη RDI, ελέγχοντάς τον και διαπιστώνοντας τη χρησιμότητά του.

Τους συναδέλφους υποψήφιους διδάκτορες Γ. Κοψιαύτη και Β. Χριστέλη για τη διακριτική τους στήριξη, καθώς ανεβασμένοι στο ίδιο “άρμα” μπορούσαν να κατανοήσουν τις ιδιαίτερες στιγμές φόρτισης και να προσφέρουν την κατάλληλη ψυχολογική ενίσχυση. Οι πολύπλευρες γνώσεις τους σε γενικά θέματα επί των επιστημών μου έδιναν πάντα την απόλαυση της απόκτησης νέας τροφής για σκέψη. Ελπίζω οι πολλές φορές μακροσκελείς συζητήσεις μας να συνεχιστούν και στο μέλλον.

Τέλος, τον Καθηγητή του Εργαστηρίου Ε.Ε.&Δ.Υ.Π., Α. Μαντόγλου, τους Καθηγητές και το προσωπικό του Τομέα Ε.Υ.&Α.Α. καθώς και όλους τους Καθηγητές και το προσωπικό της Σχολής Α.Τ.Μ. Ιδιαίτερως τον συνάδελφο Δρ. Δ. Αλεξάκη για την καθημερινή συνεργασία μας και τη βοήθειά του τόσο σε επιστημονικά όσο και σε πρακτικά θέματα του Εργαστηρίου.

Η διδακτορική αυτή διατριβή, δεν θα είχε ωστόσο ποτέ ολοκληρωθεί χωρίς την επιμονή και τη απύθμενη στήριξη της κυρίας Μαίρης Αντάκη και την πίστη της κυρίας Αλίκης Μακρή. Επειδή δεν υπάρχουν ούτε λόγια, αλλά ούτε τρόπος να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Κυρία Μαίρη και στη μητέρα μου Αλίκη, για την αδιάκοπη στήριξή τους, ας μου επιτραπεί να πω ότι η τεράστια δύναμη της επιστήμης δείχνει ασήμαντη μπροστά στην ανθρώπινη πίστη. Ας μου επιτραπεί επίσης να μνημονεύσω τον πατέρα μου Βαγγέλη Κοσμά, που αν και δεν πρόλαβε να δει την προσπάθεια αυτή ολοκληρωμένη, είμαι σίγουρος ότι θα έμενε ιδιαίτερα ευχαριστημένος.

Χάρης Βαγγέλης

Αθήνα, 2012

περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Γνωρίζοντας την ξηρασία.....</b>	<b>31</b>
1.1	Εισαγωγή.....	31
1.2	Η ξηρασία στο πέρασμα του χρόνου .....	32
1.3	Ξηρασία: Μια φυσική καταστροφή σε αριθμούς.....	45
1.4	Ορισμοί.....	51
1.5	Σχεδιασμός μέτρων και Διαχείριση Ξηρασίας.....	60
1.6	Αναφορές κεφαλαίου .....	60
<b>2</b>	<b>Χαρακτηρισμός της ξηρασίας.....</b>	<b>67</b>
2.1	Διαστάσεις - Χαρακτηριστικά .....	67
2.2	Εκτίμηση της ξηρασίας - Δείκτες.....	69
2.3	Περιγραφή γνωστών δεικτών ξηρασίας.....	75
2.3.1	Palmer Drought Severity Index – PDSI (Ο Δείκτης Palmer).....	75
2.3.2	Δείκτες ξηρασίας που αναπτύχθηκαν με βάση το μοντέλο του Palmer.....	80
2.3.3	Percent of Normal Precipitation (Ποσοστά της φυσιολογικής βροχόπτωσης) .....	81
2.3.4	Deciles of Precipitation (Δέκατα της βροχόπτωσης) .....	82
2.3.5	Foley Drought Index (Δείκτης ξηρασίας του Foley).....	83
2.3.6	Rainfall Deficiency Indices (Δείκτες ελλείμματος βροχόπτωσης) .....	84
2.3.7	Isoline Maps (Χάρτες ισότιμων καμπυλών).....	85
2.3.8	Poisson Process (Η μέθοδος Poisson).....	86
2.3.9	Palfai Aridity Index - PAI (Δείκτης ξηρότητας του Palfai) .....	86
2.3.10	Surface Water Supply Index – SWSI (Δείκτης επιφανειακής τροφοδοσίας σε νερό) .....	86
2.3.11	Crop Moisture Index - CMI (Δείκτης Υγρασίας Καλλιέργειας).....	87

2.3.12	Soil Moisture Anomaly Index – SMAI (Δείκτης Ανωμαλίας Εδαφικής Υγρασίας) .....	88
2.3.13	Bhalme-Mooley Drought Index – BMDI (Ο Δείκτης των Bhalme και Mooley) .....	88
2.3.14	Rainfall Anomaly Index – RAI (Δείκτης Ανωμαλιών Βροχόπτωσης) .....	88
2.3.15	The Streamflow Drought Index - SDI (Δείκτης ξηρασίας Απορροής) .....	89
2.3.16	The theory of Hydrologic Runs (Η θεωρία run).....	90
2.3.17	Standardized Precipitation Index – SPI (Ο Δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης) .....	91
2.3.18	Τηλεπισκοπικοί - Δορυφορικοί Δείκτες .....	94
2.4	Αξιολόγηση και σύγκριση δεικτών ξηρασίας .....	94
2.5	Αναφορές κεφαλαίου .....	99

### **3 Reconnaissance Drought Index (RDI): Ένας νέος δείκτης ξηρασίας ..... 105**

3.1	Γιατί ένας καινούριος δείκτης; Χρησιμότητα του RDI.....	105
3.2	Περιγραφή του δείκτη.....	109
3.2.1	Τα συστατικά.....	109
3.2.2	Η αρχική εξίσωση.....	113
3.2.3	Κανονικοποίηση και Τυποποίηση – Οι τελικές μορφές του RDI.....	113
3.2.4	Επίπεδα του RDI.....	114
3.2.5	Εξελίξεις στον RDI – Η κατάλληλη κατανομή για μηδενικές τιμές βροχής .....	115
3.2.6	Παραδείγματα εφαρμογής για την κατανόηση του RDI .....	117
3.2.7	Πλεονεκτήματα του δείκτη RDI .....	123
3.3	Ο ρόλος της εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υπολογισμό του δείκτη RDI.....	124
3.3.1	Εκτίμηση της εξατμιδοδιαπνοής.....	125
3.3.2	Χρήση των διαφορετικών αποτελεσμάτων της PET στον RDI... ..	130
3.3.3	Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης της PET για τον υπολογισμό του RDI .....	142
3.4	Η κατανομή πιθανότητας δύο μεταβλητών στον RDI .....	143
3.4.1	Η θεωρητική κατανομή στον RDI.....	143
3.4.2	Εφαρμογή της κατανομής από κοινού των δύο μεταβλητών του RDI.....	146
3.5	Ο RDI σε σύγκριση με τους άλλους δείκτες ξηρασίας.....	153
3.6	Απήχηση του RDI – Χρήση του RDI σε άλλες χώρες .....	159
3.7	Αναφορές κεφαλαίου .....	165

### **4 Μονοδιάστατη Ανάλυση ..... 171**

4.1	Τρεις διαστάσεις της ξηρασίας: Αποτελούν πρόβλημα;.....	171
4.2	Η μεθοδολογία: Από τις τρεις στη μία διάσταση.....	175

4.2.1	Διάρκεια .....	175
4.2.2	Χωρική έκταση.....	176
4.2.3	Δείκτης έντασης ξηρασίας .....	177
4.3	Εφαρμογές.....	179
4.3.1	Συνδέοντας την μετεωρολογική με την υδρολογική ξηρασία ...	179
4.3.2	Εκτίμηση έντασης ξηρασίας για περιόδους αναφοράς 3, 6, 9 και 12 μηνών .....	182
4.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου .....	185
4.5	Σχολιασμός της μεθοδολογίας .....	187
4.6	Αναφορές κεφαλαίου .....	187
<b>5</b>	<b>Ο RDI στην παρακολούθηση της ξηρασίας.....</b>	<b>191</b>
5.1	Γενικές αρχές (κύρια στάδια) της παρακολούθησης της ξηρασίας .....	191
5.2	Θεωρητική προσέγγιση ενός Συστήματος Παρακολούθησης .....	193
5.3	Τεχνικός εξοπλισμός και Διοικητική Οργάνωση ενός Συστήματος Παρακολούθησης.....	196
5.4	Επιλογή δείκτη ξηρασίας και μετεωρολογικών παραμέτρων .....	198
5.5	Στόχοι ενός δικτύου συλλογής δεδομένων .....	200
5.6	Μεθοδολογίες σχεδιασμού του δικτύου συλλογής δεδομένων .....	201
5.6.1	Μεθοδολογία Α.....	204
5.6.2	Μεθοδολογία Β.....	205
5.6.3	Μεθοδολογία Γ.....	206
5.7	Προτεινόμενη μεθοδολογία για το σχεδιασμό του δικτύου συλλογής.....	206
5.8	Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων .....	210
5.8.1	Περιοχή εφαρμογής και αρχικές επιλογές .....	210
5.8.2	Εφαρμογή της μεθοδολογίας για το σχεδιασμό του δικτύου συλλογής .....	213
5.8.3	Μαθηματική και καρτογραφική προσέγγιση.....	217
5.8.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	221
5.9	Αναφορές κεφαλαίου .....	227
<b>6</b>	<b>Σχεδιασμός Αντιμετώπισης της Ξηρασίας.....</b>	<b>231</b>
6.1	Γενικά περί σχεδιασμού.....	231
6.2	Σύστημα προειδοποίησης .....	234
6.2.1	Σύστημα Παρακολούθησης.....	234
6.2.2	Υπολογιστική διαδικασία .....	234
6.2.3	Σύστημα πρόγνωσης .....	235
6.3	Επιπτώσεις και επιλογές .....	238
6.3.1	Εκτίμηση των επιπτώσεων.....	240
6.3.2	Δυνητικές επιλογές .....	246
6.3.3	Ορθολογική ιεράρχηση της ικανοποίησης της ζήτησης .....	249

6.4	Οργανωτική διάσταση .....	253
6.4.1	Θεσμικό και νομικό πλαίσιο .....	253
6.4.2	Συμμετοχικές διαδικασίες.....	255
6.4.3	Προσπάθεια ανάμειξης του κοινού στον Ελληνικό χώρο .....	260
6.5	Στρατηγικός και Επιχειρησιακός Σχεδιασμός.....	270
6.6	Περιεχόμενα ενός Σχεδίου Διαχείρισης Ξηρασίας.....	273
6.7	Παραδείγματα εφαρμογής Σχεδιασμού Αντιμετώπισης της Ξηρασίας .....	275
6.8	Αναφορές κεφαλαίου .....	276
<b>7</b>	<b>Ξηρασία, RDI και Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής .....</b>	<b>279</b>
7.1	Το τέλος της μονιμότητας στις μετεωρολογικές χρονοσειρές .....	279
7.2	Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής .....	281
7.3	Βασικές αρχές ανίχνευσης της κλιματικής αλλαγής.....	285
7.4	Παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής με το δείκτη RDI .....	288
7.5	Η επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στα χαρακτηριστικά της Ξηρασίας – Κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας .....	292
7.6	Αναφορές κεφαλαίου .....	294
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα - Προτάσεις .....</b>	<b>297</b>
8.1	Αντικείμενο και προσέγγιση της διδακτορικής διατριβής.....	297
8.2	Συμπεράσματα.....	298
8.3	Προτάσεις για τη συνέχιση της έρευνας.....	300



## πίνακες

Πίνακας 1.1.	Πλήθος φυσικών καταστροφών στη Νότια Ευρώπη στη δεκαετία του 1990 .....	48
Πίνακας 1.2.	Πλήθος φυσικών καταστροφών στη Νότια Ευρώπη στη δεκαετία του 1990 .....	48
Πίνακας 1.3.	Οι ξηρασίες στις πέντε Ηπείρους από τον 20 <sup>ο</sup> αιώνα.....	49
Πίνακας 1.4.	Οι δέκα πιο θανατηφόρες ξηρασίες τον 20 <sup>ο</sup> αιώνα.....	49
Πίνακας 1.5.	Οι δέκα πιο δαπανηρές φυσικές καταστροφές στην Ελλάδα από το 1900 .....	50
Πίνακας 1.6.	Φυσικές καταστροφές στην Ελλάδα .....	50
Πίνακας 2.1.	Δείκτες ξηρασίας .....	73
Πίνακας 2.2.	Κατηγορίες καιρού με βάση το δείκτη του Palmer (PDSI).....	79
Πίνακας 2.3.	Κατηγορίες ξηρασίας με βάση το δείκτη Deciles .....	83
Πίνακας 2.4.	Ορισμός των καταστάσεων υδρολογικής ξηρασίας σύμφωνα με τον SDI.....	90
Πίνακας 2.5.	Κατάταξη της ξηρασίας με βάση τις τιμές του δείκτη SPI.....	93
Πίνακας 2.6.	Συσχέτιση δεικτών στη Βραζιλία .....	98
Πίνακας 2.7.	Συσχέτιση δεικτών στη Νέα Γουινέα (Papua) .....	98
Πίνακας 2.8.	Συσχέτιση δεικτών στη Αυστραλία.....	98
Πίνακας 2.9.	Συσχέτιση δεικτών στη Γερμανία .....	98
Πίνακας 2.10.	Συσχέτιση δεικτών στον Καναδά .....	98
Πίνακας 2.11.	Συσχέτιση δεικτών στη Ρωσία .....	99
Πίνακας 3.1.	Διάφοροι συντελεστές για την εκτίμηση της ετήσιας εξάτμισης και βροχόπτωσης (Εξίσωση 3.1) .....	111
Πίνακας 3.2.	Επίπεδα έντασης της ξηρασίας κατά $RDI_{st}$ . .....	115
Πίνακας 3.3.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς.....	134
Πίνακας 3.4.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το εξάμηνο Οκτ.-Μαρ.....	136
Πίνακας 3.5.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το εξάμηνο Απρ.-Σεπτ. ....	137
Πίνακας 3.6.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου. ....	139

Πίνακας 3.7.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Ιανουαρίου-Μαρτίου.....	139
Πίνακας 3.8.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Απριλίου-Ιουνίου.....	141
Πίνακας 3.9.	Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του $RDI_{st}$ που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Ιουλίου-Σεπτεμβρίου.....	141
Πίνακας 3.10.	Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών των P και PET για τις διαφορετικές περιόδους αναφοράς για τους υπό εξέταση σταθμούς.....	146
Πίνακας 3.11.	Έλεγχος καταλληλότητας κανονικής κατανομής για τις χρονοσειρές των P και PET για τις διάφορες περιόδους αναφοράς.....	147
Πίνακας 3.12.	Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας της συσχέτισης μεταξύ P και PET.....	148
Πίνακας 4.1.	Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής των ποταμών.....	180
Πίνακας 4.2.	Ετήσια ελάττωση της απορροής σχετιζόμενη με τις αλλαγές των μετεωρολογικών παραμέτρων και του ετήσιου σταθεροποιημένου RDI.....	182
Πίνακας 7.1.	Απόσπασμα ανάλυσης τάσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Yamuna με βάση τον Έλεγχο Mann-Kendall (modified).....	292

## σχήματα

Σχήμα 1.1.	Βροχόπτωση στη ζώνη Sahel. ....	43
Σχήμα 1.2.	Ποσοστό του πληθυσμού που επηρεάζεται από φυσικούς κινδύνους σε κάθε ήπειρο. ....	46
Σχήμα 1.3.	Η αλληλεξάρτηση μεταξύ της μετεωρολογικής, της γεωργικής, της υδρολογικής και της κοινωνικο-οικονομικής ξηρασίας. ....	58
Σχήμα 2.1.	Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου “run”. ....	91
Σχήμα 3.1.	Ετήσια PET σε σχέση με την ετήσια P για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου. ....	111
Σχήμα 3.2.	Η λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου με τη θέση των μετεωρολογικών σταθμών. ....	112
Σχήμα 3.3.	Η εξέλιξη του $a_k$ για το υδρολογικό έτος 1989-90 στο μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου σε σύγκριση με το $\bar{a}_k$ . ....	117
Σχήμα 3.4.	Ετήσιος $a_{12}$ σε σύγκριση με τον δείκτη ξηρότητας ( $\bar{a}_{12}$ ) στην περιοχή της Νάξου. ....	118
Σχήμα 3.5.	Κανονικοποιημένος ετήσιος RDI για τον μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου και για την περίοδο 1955-56 έως 1991-92. ....	119
Σχήμα 3.6.	Ετήσιος $RDI_{st}$ για το μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου. ....	119
Σχήμα 3.7.	Τιμές του $a_{12}$ για την περίοδο 1955-2002 (η πράσινη γραμμή δηλώνει τη μέση τιμή [Δείκτη Ξηρότητας]). ....	120
Σχήμα 3.8.	Τιμές του $RDI_{st}$ για τις υπό εξέταση περιοχές (περίοδος: 1955-2002). ....	121
Σχήμα 3.9.	Συχνότητα εμφάνισης ετών ξηρασίας (περίοδος: 1955-2002). ....	122
Σχήμα 3.10.	Ποσοστά ετών σημαντικής και ακραίας ξηρασίας (1955-2002). ....	122
Σχήμα 3.11.	Τιμές της PET υπολογισμένες με τις διάφορες επιλεγμένες μεθόδους για την ορεινή περιοχή. ....	131
Σχήμα 3.12.	Τιμές της PET υπολογισμένες με τις διάφορες επιλεγμένες μεθόδους για την πεδινή περιοχή. ....	131
Σχήμα 3.13.	Τιμές του $RDI_{st}$ υπολογισμένες με τη χρήση των διαφορών τιμών της PET για την ορεινή περιοχή. ....	132
Σχήμα 3.14.	Τιμές του $RDI_{st}$ υπολογισμένες με τη χρήση των διαφορών τιμών της PET για την πεδινή περιοχή. ....	133
Σχήμα 3.15.	Τιμές του $RDI_{st}$ υπολογισμένες με τη χρήση των διαφορών τιμών της PET για περίοδο 6-μηνών (Οκτ.-Μαρ. και Απρ.-Σεπ.) για την ορεινή περιοχή. ....	136

Σχήμα 3.16.	Τιμές του $RDI_{st}$ υπολογισμένες με τη χρήση των διαφορών τιμών της PET για περίοδο 6-μηνών (Οκτ.-Μαρ. και Απρ.-Σεπ.) για την πεδινή περιοχή. ....	137
Σχήμα 3.17.	Τιμές του $RDI_{st}$ υπολογισμένες με τη χρήση των διαφορών τιμών της PET για τις 3-μηνες περιόδους (Οκτ-Δεκ, Ιαν-Μαρ, Απρ-Ιουν και Ιουλ-Σεπ) για την ορεινή περιοχή. ....	139
Σχήμα 3.18.	Τιμές του $RDI_{st}$ υπολογισμένες με τη χρήση των διαφορών τιμών της PET για τις 3-μηνες περιόδους (Οκτ-Δεκ, Ιαν-Μαρ, Απρ-Ιουν και Ιουλ-Σεπ) για την πεδινή περιοχή. ....	141
Σχήμα 3.19.	Σχέση μεταξύ από κοινού παρατηρούμενης και θεωρητικής πιθανότητας μη υπέρβασης της ετήσιας βροχοπτώσεως και δυναμικής εξατμισοδιαπνοής στους σταθμούς (a) Ελληνικό, (b) Λάρισα, (c) Ηράκλειο και (d) Νάξος. ....	149
Σχήμα 3.20.	Η δισδιάστατη γραφική παράσταση της αθροιστικής πιθανότητας του λόγου $a_{12}$ σε προβολή προς τις μεταβλητές P και PET για το σταθμό της Λάρισας. ....	150
Σχήμα 3.21.	Το $a_k$ για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 20 και 50 ετών για τους σταθμούς (a) Ελληνικό, (b) Λάρισα, (c) Ηράκλειο και (d) Νάξος. ...	150
Σχήμα 3.22.	Οι περίοδοι επαναφοράς για τα κύρια έτη ξηρασίας ( $T > 5$ ετών) στους σταθμούς (a) Ελληνικό, (b) Λάρισα, (c) Ηράκλειο και (d) Νάξος. ....	152
Σχήμα 3.23.	Σύγκριση των δεικτών ξηρασίας Deciles, SPI και RDI για το σταθμό Λιδορίκι της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου. ....	155
Σχήμα 3.24.	Σύγκριση των δεικτών ξηρασίας Deciles, SPI και RDI για το σταθμό Πενταγιοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου. ...	157
Σχήμα 3.25.	Διαφορές μεταξύ SPI και $RDI_{st}$ για το τρίμηνο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου. ....	158
Σχήμα 3.26.	Ο ετήσιος RDI για το σύνολο του νησιού της Κύπρου. ....	160
Σχήμα 3.27.	Σύγκριση των ετήσιων τιμών των SPI και RDI για τον μετεωρολογικό σταθμό Kermanshah στο Ιράν. ....	162
Σχήμα 3.28.	Χάρτης έντασης της ξηρασίας με βάση τον RDI για την ξηρή χρονιά 1999-2000 στο Ιράν. ....	163
Σχήμα 3.29.	Χάρτης έντασης της ξηρασίας με βάση τον SPI για την ξηρή χρονιά 1999-2000 στο Ιράν. ....	163
Σχήμα 3.30.	Προσομοίωση ποσοστού περιοχής με ξηρασία σε 12 περιφέρειες της Αυστραλίας με βάση τον δείκτη RDI. ....	164
Σχήμα 4.1.	Η χρονική εξέλιξη της έντασης της ξηρασίας δύο επεισοδίων $i$ και $i+1$ ....	172
Σχήμα 4.2.	Η χρονική εξέλιξη της έντασης της ξηρασίας δύο επεισοδίων $i$ και $i+1$ ....	172
Σχήμα 4.3.	Απλοποιημένη παράσταση των γεγονότων ξηρασίας (με μέση ένταση) ....	175
Σχήμα 4.4.	Οι λεκάνες απορροής των ποταμών Κράθη, Κριού και Σύθα, στη Βόρεια Πελοπόννησο. ....	179
Σχήμα 4.5.	Χρονοσειρά δεδομένων ετήσιων απορροών (1970/71-1996/97) για τους ποταμούς Κράθη, Κριό και Σύθα. ....	180
Σχήμα 4.6.	Διαγράμματα Box-and-Wisker για τα δεδομένα απορροών των ποταμών Κράθη, Κριού και Σύθα. ....	181
Σχήμα 4.7α.	RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Δεκ κάθε έτους. ....	183
Σχήμα 4.7β.	RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Μαρ κάθε έτους. ....	184
Σχήμα 4.7γ.	RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Ιουν κάθε έτους. ....	184

Σχήμα 4.7δ.	RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Σεπ κάθε έτους. ....	184
Σχήμα 5.1.	Χάρτης αναγλύφου της Ανατολικής Κρήτης.....	211
Σχήμα 5.2.	Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της Ανατολικής Κρήτης.....	212
Σχήμα 5.3.	Εύρος ημι-βαριογράμματος (σε km) για διάφορες χρονικές περιόδους (1 = Ετήσια περίοδος, 2 = Υγρή περίοδος από τον Οκτώβριο – Μάρτιο, 3 = Οκτώβριος – Δεκέμβριος, 4 = Ιανουάριος – Φεβρουάριος, 5 = Οκτώβριος, 6 = Νοέμβριος, 7 = Δεκέμβριος, 8 = Ιανουάριος, 9 = Φεβρουάριος, 10 = Μάρτιος). ....	214
Σχήμα 5.4.	Προσαρμογή ενός θεωρητικού ημι-βαριογράμματος στο εμπειρικό ημι-βαριόγραμμα για δεδομένα με αφαίρεση τάσεων και ετήσια χρονική κλίμακα. ....	216
Σχήμα 5.5.	Παράδειγμα ενός βροχομετρικού δικτύου στην Ανατολική Κρήτη με 10 σταθμούς, το οποίο σχεδιάστηκε μέσω τυχαίας χωρικής δειγματοληψίας.....	216
Σχήμα 5.6.	Σκαρίφημα για την κατανόηση της μεθόδου μεταφοράς δεδομένων. ....	218
Σχήμα 5.7.	Χάρτης κατανομής υπερειήσιας βροχόπτωσης.....	222
Σχήμα 5.8.	Χάρτης χωρικού RDI για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1969-1970. ....	222
Σχήμα 5.9.	Χάρτης χωρικού RDI για το σχετικά υγρό υδρολογικό έτος 1975-1976. ....	222
Σχήμα 5.10.	Χάρτης χωρικού RDI για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1965-1966. ....	223
Σχήμα 5.11.	Χάρτης χωρικού SPI για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1965-1966. ....	223
Σχήμα 5.12.	Χάρτης χωρικού Deciles για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1965-1966. ....	224
Σχήμα 5.13.	Χάρτης χωρικού RDI για το ακραία ξηρό υδρολογικό έτος 1989-1990. ....	224
Σχήμα 5.14.	Αθροιστική καμπύλη για τους δείκτες RDI και SPI αντίστοιχα για το υδρολογικό έτος 1969-1970.....	225
Σχήμα 5.15.	Επιρρεπείς στην ξηρασία περιοχές με βάση τον RDI (επίπεδο 1: κίτρινο χρώμα, επίπεδο 2: κόκκινο χρώμα).....	226
Σχήμα 5.16.	Πολυεπίπεδος χάρτης επιρρεπών περιοχών ξηρασίας που περιλαμβάνει αρδευόμενες περιοχές και περιοχές οικολογικού ενδιαφέροντος. ....	227
Σχήμα 6.1.	Οι συχνότητες μετάβασης της κατάστασης σφοδρότητας της ξηρασίας $f_{3-1}$ , $f_{3-2}$ , $f_{3-3}$ και $f_{3-4}$ από το πρώτο τρίμηνο στο έτος. ....	236
Σχήμα 6.2.	Ετήσια και πολυετή γεγονότα ξηρασίας κατά την περίοδο 1995-2001 (1: ετήσια ξηρασία, 2: διετής ξηρασία, 3: τριετής ξηρασία, 4: τετραετής ξηρασία και 5: πενταετής ξηρασία).....	241
Σχήμα 6.3.	Ετήσια και πολυετή γεγονότα σημαντικής και ακραίας ξηρασίας κατά την περίοδο 1955-2002.....	241
Σχήμα 6.4.	Διάφορες μορφές της συνάρτησης απόκρισης εκθετικής μορφής.....	243
Σχήμα 6.5(α).	Ιεράρχηση μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας σε σχέση με την αστική και τουριστική χρήση. ....	250
Σχήμα 6.5(β).	Ιεράρχηση μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας σε σχέση με την βιομηχανική χρήση.....	251

Σχήμα 6.5(γ).	Ιεράρχηση μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας σε σχέση με την γεωργική χρήση. ....	251
Σχήμα 6.6.	Ιεράρχηση συνολικών μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας. ....	252
Σχήμα 6.7.	Τα επίπεδα συμμετοχής του κοινού. ....	257
Σχήμα 6.8.	Επιλογή του χρόνου συμμετοχής στη διαδικασία. ....	258
Σχήμα 6.9.	Οι δύο πρώτες σελίδες του ερωτηματολογίου. ....	261
Σχήμα 6.10.	Προτεραιότητα των μέτρων μείωσης της κατανάλωσης. ....	264
Σχήμα 6.11.	Σημαντικότητα των βελτιώσεων στα δίκτυα διανομής νερού. ....	266
Σχήμα 6.12.	Σημαντικότητα των επειγουσών ενεργειών. ....	267
Σχήμα 6.13.	Εκτίμηση ενός γεγονότος ξηρασίας με βάση τις επιπτώσεις στον οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό τομέα. ....	272
Σχήμα 7.1.	Εκτίμηση της θερμοκρασίας του πλανήτη έως το 2100 σύμφωνα με τα σενάρια κλιματικής αλλαγής του IPCC. ....	285
Σχήμα 7.2.	Χρονοσειρά ετήσιων τιμών βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πάδου για την περίοδο 1800-2010. ....	289
Σχήμα 7.3.	Χρονοσειρά μέσω ετήσιων τιμών θερμοκρασίας στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πάδου για την περίοδο 1800-2010. ....	290
Σχήμα 7.4.	Χρονοσειρές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και μέσης ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του μετεωρολογικού σταθμού Roquetes στην ανατολική Ισπανία για την περίοδο 1910-1944. ....	290
Σχήμα 7.5.	Λεκάνη απορροής ποταμού Yamuna. ....	291

## περίληψη

Η ξηρασία είναι ένα επαναλαμβανόμενο φυσικό φαινόμενο, που θεωρείται ότι αποτελεί σημαντικό φυσικό κίνδυνο, προσελκύοντας το ενδιαφέρον πλήθους επιστημόνων, αλλά και διεθνών οργανισμών και κυβερνήσεων. Ξηρασίες εμφανίζονται σε όλες σχεδόν τις κλιματικές ζώνες και σχετίζονται κυρίως με το μειωμένο ύψος βροχόπτωσης για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αν και οι χώρες μειωμένης διαθεσιμότητας νερού, όπως αυτές του τρίτου κόσμου, θεωρούνται πως απειλούνται περισσότερο από ξηρασίες, υπάρχουν ενδείξεις ότι ακόμα και οι επαρκώς αναπτυγμένες χώρες του βορρά και κυρίως της Μεσογείου, θα αντιμετωπίσουν σημαντικά προβλήματα διαθεσιμότητας νερού, που θα οφείλονται στην αύξηση της συχνότητας και της έντασης των γεγονότων ξηρασίας.

Η κατανόηση των ιστορικών ξηρασιών και των επιπτώσεών τους τόσο κατά τη διάρκεια των γεγονότων όσο και κατά την περίοδο που έπεται της ξηρασίας, βοηθά στην αναγνώριση των διαφορετικών εννοιολογικών προσδιορισμών και τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών της. Μια αδρομερής, ωστόσο ευρεία καταγραφή ιστορικών ξηρασιών στο πέρασμα των αιώνων θεωρήθηκε αναγκαία στη συγκεκριμένη διατριβή, μαζί με την προσπάθεια αποσαφήνισης των εννοιολογικών προσδιορισμών. Με την ξηρασία να επηρεάζει μια ποικιλία τομέων καθημερινής δραστηριότητας, η διατύπωση ενός ενιαίου ορισμού είναι δύσκολη. Συνδεδεμένη ωστόσο με τις επιπτώσεις της στους διάφορους τομείς, η ξηρασία μπορεί να διαχωριστεί σε μετεωρολογική, υδρολογική, γεωργική και κοινωνικο-οικονομική. Τέλος, δεν πρέπει να συγχέεται η ξηρασία με άλλες σχετικές φυσικές έννοιες, όπως η ξηρότητα, η λειψυδρία και η ερημοποίηση.

Συμβατικά, η εκτίμηση της ξηρασίας γίνεται μέσω των «δεικτών ξηρασίας». Οι δείκτες, πολλοί από τους οποίους περιγράφονται αναλυτικά στη διατριβή, διακρίνονται σε πολύπλοκους και μη. Οι πολύπλοκοι θεωρείται ότι προσεγγίζουν επαρκέστερα το φυσικό σύστημα, η έλλειψη όμως της καταγραφής κατάλληλων

δεδομένων, τους καθιστά μη εφαρμόσιμους στις περισσότερες περιοχές, σε αντίθεση με τους απλούς. Στην προσπάθεια κάλυψης και των δύο πλευρών, η διατριβή προτείνει έναν νέο δείκτη ξηρασίας, τον Reconnaissance Drought Index (RDI). Ο RDI, βασίζεται στο λόγο της αθροιστικής βροχόπτωσης (P) προς τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) σε μια χρονική περίοδο, ενώ έχει τρεις εκφράσεις: την αρχική μορφή, την κανονικοποιημένη και την τυποποιημένη. Ο ρόλος των μεθόδων υπολογισμού της PET αναλύεται διεξοδικά, ενώ παρουσιάζονται και οι μέχρι τώρα γνωστές εφαρμογές του RDI σε διάφορες περιοχές του πλανήτη.

Η ξηρασία χαρακτηρίζεται από τις τρεις διαστάσεις της, την ένταση, τη διάρκεια και τη χωρική της έκταση. Οι δείκτες ξηρασίας στοχεύουν κυρίως στην ανάλυση του ενός από τα τρία χαρακτηριστικά της, αυτό της έντασης. Η υιοθέτηση μοντέλων τριών διαστάσεων για την ανάλυση της συχνότητας εμφάνισης της ξηρασίας δημιουργεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, ακατάλληλη για τη λήψη διαχειριστικών αποφάσεων, κυρίως κατά την επιχειρησιακή φάση. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται η αντικατάσταση των τριών διαστάσεων με μία μοναδική παράμετρο. Η απλοποίηση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση προκαθορισμένων «περιόδων αναφοράς» αντί της διάρκειας και της έκτασης της λεκάνης απορροής αντί της χωρικής έκτασης. Η απλοποιητική αυτή μονοδιάστατη προσέγγιση εστιάζει τελικά στη εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας μέσω του νέου τυποποιημένου δείκτη RDI.

Ο Σχεδιασμός Αντιμετώπισης της ξηρασίας είναι ένα ακόμη σημαντικό αντικείμενο της διατριβής. Οι καινοτόμες προσεγγίσεις που προτείνονται στη διατριβή στηρίζονται στη φιλοσοφία του Προληπτικού Σχεδιασμού. Στο πλαίσιο αυτό προτείνονται το σύστημα πρόγνωσης βασισμένο στις συχνότητες μετάβασης και η μέθοδος ορθολογικής ιεράρχησης της ικανοποίησης της ζήτησης “brick wall”. Το σύστημα πρόγνωσης μπορεί να προβλέψει μια εικόνα της κατάστασης ξηρασίας στο τέλος του υδρολογικού έτους όταν είναι γνωστή η κατάσταση στο πρώτο μόλις τρίμηνο, με την εκτίμηση να βελτιώνεται με την προσθήκη των επόμενων τριμήνων.

Εκτός των σημαντικών συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη διατριβή και αφορούν στην εκτίμηση της ξηρασίας και τη μονοδιάστατη ανάλυσή της, ενδιαφέροντα συμπεράσματα προκύπτουν και μέσω της ανάλυσης του Προληπτικού Σχεδιασμού, κυρίως ως προς την εκτίμηση των επιπτώσεων από μεμονωμένα έτη ξηρασίας, αλλά και εμμένουσες ξηρασίες και την ορθολογική ιεράρχηση της ζήτησης για την αντιμετώπιση γεγονότων ξηρασίας.

Τέλος, παρουσιάζεται ο πιθανός ρόλος του RDI στην παρακολούθηση της ξηρασίας, αλλά και η δυνατότητα του δείκτη να αποτυπώσει επαρκέστερα την ξηρασία σε συνδυασμό με την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή.



**extended abstract**

Drought is a recurrent natural phenomenon, which is nowadays considered as a significant environmental hazard, attracting the attention of a wide range of scientists (environmentalists, hydrologists, meteorologists, geologists and agricultural scientists), but also international organisations and governments. Droughts occur in virtually all climatic zones, regardless the high or low rainfall regime in an area and are mainly related to the reduction in the amount of precipitation over a long period of time. Although the water deficient countries, such as those of the third world, are mostly exposed to this hazard, there are signs that even the sufficiently developed countries of the north and especially the countries of the Mediterranean region, will face problems of water availability in the near future partly due to the increased frequency and magnitude of the drought events.

Water resources in the Mediterranean are limited, fragile and threatened. Water shortage caused mainly by drought and human activities and processes imposes an increased pressure on the already tense situation. Water shortage conditions may cause significant social, environmental and economic impacts. Population growth, intense urbanisation and population mobility, together with the expansion of irrigated agriculture, energy and industrial sectors, which deteriorate water quality, are expected to magnify the problem.

Over the last three decades, the dramatically increased drought episodes in the European Union have increased the number of affected people by almost 20%. The drought of 2003 alone, affected about 100 million people creating a cost of damage of about 8.7 billion euros, with the total cost of droughts in Europe for the last three decades amounting to 100 billion euros. It is now realised that drought is a natural hazard affecting more people than

any other hazard for long periods of time.

Understanding historical droughts in a region, as well as their impacts both during the occurrence of the events and during the period following them, is essential in identifying the different concepts and definitions of drought and investigating its various properties. A rough, however comprehensive presentation of historical droughts over the centuries in different parts of the globe was considered necessary to be included in this thesis. Furthermore, an investigation on the definitions of drought was attempted.

Since drought affects a wide variety of sectors, developing a single definition of drought is a difficult task. An obstacle to having a precise definition of drought lies also in the differences in hydrometeorological variables and socioeconomic factors, as well as the stochastic nature of water demands in different regions around the world. According to a water-resource-oriented definition, which takes into account the water requirements related to biological, economic and social characteristics of a region, drought refers to a random condition of severe reduction of water supply availability (compared to normal value), extending along a significant period of time over a large region. However, the criteria to define severe reduction, significant period (duration) and large region are affected by subjectivity, as they stem from the demand level as well as from the perception of negative impacts of the water deficits. A number of alternative drought definitions are available in the literature, in which the variable representing water availability and the selected thresholds related to water availability are different. Hence, drought definitions are generally classified into four different categories: meteorological, hydrological, agricultural and socio-economic drought. Finally, the confusion between drought and other natural or climatic conditions, such as aridity, water scarcity and desertification, is attempted to be clarified.

Drought severity is conventionally assessed by drought indices. Drought indices are useful indicators for characterising drought and assisting water managers to take decisions on measures for mitigating its effects on the several water use sectors. A large variety of drought indices with varying complexity has been used in many geographical areas of the world for various purposes, with varying success. Among many others, the most popular indices for assessing the severity of meteorological drought are the Palmer Drought Severity Index (PDSI), the Deciles and the Standardised Precipitation Index (SPI). A number of drought indices are presented and described in detail in this thesis.

Drought indices may be simple or composite. Composite indices are supposed to more accurately describe the physical characteristics of the natural processes. However, their data demanding nature is in most of the occasions an obstacle in their calculation. As a result they lack global applicability. Simple indices on the other hand are becoming more and more popular mainly due to the fact that the data required for their calculation are available or can be estimated almost anywhere on the globe. SPI, the most popular index of this category, uses only precipitation to describe the water deficit. A step forward could be to consider the balance between two major meteorological parameters, precipitation as the input and potential evapotranspiration as the output.

In the thesis a new drought index is proposed, based on the ratio between two aggregated quantities of precipitation and potential evapotranspiration. The index is called “Reconnaissance Drought Index – RDI” and is based on a sound theoretical basis, keeping on the other hand the data requirements to a minimum. RDI can be calculated by three expressions. The initial value of the index for a certain period, indicated by a certain end month ( $k$ ) during a year, is calculated by the following equation:

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^k P_j}{\sum_{j=1}^k PET_j} \quad (1)$$

in which  $P_j$  and  $PET_j$  are the precipitation and potential evapotranspiration of the  $j$ th month of the hydrological year, which starts usually on the 1<sup>st</sup> of October, as it is customary for Mediterranean countries, hence for October  $k=1$ .

A second expression, the Normalised RDI ( $RDI_n$ ) is computed using the following equation for each year:

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (2)$$

The third expression, the Standardised RDI ( $RDI_{st}$ ), is computed following a similar procedure to the one that is used for the calculation of the SPI. The expression for the Standardised RDI is:

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (3)$$

in which  $y_k$  is the  $\ln a_k$ ,  $\bar{y}_k$  is the arithmetic mean and  $\hat{\sigma}_k$  is the standard deviation.

It is noted that the above expression is based on the assumption that the  $a_k$  values follow a lognormal distribution. The Standardised RDI behaves similar to the SPI and so is the interpretation of results. Therefore, the  $RDI_{st}$  can be compared to the same severity thresholds as the SPI. From an extended research on various data from several locations and different time scales (3, 6, 9 and 12 months) it was concluded that  $a_k$  values follow satisfactorily both the lognormal and the gamma distributions in almost all locations and time scales, but in some of the cases the gamma distribution was more successful. Therefore, the calculation of  $RDI_{st}$  could perform better by fitting the gamma probability density function to the given frequency distribution of  $a_k$ . This approach also solves the problem of calculating  $RDI_{st}$  for small time steps, such as monthly, which may include zero-precipitation values ( $a_k=0$ ).

Positive values of  $RDI_{st}$  indicate wet periods, while negative values indicate dry periods compared with the normal conditions of the area. The severity of drought events increases when  $RDI_{st}$  values are lower. Drought severity can be categorised in mild, moderate, severe and extreme classes, with corresponding classes of  $RDI_{st}$  (-0.5 to -1.0), (-1.0 to -1.5), (-1.5 to -2.0) and ( $< -2.0$ ), respectively. RDI is calculated for a hydrological year in 3, 6, 9 and 12 month reference periods. This implies a different nature of RDI in comparison to other drought indices, since RDI is calculated for predetermined reference periods and not as a “rolling” index of constant duration.

Since RDI is based both on cumulative precipitation and potential evapotranspiration, which are one measured and one estimated determinants, assessing the effect of potential evapotranspiration calculation method on the drought severity characterisation obtained by RDI is considered essential. To achieve this, an attempt was made to compare the results of RDI using some popular empirical PET methods with minimum data requirements (e.g. only temperature). The selected methods used in the RDI calculation of various reference periods are (a) Hargreaves, (b) Thornthwaite, (c) Blaney-Criddle and (d) FAO Penman-Monteith (only temperature), tested against the FAO Penman-Monteith method. Data from two meteorological stations in Greece representing the mountainous and the coastal Mediterranean climate were used. Although the errors introduced by the various PET methods are not significant, the Hargreaves and FAO P-M (only T) methods performed relatively

better. This supports the opinion that RDI is a robust drought index without significant influence by the method of PET calculation.

Based on the P/PET ratio, RDI is also studied as a bivariate index through a strict probabilistic analysis, in case both P and PET follow separately and jointly a normal distribution. This assumption was tested at several meteorological stations in Greece and proved valid, however it does not always hold in general applications of RDI. A simple computational procedure based on the bivariate probability density function is presented for the rational estimation of the annual P/PET ratio for any return period of drought in the region under study. Alternatively, based on this procedure, the severity of any drought episode is rationally assessed.

Finally, a number of advantages of RDI are presented. A strong advantage is that RDI offers a rational comparison of drought conditions between areas with different climatic characteristics. This enables the universal applicability of RDI in contrast with indices such as SPI, for which the same deviation from the normal precipitation does not necessarily mean the same drought severity for different climatic regions. In the international scientific community RDI is gaining ground against other indices mainly due to its low data requirements, its high sensitivity and resilience and its capacity to take into account the climate change. This is supported by a number of applications from Europe to Australia, which are presented in this thesis.

According to a general definition adopted by engineers and scientists who are engaged in water resources management, drought is associated with a deficient availability of water resources over a large geographical area and extending along a significant period of time. This definition implies that drought is a regional phenomenon characterised by three dimensions: the severity, the duration and the areal extent. In a comprehensive analysis of a historical record for a certain region all the above dimensions could be separately or jointly analysed or modelled. However this task may be very complicated. Especially on the temporal scale, determining the onset and the end of a drought episode is so difficult, that drought is characterised as a creeping natural phenomenon. In this thesis a number of simplifications for replacing the three dimensions by a unique dimension are proposed. These simplifications aim at devising a practical methodology, which can assist decision makers and stakeholders to face droughts during both the planning and the operational management phase.

According to the proposed simplification, duration and areal extent

variables are replaced by two predetermined constant quantities so that the uni-dimensional frequency analysis of severity could lead to meaningful and practical results. More specifically, the areal extent is replaced by the river basin or sub-basin, which is also used as the territorial unit on which decisions related to water resources management should be taken according to the European Union Water Framework Directive 2000/60/EC. On the temporal scale, duration is not considered directly as a drought determinant. Instead, a preset period the “reference period” is proposed in which the meteorological and/or hydrological variable values are referred to. The most convenient reference periods which were proposed are of durations of 3, 6, 9 and 12 months, always starting from the beginning of the hydrological year, which for the Mediterranean region is the 1st of October of each year. The major advantage of these reference periods (all starting from the same date) is that monitoring of drought has a firm standard temporal reference and comparisons of drought conditions between different locations are highly facilitated. Finally, drought severity is represented by the Reconnaissance Drought Index (RDI). The proposed simplified methodology is illustrated by presenting examples from the real world.

As an example of possible application of the proposed drought index, the role of RDI in the monitoring of drought is investigated. The components of a Drought Monitoring System are presented, but emphasis is given on two major issues related to RDI. The first issue concerns the design requirements of a meteorological network which will provide data for calculating RDI and will be appropriate for drought assessment of a region. Three methodologies for designing a gauging network are presented and the underlying assumptions and limitations are briefly discussed. The final choice of the appropriate methodology is mainly based on its applicability in the Mediterranean region. The second issue concerns the illustration of the results with the underlying mathematical approach. Two types of illustration of the results are proposed: the areal thematic maps and the cumulative “or more” curves. Both types of illustration are able to present the areal distribution of drought, providing the opportunity to easily compare the area affected by drought to a “critical area”. Drought prone areas may also be identified through this approach.

A preparedness planning process is required to combat drought. This procedure aims at reducing vulnerability of the affected system so as to become capable to withstand drought. The crisis management approach, which has been followed in both developed and developing countries during the past, is considered ineffective. Instead, a proactive management approach

is now attracting the interest of scientists and policy makers. The proactive approach is also adopted in this thesis. However, up to now there is little progress in drought preparedness planning in most of the parts of the world.

Further, major components of the drought planning process are discussed in this thesis and two innovative approaches are proposed in the field of drought forecasting and the rational prioritisation of water demand. Forecasting is proposed to utilise transition frequencies among the different drought classes based on the “reference periods”. In this way, drought severity assessment at the end of the first trimester can provide an adequate estimate of the severity class of the whole hydrological year. The estimate becomes more accurate as the time advances and the severity class at the next reference periods becomes available. Transition frequencies may be estimated based on long series of historical data of the territorial unit under study.

Regarding the rational prioritisation of the water demands, a methodology named “brick wall” is proposed. According to this proposal, the available water quantities in a territorial unit are calculated and divided in “water units”. Each water unit represents a specific amount of water demand for a predefined period of time (e.g. fortnight). A prioritisation system of water demand, in which every water unit is assigned a priority, is then deployed. According to their priority, blocks of water units may be removed from the system and the corresponding demands will not be covered according to the levels of water shortage.

Moreover, the public participation, which is nowadays considered one of the key elements towards water resources and environmental management and planning, was attempted in Heraklion (Crete). A questionnaire was distributed to stakeholders and the public and their responses to the questions were analysed providing interesting conclusions regarding the public opinion on key drought management issues.

Finally, RDI is examined as a climatic change indicator. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and other institutions, a significant trend in temperature increase has been observed for the Mediterranean region. Also, an opposite trend was observed, although not significant in most of the cases, for precipitation. Based on these assumptions, a drought index incorporating temperature, such as RDI, may be considered more appropriate for drought severity assessment in a climate change context, compared to drought indices based only on precipitation.





## κεφάλαιο 1

# Γνωρίζοντας την ξηρασία

### 1.1 Εισαγωγή

Το νερό είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη. Η φράση μπορεί να ακούγεται κοινότυπη, είναι όμως προφανές ότι το νερό επηρεάζει σχεδόν κάθε πτυχή της καθημερινότητας του ανθρώπου. Η έλλειψή του μπορεί να επιφέρει αλλαγές στον πλανήτη, τις οποίες οι άνθρωποι αλλά και οι υπόλοιπες μορφές ζωής δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν. Η ξηρασία, όντας το φυσικό φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με τη μείωση των αποθεμάτων νερού στη φύση, έλκει έντονα το ενδιαφέρον ειδικών και μη, ώστε να αποκτηθεί η απαιτούμενη γνώση για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της, πριν βρεθούμε σε αδιέξοδο.

Ιστορικά, η διαθεσιμότητα καθαρού νερού έχει παίξει κυρίαρχο ρόλο στη εξέλιξη της γεωργίας και της εγκατάστασης των ανθρώπων σε διάφορα σημεία του πλανήτη. Στις μέρες μας, μεγάλες ποσότητες νερού χρησιμοποιούνται σε μη αγροτικές χρήσεις όπως η βιομηχανία, η παραγωγή ενέργειας, οι αστικές χρήσεις και η αναψυχή. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η άνοδος του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων, σε συνδυασμό με την έντονη αστικοποίηση και την κλιμάκωση των φυσικών καταστροφών που προέρχεται και από την κλιματική αλλαγή, οδηγεί σε μια συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε νερό. Η πρόσβαση σε επαρκείς ποσότητες νερού κατάλληλης ποιότητας και προσιτού κόστους για την κάλυψη των αναγκών, χωρίς όμως να τίθεται σε κίνδυνο η βιωσιμότητα των ευαίσθητων οικοσυστημάτων, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους των τελευταίων δεκαετιών.

Το συνολικό καθαρό νερό στη φύση, ωστόσο, είναι περιορισμένο. Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν φυσικά βοηθήσει στο να ξεπεραστούν αρκετές δυσκολίες στην εξεύρεση διαθέσιμων ποσοτήτων νερού, κυρίως με τη δυνατότητα μεταφοράς νερού αλλά και τη βελτίωση της ποιότητας του. Ακόμη όμως και με την αύξηση της διαθεσιμότητας του νερού, δεν είναι πάντα δυνατό να καλυφθούν οι σύγχρονες ανάγκες. Από την άλλη πλευρά η ξηρασία, η καταστροφή των δασών, η ρύπανση του περιβάλλοντος και η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, περιορίζουν ακόμη περισσότερο τις ποσότητες νερού με επαρκή ποιότητα προς χρήση. Η κατάσταση αυτή οδηγεί στην αύξηση του ανταγωνισμού μεταξύ των διαφορετικών χρήσεων και σε διαμάχες ανάμεσα στους χρήστες σε σχέση με την προτεραιότητα στην πρόσβαση στις διαθέσιμες ποσότητες νερού. Τέτοιες διαμάχες παρουσιάζονται σε πολλές χώρες βιομηχανικές και μη, με ελεύθερη ή κεντρικά διαχειριζόμενη οικονομία, με ξηρό ή υγρό κλίμα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προβλημάτων μπορεί να ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή, το κεντρικό πρόβλημα ωστόσο παραμένει το ίδιο. Η αυξανόμενη ανησυχία γύρω από το νερό έχει οδηγήσει τους διεθνείς οργανισμούς στην ανάληψη πρωτοβουλιών για την εξεύρεση των απαιτούμενων λύσεων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Την τελευταία δεκαετία, η προσοχή των διεθνών οργανισμών και των κυβερνήσεων έχει επικεντρωθεί στη συνεχώς αυξανόμενη απειλή των συχνών αλλά και έντονων ξηρασιών, αλλά και της πίεσης που δέχεται το ευαίσθητο πια περιβάλλον αλλά και όλες οι κοινωνικές ομάδες. Αν και το πρόβλημα είναι εντονότερο κυρίως στις χώρες με μειωμένα αποθέματα νερού, ακόμη και οι πλούσιες σε υδατικούς πόρους χώρες αρχίζουν να επηρεάζονται από τα φυσικά αυτά φαινόμενα. Ο αριθμός των ανθρώπων που έχει επηρεαστεί από την ξηρασία στις Ευρωπαϊκές μόνο χώρες κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει αυξηθεί κατά 20%, ενώ τα ποσά που έχουν δαπανηθεί για την επούλωση των επιπτώσεων στο ίδιο χρονικό διάστημα ξεπερνούν τα εκατό δισεκατομμύρια ευρώ.

### **1.2 Η ξηρασία στο πέρασμα του χρόνου**

Το φαινόμενο της ξηρασίας είναι τόσο παλιό όσο και ο πλανήτης. Είναι προφανές ότι η ξηρασία, ως φυσικό φαινόμενο, εμφανίζονταν σε ολόκληρη τη διάρκεια της ζωής του πλανήτη. Φυσικά, η καταγραφή ενός φαινομένου, το οποίο ακόμη και στις μέρες μας δεν μπορεί να οριστεί με έναν μοναδικό και καθολικό για όλες τις περιπτώσεις ορισμό, ήταν πολύ δύσκολο να υπάρξει τόσο στην αρχαιότητα όσο και στα νεώτερα ιστορικά χρόνια.

Οι πρώτες αναφορές στην ξηρασία είναι έμμεσες και συναντώνται από την

εποχή που οι άνθρωποι άρχισαν να δημιουργούν μόνιμους τόπους κατοικίας και η επιβίωση τους άρχισε να βασίζεται στην συγκομιδή της σοδιάς. Φυσικά φαινόμενα, όπως η ξηρασία, επηρέαζαν την παραγωγή, αλλάζοντας τις συνθήκες ζωής των ανθρώπων. Είναι προφανές ότι ακόμη και αν είχαμε τη γνώση ότι υπήρξε κάποια συγκεκριμένη περίοδος με μειωμένες σοδιές σε σχέση με τις προηγούμενες ή επόμενες χρονιές, δεν θα μπορούσαμε να διαχωρίσουμε ποια φυσική αιτία θα μπορούσε να προκαλέσει τη μείωση αυτή. Υπάρχει ωστόσο μια ιδιαιτερότητα στην ξηρασία ή στην έλλειψη βροχής όπως ήταν πιο εύκολα αντιληπτή στην αρχαιότητα. Όταν οι άνθρωποι αντιμετώπιζαν μεγάλες περιόδους χωρίς βροχή είχαν την τάση να καταφεύγουν σε τελετουργίες για την πρόκληση βροχής. Το έργο της επίκλησης ανώτερων όντων (π.χ. θεοτήτων του νερού) ή των δυνάμεων της φύσης αναλάμβαναν οι σαμάνοι (shamans). Τα πρόσωπα αυτά, που αποτελούσαν τους «μάγους» ή τα «ιερά πρόσωπα» των διαφόρων ανθρώπινων φυλών, θεωρούνταν πως είχαν την ικανότητα επικοινωνίας με τις διάφορες θεότητες ή την ίδια τη φύση και μπορούσαν να επηρεάσουν τις «ανώτερες δυνάμεις» προς τη δημιουργία βροχής (Maddox, 2003). Από την άλλη πλευρά, η φυλή είχε ένα πρόσωπο να κατηγορεί στην περίπτωση που η επιθυμητή βροχή δεν έρχονταν ποτέ. Αυτό που δεν είχε περάσει από το μυαλό των ανθρώπων την εποχή εκείνη ήταν ότι στις μέρες μας, η ενδεχομένως «αστεία» αυτή αντιμετώπιση του φαινομένου που σήμερα ονομάζουμε ξηρασία, θα αποτελούσε ένα πραγματικό θησαυρό για τους σύγχρονους επιστήμονες σε σχέση με την καταγραφή της ξηρασίας στην αρχαιότητα. Η αρχαιολογική σκαπάνη έκανε ένα τεράστιο δώρο στους σημερινούς επιστήμονες που ασχολούνται με την ξηρασία φέρνοντας στο φως τα υπολείμματα αυτών των τελετουργικών. Η καταγραφή των θέσεων τέτοιων τελετουργιών και η δυνατότητα χρονολόγησης των υπολειμμάτων (π.χ. με τη μέθοδο του άνθρακα), δίνει στους σημερινούς επιστήμονες την εκπληκτική δυνατότητα της χαρτογράφησης στο χώρο και στο χρόνο των ξηρασιών της αρχαιότητας με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια (περίπου 20 χρόνων). Η χαρτογράφηση αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα μοναδικής αξίας εργαλείο για τους σημερινούς επιστήμονες στην εξερεύνηση και αποτύπωση τόσο των διαχρονικά επιρρεπών στις ξηρασίες περιοχών (drought prone areas) του πλανήτη, όσο και στις επιπτώσεις της ξηρασίας στις ανθρώπινες φυλές σε μεγάλη χρονική κλίμακα (π.χ. εκτεταμένες μετακινήσεις πληθυσμού μακριά από τις επιρρεπείς σε ξηρασία περιοχές).

Η χαρτογράφηση των ξηρασιών δεν είναι ωστόσο η μόνη σημαντική πληροφορία που έδωσε η αρχαιολογική σκαπάνη. Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι φυλές της αρχαιότητας έκαναν και προσπάθειες αλλαγής του καιρού ώστε να προκληθεί βροχή. Μια από τις εντυπωσιακότερες ανακαλύψεις είναι αυτή σχετικά με τη φυλή Μπαντού (Bantu) που αποτελούνταν από αυτόχθονες της

ηπειρωτικής Αφρικής. Σύμφωνα με τα ευρήματα, οι Μπαντού έστελναν σε εκτεταμένες περιόδους ανομβρίας (άνω του ενός έτους) τους σαμάνους τους σε ψηλά βουνά να ανάψουν φωτιές «μαύρου καπνού». Σύμφωνα με το θρύλο, ο «μαύρος καπνός» προσέλκυε τα σύννεφα τα οποία στη συνέχεια έριχναν το ευεργετικό τους νερό πάνω στις σοδειές παρατείνοντας την εγκατάσταση των ανθρώπων στις συγκεκριμένες περιοχές αφού η σοδιά εξασφάλιζε μια μικρή παράταση στην επιβίωση της φυλής (Vieru, 2000). Ο «θρύλος» ωστόσο αυτός, μπορεί να δώσει μια άλλη διάσταση κάτω από τις σημερινές τεχνολογικές εξελίξεις. Είναι προφανές ότι ο επονομαζόμενος «μαύρος καπνός» έστελνε στην ατμόσφαιρα σωματίδια που μπορούσαν να λειτουργήσουν ως πυρήνες δημιουργίας καταλύτη για τον σχηματισμό υδροσταγονιδίων με αποτέλεσμα τη δημιουργία βροχής με παρόμοιο τρόπο όπως η σύγχρονη μέθοδος της «σποράς νεφών» (cloud seeding).

Σύγχρονες ανακαλύψεις συνδέουν μάλιστα τις ξηρασίες με μεγάλα κοινωνικά φαινόμενα, όπως η εξαφάνιση του αρχαίου Βασιλείου της Αιγύπτου, ενός πολιτισμού που εμφανίστηκε σχεδόν πριν πέντε χιλιετίες. Έρευνες στην περιοχή της Αιγύπτου παρουσιάζουν ισχυρές ενδείξεις ότι ο αρχαίος πολιτισμός των Αιγυπτίων εξαφανίστηκε μετά από παρατεταμένη ξηρασία που ενδέχεται να διήρκεσε μερικές δεκαετίες. Οι ενδείξεις αυτές προέρχονται από τη μελέτη των στρωμάτων των ιζηματογενών αποθέσεων στη λίμνη Tana της περιοχής του Νείλου. Η ομάδα των ερευνητών, ανακάλυψε σειρά ξηρότερων στρωμάτων στα δείγματα εδαφών που λήφθηκαν από γεωτρήσεις και συνδυάζοντας το βάθος εμφάνισης των εδαφών με το ρυθμό απόθεσης ιζημάτων στην περιοχή, εκτίμησαν ότι η παρατεταμένη αυτή περίοδος ξηρασίας εμφανίστηκε περίπου 4500 χρόνια πριν, εποχή που συμπίπτει με το τέλος του αρχαίου Βασιλείου της Αιγύπτου (Williams, 2003). Παρόμοιες έρευνες έχουν διαπιστώσει την πτώση της στάθμης των λιμνών Abhe and Ziway-Shala, τα νερά των οποίων τροφοδοτούνται από ποταμούς που πηγάζουν από τα υψίπεδα της Αιθιοπίας κοντά στις πηγές του Blue Nile (Gasse and van Campo, 1994), αλλά και της λίμνης Turkana, που βρίσκεται στις παρυφές της λεκάνης απορροής του White Nile (Owen et al., 1982). Πολλοί ιστορικοί πιστεύουν ότι η καταστροφή έκανε την εμφάνισή της με την πτώση της στάθμης του Νείλου, για περίπου δύο με τρεις δεκαετίες, οι πλημμύρες του οποίου ήταν ζωτικής σημασίας για την άρδευση των παραποτάμιων περιοχών. Είναι άλλωστε γνωστό ότι ο Αιγυπτιακός πολιτισμός ήταν άμεσα συνδεδεμένος με τον ποταμό Νείλο, που αποτελούσε ζωτικής σημασίας πηγή νερού (Stanley et al., 2003). Η υδρολογική διαίτα των νερών του Νείλου είχε απασχολήσει ακόμη και μερικούς από τους σημαντικότερους ανθρώπους της ιστορίας όπως ο Ηρόδοτος και ο Leonardo da Vinci (Williams et al., 2000). Γεωλογικά δεδομένα προερχόμενα από πυρήνες γεωτρήσεων που

συλλέχθηκαν στο δέλτα του ποταμού τεκμηριώνουν την αρχαιολογική υπόθεση ότι περιβαλλοντικές συνθήκες και ειδικά μια τάση ξηρότητας που οδήγησε σε μείωση των απορροών του Νείλου, έπαιξε κυρίαρχο ρόλο στην κατάρρευση του αρχαίου Βασιλείου της Αιγύπτου (Bell, 1971). Κείμενα σχετικά με αυτή την περίοδο αναφέρουν ότι την έλλειψη των πλημμυρών του Νείλου ακολούθησε μεγάλος «λιμός», χωρίς να υπάρχουν άλλες σημαντικές σχετικές καταγραφές. Ο λιμός ωστόσο που ακολούθησε την παρατεταμένη περίοδο της ξηρασίας ήταν τόσο μεγάλης κλίμακας που υπάρχουν αρχαιολογικές ενδείξεις ότι ο λαός παραβίασε του τάφους των βασιλιάδων και κάμποι έφαγαν ακόμη και τα παιδιά τους (Hassan, 2011). Άλλες επιστημονικές μελέτες αναφέρουν ότι υπήρξε σημαντική μείωση της βροχόπτωσης με αντίστοιχη μείωση των απορροών περίπου το 2150 π.Χ. σε μια εκτεταμένη περιοχή από το Θιβέτ ως την Ιταλία.

Ένας ακόμη σπουδαίος πολιτισμός για τον οποίο υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις ότι η εξαφάνιση του συνδέεται με την ξηρασία είναι ο αρχαίος πολιτισμός των Maya. Ο πολιτισμός των Maya που ξεκίνησε από τη χερσόνησο Yucatan επεκτάθηκε σε μια μεγάλη περιοχή της κεντρικής Αμερικής την περίοδο μεταξύ του 2600 π.Χ. και του 1200 μ.Χ. Ο πολιτισμός των Maya γνώρισε τη μεγαλύτερη άνθισή του μεταξύ του 600 μ.Χ. και 800 μ.Χ. Στους δύο αιώνες που ακολούθησαν (800-900 μ.Χ.) οι Mayas αντιμετώπισαν σημαντικές κακουχίες που οδήγησαν σε αυτό που οι αρχαιολόγοι ονομάζουν Κατάρρευση του Κλασσικού Πολιτισμού των Maya. Η αιτία της κατάρρευσης του πολιτισμού αυτού αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα αρχαιολογικά μυστήρια της εποχής μας και έχει συζητηθεί από τους μελετητές για σχεδόν έναν αιώνα. Νεότερες έρευνες ωστόσο αρχίζουν να δείχνουν προς την κατεύθυνση παρατεταμένων ξηρασιών που έπληξαν την περιοχή μεταξύ του 810 μ.Χ. και του 910 μ.Χ. (Dawicki, 2003; Lovgren, 2003). Στοιχεία ισοτόπων οξυγόνου ωστόσο που μετρήθηκαν σε ιζήματα κλειστών λιμνών στη χερσόνησο Yucatan δείχνουν ότι το κλίμα της περιοχής όχι μόνο ήταν διαφορετικό από ότι σήμερα, αλλά ότι στη φυσική διακύμανση του κλίματος συμπεριλαμβάνονται περίοδοι έντονης ξηρασίας. Με τη μετριοπία του χρόνου ραδιοχρονολόγησης σε ημερολογιακά έτη διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν διακριτά χρονικά σημεία ξηρών κλιματικών συνθηκών κατά τα έτη 585 μ.Χ., 862 μ.Χ. 986 μ.Χ. και 1051 μ.Χ. με μια απόκλιση +/-50 έτη. Η πρώτη περίοδος ξηρασίας συμπίπτει με την περίοδο 530-630 μ.Χ. κατά την οποία υπήρξε σημαντική μείωση στην κατασκευή μνημείων, εγκατάλειψη περιοχών και κοινωνικές αναταραχές. Η δεύτερη περίοδος συμπίπτει με την κατάρρευση του Κλασσικού Πολιτισμού μεταξύ 800 μ.Χ. και 900 μ.Χ. Στην Μετα-Κλασσική Εποχή σχετικά ξηρό κλίμα εμφανίζεται την περίοδο μεταξύ 986 μ.Χ. και 1051 μ.Χ., ενώ γενικά μετά το 1000 μ.Χ. οι τιμές των ισοτόπων οξυγόνου υποδηλώνουν επιστροφή σε πιο υγρές συνθήκες. Σύμφωνα με τους ερευνητές, αυτού του είδους

τα ευρήματα είναι αρκετά για να υποστηρίξουν μια μάλλον ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των περιόδων ξηρασίας και των περιόδων υποβάθμισης του πολιτισμού των Mayas (Hodell et al., 1995). Προσομοίωση κλιματικών δεδομένων 10000 ετών με τη χρήση του κλιματικού μοντέλου CSIRO Mark 2, επιβεβαιώνει αυτές τις υποθέσεις. Οι Hunt and Elliott (2005) αν και δεν μπορούν να αποδείξουν ότι οι ξηρασίες που εμφανίζονται από την κλιματική προσομοίωση οδήγησαν στην κατάρρευση του πολιτισμού των Mayas, θεωρούν ότι οι σχετικές υποθέσεις μπορούν επαρκώς να υποστηριχθούν. Ένα μάλιστα χαρακτηριστικό συμπέρασμα από την προσομοίωση, είναι η περιορισμένη γεωγραφική φύση των έντονων ξηρασιών που ανιχνεύονται μόνο στην Κεντρική Αμερική, χωρίς προφανείς συνδέσεις με άλλες περιοχές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η άποψη που εκφράζεται από τους Me-Bar and Valdez Jr (2003), οι οποίοι πιστεύουν ότι παρά την υψηλή κατανόηση των Mayas απέναντι στις φυσικές διαδικασίες, δεν μπόρεσαν να ανιχνεύσουν κάποια περιοδικότητα στην ξηρασία (που ενδεχομένως και να μην υπήρχε), με αποτέλεσμα να μην προετοιμαστούν κατάλληλα για το φαινόμενο που φαίνεται να οδήγησε στην κατάρρευση του πολιτισμού τους. Η αναπαραγωγή των κλιματικών συνθηκών, ωστόσο, υποδηλώνει μια περιοδικότητα στα γεγονότα ξηρασίας για τη συγκεκριμένη περιοχή, με σημαντικά γεγονότα να παρουσιάζονται κάθε 32 χρόνια, ακραία κάθε 130 χρόνια και καταστροφικά κάθε 500 χρόνια.

Στον εικοστό αιώνα οι ξηρασίες αλλά κυρίως οι επιπτώσεις τους καταγράφονται με συστηματικότερο τρόπο. Εδικά μετά το 1950 που οι επιστήμονες άρχισαν να κατανοούν πληρέστερα το «περίεργο» αυτό φαινόμενο, η άποψη που επικρατεί είναι ότι η ξηρασία αποτελεί ίσως το πιο καταστροφικό φυσικό φαινόμενο. Από τη μια η φύση της ξηρασίας ως φαινόμενο που αναπτύσσεται αργά, χωρίς δραματικές εξάρσεις όπως οι εκρήξεις ηφαιστειών, οι σεισμοί και οι πλημμύρες, σαν μια αργά εξελισσόμενη ασθένεια που γίνεται αντιληπτή όταν ήδη έχει επιφέρει μεγάλη καταστροφή, οδηγεί από τα μέσα του εικοστού αιώνα τους επιστήμονες, να το χαρακτηρίσουν ως «έρπον φαινόμενο» (Gillette, 1950), έννοια που γίνεται πολύ δημοφιλής στον επιστημονικό κόσμο της ξηρασίας (Wilhite and Glantz, 1985; Hayes et al., 2004; Wan et al., 2004; Tsakiris, 2010). Από την άλλη, οι τεράστιες επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο είναι πλέον μετρήσιμες και καταγράφονται. Ένα από τα σημαντικότερα καταγεγραμμένα παραδείγματα αποτελεί η ξηρασία στη ζώνη Sahel της κεντρικής Αφρικής στα μέσα της δεκαετίας του '80 που αποτέλεσε τον κυριότερο περιβαλλοντικό παράγοντα για την ερημοποίηση της περιοχής και την μετακίνηση δέκα εκατομμυρίων ανθρώπων, οδηγώντας τους ερευνητές να διατυπώσουν τη θέση ότι «κανένα άλλο περιβαλλοντικό πρόβλημα δεν έχει δημιουργήσει τέτοιας έκτασης μετανάστευση πληθυσμού» (Bruins, 1999).

Η γνώση ωστόσο για τις κλιματικές συνθήκες αλλά και τα φαινόμενα ξηρασίας τουλάχιστον για τις δύο τελευταίες χιλιετίες (μετά Χριστό εποχή) θα ήταν απαραίτητη για να κατανοηθεί η ένταση των ξηρασιών του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Καθώς δεν είναι δυνατό να αναζητηθούν μετρημένα υδρομετεωρολογικά δεδομένα για μια τέτοια χρονική περίοδο, οι ερευνητές προσπαθούν να εκτιμήσουν τα ακραία φυσικά φαινόμενα με εναλλακτικούς τρόπους. Μια ενδιαφέρουσα αναζήτηση μπορεί να γίνει μέσα από περιγραφικές πηγές, όπως αρχεία, μνήμες, γραπτές αναφορές και εφημερίδες, τουλάχιστον για τους τελευταίους αιώνες. Μέσα από μια τέτοια διαδικασία, οι Do O' and Roxo (2008) κατάφεραν να προσδιορίσουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα γεγονότα ξηρασίας στη νότια Πορτογαλία από τον 12<sup>ο</sup> έως τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Μια πιο επιστημονική προσέγγιση, που συχνά φτάνει σε αρκετά υψηλή ακρίβεια αλλά και σε μεγάλο βάθος χρόνου, μπορεί να δοθεί με τη μέθοδο της δενδροχρονολόγησης, από την οποία συλλέγει τα περισσότερα δεδομένα η ονομαζόμενη «παλαιοξηρασία» (paleodrought). Τα αρχεία δεδομένων των δακτυλίων των δέντρων ωστόσο περιέχουν πολύ λίγες υψηλής ανάλυσης καταγραφές (επιπέδου ετήσιας ή εποχιακής κλίμακας) με ακριβή ημερολογιακή αναφορά που να εκτείνονται σε ολόκληρο το εύρος των δύο χιλιετιών. Είναι λοιπόν προφανές ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα δεδομένα αυτά αντικατοπτρίζουν περιόδους ξηρών συνθηκών παρά συγκεκριμένα γεγονότα ξηρασίας. Είναι επομένως δύσκολο να συγκριθούν οι ξηρασίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα με τις ξηρασίες των προηγούμενων χιλιετιών, εκτός αν εξάγοντας αντίστοιχα δεδομένα δακτυλίων των δέντρων και για τον 20<sup>ο</sup> αιώνα κάνουμε μια εκτίμηση της έντασης των φαινομένων μεταξύ των δύο εποχών. Μια τέτοια προσέγγιση, παρουσιάζει τις ξηρασίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα στην Αμερικανική Ήπειρο σχετικά ήπιες σε σχέση με αυτές που παρουσιάστηκαν τους προηγούμενους αιώνες. Ακόμη και η ξηρασία του 16<sup>ου</sup> αιώνα (Stahle et al., 2000) παρουσιάζεται μέτριας έντασης σε σύγκριση με κάποιες πρώιμες περιόδους ξηρασίας.

Τα δεδομένα των 500 τελευταίων χρόνων είναι σχετικά μεγαλύτερης ακρίβειας. Οι ερευνητές του National Climatic Data Center του NOAA στις Ηνωμένες Πολιτείες κατάφεραν μάλιστα να αναπαραστήσουν ετήσιους χάρτες με τον δείκτη ξηρασίας PDSI (Palmer Drought Severity Index) για τα τελευταία 300 χρόνια, βασισμένοι σε ένα πλέγμα μετρήσεων δακτυλίων δέντρων. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση για τις ξηρασίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα συγκριτικά με τις ξηρασίες των τελευταίων 300 χρόνων. Η σύγκριση αυτή φανερώνει ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες εμφανίζονται σημαντικές ξηρασίες μια με δύο φορές τον αιώνα στους τρεις τελευταίους αιώνες. Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1860, 1820 και 1730 υπήρξαν ξηρασίες τουλάχιστον παρόμοιας διάρκειας και χωρικής έκτασης με την ξηρασία του 1950 που παρουσιάζεται στη

συνέχεια, ωστόσο δεν υπήρξε καμιά άλλη ξηρασία κατά τα τελευταία 300 χρόνια σαν αυτή του 1930. Οι χάρτες αυτοί επεκτάθηκαν από άλλους ερευνητές για να καλύψουν εκτός από τις Ηνωμένες Πολιτείες, τον νότιο Καναδά και μεγάλο μέρος του Μεξικού (Cook et al., 2004; Stahle et al., 2007). Αντίστοιχη προσπάθεια έχει γίνει στην Κίνα, με την δενδροχρονολόγηση να χρησιμοποιείται στην εφαρμογή του Palmer Drought Severity Index (PDSI) τόσο στη βόρεια και κεντρική περιοχή της Κίνας (Li et al., 2007), όσο και στη βορειοδυτική περιοχή (Fang et al., 2009), ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και στην αναδημιουργία χρονοσειρών βροχοπτώσης στα Changling Mountains της Κίνας από το 1961 και μετά (Chen et al., 2011).

Από την άλλη λοιπόν πλευρά του Ατλαντικού, η σημαντικότερη ίσως καταγεγραμμένη ξηρασία του 20<sup>ου</sup> αιώνα έμεινε γνωστή ως “Dust Bowl”. Το “Dust Bowl” είναι ίσως η μεγαλύτερη σε διάρκεια και δριμύτητα ξηρασία από την εποχή που τα μετεωρολογικά δεδομένα άρχισαν να καταγράφονται συστηματικά, από την αρχή δηλαδή περίπου του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Πρόκειται ίσως για τη μεγαλύτερη φυσική καταστροφή που έπληξε ένα σημαντικό μεγάλο μέρος των Ηνωμένων Πολιτειών κατά τη δεκαετία του 1930. Η ξηρασία έπληξε τις περισσότερες περιοχές σε τρία κύματα, το 1934, το 1936 και το 1939-40. Σε ορισμένες όμως περιοχές των “High Plains” (υψίπεδα των μεσοδυτικών πολιτειών) η ξηρασία παρέμεινε για οκτώ συνεχή χρόνια. Το φαινόμενο του “Dust Bowl” προκλήθηκε από την παρατεταμένη ξηρασία σε συνδυασμό με τις πρακτικές διαχείρισης της γης που έκαναν το ανώτερο εδαφικό στρώμα ευάλωτο στη δύναμη του ανέμου. Το έδαφος έχοντας χάσει την υγρασία, παρασύρθηκε από τον άνεμο σε μεγάλα σύννεφα σκόνης και άμμου τόσο πυκνά που έκρυβαν τον ήλιο για αρκετές συνεχόμενες ημέρες κάνοντας τους κατοίκους να αποκαλούν το φαινόμενο «μαύρη χιονοθύελλα». Η καταστροφή στη γεωργία και κατ’ επέκταση στην οικονομία των περιοχών “Great Plains” ήταν τεράστια επιδεινώνοντας την ήδη δυσμενή οικονομική κατάσταση των αγροτών, που προσπαθούσαν να ανακάμψουν από την οικονομική ύφεση. Παρά την κρατική οικονομική ενίσχυση, η ξηρασία οδήγησε πολλούς αγρότες να εγκαταλείψουν τη γη και να πουλήσουν τις ιδιοκτησίες τους. Φυσικά, όπως στις περισσότερες καταστροφές βγήκαν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Οι αγρότες υιοθέτησαν νέες καλλιεργητικές μεθόδους που βοήθησαν στον έλεγχο της διάβρωσης του εδάφους βελτιώνοντας τον ανθρώπινο παράγοντα που συνέβαλε στην καταστροφή, με αποτέλεσμα ο αντίκτυπος των φαινομένων ξηρασίας που ακολούθησαν να είναι αισθητά μικρότερος (NOAA, 2003).

Στη δεκαετία του 1950 η περιοχή των “Great Plains” αντιμετώπισε άλλη μια σημαντική ξηρασία που σε κάποιες περιοχές διατηρήθηκε για μια πενταετία. Η χωρική έκταση αυτής της ξηρασίας ήταν πολύ μεγαλύτερη καθώς έπληξε και τις



νοτιοδυτικές πολιτείες, ενώ για τρία από τα πέντε χρόνια η ξηρασία επεκτάθηκε σχεδόν σε ολόκληρη την έκταση των Ηνωμένων Πολιτειών. Το 1956 η ξηρασία έφτασε στο πιο έντονο σημείο της ενώ με τις ανοιξιάτικες βροχές του 1957 άρχισε να υποχωρεί. Η ξηρασία της περιόδου αυτής χαρακτηρίστηκε τόσο από μείωση των βροχοπτώσεων όσο και από σημαντική άνοδο της θερμοκρασίας. Αναφέρεται ότι μεταξύ των ετών 1949 και 1951 στην πολιτεία του Texas σημειώθηκε μείωση της βροχοπτώσης κατά 40% σε σχέση με το μέσο όρο, ελάττωση που έφτασε και το 75% το 1953. Από την άλλη πλευρά καταγράφηκαν θερμοκρασίες πάνω από 38° C για 52 συνεχόμενες ημέρες το καλοκαίρι του 1953. Ο δείκτης ξηρασίας PDSI (Palmer Drought Severity Index) έδινε αρνητικά αποτελέσματα από το 1952 έως το 1957, σημειώνοντας την ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή το 1957. Οι κοινωνικές επιπτώσεις της ξηρασίας αυτής ήταν τεράστιες. Η γεωργία των περιοχών σχεδόν καταστράφηκε. Οι γεωργοί της περιοχής ανέφεραν μείωση της παραγωγής της τάξης του 50%. Η έλλειψη τροφής στους βοσκότοπους οδήγησε τους κτηνοτρόφους να ταΐσουν τα ζώα τους με μεγάλας κόστους τροφές. Το 1957 που η ξηρασία άρχισε να υποχωρεί, οι περισσότερες περιοχές είχαν δηλωθεί επίσημα ως «κατεστραμμένες από ξηρασία περιοχές».

Στη δεκαετία του 1980 καταγράφηκε μια ακόμη σημαντική ξηρασία. Μεταξύ του 1987 και του 1989, το 36% της έκτασης των Ηνωμένων Πολιτειών είχε πληγεί από την ξηρασία, που δεν θεωρήθηκε ιδιαίτερα σημαντική τουλάχιστον σε σχέση με το “Dust Bowl” που είχε καλύψει το 70% της έκτασης της χώρας. Ωστόσο, η ξηρασία της δεκαετίας του 1980 θεωρήθηκε η πιο δαπανηρή φυσική καταστροφή της δεκαετίας στην Αμερικανική Ήπειρο. Συνδυάζοντας τις απώλειες στην ενέργεια, την αγροτική παραγωγή, το νερό, αλλά και την καταστροφή του οικοσυστήματος, το συνολικό κόστος της τριετούς ξηρασίας εκτιμήθηκε στα τριανταεννιά (\$39 billion) δισεκατομμύρια δολάρια (Zhang et al., 2004), ενώ στον δυτικό Καναδά ξεπέρασε το 1.8 δισεκατομμύρια δολάρια μόνο το 1988. Είναι φυσικά σημαντικό να αναφερθεί ότι τουλάχιστον για τον Καναδά, η ξηρασία του 1988 ήταν η πρώτη ξηρασία για την οποία υπήρξε τόσο λεπτομερής καταγραφή των επιπτώσεων σε κάθε τομέα ξεχωριστά (αγροτικές, δασικές, υδρολογικές και ενεργειακές επιπτώσεις), που σε κάποιο βαθμό οφείλεται στην εκτεταμένη κάλυψη του φαινομένου από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης (Lawford, 1992). Στο έδαφος των Ηνωμένων Πολιτειών η ξηρασία του 1988 είχε σημαντικές συνέπειες στη μείωση της παραγωγής κυρίως του καλαμποκιού και της σόγιας. Με καιρικά ωστόσο φαινόμενα ακόμη πιο έντονα και από αυτά του “Dust Bowl” (χαμηλότερες βροχοπτώσεις την περίοδο Απριλίου-Ιουνίου και τα ισχυρότερα κύματα καύσωνα) η ξηρασία είχε σημαντικότερες συνέπειες ακόμη και στην υδρολογική διαίτα του ποταμού Mississippi, κυρίως στα ανώτερα τμήματα της λεκάνης απορροής του ποταμού,

με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν σημαντικά προβλήματα στην κίνηση των πλωτών φορτηγίδων. Η σημαντικότερη όμως από τις επιπτώσεις της ξηρασίας του 1988 ήταν οι εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές του καλοκαιριού που έκαψαν σχεδόν ολόκληρη τη βορειοδυτική Αμερική. Καθώς η ξηρασία αυτή ήταν η πρώτη εκτεταμένη ξηρασία μετά τη δεκαετία του 1950, την οποία πολλοί δεν την είχαν ζήσει ενώ άλλοι την είχαν ξεχάσει, αναδείχθηκε δυστυχώς το πόσο ευάλωτες στην ξηρασία εξακολουθούσαν να είναι οι περισσότερες περιοχές της Βόρειας Αμερικής παρά τα μαθήματα που διδάχτηκαν από τα φαινόμενα του 1950. Η οριακή εκμετάλλευση καλλιεργούμενων περιοχών σε συνδυασμό με την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι μια ελαφρώς μεγαλύτερης διάρκειας ξηρασία θα οδηγούσε σε ολοκληρωτική καταστροφή (NOAA, 2003). Στον Καναδά, αν και οι περισσότερες περιοχές έχουν πληγεί από ξηρασία στο παρελθόν, πιο ευαίσθητες απέναντι στην ξηρασία θεωρούνται τα Canadian Prairies και σε μικρότερο βαθμό η British Columbia. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο αιώνων, τουλάχιστον σαράντα μεγάλης διάρκειας γεγονότα ξηρασίας έχουν συμβεί στο Δυτικό Καναδά. Τα γεγονότα ξηρασίας στον Ανατολικό Καναδά είναι συνήθως μικρότερης σφοδρότητας, ωστόσο ορισμένα γεγονότα του 20<sup>ου</sup> αιώνα μπορούν να χαρακτηριστούν σημαντικά. Η πιο καταστροφική ξηρασία θεωρείται αυτή του 2001-2002, που ήταν επακόλουθο παρατεταμένης ανομβρίας (Environment Canada, 2004).

Η ξηρασία δεν αποτελεί σπάνιο φαινόμενο ούτε στην Ευρωπαϊκή πλευρά. Αν και ισχυρά φαινόμενα αναμένονται στο Ευρωπαϊκό έδαφος περίπου 1 φορά κάθε 50 χρόνια, σημαντική έλλειψη νερού σε τμήματα του Ευρωπαϊκού χώρου εμφανίζεται περίπου κάθε 5 χρόνια με διάρκεια που πολλές φορές ξεπερνά τον ένα χρόνο. Η χωρική κατανομή των φαινομένων, η διάρκεια και η έντασή τους στον Ευρωπαϊκό χώρο, επηρεάζεται έντονα από τοπικές συνθήκες τόσο του κλίματος όσο και του υψομέτρου και του μεγέθους της λεκάνης. Αξιοσημείωτης έντασης θεωρούνται τα γεγονότα ξηρασίας του 1987-88 έως το 1992-93 στην Ελλάδα, του 1988-90 στην Ιταλία και του 1990-96 στην Ισπανία (Bradford, 2000). Σύμφωνα με την European Environment Agency (EEA: Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος) ένα από τα σημαντικότερα γεγονότα που έπληξαν ολόκληρη τη Βόρεια Ευρώπη (από τις Σκανδιναβικές χώρες έως τη Γαλλία) ήταν αυτό του 1976. Στο Ηνωμένο Βασίλειο η ξηρασία διατηρήθηκε για δεκαέξι ολόκληρους μήνες, στη Γαλλία η παραγωγή γάλακτος μειώθηκε κατά 25%, ενώ χρειάστηκε να σφαχτούν είκοσι χιλιάδες χοίροι, καθώς το νερό δεν επαρκούσε για τις κτηνοτροφικές ανάγκες. Λιγότερο σημαντικά γεγονότα καταγράφονται το 1973 στην Αυστρία, Γερμανία και πρώην Τσεχοσλοβακία με σημαντικό έλλειμμα νερού που προήρθε από τον πολύ ξηρό χειμώνα και το 1984 στο Βόρειο και Δυτικό Ηνωμένο Βασίλειο που επιβλήθηκε απαγόρευση χρήσης «λάστιχου

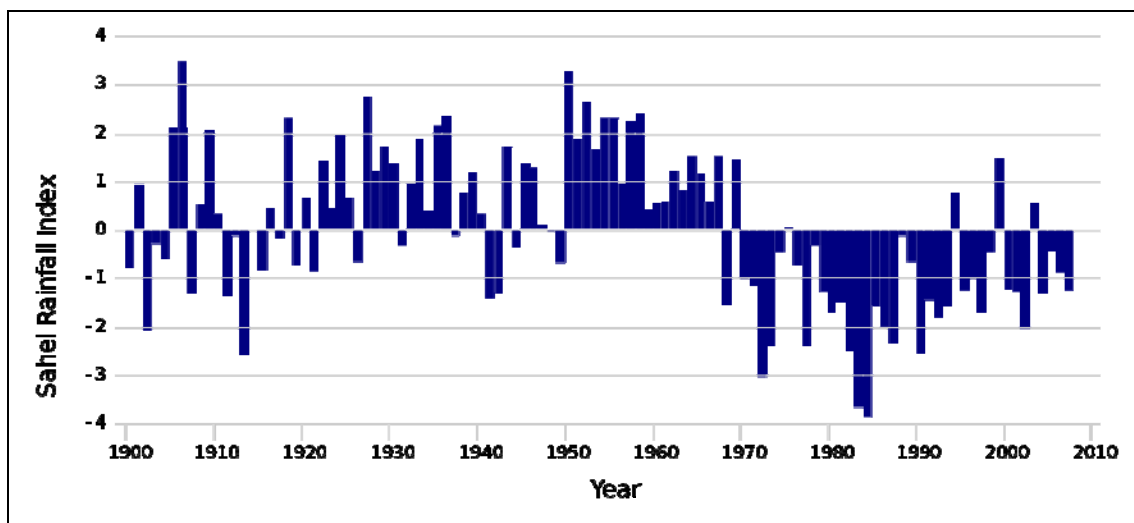
ποτίσματος» για εξωτερικές οικιακές χρήσεις. Ένα ακόμη σημαντικό γεγονός σε ολόκληρο το Ευρωπαϊκό έδαφος ήταν αυτό του 1988-92. Χαμηλή βροχόπτωση παρουσιάστηκε σχεδόν σε όλη την Ευρώπη με μικρές κατά τόπους υγρές περιόδους. Μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο εκτιμήθηκαν απώλειες της τάξης των εξακοσίων εκατομμυρίων Βρετανικών λιρών (£600 million). Στη Γερμανία, Ουγγαρία, Βουλγαρία και σε μεγάλο τμήμα της Δυτικής Ρωσίας η ξηρασία του 1992 ήταν ιδιαίτερα έντονη, οδηγώντας σε μείωση της παραγωγής κατά 22% στην Γερμανία, σε διακοπή των αρδεύσεων στη Βουλγαρία, αλλά και στην ξηρασία της δεκαετίας για τη Ρωσία. Στη Γαλλία επιβλήθηκε αυστηρός περιορισμός των αρδεύσεων, καθώς 3000 μικρά ποτάμια κινδύνευσαν με εξαφάνιση στα τέλη του 1990. Παρατεταμένη ξηρασία έπληξε και την Ιβηρική χερσόνησο από το 1990 έως το 1995, επηρεάζοντας μεγάλες περιοχές τόσο της Ισπανίας όσο και της Πορτογαλίας. Στη Seville η παροχή νερού έγινε διακοπτόμενη (12 ώρες ημερησίως) μεταξύ του 1992 και 1993, ενώ διακόπηκε η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας από το 1994 έως το 1995. Το 1995 ήταν μια άσχημη χρονιά και για την Ιρλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Νορβηγία και τη Σουηδία. Οι απώλειες από την αγροτική παραγωγή μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο εκτιμήθηκαν σε εκατόν ογδόντα εκατομμύρια στερλίνες (£180 million), ενώ η μείωση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας στη Νορβηγία οδήγησε σε 600% αύξηση στις μέσες εβδομαδιαίες τιμές. Το θερμό καλοκαίρι του 1999 οδήγησε σε πτώση της στάθμης των ποταμών, των λιμνών και των υπόγειων υδροφορέων στη Φιλανδία, ενώ το 2003 στο μεγαλύτερο μέρος της ηπειρωτικής Ευρώπης παρουσιάστηκαν σημαντικές δασικές πυρκαγιές, υποβάθμιση των γεών, μείωση της αγροτικής παραγωγής και της παραγωγής ενέργειας, αλλά και θάνατοι από παρατεταμένες υψηλές θερμοκρασίες (EEA, 2001; Royal Geographical Society, 2006; Bradford, 2000). Μια προσπάθεια εκτίμησης του ελάχιστου πιθανού οικονομικού κόστους των σημαντικών γεγονότων ξηρασίας στο Ευρωπαϊκό έδαφος εκτιμά ζημιές της τάξης των 800 εκατομμυρίων € για την ξηρασία του 1976-77, πάνω από 5 δισεκατομμύρια € για την περίοδο 1981-82, πάνω από 2 και πάνω από 1 δισεκατομμύρια € για τα γεγονότα του 1988-91 και 1992-94 αντίστοιχα, με το κόστος να ανεβαίνει στα 3.7 δισεκατομμύρια για την ξηρασία του 1992-95 στην Ισπανία. Το κόστος ωστόσο εκτοξεύεται για την εκτεταμένη ξηρασία του 2003 που έπληξε Ρουμανία, Ουγγαρία, Πολωνία, Βουλγαρία, Ελλάδα, Γιουγκοσλαβία, Τσεχία, Αυστρία, Ελβετία, Ιταλία, Γερμανία, Βέλγιο, Δανία, Ολλανδία, Νορβηγία, Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία, Ισπανία και Πορτογαλία, με ζημιές που ξεπερνούν τα 11.5 δισεκατομμύρια € (EurAqua, 2004). Αξίζει τέλος να σημειωθεί, ότι οι πιο ευάλωτες χώρες της Ευρωπαϊκής ηπείρου είναι οι Μεσογειακές, η αγροτική παραγωγή των οποίων αποτελεί το μεγαλύτερο καταναλωτή νερού, με ποσοστά περίπου 80% της συνολικής ζήτησης για την Ελλάδα, 50% για την Ιταλία, 68% για την Ισπανία και 52% για την

Πορτογαλία, όταν ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος είναι 10%. Αλλά και η πολύ σημαντική τουριστική βιομηχανία των χωρών αυτών απειλείται από την έλλειψη νερού.

Στην Αφρικανική ήπειρο έχουν επίσης καταγραφεί σημαντικές ξηρασίες κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα. Οι σημαντικότερες καταγραφές προέρχονται από τη ζώνη Sahel. Πρόκειται για μια οικοκλιματική μεταβατική ζώνη μεταξύ της ερήμου Σαχάρα στα βόρεια και της τροπικής Σαβάνας στα νότια που εκτείνεται από τον Ατλαντικό ωκεανό έως την Ερυθρά Θάλασσα. Οι ξηρασίες σε αυτή την οικολογικά ευάλωτη ζώνη υπήρξαν τόσο σφοδρές που οδήγησαν τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών στη σύνθεση της Συνθήκης για την Καταπολέμηση της Ερημοποίησης και της ξηρασίας (Zeng, 2003) Η πρώτη σημαντική ξηρασία του 20<sup>ου</sup> αιώνα εμφανίζεται το 1914, προερχόμενη από πολύ χαμηλές βροχοπτώσεις και ακολουθούμενη από μεγάλης κλίμακας λιμό. Ακόμη και υψηλές βροχοπτώσεις όμως στην Αφρική είχαν κοινωνικές επιπτώσεις. Η αύξηση της βροχής στη δεκαετία του 1960 έκανε αρκετές ξηρές περιοχές πιο προσιτές με αποτέλεσμα τη σημαντική μετακίνηση πληθυσμών προς αυτές τις περιοχές κυρίως με την προτροπή των τοπικών κυβερνήσεων. Μια μεγάλης διάρκειας ξηρασία εμφανίστηκε από το 1968 έως το 1974. Τα βοσκοτόπια απογυμνώθηκαν, η γη υποβαθμίστηκε και όπως συνήθως συμβαίνει στις Αφρικανικές ξηρασίες ακολούθησε μια μεγάλη περίοδος λιμού, η οποία όμως αντιμετωπίστηκε σε μεγάλο βαθμό λόγω της διεθνούς βοήθειας. Η πιο πρόσφατη ξηρασία είναι αυτή του 2010. Ο λιμός αυτή η φορά έπληξε 350 χιλιάδες ανθρώπους και έθεσε σε κίνδυνο περίπου 1.2 εκατομμύρια. Η θερμοκρασία ξεπέρασε σε ορισμένες χώρες τους 50° C (σύμφωνα με τα αρχεία του NOAA), ενώ στο Chad και τον Niger καταγράφηκαν 20 θάνατοι από αφυδάτωση. Ουσιαστικά, από το τέλος της δεκαετίας του 1960 έως σήμερα η ζώνη Sahel είναι σε κατάσταση παρατεταμένης ξηρασίας, όπως φαίνεται και από τα διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης (Σχήμα 1.1). Κατά την τελευταία μάλιστα παρατεταμένη ξηρασία από το 1972 έως το 1984, μια από τις χειρότερες ξηρασίες ο λιμός σκότωσε περί τα 100 χιλιάδες άτομα, ενώ πάνω από 750 χιλιάδες άνθρωποι στο Mali, τον Niger και τη Mauritania επέζησαν χάρη στις αποστολές τροφίμων το 1974 (UNEP, 2002).

Η Αφρικανική ζώνη Sahel ήταν φυσικά πάντα επιρρεπής στην ξηρασία λόγω της περιορισμένης βροχόπτωσης που δέχεται ετησίως (συνικά κάτω των 100 mm το χρόνο) και για διάστημα που φτάνει από μερικές βδομάδες έως το πολύ δύο μήνες. Η προσπάθεια ωστόσο για να εκτιμηθεί μια συγκεκριμένη τάση ξηρασίας δεν είναι εύκολη. Σύγχρονες έρευνες έχουν εκτιμήσει τις περιόδους ξηρασίας τα τελευταία χρόνια, όμως προφορικές και γραπτές αναφορές για τους τελευταίους αιώνες δίνουν συγκεκριμένες εκτιμήσεις τόσο για τις ξηρασίες όσο και για τους λιμούς που τις ακολούθησαν. Οι Tarhule και Woo (1997) κάνουν μια

καταγραφή των ξηρασιών και των λιμών (κυρίως στον Niger) από τον 16<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι πιο σημαντικοί λιμοί ακολούθησαν μια πτώση της βροχόπτωσης μεγαλύτερη από 1.3 φορές την τυπική απόκλιση μιας μεγάλης χρονοσειράς τιμών μέσης βροχόπτωσης. Αναφορές για το κλίμα της Sahel υπάρχουν ωστόσο από τον 7<sup>ο</sup> αιώνα, καθώς ταξιδιώτες από την Ανατολή αναφέρουν ότι κατά τον 7<sup>ο</sup> και 8<sup>ο</sup> αιώνα η βροχόπτωση στην περιοχή ήταν ιδιαίτερα χαμηλή και αυξήθηκε μετά το 800 μ.Χ. (Rain, 2001). Μείωση της βροχόπτωσης παρατηρήθηκε και μετά το 1300 μ.Χ. αλλά αυξήθηκε και πάλι περίπου 200 χρόνια αργότερα. Οι πρώτοι Ευρωπαίοι ταξιδιώτες (γεωγράφοι και ιστορικοί του Μεσαίωνα) αναφέρουν μεγάλης διάρκειας ξηρασίες (διάρκειας ακόμη και 12-15 χρόνια) κατά τη δεκαετία του 1680 και στα μέσα της δεκαετίας του 1700, καθώς επίσης και στις δεκαετίες του 1820 και 1830. Λιγότερο σημαντικές ξηρασίες αναφέρονται κατά τις δεκαετίες του 1640, του 1710 και του 1810 (WEL, 2010). Η πρώτη καταγεγραμμένη ξηρασία από μετρημένα μετεωρολογικά δεδομένα καταγράφεται τη δεκαετία του 1910, καθώς τα πρώτα βροχόμετρα στην περιοχή εγκαθίστανται το 1898.



Σχήμα 1.1. Βροχόπτωση στη ζώνη Sahel.  
(Πηγή: [http://jisao.washington.edu/data\\_sets/sahel/](http://jisao.washington.edu/data_sets/sahel/))

Στην Ασία, η κατανομή του νερού είναι ανομοιογενής, με μεγάλες περιοχές να υποφέρουν από λειψυδρία. Από τη δυτική Κίνα και τη Μογγολία ως τη δυτική Ασία, μεγάλες περιοχές έχουν ξηρό ή ημίξηρο κλίμα. Ο αυξημένος πληθυσμός της περιοχής δημιουργεί ακόμα χειρότερα προβλήματα. Η παραγωγή ρυζιού, καλαμποκιού και σιταριού έχει μειωθεί σε πολλά μέρη της Ασίας λόγω της αυξανόμενης πίεσης στους υδατικούς πόρους, που προκύπτει εν μέρει από την αύξηση της θερμοκρασίας, την αύξηση της συχνότητας των φαινομένων λόγω του El Niño και τη μείωση του αριθμού των βροχερών ημερών. Εκτιμάται ότι αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1 °C στην Ασία, θα δημιουργήσει 10% μεγαλύτερες

ανάγκες άρδευσης (Bates et al., 2008). Η συχνότητα των ακραίων φαινομένων συμπεριλαμβανομένης και της ξηρασίας έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Κατά την περίοδο 1999-2000, πάνω από εξήντα εκατομμύρια άνθρωποι στην κεντρική και νοτιοδυτική Ασία επηρεάστηκαν από ένα από τα εντονότερα φαινόμενα ξηρασίας παγκοσμίως, με τις σημαντικότερες επιπτώσεις να παρουσιάζονται στο Ιράν, το Αφγανιστάν, το δυτικό Πακιστάν, το Τατζικιστάν, το Ουζμπεκιστάν και το Τουρκμενιστάν (Agrawala et al., 2001). Τα τρία σημαντικότερα γεγονότα ξηρασίας που έπληξαν την Κίνα, θεωρούνται αυτά του 1586-1589, 1638-1641 και 1965-1966 (Shen et al. 2007). Σημαντικές ξηρασίες θεωρούνται και αυτές του 1972-1997 και του 1999-2002. Κατά τη διάρκεια του 1972-1997 ο Yellow River εμφάνισε επεισόδια μηδενικής απορροής, που κατά το 1997 έφτασε στις 226 συνεχόμενες ημέρες. Στην Ινδία, που αποτελεί μια από τις πιο επιρρεπής στην ξηρασία περιοχές του πλανήτη, η ξηρασία εμφανίζεται σχεδόν μία φορά κάθε τρία χρόνια. Αυτό που θεωρείται σημαντικό στην περιοχή δεν είναι η εμφάνιση της ξηρασίας, αλλά η εμφάνιση γεγονότων παρατεταμένης ξηρασίας. Σύμφωνα με την έκθεση του IPCC (Bates et al., 2008) αισθητή είναι η μείωση των βροχοπτώσεων στη Ρωσία, στη βόρεια και βορειοανατολική Κίνα, στις παράκτιες και στις ξηρές περιοχές του Πακιστάν, σε τμήματα της βορειοανατολικής Ινδίας, στην Ινδονησία, στις Φιλιππίνες και σε μερικές περιοχές της Ιαπωνίας. Ωστόσο, έχουν παρατηρηθεί και αυξητικές τάσεις της βροχοπτώσεως στη δυτική Κίνα, στην Αραβική χερσόνησο, στο Μπανγκλαντές και στις δυτικές ακτές των Φιλιππίνων.

Στην Αυστραλία οι ξηρασίες είναι συχνό φαινόμενο και συνήθως έχουν μεγάλη διάρκεια. Από το 2002 και μετά σχεδόν όλο το ανατολικό και νοτιοδυτικό τμήμα της Αυστραλίας βρίσκεται σε παρατεταμένη ξηρασία. Η ξηρασία αυτή θεωρείται συγκρίσιμη με τις παλαιότερες σφοδρές ξηρασίες (γνωστές ως “Federation droughts”) του 1895 και του 1902. Η Νέα Ζηλανδία αν και διαφορετική υδρολογικά και γεωλογικά, αντιμετωπίζει παρόμοια φαινόμενα. Η πίεση στους υδατικούς πόρους αυξάνεται και με την αύξηση της ζήτησης η οποία μετά το 1960 αυξάνεται περίπου 55% τη δεκαετία, ενώ από το 1985 ως το 1996 η αύξηση της ζήτησης και στην Αυστραλία ήταν της τάξης του 65%. Η επίπτωση των γεγονότων ξηρασίας στην αγροτική παραγωγή των χωρών αυτών αναμένεται να είναι πολύ μεγάλη τα επόμενα χρόνια (Bates et al., 2008).

Η απάντηση στο ερώτημα κατά πόσο το “Dust Bowl” ή τα αντίστοιχα σημαντικά φαινόμενα στο Ευρωπαϊκό έδαφος ή στις υπόλοιπες ηπείρους ήταν σπάνια δεν είναι εύκολο να απαντηθεί. Καθώς τα αρχεία καταγραφής της βροχοπτώσεως και των υπολοίπων υδρομετεωρολογικών δεδομένων δεν ξεπερνούν στις περισσότερες περιπτώσεις τα εκατό χρόνια, είναι πολύ δύσκολο να υπάρξει μια τεκμηριωμένη επιστημονική άποψη για όσα συνέβησαν πριν τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.

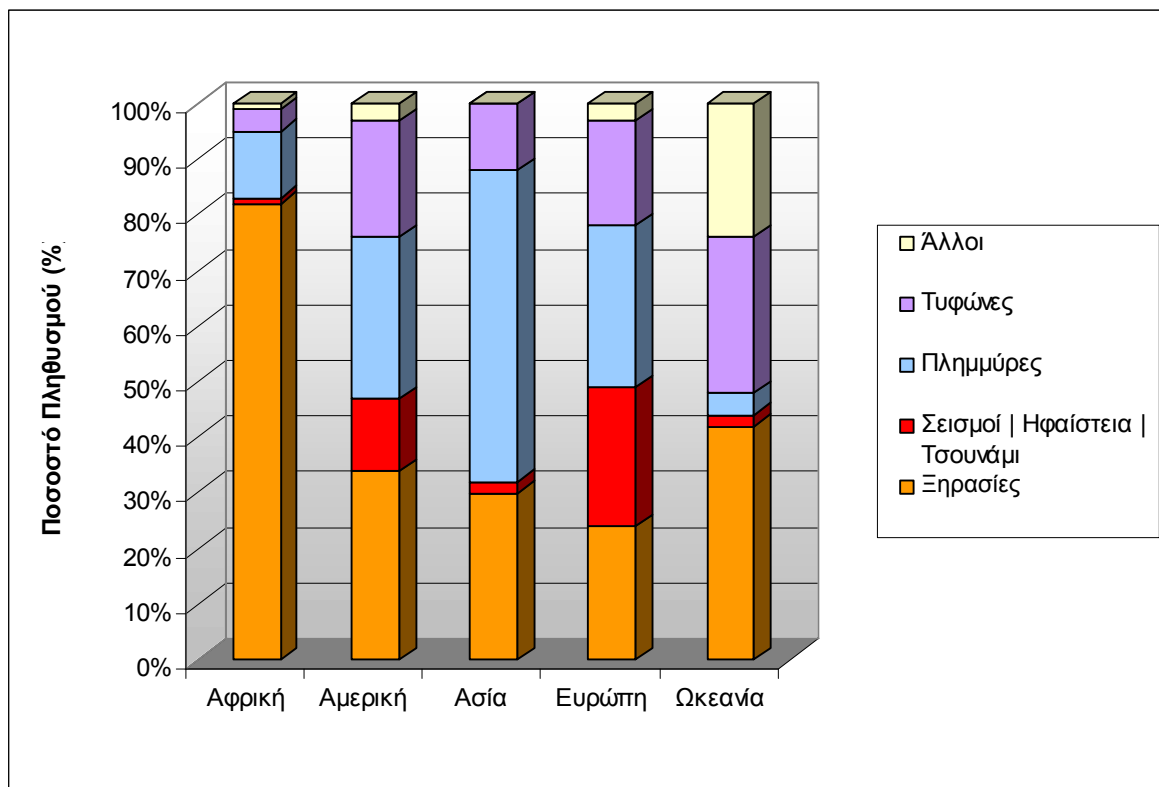
Ωστόσο η ανάλυση των δακτυλίων των δέντρων, των ιζημάτων των λιμνών και των αμμόλοφων, των αρχαιολογικών μνημείων και των ιστορικών ντοκουμέντων, αλλά και διαφόρων περιβαλλοντικών δεικτών μπορούν να επεκτείνουν τις γνώσεις μας για το κλίμα κατά τους προηγούμενους αιώνες. Η «παλαιοκλιματολογία» μπορεί με τα δεδομένα που συλλέγει να δώσει μια εκτίμηση για τη φυσική μεταβλητότητα των ξηρασιών σε χρονικές κλίμακες αιώνων ή ακόμη και χιλιετιών, αποτελώντας ένα σημαντικό εργαλείο για την απάντηση στο ερώτημα κατά πόσο τα φαινόμενα που βιώνουμε στη σύγχρονη εποχή είναι πραγματικά έντονα ή απλώς η φυσική συνέχεια των φαινομένων που συμβαίνουν στον πλανήτη. Η σημαντικότητα της απάντησης αυτής είναι τεράστια αν αναλογιστεί κανείς ότι μια μη αναμενόμενη από τους σύγχρονους επιστήμονες απάντηση θα μπορούσε να μετατρέψει σε μύθο το επιχείρημα ότι τα ακραία φαινόμενα που παρατηρούνται σήμερα στον πλανήτη είναι απόρροια μόνο των ανθρωπογενών παρεμβάσεων που δημιουργήθηκαν από το σύγχρονο τρόπο ζωής.

### 1.3 Ξηρασία: Μια φυσική καταστροφή σε αριθμούς

Οι φυσικές καταστροφές στις μέρες μας έχουν πάρει πρωτοφανείς διαστάσεις. Περισσότεροι από 255 εκατομμύρια άνθρωποι επηρεάζονται από τις φυσικές καταστροφές κάθε χρόνο, με την ξηρασία να πλήττει ιδιαίτερα τους κατοίκους της Αφρικανικής ηπείρου (Σχήμα 1.2), ενώ το οικονομικό κόστος από τις καταστροφές έχει δεκαετραπλασιαστεί σε σχέση με τη δεκαετία του 1950. Οι προβλέψεις σχετικά με την κλιματική αλλαγή υποδηλώνουν αύξηση των ακραίων γεγονότων στο μέλλον, τόσο σε συχνότητα όσο και σε ένταση. Η αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση και η αδυναμία των φτωχότερων πληθυσμών να βελτιώσουν τις συνθήκες ζωής τους αναμένεται να οδηγήσουν σε αύξηση του αριθμού των ανθρώπων που είναι ευάλωτοι απέναντι στις φυσικές καταστροφές με αποτέλεσμα όλο και περισσότερες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης στα επόμενα χρόνια.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται μετά από κάθε καταστροφή είναι η ανάγκη για συστηματική καταγραφή των επιπτώσεων κάθε είδους που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση και περιλαμβάνουν από οικονομικές απώλειες μέχρι απώλεια ανθρώπινων ζωών. Δυστυχώς μέχρι πρόσφατα η συλλογή τέτοιων δεδομένων γίνονταν αποσπασματικά και μόνο κατά τη διάρκεια της περιόδου έκτακτης ανάγκης, με αποτέλεσμα τα δεδομένα που συλλέγονταν να είναι παρωχημένα, μη ολοκληρωμένα και τελικά αναξιόποιeta. Τα τελευταία 40 χρόνια η κατάσταση αυτή συνεχώς βελτιώνεται. Τα αναπτυξιακά σχέδια θεωρούν όλο και πιο σημαντική την συλλογή δεδομένων από τις καταστροφές, καθώς τα σωστά δεδομένα ενισχύουν της εκτίμηση της τρωτότητας και της διακινδύνευσης,

θωρακίζοντας καλύτερα ένα σύστημα απέναντι σε μια μελλοντική καταστροφή και επομένως μειώνοντας σημαντικά τις επιπτώσεις ενός μελλοντικού γεγονότος. Στη βελτίωση της συλλογής και καταγραφής τέτοιων δεδομένων έχει συμβάλει αποτελεσματικά και η τεχνολογική εξέλιξη με τα συνεχώς βελτιούμενα Πληροφοριακά Συστήματα αλλά και τις νέες μεθοδολογίες συλλογής και ανάλυσης. Παρόλα αυτά ακόμη και σήμερα δεν υπάρχει μια μοναδική υπηρεσία συλλογής και διαχείρισης αλλά κυρίως ελέγχου και επικύρωσης των δεδομένων που συλλέγονται και κυρίως δεν υπάρχει τυποποίηση του τρόπου συλλογής δεδομένων. Οι όποιες προσπάθειες για τη δημιουργία και διατήρηση βάσεων δεδομένων για τις καταστροφές παραμένει δύσκολη καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται σε κάθε περίπτωση είναι τόσο καλά όσο αξιόπιστες είναι οι πηγές τροφοδοσίας των βάσεων.



Σχήμα 1.2. Ποσοστό του πληθυσμού που επηρεάζεται από φυσικούς κινδύνους σε κάθε ήπειρο (Πηγή: National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln, USA).

Σύμφωνα με στοιχεία του “Centre for Research on the Epidemiology of Disasters” που συλλέγει και καταγράφει δεδομένα στη βάση δεδομένων καταστροφών EM-DAT database, οι αριθμοί που σχετίζονται με τις φυσικές καταστροφές είναι εντυπωσιακοί. Κατά την τριακονταετία 1974-2003 καταγράφηκαν 6367 φυσικές καταστροφές (εξαιρουμένων των επιδημιών), με ελαφρώς περισσότερους από δύο εκατομμύρια νεκρούς και περισσότερους από



πέντε δισεκατομμύρια ανθρώπους αθροιστικά να έχουν επηρεαστεί από τις καταστροφές αυτές. Εκατόν ογδόντα δύο εκατομμύρια άνθρωποι έμειναν άστεγοι, ενώ οι οικονομικές ζημιές εκτιμώνται σε πάνω από ένα τρισεκατομμύριο δολάρια (US\$1.38 trillion). Μόνο τη δεκαετία 1994-2003 το 86% των σχετιζόμενων με τις καταστροφές θανάτων προέρχονταν από φυσικές καταστροφές, ενώ μόλις το 14% οφείλονταν σε τεχνολογικές καταστροφές όπως βιομηχανικά ατυχήματα ή ατυχήματα σε μέσα μεταφοράς. Αν και οι αριθμοί αυτοί φαίνονται εξωπραγματικοί, πρέπει να σημειωθεί ότι μάλλον πρόκειται για υποεκτιμήσεις. Για παράδειγμα, κατά την προαναφερθείσα περίοδο οι ξηρασίες που έπληξαν την Αιθιοπία στοίχισαν τη ζωή, σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία, σε περίπου πεντακόσιες χιλιάδες ανθρώπους. Υπάρχουν ωστόσο εκτιμήσεις ότι μόνο κατά τη μεγάλη ξηρασία του 1984-1985 έχασαν τη ζωή τους εξ αιτίας του φαινομένου εξακόσιες χιλιάδες έως ένα εκατομμύριο άνθρωποι. Σε όσα δε αφορούν στις οικονομικές ζημιές, εκτιμάται ότι μόνο το ένα τρίτο των οικονομικών απωλειών έχει καταγραφεί. Δεν πρέπει τέλος να μας διαφεύγει το γεγονός ότι η σημαντική αύξηση των καταστροφών τα τελευταία χρόνια δεν οφείλεται μόνο στην εξέλιξη των καταστροφών, αλλά και στο γεγονός της πληρέστερης καταγραφής των γεγονότων. Στην EM-DAT database για παράδειγμα έχουν καταγραφεί περισσότερες από εννιά χιλιάδες φυσικές καταστροφές από το 1900 και μετά, το 80% των οποίων αναφέρεται στην περίοδο μετά το 1970 (Guha-Sapir et al., 2004).

Ποια είναι όμως η σχέση της ξηρασίας με τις υπόλοιπες καταστροφές που καταγράφονται; Αξιολογείται ως μια σημαντική καταστροφή που αξίζει την προσοχή μας; Η ξηρασία είναι μια φυσική καταστροφή με ιδιαίτερη θέση μεταξύ των άλλων καταστροφών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι δεν επηρεάζει άμεσα τις τεχνικές υποδομές, με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις της να μην είναι άμεσα αντιληπτές ή αντιληπτές σε μικρό χρονικό διάστημα από την έναρξη του φαινομένου. Αυτό κάνει συχνά τους ανθρώπους να μην αντιλαμβάνονται τις επιπτώσεις της ξηρασίας, τουλάχιστον στην περίπτωση που δεν ακολουθείται από λιμό όπως συμβαίνει συνήθως στην Αφρικανική Ήπειρο. Μια άλλη παράμετρος που συμβάλλει στην ιδιαιτερότητα της, είναι η μεγάλη σχετικά διάρκεια των γεγονότων ξηρασίας με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολα διακριτά τα διάφορα γεγονότα μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι την αντίληψη ότι πρόκειται για σπάνια φαινόμενα σε σχέση με άλλες καταστροφές που συμβαίνουν με μεγαλύτερη συχνότητα. Για παράδειγμα, τη δεκαετία του 1990, που παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα ξηρασίας τουλάχιστον στις χώρες της Νότιας Ευρώπης, η ξηρασία εμφανίζεται στις χώρες αυτές σε ποσοστό μικρότερο του 10% του συνόλου των φυσικών καταστροφών που καταγράφηκαν στη συγκεκριμένη περίοδο (Πίνακας 1.1) με γεγονότα υποδιπλάσια τουλάχιστον σε σχέση με τις πλημμύρες και τους

σεισμούς.

Πίνακας 1.1. Πλήθος φυσικών καταστροφών στη Νότια Ευρώπη στη δεκαετία του 1990.

<b>Τύπος καταστροφής</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>%</b>
Ξηρασίες	8	9.09
Σεισμοί	18	20.45
Επιδημίες	3	3.41
Ακραίες θερμοκρασίες	4	4.55
Πλημμύρες	22	25.00
Μετακινήσεις υγρών γαιών	5	5.68
Καταιγίδες	15	17.05
Ηφαιστεια	1	1.14
Δασικές πυρκαγιές	12	13.63
<b>Σύνολο</b>	<b>88</b>	<b>100.00</b>

Πηγή: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Αν όμως κατατάξουμε τις ίδιες φυσικές καταστροφές ως προς τις εκτιμώμενες οικονομικές ζημιές, τα αποτελέσματα είναι τελείως διαφορετικά και γίνονται εντυπωσιακά αν η κατάταξη γίνει ως προς τον αριθμό των ανθρώπων που επηρεάστηκαν από την κάθε καταστροφή (Πίνακας 1.2). Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι οικονομικές ζημιές είναι περίπου ίδιες με αυτές των πλημμυρών με 2.5 φορές περισσότερα γεγονότα στη συγκεκριμένη δεκαετία, ενώ οι ξηρασίες επηρέασαν τον εντυπωσιακό αριθμό των έξι εκατομμυρίων ανθρώπων, με τον αντίστοιχο αριθμό για τις πλημμύρες να μην ξεπερνά τα εκατόν πενήντα χιλιάδες άτομα.

Πίνακας 1.2. Πλήθος φυσικών καταστροφών στη Νότια Ευρώπη στη δεκαετία του 1990.

<b>Τύπος καταστροφής</b>	<b>Άτομα που επηρεάστηκαν</b>	<b>%</b>	<b>Οικονομική Ζημιά (εκατ. δολ.)</b>	<b>%</b>
Ξηρασίες	6010000	95.2	10510	28.1
Σεισμοί	142131	2.3	10214	27.3
Επιδημίες	2148	0.0	0	0.0
Ακραίες θερμοκρασίες	0	0.0	824	2.2
Πλημμύρες	126489	2.0	12235	32.7
Μετακινήσεις υγρών γαιών	3563	0.1	71	0.2
Καταιγίδες	2410	0.0	1257	3.4
Ηφαιστεια	7000	0.1	0	0.0
Δασικές πυρκαγιές	19400	0.3	2302	6.2
<b>Σύνολο</b>	<b>6313141</b>	<b>100.0</b>	<b>37413</b>	<b>100.0</b>

Πηγή: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί ορισμένα στατιστικά στοιχεία για τις ξηρασίες ανά Ήπειρο, την περίοδο από το 1900 μέχρι

σήμερα που δείχνουν το μέγεθος της καταστροφής.

Πίνακας 1.3. Οι ξηρασίες στις πέντε Ηπείρους από τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.

Ήπειρος	Αριθμός γεγονότων	Θάνατοι	Άτομα που επηρεάστηκαν	Οικονομική ζημιά (εκατ. δολ.)
Αφρική	269	844 143	317 936 829	5 420
Αμερική	123	77	65 133 841	20 811
Ασία	147	9 663 389	1 666 286 029	33 823
Ευρώπη	38	1 200 002	15 482 969	21 461
Ωκεανία	19	660	8 027 635	10 703

Πηγή: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Οι δέκα πιο θανατηφόρες ξηρασίες που έχουν καταγραφεί στον πλανήτη (μετά το 1900) και στοίχισαν τη ζωή σε πάνω από έντεκα εκατομμύρια ανθρώπους είναι οι εξής:

Πίνακας 1.4. Οι δέκα πιο θανατηφόρες ξηρασίες τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.

Χώρα	Ημερομηνία	Αριθμός θανάτων
Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας	1928	3 000 000
Μπανγκλαντές	1943	1 900 000
Ινδία	1942	1 500 000
Ινδία	1965	1 500 000
Ινδία	1900	1 250 000
Σοβιετική Ένωση	1921	1 200 000
Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας	1920	500 000
Αιθιοπία	1983 (Μάιος)	300 000
Σουδάν	1983 (Απρίλιος)	150 000
Αιθιοπία	1973 (Δεκέμβριος)	100 000

Πηγή: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Ο Ελληνικός χώρος ακολουθεί περίπου τις ίδιες στατιστικές. Η ξηρασία παραμένει μια από τις πιο δαπανηρές καταστροφές στον Ελληνικό χώρο ιδιαίτερα αν λάβει κανείς όχι το συνολικό κόστος από κάθε καταστροφή αλλά το κόστος ανά συγκεκριμένο γεγονός. Έτσι με στοιχεία για μια μόνο ξηρασία τον 20<sup>ο</sup> αιώνα οι ζημιές εκτιμήθηκαν σε περίπου ένα εκατομμύριο δολάρια, όταν η δεύτερη πιο δαπανηρή καταστροφή ήταν οι πυρκαγιές με περίπου τριακόσια σαράντα χιλιάδες δολάρια ανά γεγονός και φυσικά οι σεισμοί με περίπου διακόσιες σαράντα χιλιάδες δολάρια ανά γεγονός (Πίνακας 1.6). Οι πιο δαπανηρές φυσικές καταστροφές που έχουν καταγραφεί για τον Ελληνικό χώρο

παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1.5).

Πίνακας 1.5. Οι δέκα πιο δαπανηρές φυσικές καταστροφές στην Ελλάδα από το 1900.

Τύπος καταστροφής	Ημερομηνία	Οικονομική Ζημιά (εκατ. δολ.)
Σεισμός (σεισμική δραστηριότητα)	7/9/1999	4 200
Δασική Πυρκαγιά	24/08/2007	1 750
Ξηρασία	1990	1 000
Σεισμός (σεισμική δραστηριότητα)	24/02/1981	900
Σεισμός (σεισμική δραστηριότητα)	13/09/1986	745
Δασική Πυρκαγιά	Ιούνιος 1998	675
Πλημμύρα	2/2/2003	600
Σεισμός (σεισμική δραστηριότητα)	13/05/1995	450
Πλημμύρα	24/10/1994	438
Σεισμός (σεισμική δραστηριότητα)	15/06/1995	423

Πηγή: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Πίνακας 1.6. Φυσικές καταστροφές στην Ελλάδα.

Κατηγορία	Αριθμός γεγονότων	Αριθμός θανάτων	Άτομα που επηρεάστηκαν	Οικονομική Ζημιά (εκατ. δολ.)
Ξηρασία	1	-	-	1 000
Σεισμός	29	951	960 398	7 099
Ακραίες θερμοκρασίες (ψυχρό κύμα)	1	5	-	-
Ακραίες θερμοκρασίες (θερμό κύμα)	5	1119	176	3
Πλημμύρες (μη καταχωρημένες)	8	66	9 730	188
Πλημμύρες (γενικές πλημμύρες)	12	18	6 100	1 043
Καταιγίδες (μη καταχωρημένες)	6	56	612	690
Καταιγίδες (τοπικές)	1	22	-	-
Καταιγίδες (κυκλώνες)	1	43	-	-
Ηφαίστεια (ηφαιστειακή έκρηξη)	1	48	-	-
Δασικές Πυρκαγιές	11	94	8 559	1 750
Δασικές Πυρκαγιές (χαμηλής βλάστησης)	2	14	500	675

Πηγή: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο φτωχότερη είναι μια χώρα τόσο μεγαλύτερες είναι οι επιπτώσεις της ξηρασίας αλλά και κάθε καταστροφής, καθώς δεν υπάρχουν οι μηχανισμοί έγκαιρης προειδοποίησης και προστασίας, αλλά ούτε τα κατάλληλα σχέδια ανακούφισης των επιπτώσεων και φυσικά οι πόροι για να τα υποστηρίξουν. Καθώς η ανακούφιση των επιπτώσεων κυρίως στις φτωχές χώρες γίνεται μέσω των δωρεών της ανθρωπιστικής βοήθειας, αξίζει να σημειωθεί ότι η ξηρασία έρχεται χαμηλά στη λίστα της ανθρωπιστικής βοήθειας η οποία συνήθως πηγαίνει στις πιο «θεαματικές» καταστροφές που τραβούν περισσότερο και τα φώτα της δημοσιότητας.

## 1.4 Ορισμοί

Η ξηρασία αποτελεί ίσως το πιο δύσκολο στην κατανόησή του φυσικό (υδρολογικό) φαινόμενο. Από τη μέση σχεδόν του 20<sup>ου</sup> αιώνα η επιστημονική κοινότητα έχει εκφράσει τις δυσκολίες που εμφανίζονται ακόμη και στη διατύπωση ενός επαρκούς ορισμού για την περιγραφή του φαινομένου. Ο W.C. Palmer (1965) αναφέρει ότι στις πρώτες περιόδους ενασχόλησης των επιστημόνων με την ξηρασία υπήρχαν διαφωνίες όχι μόνο σε σχέση με τη σημασία τις ίδιες της (αγγλικής) λέξης “drought”, αλλά ακόμη και σε σχέση με την προφορά και την ορθογραφία της. Στην ίδια έκθεση παρουσιάζεται ένα πλήθος ορισμών της ξηρασίας που έχουν συγκεντρωθεί από προγενέστερες σχετικές μελέτες, όπως ότι ως ξηρασία ορίζεται:

1. Μια περίοδος με σύνολο κατακρημνισμάτων μικρότερο από κάποιο προκαθορισμένο μικρό ύψος (π.χ. 0.10 in / 48 h).
2. Μια περίοδος μεγαλύτερη από κάποιο συγκεκριμένο αριθμό ημερών με κατακρημνίσεις μικρότερες από κάποια προκαθορισμένη ποσότητα.
3. Μια περίοδος δυνατών ανέμων, χαμηλής βροχόπτωσης, υψηλής θερμοκρασίας και συνήθως μικρής σχετικής υγρασίας (η οποία μάλιστα αναφέρεται ως «ατμοσφαιρική ξηρασία»).
4. Μια ημέρα κατά την οποία η διαθέσιμη εδαφική υγρασία έχει μειωθεί σε ένα πολύ μικρό ποσοστό της διαθέσιμης υδατοϊκανότητας.
5. Μια χρονική περίοδος κατά την οποία επικρατεί μία ή όλες οι ακόλουθες συνθήκες: (α) η βοσκή γίνεται σπάνια, (β) δεν επικρατούν επαρκείς συνθήκες για την κτηνοτροφία, (γ) γίνεται δημοφιλές το τάισμα των ζώων με το «χέρι», (δ) η εκτροφή των ζώων γίνεται συστηματικά και όχι ελεύθερα.
6. Η πώση της μηνιαίας ή ετήσιας βροχόπτωσης κάτω από κάποιο συγκεκριμένο ποσοστό του φυσιολογικού.
7. Η συνθήκη που επικρατεί όταν οι βροχοπτώσεις είναι ανεπαρκείς για να καλύψουν τις ανάγκες των συνηθισμένων ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι συχνά το ευρύ κοινό και ο περιοδικός τύπος χρησιμοποιούν τον όρο ξηρασία με ποιο συνεπή τρόπο σε σχέση με τους επιστήμονες που εργάζονται στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Ο όρος ξηρασία δεν εμφανίζεται συνήθως στον ημερήσιο τύπο έως ότου μια περιοχή έχει πλέον υποστεί μια ασυνήθιστα έντονη μείωση της εδαφικής υγρασίας για μια παρατεταμένη χρονική περίοδο. Ωστόσο, οι περισσότεροι αγρότες δεν θεωρούν ότι έχουν πληγεί από ξηρασία έως ότου η κατάσταση αρχίσει να γίνεται σοβαρή. Παρά τις διαφορές που υπάρχουν, φαίνεται ότι οι άνθρωποι στις περιοχές με υγρό κλίμα εννοούν το ίδιο, όταν αναφέρονται στην ξηρασία, με τους ανθρώπους που κατοικούν σε ξηρές ή ημίξηρες περιοχές, δηλαδή ότι το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας έχει αρχίσει να επηρεάζει αισθητά την υπάρχουσα οικονομία της περιοχής τους. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις προσεγγίσεις, ένας ορισμός που μπορεί να διατυπωθεί ως μια αρχική προσέγγιση για γενική χρήση του όρου θα περιέγραφε την ξηρασία ως μια παρατεταμένη μη φυσιολογική ανεπάρκεια υγρασίας.

Ακόμη και στην εποχή μας, που υπάρχει διάχυτη η αίσθηση του φαινομένου ακόμη και στους μη ειδικούς, δεν υπάρχει ένας ακριβής και καθολικά αποδεκτός ορισμός της ξηρασίας. Αυτό είναι ως ένα βαθμό φυσικό, αφού η ξηρασία εξαρτάται σημαντικά από τον τόπο και τον χρόνο εμφάνισής της. Ο ορισμός της ξηρασίας υπό αυτό το πρίσμα θα πρέπει να συνδέεται με την υπό μελέτη γεωγραφική περιοχή και να συσχετίζεται με συγκεκριμένη εφαρμογή του φαινομένου ([Tate and Gustard, 2000](#)). Στη διεθνή βιβλιογραφία ωστόσο, συναντώνται αρκετοί γενικοί ορισμοί για το φαινόμενο της ξηρασίας. Ένας από τους περιεκτικότερους χαρακτηρίζει την ξηρασία ως μια «ελάττωση της διαθεσιμότητας νερού σε συγκεκριμένη περιοχή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου» ([Beran and Rodier, 1985](#)). Ένας ορισμός της ξηρασίας πιο εστιασμένος στα υδατικά συστήματα παρουσιάζει την ξηρασία ως το φαινόμενο κατά τη διάρκεια εμφάνισης του οποίου το υδατικό σύστημα βρίσκεται κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο σε σχέση με την κανονική του λειτουργία ([Correia et al., 1991](#)). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης και οι ορισμοί που υιοθετούνται από μεγάλους οργανισμούς. Σύμφωνα με τους [Mishra and Singh \(2010\)](#), ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organisation, WMO) ορίζει την ξηρασία ως μια «συνεχή, εκτεταμένη ανεπάρκεια βροχοπτώσης». Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (σύμφωνα με τη Συνθήκη για την Καταπολέμηση της Ερημοποίησης) ορίζει την ξηρασία ως «το φυσικό φαινόμενο που υπάρχει όταν οι βροχοπτώσεις βρίσκονται σημαντικά κάτω από τα κανονικά επίπεδα που έχουν καταγραφεί, προκαλώντας σοβαρές υδρολογικές ανισορροπίες που επηρεάζουν δυσμενώς τα συστήματα παραγωγής χερσαίων πόρων». Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture

Organization, FAO) των Ηνωμένων Εθνών ορίζει την ξηρασία ως «το ποσοστό των ετών, κατά το οποίο οι καλλιέργειες αποτυγχάνουν από την έλλειψη υγρασίας». Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι ορισμοί της ξηρασίας ποικίλουν και ανάλογα με τη μεταβλητή που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ξηρασία. Για παράδειγμα, οι Paulo and Pereira (2009) περιγράφουν την ξηρασία ως «μια φυσική, αλλά προσωρινή ανισορροπία της διαθεσιμότητας νερού», ενώ ο Gumbel (1963) ορίζει την ξηρασία ως τη «μικρότερη ετήσια τιμή των μέσων ημερήσιων απορροών ενός ποταμού», καταλήγοντας στο (περίεργο) συμπέρασμα ότι κάθε έτος παρουσιάζει μια ξηρασία!

Παρά την έλλειψη ενός και μοναδικού ορισμού για την ξηρασία, υπάρχει μια γενικά αποδεκτή συμφωνία απόψεων σε ορισμένα χαρακτηριστικά που οδηγούν στον χαρακτηρισμό μιας κατάστασης ως ξηρασία. Για να θεωρηθεί ένα φαινόμενο ως ξηρασία πρέπει να παρατηρηθεί «κρίσιμη ελάττωση» της διαθεσιμότητας νερού σε σχέση με τις φυσιολογικές τιμές για «συγκεκριμένη χρονική περίοδο» και σε «μεγάλη γεωγραφική έκταση». Είναι προφανές ότι η ερμηνεία που μπορεί να δοθεί στα χαρακτηριστικά αυτά εισάγει σε μεγάλο βαθμό το υποκειμενικό στοιχείο στον ορισμό της ξηρασίας (Rossi et al., 1992). Δεν μπορούμε άλλωστε να παραβλέψουμε ότι η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο άμεσα επηρεαζόμενο από τον ανθρώπινο παράγοντα. Το ίδιο δηλαδή φυσικό φαινόμενο μπορεί να αξιολογείται διαφορετικά ανάλογα με το επίπεδο χρήσης του διαθέσιμου νερού ή τη στρατηγική που ακολουθείται στη διαχείριση της ξηρασίας. Αυτή η αντιμετώπιση μας οδηγεί στο να δούμε την ξηρασία και από μια άλλη οπτική γωνία, αυτή της φυσικής καταστροφής.

Η ξηρασία αποτελεί την πιο περίπλοκη φυσική καταστροφή, που διαφέρει από τις άλλες φυσικές καταστροφές με πολλούς τρόπους. Οι επιπτώσεις της συσσωρεύονται αργά για μια μεγάλη χρονική περίοδο και συχνά παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά τον τερματισμό του φαινομένου, κάνοντας πολύ δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό της έναρξης και λήξης του φαινομένου. Αυτό έχει οδηγήσει τους επιστήμονες στο να αναφέρονται συχνά στην ξηρασία με τον χαρακτηρισμό «έρπον φαινόμενο» (Wilhite, 1993). Επίσης, η εμφάνιση του φαινομένου ακολουθείται από σύγχυση τόσο των επιστημόνων όσο και των υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων και τη χάραξη πολιτικής, σχετικά με το κατά πόσο η συγκεκριμένη περίπτωση εμπίπτει ή όχι σε κάποιον αποδεκτό ορισμό της ξηρασίας, καθώς και πόσο έντονη είναι η συγκεκριμένη ξηρασία. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό στην έλλειψη ενός επαρκούς ορισμού του φαινομένου με κατανοητούς όρους, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Μια τρίτη σημαντική διαφορά είναι ότι οι επιπτώσεις της ξηρασίας είναι λιγότερο εμφανείς σε σχέση με τις επιπτώσεις άλλων φυσικών καταστροφών (π.χ. πλημμυρών) και εκτείνονται σε πολύ μεγάλης έκτασης περιοχές. Το γεγονός δε ότι σπάνια οι ξηρασίες

επιηρεάζουν δομικές κατασκευές και υποδομές, κάνει τους πολίτες να κατανοούν ακόμη πιο δύσκολα τις επιπτώσεις της ξηρασίας και τους ειδικούς να δυσκολεύονται τόσο στην έγκυρη και έγκαιρη εκτίμηση της δριμύτητας αλλά και των επιπτώσεων της ξηρασίας, όσο και στο σχεδιασμό μέτρων και έργων προληπτικής αντιμετώπισης ή μετριασμού των επιπτώσεων. Η ξηρασία ωστόσο, όπως παρουσιάζεται και στην προηγούμενη παράγραφο, επιηρεάζει περισσότερους ανθρώπους από κάθε άλλη φυσική καταστροφή, εμπλέκοντας την κοινωνική διάσταση στη διατύπωση ενός περιεκτικού ορισμού του φαινομένου. Η ξηρασία φυσικά γίνεται αντιληπτή από τον άνθρωπο ως καταστροφή όταν επιηρεάζει τα οικονομικά συμφέροντα και την κοινωνική ευημερία της ανθρώπινης κοινότητας. Οι αλληλεπιδράσεις και οι συσχετισμοί του φαινομένου με την κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον γενικότερα δεν αποτελούν παράλα αυτά τις τελευταίες δυσκολίες προς τη διατύπωση ενός μοναδικού ορισμού.

Η ξηρασία είναι επίσης μια φυσική διακύμανση του κλίματος, που παρουσιάζεται σχεδόν σε όλους τους κλιματικούς τύπους. Συμβαίνει τόσο σε υψηλής όσο και σε χαμηλής βροχόπτωσης περιοχές. Για τους περισσότερους ανθρώπους είναι πολύ δύσκολο να φανταστούν φαινόμενα ξηρασίας στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη, τη Βραζιλία ή τη νοτιοανατολική Ασία, ενώ συνδέουν την ξηρασία με την κατάσταση που παρουσιάζεται στην Αφρική, την Ινδία και την Αυστραλία. Η διαφορά ωστόσο ανάμεσα στην ξηρασία και την ξηρότητα, που αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό του κλίματος των περιοχών με χαμηλή βροχόπτωση, είναι από τα σημαντικότερα σημεία που πρέπει να αποσαφηνιστούν. Η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να παρουσιαστεί ακόμη και σε περιοχές με πολύ υγρό κλίμα, αν και οι άνθρωποι των περιοχών αυτών συνήθως αποκαλούν το φαινόμενο «πράσινη ξηρασία», καθώς τη συνδέουν με την ελάττωση της αγροτικής παραγωγής τόσο εξαιτίας της μείωσης της βροχόπτωσης όσο κυρίως λόγω της εμφάνισης της βροχής σε χρονικές στιγμές που δεν βοηθούν τις καλλιέργειες.

Κατά την προσπάθεια διατύπωσης του ορισμού της ξηρασίας είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε τους ορισμούς σε δύο είδη: τους εννοιολογικούς ορισμούς και τους διαχειριστικούς ορισμούς (Wilhite and Glantz, 1985). Εννοιολογικοί αποκαλούνται οι ορισμοί που προσδιορίζουν τα όρια στα οποία κινείται η ουσία της ξηρασίας και παρουσιάζουν μια γενικευμένη περιγραφή του φαινομένου. Είναι οι ορισμοί που συνήθως δίνονται από τα ερμηνευτικά λεξικά, όπως εκφράσεις του τύπου «ξηρασία είναι μια μεγάλη περίοδος χωρίς βροχή κυρίως κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου». Από την άλλη πλευρά, οι διαχειριστικοί ορισμοί προσπαθούν να προσδιορίσουν την έναρξη, τη λήξη και τη σφοδρότητα των περιόδων ξηρασίας (NDMC, 1995). Οι ορισμοί αυτοί



χρησιμοποιούνται επίσης στην ανάλυση της συχνότητας, της διάρκειας και της έντασης της ξηρασίας. Οι διαχειριστικοί ορισμοί είναι συχνά προσαρμοσμένοι σε συγκεκριμένες μορφές ξηρασίας και σε συγκεκριμένες μορφές αντιμετώπισής της.

Επειδή το φαινόμενο της ξηρασίας γίνεται πιο κατανοητό μέσα από τις επιπτώσεις του, είναι πιο εύκολο να οριστεί συνδεδεμένο με τους διαφορετικούς χώρους που επηρεάζει. Όπως πολύ παραστατικά περιγράφει ο Palmer (1965) η ξηρασία σημαίνει διαφορετικά πράγματα σε διαφορετικούς ανθρώπους. Για τον αγρότη, ξηρασία είναι ανεπάρκεια υγρασίας στη ζώνη του ριζοστρώματος των καλλιεργειών του. Για τον υδρολόγο, σημαίνει επίπεδα νερού κάτω του μέσου όρου στα ποτάμια, τις λίμνες και τους ταμιευτήρες. Για τον οικονομολόγο, σημαίνει την κατάσταση έλλειψης νερού που μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην υπάρχουσα οικονομία. Από αυτή την οπτική γωνία η ξηρασία μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις βασικούς τύπους, τη μετεωρολογική, την υδρολογική, τη γεωργική ξηρασία και την κοινωνικο-οικονομική ξηρασία. Είναι γνωστό ότι η τελευταία προστέθηκε σχετικά αργότερα. Οι επιπτώσεις του φαινομένου συχνά θεωρούνται πιο έντονες όταν καταλήγουν να είναι δυσάρεστες για τους ανθρώπους επηρεάζοντας τις κοινωνικές δομές και την οικονομική τους ισορροπία, παρά όταν επηρεάζουν μόνο το φυσικό περιβάλλον.

Η *Μετεωρολογική Ξηρασία* εκφράζεται με βάση την ένταση του φαινομένου, σε σχέση συνήθως με μια μέση «φυσιολογική» τιμή και τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Παρουσιάζεται μέσα από γενικούς ορισμούς (όπως αυτοί που εμφανίζονται στα ερμηνευτικά λεξικά), ως για παράδειγμα μια περίοδος χωρίς αρκετή βροχή για κάποια δεδομένη περίοδο. Η μετεωρολογική ξηρασία συνδέεται άμεσα με τη συγκεκριμένη περιοχή στην οποία παρουσιάζεται, αφού εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες μεταβάλλονται έντονα από περιοχή σε περιοχή (WMO, 2006). Για παράδειγμα, ένας ορισμός της μετεωρολογικής ξηρασίας που βασίζεται στον αριθμό των ημερών με βροχόπτωση κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο (κατώφλι), δεν έχει καμία πρακτική αξία για μια περιοχή όπου η παρατεταμένη ανομβρία αποτελεί συνηθισμένο φαινόμενο. Επίσης, ορισμοί που προέρχονται από την εφαρμογή του φαινομένου σε μια περιοχή συνήθως δεν μπορούν να μεταφερθούν σε κάποια άλλη περιοχή, αφού τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά είναι διαφορετικά. Η ανθρώπινη αντίληψη μάλιστα που μπορεί να προσδίδει διαφορετικά χαρακτηριστικά σε ίδιες μετεωρολογικές συνθήκες που συμβαίνουν σε δυο διαφορετικές περιοχές εντείνει ακόμη περισσότερο τη σύνδεση της μετεωρολογικής ξηρασίας με την κάθε συγκεκριμένη περιοχή.

Η *Υδρολογική Ξηρασία* συνδέεται κυρίως με τις επιπτώσεις του υδρολογικού ελλείμματος στα επιφανειακά και υπόγεια αποθέματα νερού, παρά με την

καθ'αυτό μείωση των κατακρημνίσεων (Dracup et al., 1980). Ενώ δηλαδή η μετεωρολογική ξηρασία παρουσιάζεται άμεσα με τη μείωση της βροχόπτωσης, η υδρολογική ξηρασία παρουσιάζεται με την ελάττωση των ποσοτήτων νερού, με αποτέλεσμα η εμφάνισή της να καθυστερεί σε σχέση με αυτή της μετεωρολογικής ξηρασίας. Η υδρολογική ξηρασία γίνεται αισθητή ως ελάττωση των απορροών (Chang and Stenson, 1990; Clausen and Pearson, 1995), πτώση της στάθμης των ποταμών, των λιμνών, των ταμιευτήρων και των υπόγειων υδροφορέων. Η ένταση και η συχνότητα της υδρολογικής ξηρασίας εκτιμάται συνήθως μέσα από την επιρροή της στις λεκάνες απορροής των ποταμών. Αν η συνολική ετήσια απορροή από μια λεκάνη απορροής είναι μικρότερη από τη μέση τιμή της απορροής της ιστορικής χρονοσειράς, τότε το έτος χαρακτηρίζεται ως έτος με υδρολογική ξηρασία. Επειδή ωστόσο συχνά παρουσιάζονται χαμηλές απορροές σε διάφορα υδατορεύματα, είναι ασφαλέστερο να θεωρείται ότι όταν η απορροή για κάποια χρονική περίοδο παραμένει χαμηλότερη από κάποια δεδομένη οριακή τιμή, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει υδρολογική ξηρασία σε εξέλιξη, που θα επιβεβαιωθεί ωστόσο όταν καλυφθούν τα σχετικά κριτήρια, που διαφέρουν ωστόσο από περιοχή σε περιοχή αλλά και από υδατόρευμα σε υδατόρευμα. Η καθυστέρηση της εμφάνισης της ανεπάρκειας βροχόπτωσης στα διάφορα υδρολογικά συστήματα, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σύγχυση σε σχέση με τις επιπτώσεις της υδρολογικής ξηρασίας στους διάφορους οικονομικούς τομείς. Άλλωστε, το νερό στα υδρολογικά συστήματα αποθήκευσης (όπως ποτάμια και ταμιευτήρες), συνήθως χρησιμοποιείται για πολλούς και ανταγωνιστικούς σκοπούς (π.χ. παραγωγή ενέργειας, άρδευση, ύδρευση, αναψυχή, έλεγχο πλημμύρας), με αποτέλεσμα την ακόμη πιο πολύπλοκη κατάσταση και ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων. Σε περίοδο υδρολογικής ξηρασίας, ο ανταγωνισμός και οι συγκρούσεις συμφερόντων για τις διάφορες χρήσεις του αποθηκευμένου στα υδρολογικά συστήματα νερού αυξάνεται εντονότατα.

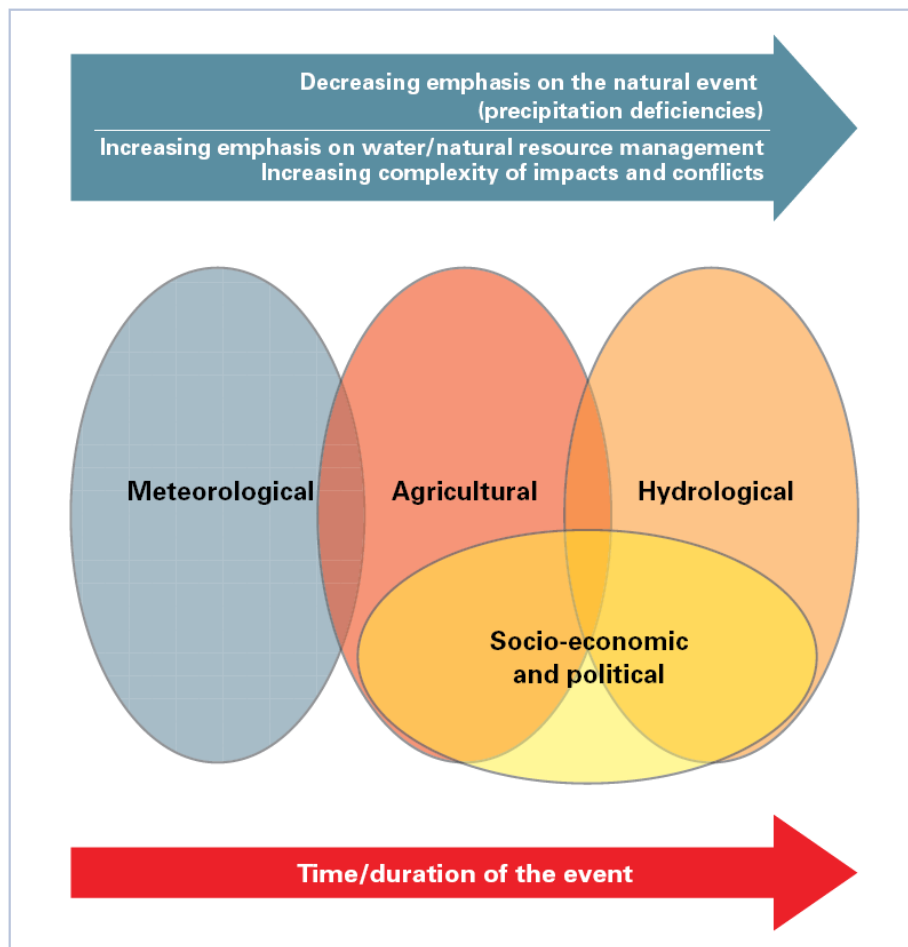
Η *Γεωργική Ξηρασία* εξαρτάται άμεσα από τα επίπεδα εδαφικής υγρασίας και επάρκειας νερού για την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Συνδέει τα χαρακτηριστικά της μετεωρολογικής και της υδρολογικής ξηρασίας στις επιπτώσεις τους στη γεωργία. Φυσικά, οι ανάγκες μιας καλλιέργειας σε νερό εξαρτώνται από τις επικρατούσες συνθήκες, τα βιολογικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, το επίπεδο ανάπτυξής του, και τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους (Mishra and Singh, 2010). Έτσι, η γεωργική ξηρασία γίνεται ακόμα πιο δύσκολα αντιληπτή. Πρέπει ακόμη να ληφθεί υπόψη, ότι η έλλειψη της κατάλληλης υπεδάφιας υγρασίας σε ένα πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης της καλλιέργειας μπορεί να έχει μικρή επίδραση στην τελική σοδειά, αν η υγρασία του ριζοστρώματος αρκεί για να καλύψει τις πρώιμες ανάγκες της ανάπτυξης των

φυτών, αν όμως η έλλειψη της εδαφικής υγρασίας συνεχιστεί, η μείωση στην απόδοση της σοδειάς θα είναι σημαντική.

Η Κοινωνικο-οικονομική Ξηρασία αναφέρεται σε έλλειμμα υδατικών πόρων λόγω υπερκατανάλωσης αγαθών, ανεπαρκούς υποδομής και προετοιμασίας και λιγότερο λόγω μειωμένης βροχοπτώσης ή διαθεσιμότητας υδατικών πόρων. Δεν αποτελεί τόσο έναν ανεξάρτητο τύπο ξηρασίας, όσο μια προσπάθεια σύνδεσης της προσφοράς και της ζήτησης κάποιων οικονομικών αγαθών ή υπηρεσιών με στοιχεία κυρίως της υδρολογικής και γεωργικής ξηρασίας. Στο πλαίσιο αυτό ορισμένοι επιστήμονες προτείνουν την ένταξη των χωροχρονικών διαδικασιών προσφοράς και ζήτησης σε έναν αντικειμενικό ορισμό της ξηρασίας. Η προσφορά πολλών οικονομικών αγαθών εξαρτάται από τα καιρικά φαινόμενα (π.χ. ύδρευση και υδροηλεκτρική ενέργεια), ενώ η ζήτηση στις περισσότερες περιπτώσεις αυξάνεται με την αύξηση του πληθυσμού και την κατά κεφαλήν κατανάλωση. Επομένως η κοινωνικο-οικονομική ξηρασία θα μπορούσε να οριστεί ακριβέστερα ως το φαινόμενο που συντελείται όταν η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά, αλλά ως αποτέλεσμα της εξαρτώμενης από τα καιρικά φαινόμενα ανεπάρκειας της προσφοράς. Ένας τέτοιος άλλωστε ορισμός της ξηρασίας αποδεικνύει την άμεση σχέση της ξηρασίας με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Για παράδειγμα, μια κακή χρήση της γης, όπως η υπερβόσκηση, μπορεί τόσο να μειώσει τη δυνατότητα εκτροφής ζώων στο μέλλον όσο και να αυξήσει την εδαφική διάβρωση, γεγονός που θα διογκώσει τις επιδράσεις αλλά και την ευαισθησία του συστήματος σε μια μελλοντική ξηρασία.

Η συχνότητα εμφάνισης της γεωργικής, της υδρολογικής και της κοινωνικο-οικονομικής ξηρασίας είναι πολύ μικρότερη από ότι της μετεωρολογικής. Συνήθως απαιτούνται αρκετές εβδομάδες πριν η έλλειψη βροχοπτώσης αρχίζει να δημιουργεί έλλειψη στην εδαφική υγρασία, που με τη σειρά της προκαλεί προβλήματα στις καλλιέργειες και τα βοσκοτόπια. Οι συνεχιζόμενες συνθήκες ξηρασίας για αρκετούς συνεχόμενους μήνες επιφέρουν μείωση των απορροών και των επιπέδων νερού σε λίμνες και ταμιευτήρες, αλλά και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Όταν οι συνθήκες ξηρασίας εξακολουθούν να υφίστανται για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε αρχίζουν να είναι εμφανείς οι σχετικές επιπτώσεις της γεωργικής, υδρολογικής και κοινωνικο-οικονομικής ξηρασίας (WMO, 2006). Η αλληλεξάρτηση των διαφόρων τύπων της ξηρασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, η άμεση σύνδεση μεταξύ των κύριων τύπων ξηρασίας και της έλλειψης βροχοπτώσεων επηρεάζεται από το πώς γίνεται η διαχείριση αυτών των συστημάτων. Αλλαγές στη διαχείριση των συστημάτων αυτών μπορούν είτε να μειώσουν είτε να επιδεινώσουν τις επιπτώσεις της ξηρασίας. Για παράδειγμα, η υιοθέτηση των κατάλληλων πρακτικών άρροσης και η φύτευση περισσότερο ανθεκτικών στην ξηρασία

καλλιεργειών μπορεί να περιορίσει σημαντικά τις επιπτώσεις της ξηρασίας λόγω της εξοικονόμησης νερού του εδάφους και της μείωσης της διαπνοής.



Σχήμα 1.3. Η αλληλεξάρτηση μεταξύ της μετεωρολογικής, της γεωργικής, της υδρολογικής και της κοινωνικο-οικονομικής ξηρασίας (Πηγή: [WMO, 2006](#)).

Σε σχέση με τον ορισμό της ξηρασίας είναι τέλος σημαντικό να γίνει ξεκάθαρη η διαφορά αλλά και η σχέση της ξηρασίας με άλλες σχετικές καταστάσεις ή φυσικά φαινόμενα τα οποία συχνά συγχέονται με αυτή. Μια προσπάθεια αποσαφήνισης και ορισμού τέτοιων φαινομένων θα μπορούσε να βοηθήσει τόσο στην κατανόηση του φαινομένου της ξηρασίας όσο και στην ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων αλλά και της ακριβούς ερμηνείας των αποτελεσμάτων τους για τη σύνταξη σχεδίων προληπτικής αντιμετώπισης της ξηρασίας. Οι συνηθέστερες φυσικές ή ανθρωπογενείς διεργασίες που εξαιτίας της σύνδεσής τους με την διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων συγχέονται μερικώς επικαλύπτονται με την ξηρασία είναι η ξηρότητα (aridity), η ερημοποίηση (desertification), την λειψυδρία (water scarcity) και την υδατική ανεπάρκεια (water shortage). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρος λειψυδρία χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει όλες τις διεργασίες που σχετίζονται με το έλλειμμα σε

νερό, ενώ μια πιο ακριβής προσέγγιση χαρακτηρίζει τη λειψυδρία ως μόνιμη (water scarcity) ή παροδική (water shortage).

Η *ξηρότητα* είναι ένα φυσικό μόνιμο χαρακτηριστικό του κλίματος μιας περιοχής, που χαρακτηρίζεται κυρίως από τα πολύ χαμηλά μέσα ετήσια ή εποχιακά κατακρημνίσματα, με υψηλή χωρική και χρονική διακύμανση. Η ξηρότητα επιφέρει χαμηλή συνολική υγρασία και υποβαθμίζει την ικανότητα ενός οικοσυστήματος. Σε συνθήκες ξηρότητας παρατηρούνται ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και το υδρολογικό καθεστώς χαρακτηρίζεται από μεγάλες διακυμάνσεις στις απορροές, αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods) και μεγάλες περιόδους με πολύ χαμηλές ή μηδενικές απορροές. Η *λειψυδρία* (ή ακριβέστερα η *μόνιμη λειψυδρία*) αποτελεί μια επίσης μόνιμη κατάσταση ανισορροπίας μεταξύ της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων και ζήτησης νερού σε μια περιοχή ή ένα υδατικό σύστημα που χαρακτηρίζεται από ξηρό κλίμα ή/και ραγδαία αύξηση της ζήτησης σε νερό, που σχετίζεται με διαδικασίες όπως η αύξηση του πληθυσμού, η επέκταση των αρδευόμενων καλλιεργειών κλπ. Η *υδατική ανεπάρκεια* (ή ακριβέστερα *παροδική λειψυδρία*) από την άλλη πλευρά είναι μια προσωρινή, κυρίως ανθρωπογενής ανισορροπία του υδατικού συστήματος. Η ανεπάρκεια σε ένα σύστημα υδροδότησης για παράδειγμα, είναι το έλλειμμα προσφερόμενου νερού σε σχέση με τη ζήτηση, που μπορεί να προκύψει από κάποιο φυσικό φαινόμενο όπως η ξηρασία, αλλά εμφανίζεται κυρίως λόγω της κακής διαχείρισης των υδατικών πόρων, της κακής ποιότητας του προσφερόμενου νερού, των προβληματικών υπηρεσιών παροχής νερού κλπ. Τέλος, *ερημοποίηση* είναι η μόνιμη υποβάθμιση των εδαφών σε περιοχές με κυρίως ξηρό ή ημί-ξηρο κλίμα, που προκαλείται κυρίως από την υπερεκμετάλλευση ή την ακατάλληλη χρήση των εδαφών των περιοχών αυτών σε συνάρτηση με τις κλιματικές μεταβολές. Η διάβρωση του εδάφους και αύξηση της αλατότητας συνήθως συνδέονται με την ερημοποίηση. Η ξηρασία επιδεινώνει σημαντικά τη διαδικασία της ερημοποίησης, αυξάνοντας την πίεση στους ήδη μειωμένους επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους.

Σημαντικό στοιχείο για την κατανόηση των διεργασιών που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα νερού είναι ο διαχωρισμός τους αφενός σε μόνιμες ή προσωρινές και αφετέρου σε φυσικές ή ανθρωπογενείς. Η ξηρασία και η υδατική ανεπάρκεια είναι προσωρινές διεργασίες με την ξηρασία να κατατάσσεται στα φυσικά φαινόμενα ενώ η υδατική ανεπάρκεια στα ανθρωπογενή. Από την άλλη πλευρά τόσο η ξηρότητα όσο και η λειψυδρία και η ερημοποίηση είναι μόνιμες καταστάσεις, με την ξηρότητα να κατατάσσεται στις φυσικές διεργασίες, ενώ η ερημοποίηση και η λειψυδρία θεωρούνται κυρίως ανθρωπογενείς (Iglesias et al., 2007).

## 1.5 Σχεδιασμός μέτρων και Διαχείριση Ξηρασίας

Ο εντοπισμός και η παρακολούθηση της ξηρασίας αποτελούν τις πιο σημαντικές διαδικασίες για τη διερεύνηση της κατάστασης μιας περιοχής. Ωστόσο, η διαχείριση της ξηρασίας και κυρίως των επιπτώσεών της, καθώς και ο σχεδιασμός για την έγκαιρη αντιμετώπιση του φαινομένου είναι οι διαδικασίες που μπορούν να οδηγήσουν από την θεωρία στην πράξη, από τη γνώση δηλαδή σχετικά με την ξηρασία σε μια περιοχή, σε χρήσιμα για το κοινωνικό σύνολο αποτελέσματα.

Οι διαχειριστικές δράσεις για την ξηρασία μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικά χρονικά σημεία, με διαφορετικούς στόχους και σε διαφορετικά στοιχεία του συστήματος. Κατά την ανάπτυξη Σχεδίων Αντιμετώπισης της ξηρασίας, όλες οι απόψεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα χρονοδιαγράμματα και οι θέσεις ευθύνης πρέπει να είναι σαφείς ώστε τα διαχειριστικά σχέδια να μπορούν να εφαρμόζονται με επιτυχία.

Σε σχέση με το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής των διαχειριστικών σχεδίων υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις. Η *αντίδραση* (reactive approach) στην ξηρασία στηρίζεται στην εκτέλεση ενεργειών και μέτρων μετά την έναρξη του φαινομένου της ξηρασίας και χρησιμοποιείται κυρίως ως η προσέγγιση στις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Είναι προφανές ότι η προσέγγιση αυτή έχει συχνά ανεπαρκή αποτελέσματα τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο αφού οι λύσεις που πρέπει να εφαρμοστούν δεν αφήνουν τα χρονικά περιθώρια για την εκτίμηση των βέλτιστων ενεργειών για κάθε περίπτωση, αλλά ούτε τον κατάλληλο χρόνο για την ενεργό εμπλοκή των πληττόμενων κοινωνικών ομάδων στη διαμόρφωση της κατάλληλης για την περίπτωση λύσης. Η *πρόληψη* (proactive or preventive approach) από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει όλα τα μέτρα που έχουν προσχεδιαστεί με κατάλληλα εργαλεία σχεδιασμού και τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων, που θεωρείται απαραίτητη από τις σύγχρονες προσεγγίσεις στη λήψη αποφάσεων. Στην προληπτική προσέγγιση εντάσσονται τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα μέτρα, ενώ περιλαμβάνονται και συστήματα παρακολούθησης της ξηρασίας για την έγκαιρη προειδοποίηση.

## 1.6 Αναφορές κεφαλαίου

Agrawala S., Barlow M, Cullen H. and Lyon B., 2001. The Drought and Humanitarian Crisis in Central and Southwest Asia: A Climate Perspective. IRI Special Report No. 01-11, International Research Institute for Climate Prediction, New York, 20 p.

- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. and Palutikof J.P., Eds., 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.
- Bell B., 1971. The Dark Ages in ancient history: I. The first dark age in Egypt. *American Journal of Archaeology*, 75(1): 1–26.
- Beran M.A. and Rodier J.A., 1985. Hydrological Aspects of Drought. Studies and Reports in Hydrology 39, Unesco-WMO, ISBN: 92-3-102288-1, France, 151 p.
- Bradford R.B., 2000. Drought Events in Europe. In: J.V. Voght and F. Somma (eds.), Drought and Drought Mitigation in Europe (Advances in Natural and Technological Hazard Research), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, The Netherlands, ISBN: 0-7923-6589-5, pp. 7-20.
- Bruins H.J., 1999. Drought Management and Water Supply Systems in Israel. In: Drought Management Planning in Water Supply Systems, Water Science and Technology Library (Volume 32), E. Cabrerria and J. Garcia-Serra (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1999, The Netherlands, ISBN: 0-7923-5294-7, pp. 299-321.
- Chang T.J. and Stenson J.R., 1990. Is it realistic to define a 100-year drought for water management? *Water Resources Bulletin*, 26(5): 823-829.
- Chen F., Yuan Y., Wen W., Yu S., Fan Z., Zhang R., Zhang T. and Shang H., 2011. Tree-ring-based reconstruction of precipitation in the Changling Mountains, China, since A.D.1691. *International Journal of Biometeorology*, Online First, DOI: 10.1007/s00484-011-0431-8.
- Clausen B. and Pearson C.P., 1995. Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, 173(1-4): 111-130.
- Cook E.R., Woodhouse C., Eakin C.M., Meko D.M., Stahle D.W. and 2004. Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 306(5698): 1015–1018.
- Correia F.N., M.A. Santos and R.R. Rodrigues, 1991. Reliability in Regional Drought Studies. In: Water Resources Engineering Risk Assessment, Jacques Ganoulis (ed.), NATO ASI Series, Vol. G 29, Berlin, 43-62.
- Dawicki S., 2003. News Release: Century-Long Drought Linked to Collapse of Mayan Civilization. Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), <http://www.whoi.edu/page.do?pid=9779&tid=282&cid=921&ct=162>
- Do O' A. and Roxo M.J., 2008. Drought events in Southern Portugal from the 12th to the 19th centuries: integrated research from descriptive sources. *Natural Hazards*, 47(1): 55-63.
- Dracup J.A., K.S. Lee and E.G. Paulson Jr., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16(2):297-302.
- EEA, 2001. Sustainable water use in Europe, Part 3: Extreme hydrological events:

- floods and droughts. Environmental issue report No. 21, European Environment Agency, Copenhagen, 84 p.
- Environment Canada, 2004. Threats to Water Availability in Canada. National Water Research Institute, Burlington, Ontario. NWRI Scientific Assessment Report Series No. 3 and ACSD Science Assessment Series No. 1, 128 p.
- EurAqua, 2004. Discussion Document - Towards a European Drought Policy. EurAqua Network of European Freshwater Research Organisations, November 2004, <http://www.euraqua.net>
- Fang K., Gou X., Chen F., Yang M., Li J., He M., Zhang Y., Tian Q. and Peng J., 2009. Drought variations in the eastern part of northwest China over the past two centuries: evidence from tree rings. *Climate Research*, 38(2): 129-135.
- Gasse F. and van Campo E., 1994. Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains. *Earth and Planetary Science Letters*, 126(4): 435-456.
- Gillette H.P., 1950. A creeping drought under way. *Water and Sewage Works*, March 1950: 104-195.
- Guha-Sapir D., Hargitt D. and Hoyois P., 2004. Thirty Years of Natural Disasters 1974-2003: The Numbers. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Presses Universitaires de Louvain (UCL), Brussels, p. 188.
- Gumbel E.J., 1963. Statistical Forecast of Droughts. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 8(1): 5-23.
- Hassan F., 2011. The Fall of the Egyptian Old Kingdom. *BBC Ancient History*, [http://www.bbc.co.uk/history/ancient/egyptians/apocalypse\\_egypt\\_01.shtml](http://www.bbc.co.uk/history/ancient/egyptians/apocalypse_egypt_01.shtml)
- Hayes M.J., Wilhelmi O.V. and Knutson C.L., 2004. Reducing Drought Risk: Bridging Theory and Practice. *Natural Hazards Review*, 5(2): 106-113.
- Hodell, D.A., Curtis J.H. and Brenner M., 1995. Possible role of climate in the collapse of the Classic Maya Civilization. *Nature (Letters)*, 375: 391-394.
- Hunt B.G. and Elliott T.I., 2005. A Simulation of the Climatic Conditions Associated with the Collapse of the Maya Civilization. *Climatic Change*, 69(2-3): 393-407.
- Iglesias A., M. Moneo and L. Garrote, 2007. Defining the planning purpose, framework and concepts (Chapter 2). In: Drought Management Guidelines Technical Annex, A. Iglesias, M. Moneo, A. Lopez-Francos (Eds.), CIHEAM/EC MEDAWater (Series B: Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes), Zaragoza, ISBN: 2-85352-359-4, pp. 17-27.
- Lawford R.G., 1992. Research Implications of the 1988 Canadian Prairie Provinces Drought. *Natural Hazards*, 6:109-129.



- Li J., Chen F., Cook E.R., Gou, X. and Zhang Y., 2007. Drought reconstruction for north central China from tree rings: the value of the Palmer drought severity index. *International Journal of Climatology*, 27(7): 903-909.
- Lovgren S., 2003. Climate Change Killed off Maya Civilization, Study Says. *National Geographic News*, [http://news.nationalgeographic.com/news/2003/03/0313\\_030313\\_mayadrought.html](http://news.nationalgeographic.com/news/2003/03/0313_030313_mayadrought.html)
- Maddox J.L., 2003. Shamans and Shamanism. Dover edition 2003, 352 p. Republication of the original: The medicine man: A sociological study of the character and evolution of shamanism, New York, Macmillan Co., 1923, ISBN: 0-486-42707-2. Based on the 1878 Shamans and shamanism by John Lee Maddox.
- Me-Bar Y. and Valdez Jr F., 2003. Droughts as random events in the Maya lowlands. *Journal of Archaeological Science*, 30(12): 1599-1606.
- Mishra A.K. and Singh V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2): 202-216.
- NDMC, 1995. Understanding and Defining Drought. Categories of Drought Definition, <http://enso.unl.edu/ndmc/enigma/def2.htm>, First published: November 15, 1995.
- NOAA, 2003. North American Drought: A Paleo Perspective. NOAA *Paleoclimatology Program*, <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/drought/>
- Owen R.B., Barthelme J.W., Renaut R.W. and Vincens A., 1982. Palaeolimnology and archaeology of Holocene deposits northeast of Lake Turkana, Kenya. *Nature (Articles)*, 298: 523-529.
- Palmer W.C., 1965. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper No. 45, Washington D.C., 58 p.
- Paulo A.A. and Pereira L.S., 2009. Drought Concepts and Characterization: Comparing Drought Indices Applied at Local and Regional Scales. *Water International*, 31(1): 37-49.
- Rain D., 2001. Eaters of the Dry Season: Circular Labor Migration in the West African Sahel. *Westview Press*, ISBN-13: 9780813338729, 280 p.
- Rossi G., M. Benedini, G. Tsakiris and S Giakoumakis, 1992. On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management*, 6(4): 249-277.
- Royal Geographical Society, 2006. Why were there such extreme drought conditions in 1976? News case study, *Geography in the News*, Royal Geographical Society, <http://www.geographyinthenews.rgs.org/>
- Shen C., Wang W-C., Hao Z and Gong W., 2007. Exceptional drought events over eastern China during the last five centuries. *Climatic Change*, 85(3-4): 453-471.
- Stahle D.W., Cook E.R., Cleaveland M.K., Therrell M.D., Meko D.M., Grissino-

- Mayer H.D., Watson E. and Luckman B.H., 2000. Tree-ring Data Document 16th Century Megadrought over North America. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 81(12): 121-125.
- Stahle D.W., Fye F.K., Cook E.R. and Griffin R.D., 2007. Tree-ring reconstructed megadroughts over North America since A.D. 1300. *Climatic Change*, 83(1-2): 133-149.
- Stanley J-D., Krom M.D., Cliff R.A. and Woodward J.C., 2003. Short Contribution: Nile Flow Failure at the End of the Old Kingdom, Egypt: Strontium Isotopic and Petrologic Evidence. *Geoarchaeology: An International Journal*, 18(3): 395-402.
- Tarhule A. and M.-K. Woo, 1997. Towards an Interpretation of Historical Droughts in Northern Nigeria. *Climatic Change*, 37(4): 601-616.
- Tate E.L. and Gustard A., 2000. Drought Definition: A Hydrological Perspective. In: J.V. Voght and F. Somma (eds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe (Advances in Natural and Technological Hazard Research)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, The Netherlands, ISBN: 0-7923-6589-5, pp. 23-48.
- Tsakiris G., 2010. Towards an adaptive preparedness framework for facing drought and water shortage. Proceedings of the 2nd International Conference on Drought Management “Economics of Drought and Drought Preparedness in a Climate Change Context”, 4-6 March 2010, Istanbul (Turkey), *Options Méditerranéennes*, A no. 95, pp. 249-257.
- UNEP, 2002. Africa Environment Outlook. Past, present and future perspectives. *United Nations Environmental Programme*, <http://www.unep.org/dewa/africa/publications/AEO-1/056.htm>
- Vieru T., 2000. Ancient Droughts Mapped via Rain-Making Rituals. *Softpedia*, <http://news.softpedia.com/news/Ancient-Droughts-Mapped-Via-Rain-Making-Rituals-102447.shtml>
- Wan Z., Wang P. and Li X., 2004. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 61-72.
- WEL, 2010. Climate and Man in the Sahel during the Historical Period. *World Environmental Library*, <http://www.greenstone.org/>
- Wilhite D.A and M.H. Glantz, 1985. Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3): 111-120.
- Wilhite D.A., 1993. The Enigma of Drought (Chapter 1, Part One). In: *Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies*, D.A. Wilhite (ed.), Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, ISBN: 0-7923-9337-6, pp. 3-15.

- Williams M., 2003. Drought that Destroyed a Civilisation. *The Herald UK*.  
<http://www.freerepublic.com/focus/news/1022897/posts>
- Williams M.A.J., Adamson D., Cock B. and McEvedy R., 2000. Late Quaternary environments in the White Nile region, Sudan. *Global and Planetary Change*, 26(1-3): 305-316.
- WMO, 2006. Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. Weather and climate information for sustainable agricultural development. WMO-No.1006, ISBN: 92-63-11006-9, World Meteorological Organization, 24 p.
- Zeng, N., 2003. Drought in the Sahel. *Science*, 302(5647): 999-1000.
- Zhang Z., Mann M.E. and Cook E.P., 2004. Alternative methods of proxy-based climate field reconstruction: application to summer drought over the conterminous United States back to AD 1700 from tree-ring data. *The Holocene*, 14(4): 502-516.



## κεφάλαιο 2

# Χαρακτηρισμός της ξηρασίας

### 2.1 Διαστάσεις - Χαρακτηριστικά

Ένας γενικός ορισμός της ξηρασίας μπορεί να είναι επαρκής για να αποκτήσει κανείς μια γενική εικόνα για το πολύπλοκο αυτό φαινόμενο. Η συστηματική ωστόσο ανάλυση του φαινομένου απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας, αλλά και την οργάνωση των εργαλείων τόσο για την αναγνώριση, την παρακολούθηση και τον προληπτικό σχεδιασμό όσο και για τον μετριασμό των επιπτώσεων του φαινομένου. Τόσο για τη διαχείριση της ξηρασίας, όσο και για τη σύνταξη των σχεδίων ετοιμότητας με στόχο τόσο την λήψη προληπτικών μέτρων όσο και για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του φαινομένου, απαιτείται η αναγνώριση τουλάχιστον των τριών βασικών χαρακτηριστικών ή διαστάσεων της ξηρασίας: της έντασης, της διάρκειας και της χωρικής έκτασης (Dracup et al., 1980; Wilhite, 1993; Panu and Sharma, 2002).

Η ένταση αναφέρεται στο βαθμό του ελλείμματος βροχόπτωσης ή αντίστοιχα στη δριμύτητα των επιδράσεων λόγω της έλλειψης αυτής. Μπορεί να μετρηθεί με σημείο αναφοράς κάποια μέση ή συνήθη τιμή και συνδέεται με τη σφοδρότητα των επιπτώσεων. Ο πιο απλός αλλά και πιο διαδεδομένος δείκτης μέτρησής της είναι ένα επί της εκατό ποσοστό της συνήθους βροχόπτωσης για το διάστημα που εξετάζεται. Δηλαδή πόσο μικρότερο είναι το ύψος βροχόπτωσης κατά την περίοδο ανάπτυξης του φαινομένου της ξηρασίας σε σχέση με τη μέση ή την αναμενόμενη μέση τιμή του ύψους βροχόπτωσης για την περίοδο, που μπορεί να έχει διάρκεια ενός μήνα, μιας εποχής ή ενός ή και περισσότερων ημερολογιακών

ή υδρολογικών ετών. Στην πραγματικότητα η μεγαλύτερη δυσκολία παρουσιάζεται στην επιλογή της συγκεκριμένης τιμής, του κατωφλιού δηλαδή, κάτω από την οποία θα πρέπει να πέσει η βροχόπτωση για να θεωρήσουμε ότι παρουσιάζεται το φαινόμενο της ξηρασίας. Τα κατώφλια αυτά συνήθως επιλέγονται αυθαίρετα, αν και ουσιαστικά θα έπρεπε να συνδέονται με τις επιπτώσεις.

Η διάρκεια, ορίζεται ως ο αριθμός των συνεχόμενων χρονικών περιόδων κατά τα οποία παρουσιάζεται το φαινόμενο της ξηρασίας. Η ξηρασία συνήθως χρειάζεται δύο με τρεις μήνες για να εγκατασταθεί, αλλά στη συνέχεια μπορεί να συνεχιστεί ακόμη και για αρκετά συνεχόμενα χρόνια. Η σπουδαιότητα των επιδράσεων της ξηρασίας έχει άμεση σχέση με τη χρονική στιγμή της έναρξης του φαινομένου, αλλά και τη χρονική κατανομή της μείωσης των βροχοπτώσεων. Διαφορετικό σημείο έναρξης και χρονική κατανομή μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές επιπτώσεις και επομένως σε διαφορετικούς τύπους ξηρασίας. Για παράδειγμα ελάττωση της βροχόπτωσης αμέσως πριν την περίοδο των αρδεύσεων θα μπορούσε να οδηγήσει σε γεωργική ξηρασία, ενώ η ίδια ελάττωση σε κάποια άλλη χρονική στιγμή θα μπορούσε να θεωρηθεί μετεωρολογική ξηρασία. Αν και υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τον προσδιορισμό της διάρκειας ενός φαινομένου ξηρασίας, ο εντοπισμός της παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς δεν υπάρχει ευρέως αποδεκτή μέθοδος που να την προσδιορίζει αντικειμενικά (Byun and Wilhite, 1999).

Η χωρική έκταση της ξηρασίας είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τις ξηρασίες. Τα φαινόμενα ξηρασίας που μπορούν να χαρακτηριστούν σημαντικά, συχνά αναπτύσσονται σε χωρικό επίπεδο σταδιακά με την πάροδο του χρόνου, με τις περιοχές μέγιστης ξηρασίας να διαφέρουν από εποχή σε εποχή. Σε χώρες με μεγάλη έκταση είναι πολύ δύσκολο οι περιοχές που πλήττονται από ξηρασία να περιλαμβάνουν ολόκληρη τη χώρα. Τέτοιες χώρες ωστόσο σχεδόν κάθε χρόνο αντιμετωπίζουν ξηρασίες σε μικρές οι μεγαλύτερες περιοχές. Αυτό οδηγεί τους υπεύθυνους των κρατών αυτών σε συνεχή εγρήγορση απέναντι στα φαινόμενα της ξηρασίας. Σε σχετικά μικρές χώρες, όπως και η Ελλάδα, είναι πιθανό ολόκληρη η χώρα να επηρεαστεί σε μια περίπτωση ακραίας ξηρασίας.

Εκτός από τον προσδιορισμό των κύριων χαρακτηριστικών της ξηρασίας είναι σημαντικό να εκτιμηθεί και η δυνατότητα του συστήματος που πλήττεται από ξηρασία με τα συγκεκριμένα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, να αντεπεξέλθει στον κίνδυνο. Καθώς η δυνατότητα αυτή του συστήματος σχετίζεται άμεσα με την ένταση των επιπτώσεων του φαινομένου, η εικόνα ενός συστήματος που πλήττεται από ξηρασία μπορεί να παρουσιάζεται διαφορετική σε κάθε περιοχή, παρά το γεγονός ότι οι διαστάσεις της ξηρασίας εμφανίζουν ίδιας τάξης

τιμές στα διαφορετικά συστήματα. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες έννοιες που σχετίζονται με τη διακινδύνευση (risk). Οι πιο συνηθισμένες από αυτές είναι η αξιοπιστία (reliability), η διάρκεια επαναφοράς (resilience) και η τρωτότητα (vulnerability) του συστήματος (Hashimoto et al., 1982; Jino, 1995; Rossi et al., 2005). Η αξιοπιστία αποτελεί μέτρο του κατά πόσο το σύστημα βρίσκεται σε ικανοποιητική κατάσταση, η διάρκεια επαναφοράς αφορά στην ταχύτητα με την οποία το σύστημα επανέρχεται σε ικανοποιητική κατάσταση μετά από κάποια αστοχία, ενώ η τρωτότητα σχετίζεται με το πόσο ευάλωτο είναι ένα σύστημα στον κίνδυνο «ξηρασία».

## 2.2 Εκτίμηση της ξηρασίας - Δείκτες

Η εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ξηρασίας, που αποτελούν όπως προαναφέρθηκε το κλειδί προς την αναγνώριση του φαινομένου, είναι δυνατή με τη χρήση εργαλείων (μεθόδων) που είναι στους ερευνητές γνωστοί με τον όρο «δείκτες ξηρασίας».

Οι δείκτες ξηρασίας είναι διαφόρων ειδών. Διακρίνονται κυρίως ανάλογα με το τύπο της ξηρασίας που είναι υπό διερεύνηση αλλά και τις ειδικές συνθήκες (κλιματολογικές, οργανωτικές κλπ.) της περιοχής στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο. Επίσης, χωρίζονται ανάλογα με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούν, καθώς άλλοι δείκτες χρησιμοποιούν λίγες παραμέτρους (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία) ώστε να είναι πιο εύχρηστοι, ενώ άλλοι ένα πλήθος παραμέτρων που τους καθιστούν ακριβέστερους, αλλά και πολύπλοκους στην εφαρμογή με μεγάλες δυσκολίες στον υπολογισμό του τελικού αποτελέσματός τους.

Η πρώτη γενιά δεικτών στηρίχθηκε στα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα κατά την περίοδο ανάπτυξης τους. Επειδή τα διαθέσιμα δεδομένα περιορίζονταν σε αποτελέσματα μετρήσεων των κύριων μετεωρολογικών παραμέτρων, οι πρώτοι δείκτες έμειναν γνωστοί ως μετεωρολογικοί δείκτες. Οι δείκτες της κατηγορίας αυτής εξακολουθούν να γνωρίζουν ευρεία εφαρμογή και στις μέρες μας, ενώ νέοι μετεωρολογικοί δείκτες εξακολουθούν να αναπτύσσονται και σήμερα καθώς καλύπτουν τη σημαντική ομάδα των εύχρηστων (μη πολύπλοκων) δεικτών που χρησιμοποιούν περιορισμένο πλήθος παραμέτρων. Παραδείγματα δεικτών της κατηγορίας αυτής αποτελούν ο Rainfall Anomaly Index (RAI; van Rooy, 1965), ο Bhalme and Mooley Drought Index (BMDI; Bhalme and Mooley, 1980), ο Standardised Anomaly Index (SAI; Katz and Glantz, 1986) και φυσικά ο δημοφιλέστερος ίσως δείκτης ξηρασίας, Standardised Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993), που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα από ερευνητές

παγκοσμίως (Hayes et al., 1999; Tsakiris and Vangelis, 2004; Edossa et al., 2010; Zhai et al., 2010). Φυσικά, νέοι δείκτες προστίθενται συνεχώς στην κατηγορία αυτή όπως ο Effective Drought Index (EDI; Byun and Wilhite, 1999).

Η προσπάθεια να αποδοθεί το υδατικό ισοζύγιο ενός υδατικού συστήματος ή μιας λεκάνης απορροής μέσα από την οπτική του συνολικού υδρολογικού κύκλου με έναν κατανοητό και συνεκτικό τρόπο οδήγησε στην ανάπτυξη των υδρολογικών δεικτών ξηρασίας. Οι δείκτες αυτοί που αναφέρονται ουσιαστικά στην άλλη μεγάλη κατηγορία ξηρασίας, την υδρολογική ξηρασία, βασίζονται κυρίως στη δίατα της απορροής. Ο πιο δημοφιλής και με την ευρύτερη χρήση παγκοσμίως δείκτης της κατηγορίας αυτής είναι ο Palmer Hydrological Drought Index (PHDI), ενώ εξίσου σημαντικός θεωρείται και ο Surface Water Supply Index (SWSI; Shafer and Dezman, 1982). Για την εκτίμηση τοπικών γεγονότων ξηρασίας έχει ευρύτατα χρησιμοποιηθεί ο Regional Streamflow Deficiency Index που αναπτύχθηκε από την Stahl (2001).

Η γεωργική ξηρασία αποτελεί έναν ακόμη τύπο ξηρασίας που προσέλκυσε το ενδιαφέρον των ερευνητών καθώς ένα πλήθος δραστηριοτήτων εξαρτάται από την πορεία και την απόδοση των καλλιεργειών που επηρεάζονται φυσικά άμεσα από τις ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Από τους δημοφιλέστερους δείκτες στην κατηγορία αυτή είναι ο Palmer Drought Severity Index (PDSI; Palmer, 1965). Ο δείκτης παρουσιάζει μια κατανοητή εικόνα του υδρολογικού κύκλου και των επιμέρους στοιχείων του βασιζόμενος στην εδαφική υγρασία και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Γνωστοί δείκτες της κατηγορίας αυτής είναι επίσης ο Crop Moisture Index (CMI; Palmer, 1968), ο Soil Moisture Drought Index (SMDI; Hollinger et al., 1993) και ο Crop Specific Drought Index (CSDI; Meyer et al., 1993). Δυο δείκτες στην κατηγορία αυτή που αναπτύχθηκαν πρόσφατα είναι ο Soil Moisture Deficit Index (SMDI) και ο Evapotranspiration Deficit Index (ETDI), οι οποίοι έχουν και οι δύο προταθεί από τους Narasimhan and Srinivasan (2005).

Οι νέες τεχνολογίες και κυρίως η ανάπτυξη των τεχνητών δορυφόρων παρατήρησης της γης άνοιξαν νέους δρόμους στην ανίχνευση της ξηρασίας. Μια νέα κατηγορία δεικτών δημιουργήθηκε με την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών που έγινε γνωστή με τον ευρύτερο όρο τηλεπισκοπικοί (ή δορυφορικοί) δείκτες ξηρασίας. Οι δείκτες της κατηγορίας αυτής περιγράφουν την κατάσταση της επιφάνειας της γης και κυρίως της βλάστησης, μέσα από την οποία δίνεται η δυνατότητα να ανιχνευθούν κλιματολογικές ανωμαλίες όπως η ξηρασία. Ο πιο γνωστός αλλά ίσως και ο πιο δημοφιλής δείκτης της κατηγορίας αυτής είναι ο Normalised Difference Vegetation Index (NDVI; Tucker, 1979). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η τάση των τελευταίων ετών στην ανάπτυξη δεικτών ξηρασίας είναι η ενσωμάτωση της μέγιστης διαθέσιμης πληροφορίας. Αυτό επιτυγχάνεται



με τον συνδυασμό μετεωρολογικών δεδομένων με πληροφορίες που προέρχονται από την τηλεπισκόπηση. Σε κάθε περίπτωση ο δείκτης ξηρασίας θα πρέπει να διατηρεί τη σαφήνεια και την περιεκτικότητα του συνδυασμένη με μια σαφή μαθηματική εξίσωση ώστε να είναι δυνατή η επιχειρησιακή εφαρμογή του.

Η πολυπλοκότητα των δεικτών ποικίλει σημαντικά, από την πιο απλή μέτρηση της μετεωρολογικής ξηρασίας όπως η κλασματική απόκλιση των βροχοπτώσεων από το μέσο όρο της, έως τα πιο περίπλοκα παραμετρικά μοντέλα νερού-καλλιέργειας (π.χ. [Burt et al., 1981](#)) που ενσωματώνουν τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας και διαχείρισης της χρήσης γης για κλιματολογικά ομοιογενείς περιοχές. Λόγω του μεγέθους της προσπάθειας και του κόστους που θα απαιτούνταν, μια λεπτομερής προσέγγιση καλλιέργειας – εδαφικής υγρασίας – υδατικών αναγκών δεν είναι πολύ εφικτή για μεγάλης κλίμακας μελέτη της ξηρασίας, ιδίως όταν θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από πολλούς κλιματολογικούς σταθμούς ([Oladipo, 1985](#)).

Στην ιδανική περίπτωση, η επιθυμητή κύρια ιδιότητα οποιουδήποτε δείκτη ξηρασίας είναι ότι πρέπει να είναι αρκετά γενικός ώστε να μπορεί να μοντελοποιήσει την εμφάνιση ξηρασίας σε διαφορετικές κλιματικές περιοχές. Η προσπάθεια επιλογής του καταλληλότερου δείκτη δεν είναι εύκολη υπόθεση. Μια καλή προσέγγιση για την επιλογή δεικτών προτείνεται από τους [Keyantash and Dracup \(2002\)](#), οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα σύνολο έξι σταθμισμένων κριτηρίων για την αξιολόγηση των δεικτών. Τα κριτήρια αυτά στηρίχθηκαν στις επιθυμητές ιδιότητες που ένας δείκτης ξηρασίας θα έπρεπε να ακολουθεί στην ιδανική περίπτωση, όπως προτάθηκαν από προηγούμενες έρευνες (π.χ. [Redmond, 1991](#)) και είναι: η σταθερότητα (robustness), η ευχρηστία (tractability), η διαφάνεια (transparency), η επιτήδευση (sophistication), η επεκτασιμότητα (extendability) και η διαστατικότητα (dimensionality).

Η *σταθερότητα* υποδηλώνει τη δυνατότητα χρήσης του δείκτη σε ένα ευρύ φάσμα φυσικών συνθηκών. Δεν πρέπει να συγχέεται με την ακρίβεια (accuracy), η οποία υπονοεί την ύπαρξη κάποιου προτύπου με το οποίο μπορεί να συγκριθεί η υπολογιζόμενη με τον δείκτη ένταση της ξηρασίας. Επιπλέον, η σταθερότητα μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο της διακύμανσης του δείκτη. Στην ιδανική περίπτωση, ο δείκτης πρέπει να μπορεί να ανταποκριθεί στις αλλαγές των φυσικών συνθηκών, αλλά να μην παρουσιάζει και υπερβολική ευαισθησία.

Η *ευχρηστία* αντιπροσωπεύει την πρακτική πλευρά της χρήσης ενός δείκτη. Ένας δείκτης δεν θεωρείται εύχρηστος, για παράδειγμα, όταν απαιτεί για τον υπολογισμό του δεδομένα σε υπερβολικά μεγάλες ιστορικές χρονοσειρές ή δεδομένα που δεν είναι σύνηθες να καταγράφονται.

Η *διαφάνεια* σχετίζεται με τη σαφήνεια και την ορθολογικότητα του δείκτη

ξηρασίας. Η παράμετρος αυτή είναι αρκετά σημαντική, καθώς ένας ρεαλιστικός δείκτης θα πρέπει να είναι κατανοητός όχι μόνο από την επιστημονική κοινότητα αλλά και από το ευρύ κοινό που πλήττεται από την ξηρασία. Ως εκ τούτου, η διαφάνεια μπορεί να εκπροσωπεί τη γενική χρησιμότητα ενός δείκτη.

Η *επιτήδευση* (δηλαδή η περιπλοκότητα), αν και στην πραγματικότητα έρχεται σε αντίθεση με τη διαφάνεια, αντικατοπτρίζει την εννοιολογική προσέγγιση και επομένως θεωρείται απαραίτητη. Μια τεχνική εκτίμησης της ξηρασίας μπορεί να μην είναι κατανοητή (διαφανής), αλλά κατάλληλη για συγκεκριμένη προσέγγιση. Το επίπεδο ωστόσο της επιτήδευσης πρέπει να μπορεί να υποστηριχθεί από την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων και τη θεμελιώδη ακρίβεια της μεθόδου προσέγγισης.

*Επεκτασιμότητα* είναι ο βαθμός στον οποίο ο δείκτης μπορεί να επεκταθεί προκειμένου να καλύψει εναλλακτικά σενάρια ξηρασίας. Για παράδειγμα, ένας δείκτης που εξαρτάται από βασικές μετρούμενες μεταβλητές (π.χ. βροχόπτωση και θερμοκρασία) μπορεί να υπολογιστεί για μεγάλες ιστορικές περιόδους, σε αντίθεση με ένα δείκτη που στηρίζεται σε δορυφορικές μετρήσεις, ο οποίος μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί μόνο για τις τελευταίες δεκαετίες. Η επεκτασιμότητα αναφέρεται επίσης στο βαθμό που οι προσεγγίσεις που απορρέουν από τον αρχικό δείκτη μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της εκτίμησης της ξηρασίας.

Η *διαστατικότητα* αναφέρεται στη σύνδεση του δείκτη με τη φυσική πραγματικότητα. Ένας δείκτης θεωρείται ότι πλεονεκτεί, όταν χρησιμοποιεί θεμελιώδεις μονάδες μέτρησης ή αποτελεί ποσοστό φυσικών παραμέτρων Αδιάστατες, κανονικοποιημένες ή πιθανοκρατικές εκδοχές των δεικτών είναι χρήσιμες για τη σύγκριση χαρακτηριστικών διαφορετικών τόπων και χρονικών περιόδων.

Φυσικά, η συμμετοχή των κριτηρίων αυτών στην τελική αναγνώριση ενός δείκτη γίνεται με τη χρήση βαρών, που αντικατοπτρίζουν τη σχετική σημαντικότητα των κριτηρίων. Τα βάρη που θα χρησιμοποιηθούν είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν και βασίζονται κυρίως στην επαγγελματική εμπειρία του χρήστη, αλλά και στην προσωπική του εκτίμηση. Σε γενικές γραμμές, το σημαντικότερο κριτήριο για ένα δείκτη θεωρείται η σταθερότητά του (robustness).

Τις τελευταίες δεκαετίες πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να συγκεντρώσουν, να κατατάξουν και να ομαδοποιήσουν τους δείκτες που έχουν προταθεί. Οι δείκτες αυτοί έχουν αναπτυχθεί από διάφορες γενιές ερευνητών κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα για όλους του τύπους ξηρασίας. Η ανασκόπηση των δεικτών, που εμφανίζεται πλέον σε τακτά διαστήματα, φαίνεται να

αναγνωρίζει πάνω από 80 δείκτες ξηρασίας. Ενδιαφέρον πάνω στην ανασκόπηση των δεικτών παρουσιάζουν, μεταξύ άλλων, οι εργασίες των Heim (2002), Hayes et al (2007), Niemeier (2008) και Cloppet (2011). Μια προσπάθεια συγκέντρωσης των πιο γνωστών δεικτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Δείκτες ξηρασίας.

<b>α/α</b>	<b>Όνομασία δείκτη</b>	<b>Συντομογραφία</b>
1	Aggregate Drought Index (ADI)	ADI
2	Agricultural Drought Index	DTx
3	Anomaly of Normalized Difference Vegetation Index	NDVIA
4	Base Flow Index	BFI
5	Bhalme and Mooley Drought Index	BMDI
6	Colorado Palmer Drought Index	CPDI
7	Consecutive Dry Days	CDD
8	Corn Drought Index	CDI
9	Crop Moisture Index	CMI
10	Crop Specific Drought Index	CSDI
11	Cumulative Precipitation Anomaly	CPA
12	Cumulative Streamflow Anomaly	CSA
13	Deciles	DECILES
14	Drought Area Index	DAI
15	Drought Frequency Index	DFI
16	Drought Severity Index	DSI
17	Effective Drought Index	EDI
18	Evapotranspiration Deficit Index	ETDI
19	Foley Drought Index	FDI
20	Global Vegetation Water moisture Index	GVWI
21	Groundwater Resource Index	GRI
22	Keetch-Byam Drought Index	KBDI
23	Leaf Water Content Index	LWCI
24	Low Flow Index	Q90
25	Modified Perpendicular Drought Index	MPDI
26	Moisture Availability Index	MAI
27	Normalised Burn Ratio	NBR
28	Normalised Difference Infrared Index	NDII
29	Normalised Difference Vegetation Index	NDVI
30	Normalised Difference Water Index	NDWI
31	Normalised Multi-band Drought Index	NMDC
32	Normalised Precipitation Index	NPI
33	Palfai Aridity Index	PAI
34	Palmer Drought Severity Index	PDSI
35	Palmer Hydrological Drought Index	PHDI
36	Palmer Modified Drought Index	PMDI
37	Palmer Z-index	Z-index
38	Percent of Normal Precipitation	PN

<b>α/α</b>	<b>Ονομασία δείκτη</b>	<b>Συντομογραφία</b>
39	Perpendicular Drought Index	PDI
40	Rainfall Anomaly Index	RAI
41	Rainfall Deficiency Index	RDI
42	Reclamation Drought Index	RDI
43	Regional Streamflow Deficiency Index	RSDI
44	Remote Sensing Drought Risk Index	RDRI
45	Runoff Deficiency Index	RDI
46	Simple Ratio Water Index	SRWI
47	Soil Moisture Anomaly Index	SMAI
48	Soil Moisture Deficit Index	SMDI
49	Soil Moisture Drought Index	SMDI
50	Soybean Drought Index	SCI
51	Sperling Drought Index	SDI
52	Standardised Anomaly Index	SAI
53	Standardised Precipitation Index	SPI
54	Standardised Streamflow Index	SSI
55	Standardised Vegetation Index	SVI
56	Streamflow Drought Index	SDI
57	Surface Water Supply Index	SWSI
58	Temperature Condition Index	TCI
59	Theory of Runs	Run
60	Total Storage Deficit Index	TSDI
61	Vegetation Condition Albedo Drought Index	VCADI
62	Vegetation Condition Index	VCI
63	Vegetation Drought Response Index	VegDRI
64	Vegetation Health Index	VHI
65	Water Index	WI

Ένα ενδιαφέρον ερώτημα μπορεί να τεθεί σε αυτό το σημείο: Αν υπάρχουν τόσοι δείκτες ξηρασίας για κάθε τύπο, τι κάνει τους επιστήμονες να αναπτύσσουν νέους δείκτες; Τα κίνητρα για την ανάπτυξη δεικτών ξηρασίας είναι πολλαπλά. Πρόκειται για μια ελκυστική διαδικασία από επιστημονική σκοπιά, που θα οδηγήσει σε μια μεθοδολογία κατάλληλη για την ανίχνευση, την παρακολούθηση και την εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας. Η αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών που παρέχουν νέας μορφής δεδομένα ή απλά πιο αξιόπιστες χρονοσειρές, καθώς και η εφαρμογή νέων ή τουλάχιστον δημοφιλών μεθοδολογιών από συναφείς επιστημονικούς κλάδους, αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες για την ανάπτυξη νέων δεικτών ξηρασίας. Εξίσου σημαντικό κίνητρο, υπήρξαν επίσης πάντοτε οι ανάγκες των επαγγελματιών, π.χ. στον αγροτικό τομέα ή τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Στην περίπτωση αυτή, έμφαση δίνεται στην αξιοπιστία και τη στιβαρότητα του δείκτη, αλλά κυρίως στη διαθεσιμότητα των δεδομένων που χρησιμοποιεί. Η ποικιλία για την ανάπτυξη νέων δεικτών αντικατοπτρίζεται στην ποικιλία των διαθέσιμων στη βιβλιογραφία

δεικτών. Για πρακτικές εφαρμογές ωστόσο, όπως η επιχειρησιακή παρακολούθηση της ξηρασίας, χρησιμοποιούνται σχετικά λίγοι δείκτες. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται πιθανότατα στη μειωμένη διαθεσιμότητα δεδομένων αλλά και τη διάχυτη αίσθηση ότι είναι καλύτερο να βασίζεται κανείς σε δοκιμασμένες μεθοδολογίες.

## 2.3 Περιγραφή γνωστών δεικτών ξηρασίας

### 2.3.1 Palmer Drought Severity Index – PDSI (Ο Δείκτης Palmer)

Ο Δείκτης που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε από τον W.C. Palmer το 1965 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έγινε γνωστός με την ονομασία Palmer Drought Severity Index - PDSI. Ο PDSI είναι ο πρώτος κατανοητός και περιεκτικός δείκτης ξηρασίας που αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες (Hayes et al., 2007). Η εννοιολογική βάση του PDSI είναι ότι η ποσότητα της βροχόπτωσης που απαιτείται για μια σχεδόν κανονική λειτουργία της υπάρχουσας οικονομίας μιας περιοχής κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης περιόδου, εξαρτάται από το μέσο κλίμα της περιοχής και από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και το διάστημα πριν την υπό μελέτη περίοδο. Η ένταση της ξηρασίας υπολογίζεται ως η αθροιστική διαφορά της πραγματικής βροχόπτωσης και αυτής που απαιτείται για την εξατμισοδιαπνοή. Αν και ο PDSI αναφέρεται ως ένας δείκτης μετεωρολογικής ξηρασίας, η διαδικασία λαμβάνει υπόψη τη βροχόπτωση, την εξατμισοδιαπνοή και τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους, που αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της υδρολογικής ξηρασίας (Tsakiris et al., 2007).

Ο υπολογισμός του PDSI ξεκινά με την εκτίμηση ενός κλιματικού υδατικού ισοζυγίου, που βασίζεται σε μεγάλου μήκους χρονοσειρές μηνιαίων κλιματολογικών στοιχείων. Με βάση τα μηνιαία κλιματολογικά στοιχεία υπολογίζονται οι παράμετροι του υδατικού ισοζυγίου. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (*PE*) στο δείκτη Palmer υπολογίζεται με τη μέθοδο του Thornthwaite. Για εφαρμόσιμα αποτελέσματα εισάγεται στους υπολογισμούς η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (*ET*), που θεωρείται συνάρτηση της *PE* και της εδαφικής υγρασίας (να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί που παρουσιάζονται στη μελέτη του Palmer (1965)). Εξαιτίας των δυσκολιών που υπάρχουν σε όσα αφορούν στη διαθεσιμότητα της υγρασίας του εδάφους, το έδαφος χωρίζεται σε δύο στρώσεις, την ανώτερη ή επιφανειακή στρώση και την κατώτερη ή ζώνη ριζοστρώματος. Η επιφανειακή στρώση θεωρείται ότι περιέχει 25 mm διαθέσιμης υγρασίας. Η διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα στην κατώτερη στρώση εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης

περιοχής και από το βάθος του ριζοστρώματος. Η απώλεια υγρασίας από την κατώτερη στρώση εξαρτάται από το αρχικό περιεχόμενο υγρασίας και από την PE. Ισχύουν επομένως οι σχέσεις:

$$L_S = \min[S_S, (PE - P)] \quad \text{αν } PE > P \quad (2.1)$$

$$L_U = \frac{[(PE - P) - L_S] S_U}{AWC} \quad L_U < S_U \quad (2.2)$$

όπου  $S_S$  και  $S_U$  είναι οι ποσότητες της διαθέσιμης αποθηκευμένης υγρασίας στην αρχή του μήνα στην επιφανειακή στρώση και στα υποκείμενα επίπεδα αντίστοιχα και  $L_U$  η απώλεια υγρασίας της κατώτερης στρώσης.  $AWC$  είναι η διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα και των δύο στρώσεων. Θεωρείται ότι δεν εμφανίζεται απορροή μέχρις ότου και οι δύο στρώσεις φτάσουν στην υδατοϊκανότητα.

Στο μηνιαίο υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι δυναμικοί όροι. Δυναμικός ανεφοδιασμός ( $PR$ ) είναι το ποσοστό της υγρασίας που απαιτείται για να φτάσει η υγρασία του εδάφους στην υδατοϊκανότητα. Η μαθηματική του έκφραση είναι η εξής:

$$PR = AWC - (S_S + S_U) \quad (2.3)$$

Δυναμική απώλεια ( $PL$ ) είναι το ποσό υγρασίας που θα μπορούσε να χαθεί από το έδαφος εφόσον ο υετός του μήνα είναι μηδέν. Η ισοδύναμη μαθηματική έκφραση έχει ως εξής:

$$PL = PL_S + PL_U \quad (2.4)$$

όπου

$$PL_S = \min[PE, S_S] \quad (2.5)$$

$$PL_U = \frac{(PE - PL_S) S_U}{AWC} \quad PL_U < S_U \quad (2.6)$$

Η δυναμική επιφανειακή απορροή ( $PRO$ ) αντιπροσωπεύει τη διαφορά του υετού και του δυναμικού ανεφοδιασμού του εδάφους σε νερό, σχετίζεται με το αρχικό ποσό της διαθέσιμης υδατοχωρητικότητας του εδάφους και θεωρείται ότι ισούται με αυτό. Η μαθηματική έκφρασή του είναι η ακόλουθη:

$$PRO = AWC - PR = S_S + S_U \quad (2.7)$$

Πριν τον υπολογισμό των μηνιαίων τιμών του PDSI, πρέπει να γίνει

βαθμονόμηση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου στα φυσιολογικά επίπεδα. Αυτό θα γίνει με την προσομοίωση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Με τον τρόπο αυτό εξάγονται διάφοροι κλιματικοί συντελεστές και παράμετροι για την υπό μελέτη περιοχή. Οι συντελεστές αυτοί είναι:

$$a_j = \frac{\overline{ET}_j}{\overline{PE}_j} \quad (2.8)$$

$$b_j = \frac{\overline{R}_j}{\overline{PR}_j} \quad (2.9)$$

$$c_j = \frac{\overline{RO}_j}{\overline{PRO}_j} \quad (2.10)$$

$$d_j = \frac{\overline{L}_j}{\overline{PL}_j} \quad (2.11)$$

όπου  $ET$  η εξατμισοδιαπνοή,  $R$  ο ανεφοδιασμός του εδάφους,  $RO$  η επιφανειακή απορροή,  $L$  η συνολική απώλεια νερού από το έδαφος και  $PE$ ,  $PR$ ,  $PRO$  και  $PL$  οι αντίστοιχοι δυνητικοί όροι. Οι συντελεστές  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  και  $d_j$  υπολογίζονται για κάθε μήνα  $j$ .

Οι συντελεστές που υπολογίζονται από τις πιο πάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την εκ νέου ανάλυση των χρονοσειρών με σκοπό τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ποσότητας υγρασίας για το «σύνηθες» κλίμα κάθε μήνα. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι «κλιματικά κατάλληλες τιμές» (Climatically Appropriate For Existing Conditions – CAFEC) για τις υπάρχουσες συνθήκες. Οι τιμές CAFEC για τις  $ET$ ,  $R$ ,  $RO$  και  $L$  του μήνα  $j$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\hat{ET}_j = a_j \cdot PE_j \quad (2.12)$$

$$\hat{R}_j = b_j \cdot PR_j \quad (2.13)$$

$$\hat{RO}_j = c_j \cdot PRO_j \quad (2.14)$$

$$\hat{L}_j = d_j \cdot PL_j \quad (2.15)$$

Εφαρμόζοντας το μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου, η τιμή CAFEC για τον υετό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\hat{P}_j = \hat{ET}_j + \hat{R}_j + \hat{RO}_j - \hat{L}_j \quad (2.16)$$

$$\text{ή } \hat{P}_j = a_j \cdot PE_j + b_j \cdot PR_j + c_j \cdot PRO_j - d_j \cdot PL_j \quad (2.17)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά  $D = P - \hat{P}$  μεταξύ του μετρημένου υετού και της τιμής CAFEC για τον υετό. Η διαφορά  $D$  αποτελεί ένδειξη του ελλείμματος ή πλεονάσματος νερού για το μήνα στην εξεταζόμενη περιοχή. Οι αποκλίσεις  $D$  μετατρέπονται στη συνέχεια σε «δείκτες ανωμαλίας υγρασίας»  $Z$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$Z_j = k_j \cdot D_j \quad (2.18)$$

όπου  $k_j$  είναι ένας σταθμισμένος συντελεστής για το μήνα  $j$  που χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει τις διαφορές  $D$  ώστε να είναι συγκρίσιμες για διαφορετικές περιοχές και χρονικές περιόδους. Ο συντελεστής  $k$  δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{PE + R}{P + L} \quad (2.19)$$

Ο συντελεστής  $k$  ονομάζεται κλιματικός χαρακτήρας και εξαρτάται από τη μέση έλλειψη υγρασίας μιας περιοχής. Ο αριθμητής της σχέσης (2.19) εκφράζει μέσες απαιτήσεις σε υγρασία και ο παρονομαστής μέση παροχή σε υγρασία, υπολογίζονται δε δώδεκα τιμές του  $k$ , μία για κάθε μήνα.

Στην τελευταία φάση οι σειρές του δείκτη  $Z$  αναλύονται για τον προσδιορισμό κριτηρίων έναρξης και λήξης των περιόδων ξηρασίας. Η μεθοδολογία του Palmer περιλαμβάνει τον υπολογισμό, για κάθε μήνα, τριών ενδιάμεσων δεικτών  $X_1$ ,  $X_2$  και  $X_3$  και ενός παράγοντα πιθανότητας. Ο Palmer εξέφρασε την έναρξη και τη λήξη της ξηρασίας (ή της υγρής περιόδου) σε σχέση με την πιθανότητα να έχει αρχίσει ή τελειώσει η ξηρή ή η υγρή περίοδος. Η ξηρή ή υγρή περίοδος έχει οριστικά τελειώσει όταν αυτή η πιθανότητα έχει φθάσει ή υπερβεί το 100%, ωστόσο η ξηρή ή υγρή περίοδος θεωρείται ότι τελείωσε τον πρώτο μήνα κατά τον οποίο η πιθανότητα έγινε μεγαλύτερη από 0% και συνέχισε να παραμένει πάνω από 0% μέχρι να φτάσει 100%. Κατά την περίοδο «αβεβαιότητας» σχετικά με το αν μια ξηρασία έχει ή δεν έχει τελειώσει (δηλαδή όταν η πιθανότητα είναι μεταξύ 0% και 100%), το μοντέλο υπολογίζει τους τρεις ενδιάμεσους δείκτες  $X_1$ ,  $X_2$  και  $X_3$ . Το  $X_1$  είναι η τιμή του δείκτη για την αρχόμενη υγρή περίοδο,  $X_2$  η τιμή του δείκτη για την αρχόμενη ξηρασία και  $X_3$  η τιμή του δείκτη για μια εγκατεστημένη ξηρασία. Και οι τρεις ενδιάμεσοι δείκτες υπολογίζονται με βάση την ακόλουθη εμπειρική έκφραση:



$$X_j = 0.897 \cdot X_{j-1} + \frac{Z_j}{3} \quad (2.20)$$

όπου  $Z_j$  είναι η τιμή του δείκτη  $Z$  για το μήνα  $j$ . Το μοντέλο του Palmer επιλέγει την τιμή του ενός από τους ενδιάμεσους δείκτες και τον θέτει στον PDSI ανάλογα με την τιμή της πιθανότητας. Για παράδειγμα, αν η πιθανότητα παίρνει μια τιμή μεταξύ 0 και 1, τότε ο PDSI παίρνει την τιμή του  $X_1$ , εάν η πιθανότητα παίρνει μια τιμή μεταξύ 0 και -1, τότε ο PDSI παίρνει την τιμή  $X_2$  και όταν η πιθανότητα λαμβάνει τις τιμές μεγαλύτερες από 1 ή μικρότερες από -1 τότε ο PDSI παίρνει την τιμή του  $X_3$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης  $Z$  παρέχει μια ένδειξη της επιμονής του φαινομένου ξηρασίας, ενώ ο PDSI υποδηλώνει τη σφοδρότητα της ξηρασίας.

Από έρευνες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και στον Καναδά έχουν υπολογιστεί τα όρια στις τιμές του PDSI, που παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί:

*Πίνακας 2.2. Κατηγορίες καιρού με βάση το δείκτη του Palmer (PDSI).*

<b>PDSI</b>		<b>Κατηγορία καιρού</b>	
>	4.00	Εξαιρετικά υγρός	
3.00	έως 3.99	Πολύ υγρός	
2.00	έως 2.99	Μέτρια υγρός	
1.00	έως 1.99	Ελαφρά υγρός	
0.50	έως 0.99	Ασθενικά υγρός	
0.49	έως -0.49	Σχεδόν φυσιολογικός	
-0.50	έως -0.99	Ασθενής ξηρασία	
-1.00	έως -1.99	Ελαφρά ξηρασία	
-2.00	έως -2.99	Μέτρια ξηρασία	
-3.00	έως -3.99	Ισχυρή ξηρασία	
<	-4.00	Ακραία ξηρασία	

Ο Δείκτης Palmer έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στις Ηνωμένες Πολιτείες αλλά και σε πολλές άλλες χώρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Νότιος Αφρική, όπου ο Δείκτης Palmer χρησιμοποιήθηκε έως το 1982 για την παραγωγή μιας βάσης δεδομένων ψηφιακών χαρτών. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της παρουσίας της ξηρασίας και στη συνέχεια για την παρακολούθηση της εξέλιξής της. Ωστόσο, γύρω στα 1990 τα εργαστήρια για την ξηρασία του SARCCUS (Southern African Regional Commission for the Conservation and Utilisation of the Soil) γνωστοποίησαν τον ισχυρισμό ότι η εμπειρία της Νοτίου Αφρικής με τον Δείκτη Palmer κάθε άλλο παρά ικανοποιητική μπορούσε να χαρακτηριστεί. Αν και είχε φτάσει σε εξαιρετικό επίπεδο σε όσα αφορούν στους υπολογισμούς και στους χάρτες, δεν

κατάφερε να ικανοποιήσει τις ανάγκες δημιουργίας πολιτικής και δεν απέδωσε πάντα τέτοιες τιμές του δείκτη που να μπορούν να συσχετιστούν ικανοποιητικά με πραγματικές επί τόπου εκτιμήσεις. Ένας γνωστός περιορισμός του δείκτη υπάρχει σχετικά με τις μικρής χρονικής περιόδου μεταβολές στην εδαφική υγρασία, που επηρεάζει την παραγωγή και γενικότερα τις γεωργικές εργασίες. Επίσης, η έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων στις ξηρές περιοχές της Νότιας Αφρικής δυσκόλεψαν την εφαρμογή του. Ο PDSI είναι σχετικά περίπλοκος αφού απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό πρωτογενών μετεωρολογικών και υδρολογικών δεδομένων (Tate and Gustard, 2000).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες ο PDSI έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον, κυρίως από την NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) και για τους 344 κλιματικούς τομείς της χώρας. Πολλά κυβερνητικά τμήματα αλλά και ιδιωτικές εταιρίες χρησιμοποιούν αυτόν τον δείκτη για τη διαχείριση και το σχεδιασμό των μέτρων για την αντιμετώπιση της ξηρασίας σε πραγματικό χρόνο. Συνήθως ως γεγονός ξηρασίας θεωρείται η εμφάνιση του φαινομένου για τρεις ή και περισσότερους διαδοχικούς μήνες με τιμή του PDSI  $\leq -2.0$ , ενώ μια περίοδος έξι ή περισσότερων μηνών θεωρείται σημαντικό περιστατικό ξηρασίας. Το τέλος του γεγονότος ξηρασίας θεωρείται ο τελευταίος στη σειρά μήνας που ο PDSI διατηρεί τιμή  $\leq -2.0$ .

### 2.3.2 Δείκτες ξηρασίας που αναπτύχθηκαν με βάση το μοντέλο του Palmer

Τέσσερις δείκτες που αναπτύχθηκαν με βάση το μοντέλο του Palmer είναι:

- PDSI, ο Δείκτης Palmer (που αναπτύχθηκε πιο πάνω),
- Palmer Hydrologic Drought Index - PHDI, (Δείκτης Υδρολογικής Ξηρασίας του Palmer),
- Palmer Monthly Moisture Anomaly Index - ZINX, (Δείκτης μηνιαίας ανωμαλίας της υγρασίας, γνωστός και ως Δείκτης Z (Z Index)),
- Colorado Palmer Drought Index - CPDI (Δείκτης Palmer του Colorado).

Η προσέγγιση του Palmer στον ορισμό της ξηρασίας συνεπάγεται δύο σημαντικά συμπεράσματα. Το πρώτο είναι ότι η ανισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης σε νερό είναι το κλειδί στον ορισμό της ξηρασίας. Το δεύτερο είναι ότι η ένταση της ξηρασίας δεν εξαρτάται μόνο από το έλλειμμα νερού της περιοχής, αλλά και από τα χαρακτηριστικά αντίστασης στην ξηρασία της ευρύτερης περιοχής (τρωτότητα του συστήματος).

Οι διάφοροι δείκτες έχουν διαφορετικούς βαθμούς απόκρισης στις μεταβολές της προσφοράς και ζήτησης σε υγρασία και επομένως

αντιπροσωπεύουν και διαφορετικούς τύπους ξηρασίας. Αντί να προέρχονται από βασικές μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου, έχουν πολύπλοκες διαδικασίες μαθηματικών υπολογισμών. Σε όσα αφορούν τους τύπους της ξηρασίας, ο δείκτης ZINX μπορεί να θεωρηθεί καταλληλότερος ως μέτρο της έντασης της γεωργικής ξηρασίας, ενώ ο PDSI συνήθως θεωρείται μέτρο της έντασης της μετεωρολογικής ξηρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί ο PDSI έχει την τάση να ανταποκρίνεται πολύ αργά για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο της γεωργικής ξηρασίας και πολύ γρήγορα για να μπορεί να εκτιμήσει συνθήκες υδρολογικής ξηρασίας, όπως την ποτάμια ροή και τις στάθμες των υπογείων υδροφορέων, με ικανοποιητική ακρίβεια. Παρόλα αυτά η πρωταρχική του χρήση ως γενικό μέτρο της έντασης της ξηρασίας εξακολουθεί να είναι σημαντική.

Ο PHDI είναι ένας δείκτης που προκύπτει από τον PDSI μετά από μεταβολή των διαδικασιών των μαθηματικών υπολογισμών. Ο PHDI αναπτύσσεται ως ένας δείκτης που μπορεί να εκτιμήσει καλύτερα τις ανωμαλίες της υγρασίας που επιδρούν στη ροή των ποταμών, στη διαθεσιμότητα των υπογείων νερών και στη στάθμη των λιμνών και των ταμιευτήρων.

Ο CPDI, δηλαδή η έκδοση του Colorado για τον Δείκτη Palmer, είναι μια εκδοχή του Δείκτη Palmer η οποία χρησιμοποιεί δεδομένα για μικρότερες εκτάσεις. Είναι χρήσιμος σε χαμηλότερα υψόμετρα, ειδικά για την εφαρμογή της εδαφικής υγρασίας στη γεωργία.

Είναι φανερό ότι τέτοιου είδους δείκτες μπορεί να δίνουν μια εικόνα της ξηρασίας, δεν είναι όμως ιδιαίτερα χρήσιμοι στη γενικότερη διαχείριση των υδατικών πόρων και στο σχεδιασμό. Οι αρμόδιοι για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των ακραίων μορφών της ξηρασίας, αλλά και οποιουδήποτε τύπου ξηρασίας γενικότερα, θα έπρεπε να στηρίζονται στις τιμές ενός δείκτη που αντιστοιχεί στην αναμενόμενη διάρκεια ή περίοδο επαναφοράς του φαινομένου, παρά στη χρήση αυθαίρετων κατωφλίων σαν αυτά του Palmer ([Guttman et al., 1992](#)).

### 2.3.3 Percent of Normal Precipitation (Ποσοστά της φυσιολογικής βροχόπτωσης)

Τα ποσοστά της φυσιολογικής βροχόπτωσης είναι από τους απλούστερους τρόπους προσδιορισμού της ξηρασίας σε μια περιοχή. Αναλύσεις που χρησιμοποιούν τα ποσοστά της συνηθισμένης τιμής της βροχόπτωσης σε μια περιοχή έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικές όταν χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένη περιοχή ή για μια συγκεκριμένη εποχή του χρόνου. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συχνά είναι δύσκολο να γίνουν κατανοητά, αφού διαφορετικές καταστάσεις μπορούν να περιγραφούν με τα ίδια ποσοστά σε

διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις ή εποχές του χρόνου. Ως φυσιολογική βροχόπτωση τυπικά θεωρείται η μέση τιμή της βροχόπτωσης μιας περιόδου τριάντα ετών (Hayes et al., 2007).

Ο υπολογισμός των ποσοστών της φυσιολογικής βροχόπτωσης γίνεται διαιρώντας την πραγματική τιμή της βροχόπτωσης σε ένα σημείο με τη μέση τιμή της βροχόπτωσης και πολλαπλασιάζοντας με 100%. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει για διάφορες χρονικές κλίμακες, που συνήθως κυμαίνονται από ένα μήνα ή έναν αριθμό συνεχόμενων μηνών που μπορεί να αντιπροσωπεύουν μια εποχή έως ένα ολόκληρο ημερολογιακό ή υδρολογικό έτος.

Η μέθοδος είναι προφανώς απλή στην εφαρμογή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προκαταρκτική κυρίως ανάλυση. Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι συχνά η μέση τιμή της βροχόπτωσης δεν είναι η ίδια με τη τιμή που θα ξεπεραστεί στο 50% των περιπτώσεων. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις όπου οι εποχιακές ή οι μηνιαίες κλίμακες δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στην περίπτωση αυτή, τα ποσοστά της βροχόπτωσης δεν εκφράζουν ακριβώς την κατάσταση ξηρασίας που θα έπρεπε να εκφράζουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσκολία σύνδεσης των ποσοστών με συγκεκριμένες επιπτώσεις μια ξηρασίας και επομένως και της προσπάθειας μετριάσμού των επιπτώσεων αυτών.

Η κλιμάκωση των ποσοστών που θα χρησιμοποιηθούν για την ενοποίηση και παρουσίαση των περιοχών που πλήττονται από ξηρασία διαφορετικής έντασης, ώστε τα αποτελέσματα να έχουν αξία για διαφορετικές περιοχές ή εποχές του χρόνου, αποτελεί θέμα προς έρευνα. Στον ευρωπαϊκό χώρο έχει παρουσιαστεί μια κλιμάκωση με εύρος 20%, που σημαίνει ότι οι περιοχές που βρίσκονται στο χαμηλότερο 20% παρουσιάζουν έντονη ξηρασία. Αντίστοιχα οι τιμές που βρίσκονται μεταξύ 40% και 60% της μέσης τιμής της βροχόπτωσης αποτελούν τη ζώνη της φυσιολογικής κατάστασης της περιοχής.

### 2.3.4 Deciles of Precipitation (Δέκατα της βροχόπτωσης)

Η έννοια των δεκάτων της βροχόπτωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη της ξηρασίας. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Gibbs and Maher (1967) με σκοπό να ξεπεραστούν οι αδυναμίες της προσέγγισης των ποσοστών της φυσιολογικής βροχόπτωσης. Η τεχνική που αναπτύχθηκε χωρίζει την κατανομή μιας μεγάλης διάρκειας χρονοσειράς βροχοπτώσεων σε δέκατα της κατανομής. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες ονομάστηκε decile (δεκατημόριο). Το πρώτο δεκατημόριο είναι αυτό στο οποίο το ύψος των βροχοπτώσεων δεν υπερβαίνει το χαμηλότερο 10% βροχόπτωσης. Το δεύτερο δεκατημόριο είναι αυτό κατά το οποίο η βροχόπτωση δεν υπερβαίνει το

χαμηλότερο 20% και ούτω καθ' εξής, μέχρι το ποσό βροχής στο δέκατο δεκατημόριο να είναι το μεγαλύτερο ποσό βροχοπτώσεων κατά την μακρά χρονοσειρά. Εξ ορισμού, το πέμπτο δεκατημόριο είναι η διάμεσος, κατά το οποίο η βροχόπτωση δεν υπερβαίνει το 50% του συνόλου για την περίοδο που αξιολογείται. Τα deciles ομαδοποιούνται σε πέντε κλάσεις, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί:

*Πίνακας 2.3. Κατηγορίες ξηρασίας με βάση το δείκτη Deciles.*

<b>Deciles</b>		<b>Κατηγορία καιρού</b>
1-2	< 20%	σημαντικά κάτω του φυσιολογικού
3-4	20% - 40%	κάτω του φυσιολογικού
5-6	40% - 60%	σχεδόν φυσιολογικός
7-8	60% - 80%	πάνω του φυσιολογικού
9-10	80% - 100%	σημαντικά άνω του φυσιολογικού

Η μέθοδος των Deciles επιλέχθηκε ως η μετεωρολογική μέτρηση της ξηρασίας στο πλαίσιο του συστήματος παρακολούθησης της ξηρασίας της Αυστραλίας, επειδή είναι σχετικά απλή στον υπολογισμό και απαιτεί λιγότερα δεδομένα και λιγότερες υποθέσεις σε σχέση με τον δείκτη ξηρασίας του Palmer (Smith et al., 1993). Σύμφωνα με το σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας στην Αυστραλία, οι γεωργοί και κτηνοτρόφοι μπορούν να ζητήσουν τη βοήθεια της κυβέρνησης μόνο εάν το γεγονός ξηρασίας που αντιμετωπίζουν αποδειχθεί ότι συμβαίνει μόνο μια φορά σε διάστημα 20-25 χρόνων (δηλαδή ανήκει στα δεκατημόρια 1 και 2 υπολογιζόμενα για μια χρονοσειρά 100 ετών) και έχει διαρκέσει περισσότερο από 12 μήνες. Αυτή η ομοιομορφία στην ταξινόμηση της ξηρασίας, σε αντίθεση με ένα σύστημα που βασίζεται στα ποσοστά της φυσιολογικής βροχόπτωσης, έχει βοηθήσει τις αρχές της Αυστραλίας για τον προσδιορισμό κατάλληλων μέτρων αντίδρασης στην ξηρασία. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί μεγάλη κλιματολογική χρονοσειρά για να υπολογίσει με ακρίβεια τα δεκατημόρια.

### 2.3.5 Foley Drought Index (Δείκτης ξηρασίας του Foley)

Η υπέρβαση του ελλείμματος της μηνιαίας βροχόπτωσης ή της βροχόπτωσης μιας περιόδου γενικότερα, συγκρινόμενη με τον αντίστοιχο μέσο όρο μιας μακράς περιόδου μπορεί να ολοκληρωθεί με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός γραφήματος αθροιστικών αποκλίσεων, γνωστό ως «καμπύλη αθροιστικών υπολοίπων». Μια διαδοχική σειρά ανεπαρκειών μπορεί να οδηγήσει σε ένα αξιοσημείωτο συνολικό έλλειμμα, το οποίο προσδιορίζει την περίοδο ξηρασίας. Το γράφημα έχει το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζει καθαρά τόσο τη διάρκεια όσο και την ένταση του ελλείμματος της βροχόπτωσης. Από την άλλη

πλευρά, παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι όλα τα ελλείμματα έχουν την ίδια βαρύτητα ανεξάρτητα από το νερό που απαιτούν οι καλλιέργειες. Ο Foley (1957) εξέφρασε τα ελλείμματα σε ποσοστά επί τις χιλίους της ετήσιας βροχόπτωσης, τα οποία ονόμασε «μονάδες» για συντομία. Οι μονάδες δημιουργήθηκαν ως μια μέθοδος εκτίμησης μιας ξηρής περιόδου και μπορούν να διαιρεθούν με τον αριθμό των μηνών της περιόδου που εξετάζεται δίνοντας ένα δείκτη της έντασης της ξηρασίας. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε μεγάλες περιόδους ξηρασίας σε περιοχές της Αυστραλίας.

### 2.3.6 Rainfall Deficiency Indices (Δείκτες ελλείμματος βροχόπτωσης)

Πρόκειται για δείκτες που στηρίζονται στα μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης. Τέτοιου είδους δείκτες προσδιορίζουν εύκολα περιόδους με έλλειμμα βροχόπτωσης, αλλά απαιτούν προσεκτική ερμηνεία αφού το φαινομενικό μέγεθος κάθε επεισοδίου χαμηλής βροχόπτωσης μπορεί να είναι ευαίσθητο στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν το τέλος κάθε ξηρασίας. Αυτό συνέβη κατά την ξηρασία του 1988-92 στο Ηνωμένο Βασίλειο, όπου η ξηρασία θεωρήθηκε ότι τελείωσε όταν για μια περίοδο έξι μηνών η βροχόπτωση ξεπέρασε το μέσο όρο. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μεθοδολογία, σημαντικά αθροιστικά ελλείμματα μπορεί να εξακολουθούν να υπάρχουν μετά το πέρας της ξηρασίας.

Δείκτες τέτοιου είδους είναι πιθανό να προσδιορίσουν τη διάρκεια και την ένταση της βροχόπτωσης, καθώς και το μήνα έναρξης και παύσης του φαινομένου. Επίσης υπολογίζεται ένας δείκτης ξηρασίας ο οποίος επιτρέπει τη σύγκριση της έντασης της ξηρασίας ανεξάρτητα από την εποχή της εμφάνισής της. Οι ερευνητές προτείνουν ότι η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο εφαρμόσιμη στη Νότια Αφρική από ότι οι Βρετανικές και Αυστραλιανές μέθοδοι, λόγω της οξείας, παρατεταμένης και εκτεταμένης φύσης της ξηρασίας που επικρατεί συνήθως στη Νότια Αφρική (Herbst et al., 1966).

Η μέθοδος αναγνωρίζει ότι το όφελος στις καλλιέργειες από την άνω του μέσου όρου βροχόπτωση παραμένει για μια χρονική περίοδο μετά την πτώση της βροχόπτωσης και αντίστοιχα, οι καλλιέργειες χρειάζονται κάποιο χρόνο ώστε να επανακάμψουν μετά το τέλος της ξηρασίας. Έτσι, η χρονική μεταφορά των επιπτώσεων της βροχόπτωσης λαμβάνεται υπόψη, ώστε το έλλειμμα ή η υπέρβαση ενός συγκεκριμένου μήνα να διατηρηθεί και η τιμή της να χρησιμοποιηθεί στην εξαγωγή της τιμής της «ενεργούς βροχόπτωσης». Το μέσο μηνιαίο έλλειμμα βροχόπτωσης μπορεί τότε να υπολογιστεί από την ενεργό βροχόπτωση σε σχέση με τη μέση μηνιαία βροχόπτωση. Ο δείκτης της ξηρασίας υπολογίζεται από το μέσο μηνιαίο έλλειμμα βροχόπτωσης διαιρεμένο με το μέσο

μηνιαίο έλλειμμα της ίδιας περιόδου και πολλαπλασιασμένο με την περίοδο της ξηρασίας.

### 2.3.7 Isoline Maps (Χάρτες ισότιμων καμπυλών)

Χάρτες με καμπύλες ίσων τιμών παραμέτρων για την περιγραφή περασμένων ξηρασιών με δεδομένο χρονικό βήμα μπορούν να σχεδιαστούν με τη χρήση διάφορων περιγραφικών χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, το ύψος βροχόπτωσης σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό επί τις εκατό της μέσης τιμής για το ίδιο χρονικό διάστημα και για συγκεκριμένο αριθμό ετών. Ένα δεύτερο περιγραφικό στοιχείο μπορεί να είναι η απόκλιση από τη συνήθη βροχόπτωση σε μια περασμένη περίοδο ξηρασίας δεδομένης διάρκειας, εκφρασμένη σαν απόλυτη τιμή ή αναλογία ή ποσοστό επί τοις εκατό της διαφοράς, σε σχέση με τη μέση βροχόπτωση (π.χ. έλλειμμα βροχόπτωσης). Ένα ακόμη περιγραφικό στοιχείο της ξηρασίας είναι το τυποποιημένο έλλειμμα που λαμβάνεται ως ο λόγος της απόκλισης της βροχόπτωσης από τη μέση τιμή προς την τυπική απόκλιση, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Μια πιο συμπαγής περιγραφή της περιοχικής έκτασης μιας ιστορικής ξηρασίας μπορεί να σχεδιαστεί από τη σχέση μεταξύ του επί τοις εκατό ποσοστού της μέσης βροχόπτωσης (ή κάποιου άλλου δείκτη ξηρασίας) και της επιφανειακής κάλυψης της ξηρασίας. Τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ξηρασίας μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση στοχαστικών μοντέλων. Δύο μέθοδοι μπορούν να υιοθετηθούν για τον διαχωρισμό των αιτιοκρατικών και των στοχαστικών στοιχείων: η παραμετρική και η μη παραμετρική μέθοδος. Και στις δύο περιπτώσεις, οι σταθερές στοχαστικές σειρές στοιχείων ενός δεδομένου σταθμού δημιουργούνται από τις τυποποιημένες τιμές της βροχόπτωσης. Ένα γενικό μαθηματικό μοντέλο της χρονικής κατανομής της μηνιαίας βροχόπτωσης μπορεί να κατασκευαστεί με την ανάλυση σειρών Fourier, για την περιγραφή της περιοδικής μεταβλητότητας των παραμέτρων. Όταν το μαθηματικό μοντέλο της βασικής υδρολογικής διαδικασίας ολοκληρωθεί, οι επιλεγμένοι δείκτες ξηρασίας μπορούν να υπολογιστούν και να αναλυθούν. Πρέπει να επιλεγεί επίσης ένα επίπεδο στρογγυλοποίησης. Μια απλή προσέγγιση είναι να θεωρηθεί ότι η ζήτηση νερού ισοδυναμεί με το μέσο όρο της βασικής μεταβλητής (Rossi et al., 1992).

Δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην έρευνα χαρακτηριστικών της επιφανειακής ξηρασίας στη βάση ενός πλέγματος μοναδιαίων τετραγώνων, όπως για παράδειγμα το πλέγμα από το δίκτυο των πολυγώνων Thiessen, είναι:

- η ελλειμματική περιοχή, προσδιορισμένη για συγκεκριμένη χρονική

περίοδο ως ο αριθμός των μοναδιαίων περιοχών που παρουσιάζουν έλλειμμα για συγκεκριμένο επίπεδο στρωγγυλοποίησης της σταθεροποιημένης μεταβλητής,

- η συνολική ελλειμματική περιοχή, που προσδιορίζεται ως το σύνολο των ελλειμματικών περιοχών στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και
- το μέγιστο έλλειμμα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

### 2.3.8 Poisson Process (Η μέθοδος Poisson)

Η μέθοδος του Poisson βασίζεται στην κατανομή των μέγιστων ξηρών περιόδων μεταξύ των γεγονότων βροχόπτωσης σε κάποιο σημείο μια συγκεκριμένη εποχή. Η κατανομή του αριθμού των γεγονότων βροχής μέσα σε μια εποχή θεωρείται ότι ακολουθεί την ομογενοποιημένη μέθοδο του Poisson. Με βάση την υπόθεση του Poisson οι συναρτήσεις κατανομής των δύο τυχαίων μεταβλητών, δηλαδή της μέγιστης ξηρής περιόδου μέσα σε μια εποχή και του χρόνου αναμονής για την εκδήλωση της πρώτης κρίσιμης ξηρής περιόδου, είναι δεδομένες. Οι στατιστικές στιγμές και στις δύο περιπτώσεις μπορούν να υπολογιστούν ([Tate and Gustard, 2000](#)).

### 2.3.9 Palfai Aridity Index - PAI (Δείκτης ξηρότητας του Palfai)

Ο δείκτης ξηρότητας του Palfai είναι ο λόγος της μέσης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της περιόδου από τον Απρίλιο έως τον Αύγουστο, προς τη μέση βροχόπτωση από τον Οκτώβριο έως τον Αύγουστο. Σε έρευνες του ίδιου του Palfai στην Ουγγαρία διαπιστώθηκε ότι ο PAI συσχετίζεται πολύ καλά με τον PDSI και ο Palfai επέλεξε ως κατώφλι την τιμή  $PAI=6.5$  για να ορίσει τη «σημαντική» ξηρασία ([Palfai, 1990](#)). Ο δείκτης εστιάζει στην κύρια εποχή ανάπτυξης των καλλιεργειών. Ωστόσο πολλοί ερευνητές, όπως ο [Pereira \(1990\)](#), θεωρούν ότι περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη πριν χρησιμοποιηθεί ο δείκτης σε περιοχές με κλιματικές συνθήκες διαφορετικές από αυτές της Ουγγαρίας.

### 2.3.10 Surface Water Supply Index – SWSI (Δείκτης επιφανειακής τροφοδοσίας σε νερό)

Άλλος ένας δείκτης που αναπτύχθηκε στο Colorado είναι ο δείκτης επιφανειακής τροφοδοσίας σε νερό. Αποτελεί έναν από τους αρκετούς δείκτες που αναπτύχθηκαν στην Αμερική, όπου σχεδόν κάθε Πολιτεία έχει υιοθετήσει έναν δικό της δείκτη για την παρακολούθηση της ξηρασίας.

Ο SWSI που αναπτύχθηκε από τους [Shafer and Dezman \(1982\)](#) ενοποιεί ιστορικά δεδομένα με τρέχουσες τιμές ποτάμιας ροής, αποθηκευμένου νερού σε ταμιευτήρες και βροχόπτωσης σε ψηλά υψόμετρα, σε μια μόνο τιμή ενός δείκτη.



Ο δείκτης προτείνεται να λειτουργεί ως συμπλήρωμα του PDSI. Είναι χρήσιμος για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας νερού στα στρώματα χιονιού, τους ταμειυτήρες και τα ποτάμια, σε αντίθεση με τον PDSI που δεν μπορεί να ερμηνεύσει τη συσσώρευση και το λιώσιμο του χιονιού. Σκοπός του SWSI είναι να αποτελεί μια ένδειξη της διαθεσιμότητας νερού σε έναν ολόκληρο τομέα, να είναι προγνωστικός και να επιτρέπει τη σύγκριση των συνθηκών τροφοδοσίας νερού μεταξύ διαφόρων λεκανών ώστε να εκτιμά τη σχετική δριμύτητα της ξηρασίας.

Αρχικά ο SWSI διατυπώθηκε ως το σταθμισμένο άθροισμα των πιθανοτήτων μη υπέρβασης τεσσάρων υδρολογικών συνιστωσών: της χιονόπτωσης, της βροχόπτωσης, της ποτάμιας ροής και της επιφανειακής αποθήκευσης. Η μαθηματική του διατύπωση είναι η ακόλουθη:

$$SWSI = \frac{a \cdot P_{snow} + b \cdot P_{prec} + c \cdot P_{strm} + d \cdot P_{resv} - 50}{12} \quad (2.21)$$

όπου:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$  τα βάρη για κάθε υδρολογική συνιστώσα, με  $a+b+c+d=1$ ,  $P_i$  η πιθανότητα μη υπέρβασης (σε ποσοστό %) για τη συνιστώσα  $i$ , και  $snw$ ,  $prec$ ,  $strm$  και  $resv$  είναι οι υδρολογικές συνιστώσες χιονόπτωση, βροχόπτωση, ποτάμια ροή και επιφανειακή αποθήκευση αντίστοιχα.

Αφαιρώντας το 50 και διαιρώντας με το 12 ακολουθούμε μια διαδικασία στρογγυλοποίησης και συρρίκνωσης, σχεδιασμένη να φέρει την τελική τιμή στην ίδια τάξη μεγέθους με τις τιμές του PDSI (Garen, 1993).

### 2.3.11 Crop Moisture Index - CMI (Δείκτης Υγρασίας Καλλιέργειας)

Ο δείκτης υγρασίας καλλιέργειας αναπτύχθηκε από τον Palmer (1968) ως συμπλήρωμα του δείκτη PDSI, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των βραχυπρόθεσμων αλλαγών στις συνθήκες υγρασίας που πλήττουν τις καλλιέργειες. Ο CMI είναι το άθροισμα των ελλειμμάτων εξατμισοδιαπνοής (σε σχέση με κανονικές συνθήκες) και των ποσοτήτων νερού που επανατροφοδοτούν το έδαφος. Οι όροι αυτοί υπολογίζονται σε εβδομαδιαία βάση, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του PDSI, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη μέση θερμοκρασία, τη συνολική βροχόπτωση και τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους της προηγούμενης εβδομάδας. Ο CMI μπορεί να εκτιμήσει τις παρούσες συνθήκες για τις καλλιέργειες αλλά μπορεί γρήγορα να μεταβληθεί, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί αξιόλογο εργαλείο για την μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της ξηρασίας. Για παράδειγμα, μια ευεργετική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια μιας ξηρής περιόδου μπορεί να κάνει τον δείκτη CMI να δώσει ικανοποιητική κατάσταση υγρασίας, ενώ στην πραγματικότητα η ξηρασία συνεχίζει να υφίσταται

στην περιοχή.

Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο ο CMI δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση μεγάλης διάρκειας ξηρασίας είναι το γεγονός ότι αρχίζει και τελειώνει κάθε νέα καλλιεργητική περίοδο κοντά στο μηδέν, με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλος μόνο για την καλλιεργητική περίοδο. Κατά συνέπεια, ο CMI είναι καταλληλότερος για την εκτίμηση των γεωργικών ξηρασιών σε σχέση με τον PDSI ή τον Z-Index (Karl, 1986).

#### 2.3.12 Soil Moisture Anomaly Index – SMAI (Δείκτης Ανωμαλίας Εδαφικής Υγρασίας)

Ο Δείκτης Ανωμαλίας Εδαφικής Υγρασίας αναπτύχθηκε από τους Bergman et al (1988) για τον χαρακτηρισμό της ξηρασίας σε παγκόσμια βάση. Η μέθοδος βασίζεται ολοκληρωτικά στη μέθοδο εντοπισμού υγρασίας του Thornthwaite (δηλαδή, στην παρακολούθηση των κατακρημνίσεων και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής) και λειτουργεί στο πλαίσιο ενός μοντέλου εδάφους δύο στρωμάτων που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κίνησης του νερού, οδηγώντας τελικά στην εκτίμηση σε ποσοστό επί τοις εκατό του κορεσμού του εδάφους. Προσομοιώσεις δείχνουν ότι οι τιμές του δείκτη SMAI αλλάζουν με ένα ρυθμό που βρίσκεται ανάμεσα στον σχετικά γρήγορο CMI και στον σχετικά αργό PDSI.

#### 2.3.13 Bhalme-Mooley Drought Index – BMDI (Ο Δείκτης των Bhalme και Mooley)

Ο Δείκτης των Bhalme και Mooley (1980) παρέχει ένα καλό μέτρο της παρούσας κατάστασης της ξηρασίας που προέρχεται από μικρά ξηρά χρονικά διαστήματα, σε αντίθεση με τον PDSI ο οποίος σχεδιάστηκε για την εκτίμηση της έντασης και της συχνότητας παρατεταμένων περιόδων με ξηρές συνθήκες. Ο Δείκτης των Bhalme και Mooley είναι απλός, αφού ο υπολογισμός του στηρίζεται μόνο σε δεδομένα μηνιαίας βροχόπτωσης αποφεύγοντας δύσκολες στην εκτίμησή τους παραμέτρους όπως η εξατμισοδιαπνοή και η εδαφική υδατοϊκανότητα. Απαιτεί ωστόσο μεγάλο πλήθος δεδομένων από πολλούς βροχομετρικούς σταθμούς για περιοχικές αναλύσεις στις οποίες συνήθως χρησιμοποιείται.

#### 2.3.14 Rainfall Anomaly Index – RAI (Δείκτης Ανωμαλιών Βροχόπτωσης)

Ο Δείκτης Ανωμαλιών Βροχόπτωσης αναπτύχθηκε από τον van Roy (1965) και ενσωματώνει μια διαδικασία ταξινόμησης του μεγέθους των θετικών και αρνητικών ανωμαλιών της βροχόπτωσης. Ο δείκτης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$RAI = \pm 3 \frac{P - \bar{P}}{\bar{E} - \bar{P}} \quad (2.22)$$

όπου  $P$  η μετρημένη βροχόπτωση,  $\bar{P}$  η μέση βροχόπτωση και  $\bar{E}$  η μέση τιμή των δέκα ακραίων τιμών βροχόπτωσης. Για τις θετικές ανωμαλίες βροχόπτωσης η  $\bar{E}$  παίρνει θετικό πρόσημο και η τιμή της είναι η μέση τιμή των δέκα υψηλότερων τιμών βροχόπτωσης της χρονοσειράς που εξετάζεται, ενώ για αρνητικές ανωμαλίες βροχόπτωσης παίρνει αρνητικό πρόσημο και η τιμή της είναι η τιμή των δέκα χαμηλότερων τιμών βροχόπτωσης της χρονοσειράς. Οι τιμές του δείκτη κατατάσσονται σε 9 κατηγορίες από ακραία υγρή ως ακραία ξηρή. Ο Oladipo (1985) ανακάλυψε ότι οι διαφορές ανάμεσα στον RAI και στους πιο πολύπλοκους δείκτες όπως οι δείκτες που στηρίζονται στο μοντέλο Palmer ή ο δείκτης Bahlme-Mooley είναι αμελητέες. Επίσης, οι Loukas et al (2003) έδειξαν ότι αν ο RAI χρησιμοποιηθεί αθροιστικά σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον SPI.

### 2.3.15 The Streamflow Drought Index - SDI (Δείκτης ξηρασίας Απορροής)

Σύμφωνα με τους Nalbantis and Tsakiris (2009), αν είναι διαθέσιμη μια χρονοσειρά μηνιαίων όγκων απορροής  $Q_{i,j}$ , όπου  $i$  το υδρολογικό έτος και  $j$  ο μήνας του συγκεκριμένου υδρολογικού έτους (με  $j=1$  για το μήνα Οκτώβριο), τότε:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2.23)$$

όπου  $V_{i,k}$  ο αθροιστικός όγκος απορροής για το υδρολογικό έτος  $i$  και την περίοδο αναφοράς  $k$ , με  $k=1$  για την περίοδο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου,  $k=2$  για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου,  $k=3$  για την περίοδο Οκτωβρίου-Ιουνίου και  $k=4$  για την περίοδο Οκτωβρίου-Σεπτεμβρίου.

Με βάση τους αθροιστικούς όγκους απορροής  $V_{i,k}$ , ο SDI ορίζεται για κάθε περίοδο αναφοράς  $k$  του υδρολογικού έτους  $i$  ως εξής:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad i = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (2.24)$$

όπου  $\bar{V}_k$  και  $s_k$  η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των αθροιστικών όγκων απορροής της περιόδου αναφοράς  $k$ , αντίστοιχα, όπως εκτιμούνται για μια μακρά χρονική περίοδο.

Σύμφωνα με τον SDI μπορούν να αναγνωριστούν πέντε καταστάσεις

ξηρασίες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται από τον Standardized Precipitation Index. Οι καταστάσεις αυτές συμβολίζονται με έναν ακέραιο αριθμό μεταξύ 0 (χωρίς ξηρασία) και 4 (ακραία ξηρασία) και ορίζονται σύμφωνα με τα κριτήρια του Πίνακα 2.4 (Nalbantis, 2008).

Το πρόβλημα της αντιμετώπισης της διακοπτόμενης ή εφήμερης ροής είναι πολύ σημαντικό, όταν πρόκειται για υδρολογικές ξηρασίες. Τρεις περιπτώσεις μπορούν να διακριθούν: (1) υδατόρευμα με μόνιμη ροή, (2) υδατόρευμα με εφήμερη ροή και όχι ολοκληρωτικά ξηρό καθ' όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους, (3) υδατόρευμα χωρίς ροή σε ορισμένα υδρολογικά έτη. Σύμφωνα με τον ορισμό του SDI, η περίπτωση 2 δεν είναι αξιοποιήσιμη, δεδομένου ότι η αθροιστική απορροή θα λαμβάνει πάντα κάποια θετική τιμή. Παραμένει έτσι μόνο η περίπτωση των απολύτως ξηρών υδρολογικών ετών (περίπτωση 3), η οποία αυθαίρετα κατατάσσεται στην κατηγορία της ακραίας ξηρασίας (κατάσταση 4).

Πίνακας 2.4. Ορισμός των καταστάσεων υδρολογικής ξηρασίας σύμφωνα με τον SDI.

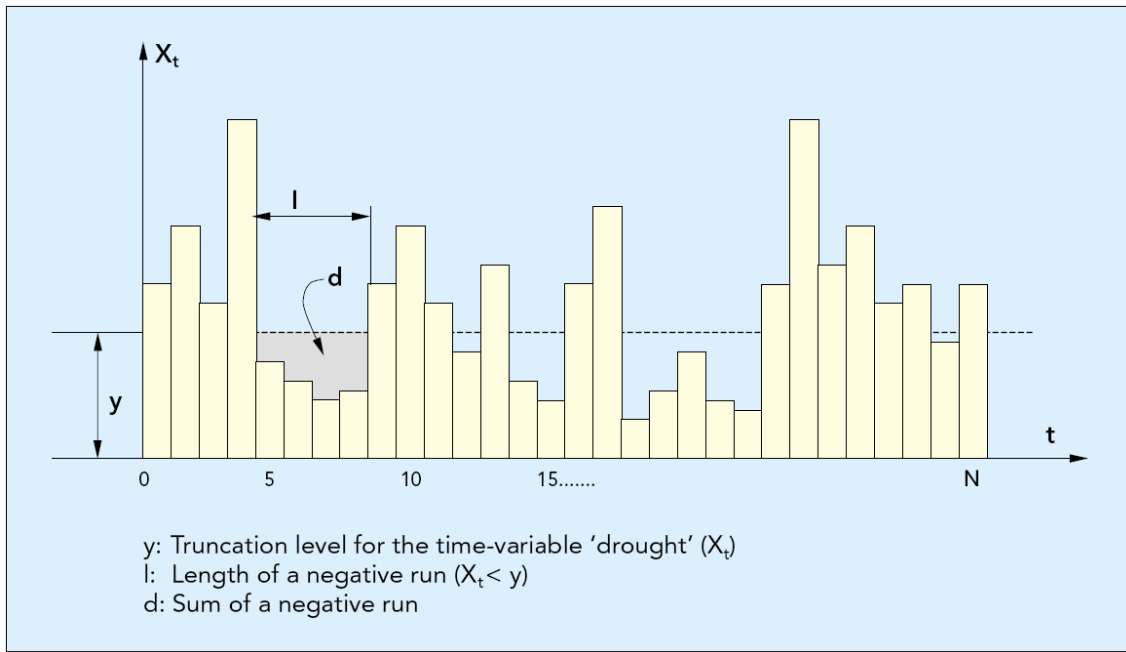
Κατάσταση	Περιγραφή	Κριτήριο	Πιθανότητα (%)
0	Χωρίς ξηρασία	$SDI \geq 0.0$	50.0
1	Ήπια ξηρασία	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1
2	Μέτρια ξηρασία	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2
3	Σημαντική ξηρασία	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4
4	Ακραία ξηρασία	$SDI < -2.0$	2.3

### 2.3.16 The theory of Hydrologic Runs (Η θεωρία run)

Η χρήση της θεωρίας “run” έχει προταθεί ως μια αντικειμενική μέθοδος για τον εντοπισμό των περιόδων ξηρασίας και για την αξιολόγηση των στατιστικών ιδιοτήτων της ξηρασίας. Προτάθηκε αρχικά το 1967 από τον Yenjevich και έχει χρησιμοποιηθεί έκτοτε από πλήθος ερευνητών (π.χ. Moyé et al., 1988; Rossi et al., 1992). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μια περίοδος ξηρασίας συμπίπτει με μια «αρνητική τιμή» του “run”, που ορίζεται ως ο αύξων αριθμός των διαστημάτων κατά τα οποία μια επιλεγμένη υδρολογική μεταβλητή παραμένει κάτω από ένα επιλεγμένο κατώτατο όριο (Σχήμα 2.1).

Ο καθορισμός ενός τέτοιου ορίου είναι σημαντική υπόθεση. Στην περίπτωση μη-περιοδικών μόνιμων χρονοσειρών μπορεί να είναι μια σταθερή τιμή, ενώ σε περίπτωση μόνιμων περιοδικών χρονοσειρών μπορεί να είναι ένα εποχιακά μεταβαλλόμενο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό σε κάθε χρονικό διάστημα είναι σχετικά αυθαίρετο και πρέπει να επιλέγεται βάσει του στόχου της μελέτης. Συνήθως θεωρείται ίσο με το μέσο όρο (ή το διάμεσο) μιας μακράς περιόδου της μεταβλητής ενδιαφέροντος, ενώ άλλες πιθανές επιλογές περιλαμβάνουν ένα

κλάσμα του μέσου όρου (Clausen and Pearson, 1995), μια τιμή που αντιστοιχεί σε μια δεδομένη πιθανότητα μη υπέρβασης (Zelenhasic and Salvai, 1987), ή ένα επίπεδο που ορίζεται ως μία τυπική απόκλιση κάτω από το μέσο όρο (Ben-Zvi, 1987). Σε κάθε περίπτωση, το όριο θα πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να θεωρείται αντιπροσωπευτικό του επιπέδου ζήτησης νερού.



Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου “run” (πηγή: EEA, 2001).

Το πλεονέκτημα της χρήσης της μεθόδου run για τον ορισμό της ξηρασίας συνίσταται στη δυνατότητα της εξαγωγής των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (π.χ. διάρκεια, συνολικό έλλειμμα) είτε αναλυτικά, είτε με την παραγωγή συνθετικών δεδομένων, αφού γίνουν γνωστές οι στοχαστικές ιδιότητες των βασικών μεταβλητών. Η δυνατότητα αυτή δεν περιορίζεται σε σχετικά απλές περιπτώσεις κατά τις οποίες η χρονική εξάρτηση των διαδοχικών τιμών είναι δυνατόν να αγνοηθεί, αλλά και όταν χρησιμοποιείται μια δομή τύπου αλυσίδας Markov για τη θεωρούμενη μεταβλητή (Cancelliere et al, 1998). Πρόσφατα, έχουν διατυπωθεί και διαδικασίες για την εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς της ξηρασίας σύμφωνα με τη μέθοδο run (Shiau and Shen, 2001; Bonaccorso et al, 2003), καθιστώντας την έτσι ιδανική για την ανάλυση διακινδύνευσης από ξηρασία (drought risk analysis).

### 2.3.17 Standardized Precipitation Index – SPI (Ο Δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης)

Ο γνωστότερος και παλαιότερος δείκτης ξηρασίας, ο δείκτης Palmer, παρουσιάζει, όπως αποδείχθηκε με τη μακρόχρονη χρήση του, ορισμένους

περιορισμούς ή κατά άλλους μειονεκτήματα. Κάποια από τα μειονεκτήματα αυτά έρχεται να ξεπεράσει ο Standardized Precipitation Index, γνωστός ως SPI.

Ο Δείκτης SPI σχεδιάστηκε από τον McKee και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο της Πολιτείας του Colorado, με σκοπό να είναι ένας δείκτης σχετικά απλός, που να έχει εφαρμογή σε ετήσια βάση πάνω στις συνθήκες τροφοδοσίας σε νερό που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στο Colorado, αλλά και για να συμπληρώσει τις πληροφορίες που παρέχει ο Δείκτης του Palmer (McKee et al., 1993).

Ο υπολογισμός του SPI για μια οποιαδήποτε τοποθεσία βασίζεται σε χρονοσειρές αθροιστικής βροχόπτωσης για συγκεκριμένη χρονική κλίμακα ενδιαφέροντος (π.χ. 1, 3, 6, 9, 12, ... μήνες). Στη χρονοσειρά αυτή προσαρμόζεται μια κατανομή πιθανότητας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε κανονική κατανομή, έτσι ώστε η μέση τιμή του SPI για τη συγκεκριμένη τοποθεσία και την επιθυμητή περίοδο να είναι μηδέν (Edwards and McKee, 1997). Θετικές τιμές του SPI υποδεικνύουν βροχόπτωση μεγαλύτερη από το μέσο όρο, ενώ οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν βροχόπτωση μικρότερη από το μέσο όρο. Επειδή ο SPI είναι κανονικοποιημένος, το υγρότερο και ξηρότερο κλίμα παρουσιάζεται με τον παρόμοιο τρόπο και υγρές περίοδοι μπορούν επίσης να παρακολουθούνται με τη χρήση του SPI.

Η κατανομή που τελικά επιλέγεται για χρήση με τον SPI είναι η κατανομή γάμα, που έχει παρατηρηθεί ότι προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις χρονοσειρές βροχόπτωσης. Τότε, ο SPI υπολογίζεται λαμβάνοντας τη διαφορά των βροχοπτώσεων από το μέσο όρο κάποιας συγκεκριμένης χρονικής κλίμακας και διαιρώντας την με την τυπική απόκλιση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma} \quad (2.25)$$

Ο SPI βασίζεται μόνο στα κατακρημνίσματα. Η θεμελιώδης δύναμή του έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να υπολογιστεί για ποικιλία χρονικών κλιμάκων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει τη χρήση του SPI στην παρακολούθηση τόσο βραχυπρόθεσμης τροφοδοσίας του εδάφους σε νερό, όπως η εδαφική υγρασία για την αγροτική παραγωγή, όσο και μακροπρόθεσμης τροφοδοσίας υδατικών πόρων, όπως τα αποθέματα υπόγειου νερού, η ποτάμια ροή και η στάθμη των λιμνών και των ταμιευτήρων. Η ικανότητα της εξέτασης διαφορετικών χρονικών κλιμάκων επιτρέπει ακόμη τον άμεσο προσδιορισμό της ξηρασίας και την παρακολούθησή της κατά τη διάρκειά εξέλιξης ενός γεγονότος (Wilhite et al., 2000).

Ο υπολογισμός του SPI για συγκεκριμένη χρονική περίοδο σε οποιαδήποτε

περιοχή απαιτεί μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης με δεδομένα τριάντα ή και περισσότερων χρόνων. Η κανονικοποίηση του SPI βοηθά στην εύκολη κατανόηση της ξηρασίας, καθώς το μέγεθος της αποχής από το μηδέν αντιπροσωπεύει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου. Επειδή οι τιμές του SPI ακολουθούν την τυπική κανονική κατανομή, θα περίμενε κανείς να βρίσκονται μέσα στο διάστημα της τυπικής απόκλισης για το 68% των περιπτώσεων, μέσα στο διπλάσιο της τυπικής απόκλισης για το 95% των περιπτώσεων και μέσα στο τριπλάσιο της τυπικής απόκλισης για το 99% των περιπτώσεων. Μια σχετική ερμηνεία θα ήταν ότι για τιμές του SPI μικρότερες του  $-1.0$  το φαινόμενο θα εμφανιστεί 16 φορές στα εκατό χρόνια και για τιμές του SPI μικρότερες του  $-2.0$  το φαινόμενο θα εμφανιστεί δύο έως τρεις φορές στα εκατό χρόνια, συχνότητα αποδεκτή και στον υδρολογικό σχεδιασμό. Ο C.T. Agnew (2000), απέδειξε χρησιμοποιώντας δεδομένα για την περίοδο 1961-1990 ότι η πιθανότητα να συμβεί μια ακραία ξηρασία είναι 2.3%, ενώ η πιθανότητα να συμβεί σημαντική ξηρασία, είναι περίπου τριπλάσια, γύρω στο 6.7%.

Η κατάταξη των ξηρασιών με βάση τις τιμές του SPI παρουσιάζεται στον Πίνακα που ακολουθεί:

*Πίνακας 2.5. Κατάταξη της ξηρασίας με βάση τις τιμές του δείκτη SPI.*

<b>Τιμές SPI</b>	
> 2.0	ακραία υγρό
1.50 έως 1.99	πολύ υγρό
1.00 έως 1.49	μετρίως υγρό
-0.99 έως 0.99	σχεδόν κανονικό
-1.00 έως -1.49	μετρίως ξηρό
-1.50 έως -1.99	σημαντικά ξηρό
< -2.00	ακραία ξηρό

Παρά το γεγονός ότι ο δείκτης SPI αναπτύχθηκε για χρήση στο Colorado, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε περιοχή αρκεί να υπάρχουν επαρκή δεδομένα, δηλαδή δεδομένα για τριάντα ή και περισσότερα χρόνια. Έτσι ο δείκτης SPI έχει βρει μέχρι σήμερα εφαρμογή στις περισσότερες από τις Πολιτείες της Αμερικής για την παρακολούθηση της ξηρασίας. Επίσης, πολλοί ερευνητές από άλλες χώρες έχουν λάβει υπόψη τους ή ακόμη και έχουν χρησιμοποιήσει τον SPI για μελέτες στις περιοχές τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο SPI έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στην Ουγγαρία, στην Τουρκία, στο Μεξικό, στην Αργεντινή, στη Βραζιλία, στη Χιλή, αλλά και στη Νότια Αφρική και την Κένυα.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες μάλιστα ο SPI χρησιμοποιείται για την παραγωγή εθνικών χαρτών ξηρασίας από το NDMC (National Drought Mitigation Center).

Τα δεδομένα κατακρημνισμάτων προέρχονται από το CPC και οι τιμές του SPI υπολογίζονται από το WRCC (Western Regional Climate Center). Οι χάρτες ξηρασίας παράγονται από τον Φεβρουάριο του 1996 σε χρονικές κλίμακες ενός, τριών, έξι και δώδεκα μηνών και διατίθενται από το NDMC μέσω της ιστοσελίδας του, όπου βρίσκονται αρχειοθετημένοι χρονολογικά.

### 2.3.18 Τηλεπισκοπικοί - Δορυφορικοί Δείκτες

Η ραγδαίες εξελίξεις της τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες έδωσαν τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας νέας ομάδας δεικτών που στηρίζονται σε δορυφορικά δεδομένα και αξιοποιούν τις εξελίξεις της τηλεπισκόπησης. Τα δεδομένα αφορούν κυρίως σε ραδιομετρικές μετρήσεις της κατάστασης και της ποιότητας της βλάστησης σύμφωνα με τον τύπο βλάστησης και το στάδιο ανάπτυξης, χρησιμοποιώντας τις φασματικές υπογραφές των φυτών κυρίως στο υπέρυθρο και το κοντινό υπέρυθρο φάσμα (Huete et al., 1997).

Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες αυτής της κατηγορίας είναι (Kanellou et al., 2008): ο Normalised Difference Vegetation Index – NDVI (Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης) που προτάθηκε από τον Tucker (1979), ο Enhanced Vegetation Index – EVI (Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης) που προτάθηκε από τους Huete et al (2002), οι Vegetation Condition Index – VCI (Δείκτης Κατάστασης Βλάστησης) και Temperature Condition Index - TCI (Δείκτης Κατάστασης Θερμοκρασίας) που προτάθηκαν από τον Kogan (1995), ο Normalised Difference Temperature Index – NDTI (Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Θερμοκρασίας) που αναπτύχθηκε από τους McVicar et al (1992) και Jupp et al (1998), ο Crop Water Stress Index –CWSI (Δείκτης Υδατικής Πίεσης Καλλιέργειας) που προτάθηκε από τους Idso et al (1981) και ο Drought Severity Index - DSI (Δείκτης Σφοδρότητας Ξηρασίας) που προτάθηκε από τους Bayarjargal et al (2006).

## 2.4 Αξιολόγηση και σύγκριση δεικτών ξηρασίας

Μια από τις δημοφιλέστερες ενασχολήσεις των ερευνητών σε σχέση με τους δείκτες ξηρασίας είναι η σύγκριση διαφόρων δεικτών μεταξύ τους. Πλήθος τέτοιων συγκρίσεων εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Oladipo, 1985; Guttman, 1998; Quiring and Papakryiakou, 2003; Hayes et al., 2007; Barua et al., 2009), με αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση. Λόγω της χωρικής κυρίως διαφοράς ή της δομής των χρονοσειρών, πολλές φορές τα αποτελέσματα των συγκριτικών ερευνών έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους, ωστόσο όλες οι περιπτώσεις προσθέτουν μια διαφορετική προοπτική στον τρόπο



με τον οποίο οι δείκτες ανιχνεύουν την ξηρασία στα διάφορα μέρη του πλανήτη.

Στην παρούσα παράγραφο, θα γίνει μια προσπάθεια περιγραφής των κυριότερων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των δύο πιο δημοφιλών δεικτών (Palmer Drought Severity Index και Standardized Precipitation Index), ώστε να μπορεί κανείς να σχηματίσει μια εικόνα της καταλληλότητας των δεικτών αυτών για κάθε περίπτωση, αλλά και μια συγκριτική ματιά μεταξύ τους προερχόμενη από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Ο PDSI έχει τρία κύρια πλεονεκτήματα σύμφωνα με τον Alley (1984). Παρέχει στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων μια μέτρηση της ανωμαλίας των πρόσφατων χαρακτηριστικών του καιρού για μια περιοχή και τοποθετεί τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες σε μια ιστορική βάση. Επίσης, παρέχει χωρικές και χρονικές αναπαραστάσεις των ιστορικών ξηρασιών. Ο PDSI έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για μια ποικιλία εφαρμογών στις Ηνωμένες Πολιτείες και έχει αποδείξει ότι είναι πιο αποτελεσματικός στη μέτρηση επιπτώσεων ευαίσθητων στις συνθήκες εδαφικής υγρασίας, όπως στην περίπτωση της γεωργίας. Έχει επίσης αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο στην παρακολούθηση της ξηρασίας και έχει χρησιμοποιηθεί για να «πυροδοτήσει» ενέργειες που περιγράφονται στα σχέδια έκτακτης ανάγκης.

Τα μειονεκτήματα του PDSI από την άλλη πλευρά συνοψίζονται στα εξής:

- Οι τιμές για την ποσοτικοποίηση της έντασης της ξηρασίας και την ένδειξη έναρξης και λήξης ενός επεισοδίου ξηρασίας επιλέχθηκαν αυθαίρετα με βάση τη μελέτη του Palmer στην κεντρική Iowa και στο δυτικό Kansas και έχουν μικρή επιστημονική έννοια.
- Ο PDSI είναι ευαίσθητος στο διαθέσιμο περιεχόμενο νερό (AWC = available water content) ενός τύπου εδάφους. Τα δύο στρώματα εδάφους στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου έχουν απλοποιηθεί και μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια κάποια τοποθεσία. Επομένως, η εφαρμογή του δείκτη σε συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες μπορεί να είναι πολύ γενική.
- Η χιονόπτωση, η χιονοκάλυψη και το παγωμένο έδαφος δεν συμπεριλαμβάνονται στο δείκτη. Όλα τα κατακρημνίσματα θεωρούνται ως βροχόπτωση, με αποτέλεσμα η χρονική στιγμή για την οποία παράγονται οι τιμές του PDSI ενδέχεται να είναι ανακριβής κατά τους χειμερινούς και ανοιξιάτικους μήνες στις περιοχές όπου υπάρχει χιόνι.
- Η φυσική υστέρηση από τη βροχόπτωση ως την απορροή δεν λαμβάνεται υπόψη. Επιπλέον, δεν επιτρέπεται η εμφάνιση απορροής στο μοντέλο έως ότου η χωρητικότητα σε νερό των επιφανειακών και υποεπιφανειακών στρωμάτων του εδάφους είναι πλήρης, με αποτέλεσμα να υποεκτιμούνται

- οι απορροές.
- Ο PDSI δεν ερμηνεύει τις μακράς διάρκειας επιπτώσεις της ξηρασίας, όπως αυτές στην απορροή και στα επίπεδα του νερού των λιμνών και των ταμιευτήρων.
- Ανθρώπινες παρεμβάσεις στο υδατικό ισοζύγιο, όπως η άρδευση, δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Ο PDSI έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στις Ηνωμένες Πολιτείες, ωστόσο η αποδοχή του σε άλλα μέρη του κόσμου είναι σχετικά μικρή.
- Τα επίπεδα «ακραίας» και «σημαντικής» ξηρασίας εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα σε κάποιες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών σε σχέση με άλλες. Το γεγονός αυτό περιορίζει την ακρίβεια κατά τη σύγκριση της έντασης της ξηρασίας μεταξύ δύο περιοχών και δυσκολεύει το σχεδιασμό για την αντιμετώπιση της ξηρασίας.

Τα σημαντικότερα ίσως πλεονεκτήματα του SPI συνοψίζονται στην ευκολία του υπολογισμού του, τη δυνατότητα εφαρμογής του στα περισσότερα μέρη του κόσμου (λόγω των χαμηλών απαιτήσεων του σε δεδομένα) με συγκρίσιμα αποτελέσματα (λόγω της κανονικοποίησής του) και στη δυνατότητα περιγραφής τόσο των ξηρών όσο και των υγρών περιόδων με τον ίδιο τρόπο. Στα μειονεκτήματα του συμπεριλαμβάνονται η αδυναμία περιγραφής του φυσικού συστήματος (που είναι πολυπαραμετρικό), η ανάγκη για χρήση μεγάλων σχετικά χρονοσειρών ώστε να παράγονται αξιόπιστα αποτελέσματα και το γεγονός ότι οι τιμές του για μικρές χρονικές περιόδους (π.χ. ένα μήνα) μπορεί να δώσουν παραπλανητικά αποτελέσματα κυρίως στις περιοχές με χαμηλά ύψη βροχοπτώσεων.

Σε σύγκριση με τον PDSI θα μπορούσαν να διατυπωθούν τα εξής. Όπως είναι φανερό ο SPI είναι ένας απλός δείκτης που βασίζεται μόνο στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Αντίθετα οι υπολογισμοί για τον PDSI είναι πολύπλοκοι. Έχει αναφερθεί ότι περίπου 68 παράμετροι ορίζονται κατά τη διαδικασία υπολογισμού του PDSI. Βέβαια η σημαντικότερη παράμετρος είναι και στον PDSI η βροχόπτωση. Ο SPI είναι επίσης ευέλικτος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα, γεγονός που δίνει στον SPI την ικανότητα παρακολούθησης των κλιματικών συνθηκών τόσο για γεωργικές όσο και για υδρολογικές εφαρμογές. Οι χρονικές κλίμακες στις οποίες χρησιμοποιείται συνήθως ο SPI είναι αυτές των τριών, έξι και δώδεκα μηνών ενώ επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί και χρονικές κλίμακες του ενός και των εννέα μηνών. Ο SPI των τριών μηνών αντικατοπτρίζει τις συνθήκες υγρασίας μικρής και μέσης περιόδου, παρέχοντας εποχιακές εκτιμήσεις της ξηρασίας. Ο SPI των έξι μηνών δείχνει μέσης περιόδου τάσεις, ενώ είναι δυνατόν να παρουσιάσει και

μεταβολές στη διαίτα των ποταμών. Σε αυτή την κλίμακα ο SPI θεωρείται πιο ευαίσθητος από τον δείκτη του Palmer. Ο SPI των δώδεκα μηνών αντικατοπτρίζει διαίτα ξηρασίας μεγάλης περιόδου. Σε αυτή τη χρονική κλίμακα ο SPI τείνει συνήθως προς το μηδέν, ενώ τα αποτελέσματά του θεωρούνται άμεσα σχετιζόμενα με αυτά του δείκτη του Palmer. Από την άλλη πλευρά οι χάρτες που βασίζονται στο δείκτη SPI του ενός μήνα είναι παρόμοιοι με τους χάρτες ποσοστών της βροχοπτώσης για το μήνα αυτό, αν και θεωρούνται ακριβέστεροι λόγω της αναγωγής που απαιτείται από την κατανομή. Ο δε δείκτης SPI των εννέα μηνών εμφανίζει διαίτα ξηρασίας μεσαίας κλίμακας και μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμος επειδή συνήθως η ξηρασία χρειάζεται περισσότερο από μια εποχή του χρόνου για να αναπτυχθεί. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι επίσης κρίσιμη για την παρακολούθηση της ανάπτυξης της ξηρασίας, η οποία περιλαμβάνει την έναρξη και τον τερματισμό της, που συνήθως δυσκολεύουν τους περισσότερους δείκτες. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της κανονικής κατανομής που ακολουθούν οι τιμές του SPI, η συχνότητα ακραίων και σημαντικών ξηρασιών για οποιαδήποτε περιοχή και χρονική κλίμακα είναι περίπου σταθερή. Τέλος, πλεονέκτημα του SPI αποτελεί και το γεγονός ότι ο δείκτης είναι εξίσου αποτελεσματικός και κατά τους χειμερινούς μήνες γιατί βασίζεται μόνο στα κατακρημνίσματα και όχι στις εκτιμώμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας όπως ο PDSI.

Σύμφωνα με το NDMC ο SPI ανιχνεύει τις συνθήκες επείγουσας ξηρασίας πολύ πιο γρήγορα από τον PDSI, χαρακτηριστικό που είναι εξαιρετικά κρίσιμο κατά τη χρονική περίοδο υλοποίησης των μέτρων αντίδρασης και μετριασμού της ξηρασίας από κρατικούς ή άλλους φορείς. Ο προσδιορισμός ωστόσο της σχέσης μεταξύ των τιμών του SPI και των επιπτώσεων σε συγκεκριμένους τομείς απαιτεί περαιτέρω έρευνα.

Η σύγκριση του SPI και του PDSI με άλλους δείκτες παρουσιάζει εξίσου μεγάλο ενδιαφέρον, ωστόσο μια τέτοια διαδικασία απαιτεί μεγάλη προσπάθεια, ειδικά αν πρέπει να ληφθούν υπόψη και διαφορετικές κλιματικές συνθήκες στις οποίες είναι δυνατό να υπολογιστούν οι τιμές των διαφόρων δεικτών. Αξίζει ωστόσο να παρουσιαστούν αποτελέσματα συσχέτισης μεταξύ γνωστών δεικτών, όπως μελετήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του Ευρωπαϊκού Προγράμματος WATCH και περιγράφονται στο Technical Report No. 24 του προγράμματος (Wanders et al., 2010). Να σημειωθεί ότι στους Πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται μόνο ορισμένοι από τους δείκτες που εξετάστηκαν από την ομάδα του WATCH για τους έξι διαφορετικούς κλιματικούς τύπους που εκπροσωπούνται από την Βραζιλία, τη Νέα Γουινέα, την Αυστραλία, τη Γερμανία, τον Καναδά και τη Ρωσία.

Πίνακας 2.6. Συσχέτιση δεικτών στη Βραζιλία.

	SPI	EDI	PDSI	Z-index	SMDI
SPI	-	0.33	0.46	0.92	0.58
EDI	0.33	-	0.54	0.37	0.56
PDSI	0.46	0.54	-	0.55	0.40
Z-index	0.92	0.37	0.55	-	0.54
SMDI	0.58	0.56	0.40	0.54	-

Πίνακας 2.7. Συσχέτιση δεικτών στη Νέα Γουινέα (Παπούα).

	SPI	EDI	PDSI	Z-index	SMDI
SPI	-	0.64	0.47	0.39	0.35
EDI	0.64	-	0.74	0.71	0.23
PDSI	0.47	0.74	-	0.89	0.15
Z-index	0.39	0.71	0.89	-	0.13
SMDI	0.35	0.23	0.15	0.13	-

Πίνακας 2.8. Συσχέτιση δεικτών στη Αυστραλία.

	SPI	EDI	PDSI	Z-index	SMDI
SPI	-	0.10	0.07	0.06	0.07
EDI	0.10	-	0.67	0.67	0.48
PDSI	0.07	0.67	-	0.96	0.28
Z-index	0.06	0.67	0.96	-	0.24
SMDI	0.07	0.48	0.28	0.24	-

Πίνακας 2.9. Συσχέτιση δεικτών στη Γερμανία.

	SPI	EDI	PDSI	Z-index	SMDI
SPI	-	0.65	0.38	0.26	0.62
EDI	0.65	-	0.68	0.62	0.50
PDSI	0.38	0.68	-	0.82	0.36
Z-index	0.26	0.62	0.82	-	0.23
SMDI	0.62	0.50	0.36	0.23	-

Πίνακας 2.10. Συσχέτιση δεικτών στον Καναδά.

	SPI	EDI	PDSI	Z-index	SMDI
SPI	-	0.55	n/a	n/a	0.24
EDI	0.55	-	n/a	n/a	0.44
PDSI	n/a	n/a	-	n/a	n/a
Z-index	n/a	n/a	n/a	-	n/a
SMDI	0.24	0.44	n/a	n/a	-

Πίνακας 2.11. Συσχέτιση δεικτών στη Ρωσία.

	SPI	EDI	PDSI	Z-index	SMDI
SPI	-	0.49	0.14	0.11	0.36
EDI	0.49	-	0.33	0.29	0.40
PDSI	0.14	0.33	-	0.90	0.12
Z-index	0.11	0.29	0.90	-	0.09
SMDI	0.36	0.40	0.12	0.09	-

Για την πληρότητα της ανάγνωσης σημειώνεται ότι οι δείκτες ξηρασίας που αναφέρονται στους παραπάνω πίνακες (αν και έχουν επανειλημμένα αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους) είναι οι: SPI: Standardized Precipitation Index, EDI: Effective Drought Index, PDSI: Palmer Drought Severity Index, Z-index: Palmer Z-index και SMDI: Soil Moisture Deficit Index.

## 2.5 Αναφορές κεφαλαίου

- Agnew C.T., 2000. Using the SPI to Identify Drought. *Drought Network News*, 12(1): 6-12.
- Alley W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7): 1100-1109.
- Barua S., Perera B.J.C. and Ng A.W.M., 2009. A comparative drought assessment of Yarra River Catchment in Victoria, Australia. Proceedings of the 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Cairns, Australia, 13–17 July 2009, pp. 3245-3251.
- Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C. and Tucker C.J., 2006. A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 105(1): 9-22.
- Ben-Zvi A., 1987. Indices of hydrological drought in Israel. *Journal of Hydrology*, 92(1-2): 179-191.
- Bergman K.H., Sabol H. and Miskus D., 1988. Experimental indices for monitoring global drought conditions. Proceedings of the 13th Annual Climate Diagnostics Workshop, Cambridge, Boston (MA), November 1988, U.S. Department of Commerce, pp. 190-197.
- Bhalme H.N. and Mooley D.A., 1980. Large scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108(8): 1197-1211.
- Bonaccorso B., Cancelliere A. and Rossi G., 2003. An analytical formulation of return period of drought severity. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17(3): 157-174.

- Burt J.E., Hayes J.T., O'Rourke P.A., Terjung W.H. and Todhunter P.E., 1981. A parametric crop water use model. *Water Resources Research*, 17(4): 1095-1108.
- Byun H-R. and Wilhite D.A., 1999. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, 12(9): 2747-2756.
- Cancelliere A., Ancarani A. and Rossi G., 1998. Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(2): 140-148.
- Clausen B. and Pearson C.P., 1995. Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, 173(1-4): 111-130.
- Cloppet E., 2011. Agricultural Drought Indices in France and Europe: Strengths, Weaknesses, and Limitations. Agricultural Drought Indices - Proceedings of an Expert Meeting, 2-4 June 2010, Murcia, Spain, World Meteorological Organisation, pp. 83-94.
- Dracup J.A., Lee K.S. and Paulson Jr. E.G., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16(2):297-302.
- Edossa D.C., Babel M.S. and Guota A.D., 2010. Drought Analysis in the Awash River Basin, Ethiopia. *Water Resources Management*, 24(7): 1441-1460.
- Edwards D.C. and McKee T.B., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report No. 97-2 (Atmospheric Science Paper No. 634), Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins (CO), May 1997, 155 p.
- EEA, 2001. Sustainable water use in Europe, Part 3: Extreme hydrological events: floods and droughts. Environmental issue report No. 21, European Environment Agency, Copenhagen, 84 p.
- Foley J.C., 1957. Droughts in Australia. Bulletin no. 43, 281. Commonwealth of Australia, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia.
- Garen D.C., 1993. Revised Surface-Water Supply Index for the Western United States. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4): 437-454.
- Gibbs W.J. and Maher J.V., 1967. Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin 48, Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia.
- Guttman N.B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 113-121.
- Guttman N.B., Wallis J.R. and Hosking J.R.M., 1992. Spatial Comparability of the Palmer Drought Severity Index. *Water Resources Bulletin*, 28(6): 1111-1119.

- Hashimoto T., Stedinger J.R. and Loucks D.P., 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1): 14-20.
- Hayes M.J., Alvord C. and Lowrey J., 2007. Drought Indices. Feature Article, *Intermountain West Climate Summary*, 3(6): 2-6.
- Hayes M.J., Svoboda M.D., Wilhite D.A., Vanyarkho O.V., 1999. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3): 429-438.
- Heim R.R., 2002. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8): 1149-1165.
- Herbst P.H., Bredenkamp D.B. and Barker H.M.G., 1966. A Technique for the Evaluation of Drought from Rainfall Data. *Journal of Hydrology*, 4: 264-272.
- Hollinger S.E., Isard S.A. and Welford M.R., 1993. A new soil moisture drought index for predicting crop yields. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Anaheim (CA), 17-22 January 1993, AMS, pp 187-190.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X. and Ferreira L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K. and van Leeuwen W., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3): 440-451.
- Idso S.B., Jackson R.D., Pinter Jr. P.J., Reginato R.J. and Hatfield J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45-55.
- Jinno K., 1995. Risk Assessment of a Water Supply System during Drought. *International Journal of Water Resources Development*, 11(2): 185-204.
- Jupp D.L.B., Tian G., McVicar T.R., Qin Y. and Li F., 1998. Monitoring Soil Moisture and Drought Using AVHRR Satellite Data I: Theory. CSIRO Earth Observation Centre Technical Report, 98.1, Canberra, ACT
- Kanellou E., Domenikiotis C. and Dalezios N.R., 2008. Description of Conventional and Satellite Drought Indices. In: G. Tsakiris (Ed.), Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM) – Final Report. CANaH Publication 6/08, Athens 2008, pp. 23-57.
- Karl T.R., 1986. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25: 77-86.
- Katz R.W. and Glantz M.H., 1986. Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather*

*Review*, 114(4): 764-771.

- Keyantash J. and Dracup J.A., 2002. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8): 1167-1180.
- Kogan F.N., 1995. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5): 655-668.
- Loukas A., Vasiliades L. and Dalezios N.R., 2003. Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology, 8-10 September 2003, Lemnos, Greece, pp. 484-731.
- McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Anaheim (CA), 17-22 January 1993, AMS, pp. 179-184.
- McVicar T.R., Jupp D.L.B., Yang X. and Tian G., 1992. Linking regional water balance models with remote sensing. Proceedings of the 13th Asian Conference on Remote Sensing, Ulaanbaatar, Mongolia, 7-11 October, pp. B.6.1-B.6.6.
- Meyer S.J., Hubbard K.G. and Wilhite D.A., 1993. A crop specific drought index for corn: I. Modern development and validation. *Agronomy Journal*, 85(2): 388-395.
- Moyé L.A., Kapadia A.S., Cech I.M. and Hardy R.J., 1988. The theory of runs with applications to drought prediction. *Journal of Hydrology*, 103(1-2): 127-137.
- Nalbantis I. and Tsakiris G., 2009. Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5): 881-897.
- Nalbantis I., 2008. Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water*, 23/24: 67-77.
- Narasimhan B. and Srinivasan R., 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for Agricultural Drought Monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4): 69-88.
- Niemeyer S., 2008. New drought indices. Proceedings of the 1st International Conference "Drought management: Scientific and technological innovations" (Option Méditerranéennes, Series A, No. 80), 12-14 June 2008, Zaragoza (Spain), pp. 267-274.
- Oladipo E.O., 1985. A comparative performance analysis of three meteorological drought indices. *Journal of Climatology*, 5(6): 655-664.
- Palfai I., 1990. Description and Forecasting of Droughts in Hungary. In:



- Transactions of the 14<sup>th</sup> Congress on Irrigation and Drainage, Rio De Janeiro, Vol. 1-C. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), pp. 151-158.
- Palmer W.C., 1965. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper No. 45, Washington D.C., 58 p.
- Palmer W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new Crop Moisture Index. *Weatherwise*, 21(4): 156-161.
- Panu U.S. and Sharma T.C., 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S1): S19-S30.
- Pereira L.S., 1990. The Role of Irrigation in Mitigating the Effects of Drought. In: Transactions of the 14<sup>th</sup> Congress on Irrigation and Drainage, Rio De Janeiro, Vol. 1-F. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), G43.1-G43.27.
- Quiring S.M. and Papakryiakou T.N., 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118(1-2): 49-62.
- Redmond K., 1991. Climate monitoring and indices. Proceedings of the Drought Management and Planning Seminar and Workshop, D.A. Wilhite, D.A. Wood and P.A. Kay (Eds.), Lincoln, NE, University of Nebraska, Lincoln, pp. 29-33.
- Rossi G., Benedini M., Tsakiris G. and Giakoumakis S., 1992. On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management*, 6(4): 249-277.
- Rossi G., Cancelliere A. and Giuliano G., 2005. Case Study: Multicriteria Assessment of Drought Mitigation Measures. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6): 449-457.
- Shafer B.A. and Dezman L.E., 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proceedings of the Western Snow Conference, Reno (NV), 19-23 April 1982, Colorado State University, Fort Collins (CO), pp. 164-175.
- Shiau J. and Shen H.W., 2001. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(1): 30-40.
- Smith D.I., Hutchinson M.F. and McArthur R.J., 1993. Australian climatic and agricultural drought: Payments and policy. *Drought Network News*, 5(3): 11-12.
- Stahl K., 2001. Hydrological drought – A study across Europe. Dissertation, Albert-Ludwigs Universitat Freiburg, Freiburg, 122 p.
- Tate E.L. and Gustard A., 2000. Drought Definition: A Hydrological Perspective. In: J.V. Voght and F. Somma (eds.), *Drought and Drought Mitigation in*

- Europe (Advances in Natural and Technological Hazard Research), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, The Netherlands, ISBN: 0-7923-6589-5, pp. 23-48.
- Tsakiris G. and Vangelis H., 2004. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. *Water Resources Management*, 18(1): 1-12.
- Tsakiris G., Loukas A., Pangalou D., Vangelis H., Tigkas D., Rossi G. and Cancelliere A., 2007. Drought characterisation (Chapter 7). In: Drought Management Guidelines Technical Annex, A. Iglesias, M. Moneo, A. Lopez-Francos (Eds.), CIHEAM/EC MEDAWater (Series B: Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes), Zaragoza, ISBN: 2-85352-359-4, pp. 85-102.
- Tucker C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- van Rooy M.P., 1965. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos, Weather Bureau of South Africa*, 14: 43-48.
- Wanders N., van Lanen H.A.J. and van Loon A.F., 2010. Indicators for drought characterization on a global scale. WATCH – Water and Global Change Project. Technical Report No.24, October 2010, 54 p.
- Wilhite D.A., 1993. The Enigma of Drought (Chapter 1, Part One). In: Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies, D.A. Wilhite (ed.), Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, ISBN: 0-7923-9337-6, pp. 3-15.
- Wilhite D.A., Hayes M.J. and Svoboda M.D., 2000. Drought Monitoring and Assessment: Status and Trends in the United States. In: J.V. Voght and F. Somma (eds.), Drought and Drought Mitigation in Europe (Advances in Natural and Technological Hazard Research), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, The Netherlands, ISBN: 0-7923-6589-5, pp. 149-160.
- Zelenhasic E. and Salvai A., 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*, 23(1): 156-168.
- Zhai J., Su B., Krysanova V., Vetter T., Gao C., Jiang T., 2010. Spatial Variation and Trends in PDSI and SPI Indices and their Relation to Streamflow in 10 Large Regions of China. *Journal of Climate*, 23(3): 649-663.

## κεφάλαιο 3

# Reconnaissance Drought Index (RDI): Ένας νέος δείκτης ξηρασίας

### 3.1 Γιατί ένας καινούριος δείκτης; Χρησιμότητα του RDI

Η ανάπτυξη ενός νέου δείκτη ξηρασίας αποτελούσε πάντα μια ενδιαφέρουσα πρόκληση από επιστημονικής πλευράς. Ένας νέος δείκτης θα πρέπει είτε να μπορεί να καλύψει κάποιο σημασιολογικό κενό των προηγούμενων δεικτών ή να προσφέρει κάποια ευκολία στις απαιτούμενες για την εκτίμησή του διεργασίες σε σχέση με τους υπάρχοντες δείκτες, χωρίς όμως να χάνει την ακρίβεια του στην αποτύπωση του φαινομένου. Παρά τις δυσκολίες στον ορισμό του φαινομένου της ξηρασίας δύσκολα μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι εντοπίζονται σημασιολογικά κενά στους υπάρχοντες δείκτες. Η πολυπλοκότητα κάποιων δεικτών που χρησιμοποιούν μεγάλο πλήθος παραμέτρων καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα των διεργασιών που συντελούνται στη φύση, αλλά και ο διαχωρισμός της ξηρασίας σε διαφορετικούς τύπους με την ανάπτυξη εξειδικευμένων δεικτών για τον κάθε τύπο, δεν αφήνει σημαντικά περιθώρια για σημασιολογικά κενά. Έτσι, τη σημαντικότερη κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη νέων δεικτών αποτέλεσαν οι τεχνολογικές εξελίξεις σε συνδυασμό με την εφαρμογή προηγμένων μεθοδολογιών εκτίμησης, αποτύπωσης και καταγραφής των φυσικών παραμέτρων και διεργασιών.

Είτε ωστόσο πρόκειται για δείκτες που προέρχονται από την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας, είτε για παραδοσιακούς δείκτες, η έμφαση δίνονταν πάντα στην αξιοπιστία (reliability) και στην σταθερότητα (robustness) ενός

δείκτη, χωρίς όμως ποτέ να παραβλέπεται και η διαθεσιμότητα δεδομένων. Η διαθεσιμότητα των κατάλληλων δεδομένων μάλιστα ήταν η κύρια αιτία για την οποία η πρώτη γενιά μετεωρολογικών δεικτών βασίστηκε μόνο σε μετεωρολογικά δεδομένα μένοντας γνωστή ως γενιά δεικτών μετεωρολογικής ξηρασίας. Η διαθεσιμότητα των δεδομένων όμως δεν αποτελούσε εμπόδιο μόνο κατά την πρώιμη εποχή μελέτης των ξηρασιών. Σε πολλές περιοχές του πλανήτη, όπως και στη χώρα μας, υπάρχει σημαντική έλλειψη μετρήσεων των υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων. Ακόμη και στις περιπτώσεις μετρητικών σταθμών με αξιόπιστες και μεγάλου μήκους χρονοσειρές δεδομένων παρουσιάζονται πολλά κενά στις μετρήσεις, ενώ τα δεδομένα πέραν της βροχοπτώσης και της θερμοκρασίας ελέγχονται ως προς την αξιοπιστία τους. Από την άλλη πλευρά η χρήση δορυφορικών δεδομένων ή δεδομένων τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην εκτίμηση της ξηρασίας στις μέρες μας, δίνουν μεν αξιόπιστα αποτελέσματα, οι χρονοσειρές ωστόσο τέτοιων δεδομένων είναι περιορισμένες με αποτέλεσμα να είναι δυσχερής η άμεση σύγκριση των νεότερων με τις ιστορικές ξηρασίες.

Η έλλειψη δεδομένων ή τουλάχιστον η έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων σε μεγάλες (ή έστω επαρκείς) χρονοσειρές, οδήγησαν τους ερευνητές στην προσπάθεια για αξιοποίηση δεικτών με χαμηλές ανάγκες σε δεδομένα. Αυτός όμως δεν είναι στην πραγματικότητα ο μοναδικός λόγος. Υπάρχει μια έντονη συζήτηση γύρω από τους δείκτες αλλά και της μεθοδολογίες γενικότερα που χρησιμοποιούν μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Είναι προφανές ότι ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων βοηθά στην ακριβέστερη αποτύπωση των φυσικών διεργασιών αφού δίνει τη δυνατότητα να συμπεριληφθούν περισσότερα τμήματα της φυσικής πραγματικότητας στην τελική εξίσωση. Το εύλογο ερώτημα είναι κατά πόσο μια πολύπλοκη, έστω και «θεωρητικά ορθότερη» μεθοδολογία δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην περίπτωση των δεικτών ξηρασίας το «επιθυμητό» αποτέλεσμα είναι η όσο το δυνατό καλύτερη σύνδεση της τιμής του δείκτη με την ένταση της ξηρασίας, κυρίως όπως γίνεται αντιληπτή από τις συνέπειές της, η οποία να απολαμβάνει την ευρύτερη δυνατή αποδοχή. Αφενός δηλαδή θα πρέπει να υπάρχει ευθεία αναλογία μεταξύ της τιμής του δείκτη και των ζημιών που προκαλεί η κάθε ξηρασία και η αναλογία αυτή θα πρέπει να μπορεί να διατυπωθεί με ίδιο τρόπο ανεξάρτητα από τις τοπικές συνθήκες της περιοχής που μελετάται. Η ευρύτητα αυτή της αποδοχής όχι απλώς δεν είναι περιττή, αντίθετα μπορεί να αποτελεί το κλειδί για τη δημιουργία ενός καινούριου δείκτη ο οποίος θα έρθει να καλύψει ένα από τα ελάχιστα κενά στην προσέγγιση της εκτίμησης της ξηρασίας.

Ας παραμείνουμε ωστόσο στις πιθανές αδυναμίες των πολύπλοκων μεθοδολογιών. Οι δείκτες που αξιοποιούν μεγάλο πλήθος παραμέτρων απαιτούν

συνήθως πολύπλοκους υπολογισμούς, που ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την έλλειψη μετρημένων δεδομένων μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αβεβαιότητες στα αποτελέσματά τους. Είναι σύνηθες όταν δεν υπάρχουν τα κατάλληλα μετρημένα δεδομένα πολλές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται σε μια πολύπλοκη μεθοδολογία να λαμβάνονται και εκτίμηση. Η εκτίμηση αυτή είναι συχνά αυθαίρετη με αποτέλεσμα η καλύτερη «θεωρητική» προσέγγιση του φυσικού συστήματος να ακυρώνεται στην πράξη, αφού το τελικό αποτέλεσμα περνά μέσα από ένα πλήθος εκτιμήσεων και αστάθμητων παραγόντων. Τελικά οι πολύπλοκοι δείκτες ξηρασίας περιορίζονται στο να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο στις περιοχές που υπάρχουν όλα τα απαιτούμενα δεδομένα χάνοντας έτσι το στοιχείο της ευρείας εφαρμογής (global application). Ακόμη και μεταξύ των περιοχών στις οποίες όλα τα απαιτούμενα δεδομένα είναι διαθέσιμα, υπάρχει η πιθανότητα τα διαφορετικά στοιχεία του φυσικού συστήματος να συμβάλουν με διαφορετική βαρύτητα στο τελικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό παρατηρείται ότι σε πολύπλοκες μεθοδολογίες χρησιμοποιούνται συχνά διορθωτικοί συντελεστές με στόχο να «καλιμπράρουν» τη μεθοδολογία για συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειονεκτούν οι μεθοδολογίες αυτές στην αποτύπωση των πιθανών επιπτώσεων της ξηρασίας με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις περιοχές.

Είναι λοιπόν λογικό να οδηγηθούν οι ερευνητές στη χρήση απλών δεικτών ξηρασίας με μειωμένες απαιτήσεις σε δεδομένα, που ταυτόχρονα απαιτούν και απλούς υπολογισμούς για την εκτίμησή τους. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι με τα σύγχρονα υπολογιστικά μηχανήματα η πολυπλοκότητα των εξισώσεων αλλά και ο χρόνος που απαιτείται για τη διενέργεια των υπολογισμών δεν αποτελούν σημαντικούς ανασταλτικούς παράγοντες στη χρήση πολύπλοκων δεικτών ξηρασίας. Τα ευρύτερα διαθέσιμα δεδομένα σχεδόν σε όλες τις περιοχές του πλανήτη είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, ακολουθούμενα από την ταχύτητα ανέμου, τη σχετική υγρασία, την ηλιοφάνεια και μετρήσεις μερικών ακόμα ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Αυτό εξηγεί σε μεγάλο βαθμό την ευρεία διάδοση δεικτών που στηρίζονται σε αυτά τα δεδομένα. Η πιο γνωστή περίπτωση είναι αυτή του δείκτη SPI, ο οποίος χρησιμοποιώντας μόνο τη βροχόπτωση μπορεί πρακτικά να εκτιμηθεί σε όλα τα σημεία του πλανήτη. Παρουσιάζει ωστόσο ένα μικρό πρόβλημα που χρειάζεται να γεφυρωθεί. Το πρόβλημα δημιουργείται όταν χρειαστεί να εκτιμηθεί ο δείκτης για περιοχές διαφορετικού κλίματος. Αυτό γίνεται εμφανέστερο παρατηρώντας τα βασικά τμήματα του υδρολογικού κύκλου.

Ακολουθώντας μια αφαιρετική προσέγγιση του υδρολογικού κύκλου και εστιάζοντας στο τμήμα που δημιουργεί την ξηρασία θα παρατηρούσαμε ότι καθώς η ξηρασία στηρίζεται στην υδατική διαθεσιμότητα η προσφορά προς το

σύστημα, δηλαδή η βροχόπτωση, δεν μπορεί να δώσει από μόνη της την πλήρη εικόνα της κατάστασης. Είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες του συστήματος που θα οδηγήσουν στην εκτίμηση της τελικής διαθεσιμότητας. Ο πιο καθοριστικός παράγοντας απωλειών του υδρολογικού κύκλου, που ταυτόχρονα είναι και ο απλούστερος στην προσέγγισή του καθώς έχει ερευνηθεί σε βάθος είναι η εξατμισοδιαπνοή. Η προσέγγιση μέσα από τις δύο αυτές παραμέτρους θα γίνει φανερή μέσα από ένα απλό παράδειγμα. Εκτιμώντας τον δείκτη SPI για περιοχές διαφορετικού κλίματος, για παράδειγμα στο υγρό κλίμα των χωρών της βόρειας Ευρώπης, στο ημίξηρο κλίμα των χωρών της Μεσογείου και στο ξηρό κλίμα των χωρών της κεντρικής Αφρικής μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι ο SPI στις τρεις αυτές περιοχές δεν είναι συγκρίσιμος. Στη βόρεια Ευρώπη, μια αρνητική τιμή του SPI μπορεί να δηλώνει μείωση της βροχόπτωσης σε σχέση με τον υπερειτήσιο μέσο όρο, το έλλειμμα ωστόσο υδατικής διαθεσιμότητας που αυτή η μείωση της βροχής συνεπάγεται μπορεί να μην είναι τόσο σημαντικό ώστε να επιφέρει μεγάλη μείωση στη διαθεσιμότητα νερού για την παραγωγή (αγροτική, ενέργειας κλπ.) ή άλλες χρήσεις και επομένως οι επιπτώσεις μιας τέτοιας ξηρασίας δεν μπορούν να θεωρηθούν σημαντικές. Η ίδια τιμή του δείκτη στη Μεσόγειο, δηλαδή η ίδια μείωση βροχόπτωσης, σε συνδυασμό με την αυξημένη θερμοκρασία και επομένως τις μεγάλες τιμές εξατμισοδιαπνοής μπορεί να επιφέρει πολύ μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής και επομένως ισχυρότερες επιπτώσεις σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο. Για τη δε περιοχή της κεντρικής Αφρικής, η ίδια τιμή SPI σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα αυξημένα επίπεδα εξατμισοδιαπνοής μπορεί να έχουν ως συνέπεια την πλήρη αδυναμία παραγωγής αγαθών. Η προσέγγιση αυτή δεν μειώνει σε καμία περίπτωση την αξιοπιστία του δείκτη SPI και την ικανότητά του στην παρακολούθηση της ξηρασίας σε μια περιοχή συνδυάζοντας την απλότητα των υπολογισμών και τη δυνατότητα ευρείας εκτίμησης του δείκτη λόγω των μικρών αναγκών σε δεδομένα. Αν όμως λάβουμε υπόψη μια από τις βασικές προσεγγίσεις για τη χρήση ενός δείκτη ξηρασίας που είναι η σύνδεση της τιμής του με τις επιπτώσεις της ξηρασίας, τότε ο SPI καταλήγει να εξαρτάται άμεσα από τα τοπικά μετεωρολογικά φαινόμενα μιας περιοχής, όπως άλλωστε συμβαίνει με τη μετεωρολογική προσέγγιση της ξηρασίας.

Για να καλυφθεί το έλλειμμα της μετεωρολογικής προσέγγισης, που συχνά εξαρτάται από τα τοπικά μετεωρολογικά φαινόμενα και να είναι πιο συνεπής η σύνδεση της τιμής του δείκτη ξηρασίας με τις επιπτώσεις της, χρησιμοποιώντας όμως τις ελάχιστες δυνατές παραμέτρους καταλήξαμε στη προσέγγιση ενός δείκτη ξηρασίας που θα αξιοποιεί όλες αυτές τις παραδοχές. Ο δείκτης αυτός ονομάζεται Reconnaissance Drought Index (RDI) και φιλοδοξεί να συνδέσει την απλή προσέγγιση στην εκτίμηση της ξηρασίας με το κλίμα της κάθε περιοχής με

έναν αξιόπιστο ενιαίο τρόπο, προσαρμοζόμενος ακόμη και στην κλιματική αλλαγή.

## 3.2 Περιγραφή του δείκτη

### 3.2.1 Τα συστατικά

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, ο SPI γίνεται, αν δεν είναι ήδη, ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης εκτίμησης της ξηρασίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ευκολία υπολογισμού του και οι πολύ μικρές απαιτήσεις του σε δεδομένα, είναι ίσως οι δύο βασικότεροι παράγοντες για την πολύ μεγάλη αυτή απήχηση του SPI. Η ξηρασία, ωστόσο, αντικατοπτρίζοντας το έλλειμμα σε νερό, θα πρέπει να προσεγγιστεί μέσα από κάποια μορφή ισοζύγιο μεταξύ «εισορών» και «εκροών» στο υδατικό σύστημα. Η υπόθεση ότι το έλλειμμα σε νερό μπορεί να προσεγγιστεί μόνο από τις «εισορές» στο σύστημα δεν είναι βάσιμη σε όλες τις περιπτώσεις.

Η προσέγγιση ενός ισοζυγίου με τον λιγότερο πολύπλοκο τρόπο θα μπορούσε να περιλαμβάνει δύο βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, τη βροχόπτωση (P) ως «εισορή» και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) ως «εκροή». Προφανώς, η πραγματική και όχι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι η πραγματική εκροή από το σύστημα, η χρήση όμως της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής θα δημιουργούσε μεγάλη πολυπλοκότητα και αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ξηρασίας, ακυρώνοντας στην πράξη τη θεωρητική προσέγγιση που δημιούργησε την ιδέα του δείκτη RDI. Επομένως η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι αυτή που θα επιλεγεί ως βασική παράμετρος που αντιπροσωπεύει την ικανότητα της ατμόσφαιρας να αποσπά νερό από το υδατικό σύστημα και να δημιουργεί απώλεια από την αρχική «εισορή» που είναι η βροχόπτωση. Από την άλλη πλευρά, η πραγματική εισορή στο σύστημα δεν είναι απαραίτητα η σημειακή βροχόπτωση που καταγράφεται στους μετεωρολογικούς σταθμούς, αλλά το τμήμα της βροχόπτωσης που είναι χρήσιμο και αποτελεσματικό για το υπό μελέτη σύστημα. Για παράδειγμα, αν το υπό μελέτη σύστημα είναι μια μη αρδευόμενη καλλιέργεια, η βροχόπτωση που θα ληφθεί υπόψη είναι η επονομαζόμενη «ενεργός βροχόπτωση». Για την ακόμη μεγαλύτερη απλούστευση της διαδικασίας ωστόσο, η καταγεγραμμένη βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη μέσω μιας απλής διαδικασίας όπως η εξίσωση του Thornthwaite (ή ακόμη και η χρήση μετρημένων τιμών από εξατμισήμετρο) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυτό σημαίνει ότι επί της ουσίας τα μόνα απαραίτητα για την εκτίμηση του δείκτη δεδομένα είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, δεδομένα που τουλάχιστον σε μηνιαία βάση μπορούν να βρεθούν ή να εκτιμηθούν σχεδόν παντού.

Τόσο η βροχόπτωση όσο και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι μεταβλητές που χαρακτηρίζονται από διακύμανση με έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των διαφορετικών κλιματικών περιοχών και εξαρτάται έντονα από την χρονική κλίμακα. Επίσης, και οι δύο μεταβλητές χαρακτηρίζονται από εποχικότητα σε όλες σχεδόν τις κλιματικές περιοχές. Σε ξηρές και ημι-ξηρές περιοχές η διακύμανση των βροχοπτώσεων είναι πολύ υψηλή σε σύγκριση με τη διακύμανση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, η οποία είναι χαμηλή κυρίως για μεγάλες χρονικές κλίμακες.

Σε γενικές γραμμές και οι δύο μεταβλητές μπορούν να θεωρηθούν ως «τυχαίες» μεταβλητές που χαρακτηρίζονται από την αριθμητική μέση τιμή και τη διασπορά τους. Ωστόσο, οι δύο αυτές μεταβλητές (σε μηνιαία ή ετήσια βάση) δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σε μια προσπάθεια να εκφραστεί η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) ως συνάρτηση της βροχόπτωσης (P), μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση απλής γραμμικής παλινδρόμησης, όπως η ακόλουθη:

$$PET = b_0 + b_1 \cdot P \quad (3.1)$$

όπου  $b_0$  και  $b_1$  είναι οι σταθερές της γραμμικής παλινδρόμησης.

Παρά το γεγονός ότι μπορεί να υπάρξει μια ποικιλία περιπτώσεων, στη συντριπτική τους πλειοψηφία η παράμετρος  $b_1$  της παλινδρόμησης είναι αρνητικός αριθμός. Επίσης, στις περισσότερες των περιπτώσεων ο συντελεστής συσχέτισης είναι επίσης αρνητικός αριθμός.

Για την υποστήριξη των παραπάνω διαπιστώσεων στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται αποτελέσματα από μελέτες που ολοκληρώθηκαν κατά το παρελθόν σε 11 σταθμούς που καλύπτουν ολόκληρο σχεδόν το έδαφος της Αυστραλίας και επομένως μια ποικιλία κλιματικών συνθηκών ([Srikanthan and McMahon, 1983](#)). Στον πίνακα έχουν χρησιμοποιηθεί στοιχεία εξατμίσου αντί για PET. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, σε όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας ετήσιες τιμές, ο συντελεστής συσχέτισης ήταν αρνητικός, ενώ στους 6 από τους 11 σταθμούς παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τα μηνιαία στοιχεία των 11 αυτών σταθμών.

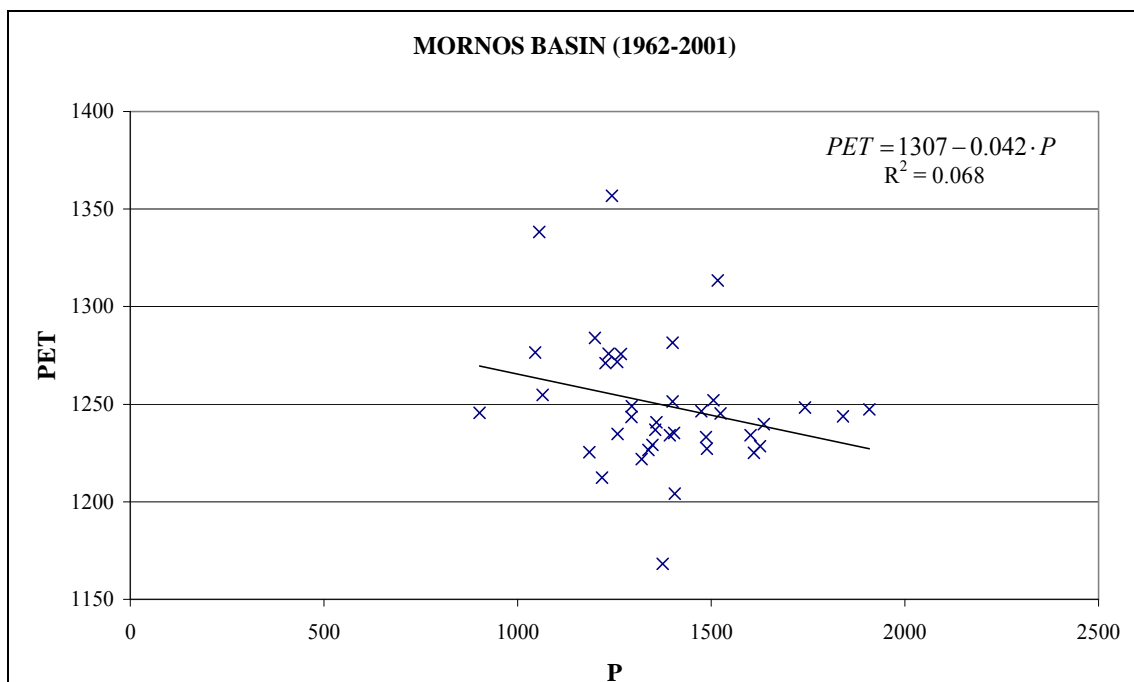
Ανάλογα αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από ένα σημαντικό αριθμό σταθμών στην χώρα μας. Μια παρόμοια ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης παράγεται για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου (Σχήμα 3.1), μετά τη μεταφορά των δεδομένων και των οκτώ (8) μετεωρολογικών σταθμών της λεκάνης απορροής (Σχήμα 3.2) στο επίπεδο της λεκάνης με βάση τις περιοχές επιρροής των σταθμών (σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen).



Πίνακας 3.1. Διάφοροι συντελεστές για την εκτίμηση της ετήσιας εξατμίσωσης και βροχόπτωσης (Εξίσωση 3.1).

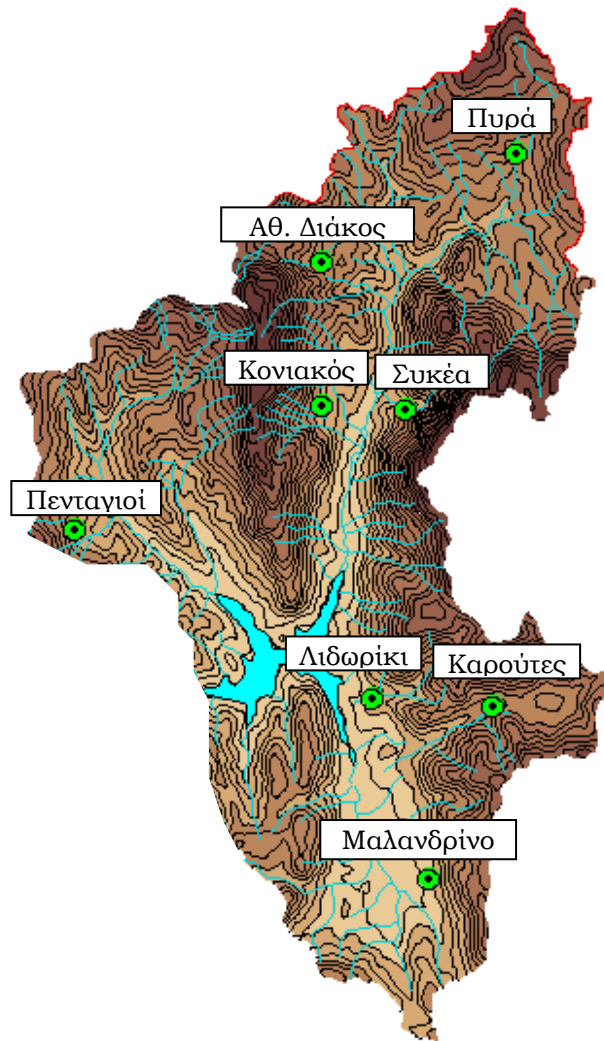
Σταθμός	Αριθμός ετών	Συντελεστής συσχέτισης	Συντελεστής απόφασης	Συντελεστής παλινδρόμησης		Τυπικό σφάλμα
				$b_0$	$b_1$	
Melbourne	11	-0.12	0.02	1450.7	-0.083	100
Sydney	9	-0.81*	0.66	2076.2	-0.230	73
Monto	12	-0.63*	0.42	1858.7	-0.333	76
Cowra	9	-0.93*	0.86	1891.8	-0.806	84
Brisbane	8	-0.27	0.07	1480.5	-0.047	48
Darwin	6	-0.69	0.48	3053.8	-0.149	75
Broome	12	-0.73*	0.54	3161.0	-0.463	146
Perth	12	-0.09	0.01	1886.4	-0.065	113
Adelaide	5	-0.83	0.69	1827.3	-0.416	37
Alice Springs	16	-0.83*	0.68	3695.7	-2.099	265
Kalgoorlie	14	-0.81*	0.65	3093.2	-1.609	137

\*Σημαντικά διαφορετικό από το μηδέν σε επίπεδο 5%.



Σχήμα 3.1. Ετήσια PET σε σχέση με την ετήσια P για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου.

Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή παρουσιάζουν ελαφρά αρνητική συσχέτιση (αν και ο συντελεστής προσδιορισμού είναι πολύ μικρός). Επομένως, το έλλειμμα του νερού είναι μεγαλύτερο εάν και οι δύο μεταβλητές ληφθούν υπόψη, σε σύγκριση με το έλλειμμα που βασίζεται μόνο στη βροχόπτωση.



Σχήμα 3.2. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου με τη θέση των μετεωρολογικών σταθμών.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να τονιστεί ότι για την εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας, εκτός από βροχόπτωση, η συμπερίληψη της εξατμισοδιαπνοής δίνει μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση του ελλείμματος του διαθέσιμου από τη φύση νερού. Με άλλα λόγια, εάν η δυνητική εξατμισοδιαπνοή παραλειφθεί στο ισοζύγιο του νερού (όπως στην περίπτωση των δεικτών ξηρασίας όπως SPI), η σφοδρότητα της ξηρασίας θα υποεκτιμηθεί. Επίσης, η προσπάθεια συσχετισμού ενός δείκτη ξηρασίας με τις αναμενόμενες ζημιές αναμένεται να είναι ασθενέστερη στην περίπτωση παράλειψης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Η χρήση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στην ανάλυση του ελλείμματος νερού είναι επίσης άμεσα χρησιμοποιούμενη σε μελέτες αξιολόγησης της τρωτότητας των υδατικών συστημάτων λόγω της έλλειψης νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι η μεταβλητή που άμεσα ή έμμεσα επηρεάζει τη Ζήτηση όσο και την Προσφορά.

### 3.2.2 Η αρχική εξίσωση

Ο δείκτης RDI βασίζεται στον λόγο δύο αθροιστικών ποσοτήτων, της βροχοπτώσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η αρχική τιμή ( $a$ ) του RDI για συγκεκριμένο μήνα ( $k$ ) μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^k P_j}{\sum_{j=1}^k PET_j} \quad (3.2)$$

όπου  $P_j$  και  $PET_j$  η βροχοπτώση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή αντίστοιχα, του μήνα  $j$  του συγκεκριμένου υδρολογικού έτους. Επειδή το υδρολογικό έτος για τις Μεσογειακές συνθήκες θεωρείται ότι ξεκινά τον Οκτώβριο (για τις Μεσογειακές χώρες), η τιμή του  $k$  για τον μήνα Οκτώβριο είναι  $k=1$ .

Από τη σχέση 3.2 μπορεί να εκτιμηθεί η αρχική τιμή του RDI για οποιαδήποτε χρονική περίοδο ενός συγκεκριμένου έτους. Η τιμή του  $a_k$  μπορεί επίσης να εκτιμηθεί ακόμα και για περιόδους με μήνα έναρξης διαφορετικό από τον Οκτώβριο, στην περίπτωση που κάτι τέτοιο θεωρηθεί αναγκαίο (π.χ. για να εκφράσει καλλιεργητικές ή άλλες συγκεκριμένες περιόδους).

Για τις πραγματικές εφαρμογές στις οποίες η τιμή του  $a_k$  θα υπολογιστεί ως γενικός μετεωρολογικός δείκτης, οι χρονικές περίοδοι που προτείνονται είναι 3, 6, 9 και 12 μήνες. Στην περίπτωση των 12 μηνών, το αποτέλεσμα κάθε έτους μπορεί να συγκριθεί άμεσα με τον δείκτη ξηρότητας (aridity index) της συγκεκριμένης περιοχής. Αν ο δείκτης  $a_k$  για κάποιο συγκεκριμένο έτος είναι χαμηλότερος από τον δείκτη ξηρότητας όπως εκτιμάται σύμφωνα με τον UNEP (1992), τότε η περιοχή θεωρείται ότι υφίσταται ξηρασία για το συγκεκριμένο έτος.

### 3.2.3 Κανονικοποίηση και Τυποποίηση – Οι τελικές μορφές του RDI

Η τιμή  $a_k$  του RDI, χρησιμοποιεί φυσικά τόσο τη βροχοπτώση όσο και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, δεν μπορεί όμως να δώσει άμεση απάντηση σχετικά με την ύπαρξη ή όχι ξηρασίας σε μια περιοχή. Για να δοθεί η απάντηση στο ερώτημα αυτό, θα πρέπει η τιμή  $a_{12}$  να συγκριθεί με τη μέση τιμή  $\bar{a}_{12}$ , που είναι ίση με τον δείκτη ξηρότητας της περιοχής που εξετάζεται. Η διαφορά μάλιστα  $\bar{a}_{12} - a_{12}$  αποτελεί μέτρο της έντασης της ξηρασίας.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό αναπτύχθηκαν δύο εκφράσεις του δείκτη ικανές να παρουσιάζουν τόσο την ύπαρξη της ξηρασίας όσο και την έντασή της, χωρίς να απαιτείται η σύγκριση του δείκτη με κάποια άλλη ποσότητα. Οι δύο αυτές εκφράσεις ονομάζονται Normalised RDI

(κανονικοποιημένος RDI) και Standardised RDI (τυποποιημένος RDI).

Ο Normalised RDI μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (3.3)$$

Ο Standardised RDI μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (3.4)$$

όπου  $y_k$  είναι ο  $\ln a_k$ ,  $\bar{y}_k$  είναι ο αριθμητικός μέσος όρος και  $\hat{\sigma}_k$  η τυπική απόκλιση.

Η εκτίμηση του τυποποιημένου RDI ( $RDI_{st}$ ) με βάση την προηγούμενη εξίσωση στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι τιμές του  $a_k$  ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή, ενώ η διαδικασία υπολογισμού είναι ανάλογη με αυτή που ακολουθείται και για τον δείκτη SPI. Επειδή μάλιστα η γενική συμπεριφορά του RDI είναι παρόμοια με αυτή του SPI και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους μπορεί να γίνει με παρόμοιο τρόπο, οι δύο δείκτες είναι άμεσα συγκρίσιμοι και συχνά τα αποτελέσματά τους αντιπαραβάλλονται.

#### 3.2.4 Επίπεδα του RDI

Η άμεση ερμηνεία των αποτελεσμάτων ενός δείκτη είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του. Καθώς τα μετρήσιμα αποτελέσματα δεν γίνονται άμεσα κατανοητά παρά μόνο αν συνδεθούν με κάποιο ποιοτικό χαρακτηριστικό, όλοι οι δείκτες ξηρασίας συνοδεύονται από μια κλίμακα τιμών των αποτελεσμάτων τους που ερμηνεύονται με ποιοτικό τρόπο κυρίως ως προς την ένταση της εξεταζόμενης ξηρασίας.

Ο ετήσιος δείκτης RDI στην αρχική του έκφραση  $a_{12}$  μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τον δείκτη ξηρότητας του UNEP, σύγκριση ωστόσο που δίνει ουσιαστικά μόνο μια γενική εικόνα σχετικά με το αν το έτος που εξετάζεται βρίσκεται σε καθεστώς ξηρασίας ή όχι. Μια προσέγγιση σχετικά με την σφοδρότητα της ξηρασίας μπορεί να δοθεί αν εκτιμηθούν διάφορα ποσοστά του δείκτη ξηρότητας κάτω από τα οποία θεωρούμε διαφορετικές εντάσεις της ξηρασίας. Για παράδειγμα, μπορούμε να συγκρίνουμε τον δείκτη  $a_k$  με το 70% της τιμής του δείκτη ξηρότητας, επίπεδο κάτω από το οποίο θεωρούμε την ένταση της ξηρασίας σημαντική (Tsakiris and Vangelis, 2005).

Η έκφραση του RDI που μπορεί άμεσα να συνδεθεί με την ένταση είναι ο τυποποιημένος RDI. Καθώς η συμπεριφορά του  $RDI_{st}$  είναι παρόμοια με αυτή

του SPI λόγω της διαδικασίας με την οποία εκτιμώνται οι δύο δείκτες, τα επίπεδα της ποιοτικής διαφοροποίησης της έντασης της ξηρασίας του  $RDI_{st}$  είναι παρόμοια με αυτά του SPI (Tsakiris et al., 2007) και παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

*Πίνακας 3.2. Επίπεδα έντασης της ξηρασίας κατά  $RDI_{st}$ .*

<b>Τιμή του <math>RDI_{st}</math></b>	<b>Κατηγορία ξηρασίας</b>
> 2.0	ακραία υγρή
1.50 – 1.99	σημαντικά υγρή
1.00 – 1.49	μέτρια υγρή
-0.99 – 0.99	κανονικές συνθήκες
-1.00 – -1.49	μέτρια ξηρή
-1.50 – -1.99	σημαντικά ξηρή
< -2.00	ακραία ξηρή

Η κατηγορία των κανονικών συνθηκών μπορεί να διαιρεθεί και σε ένα ακόμη επίπεδο αν στην περιοχή που εξετάζουμε παρουσιάζονται πάντα πολύ χαμηλής έντασης ξηρασίες, σχεδόν στις κανονικές συνθήκες, οι οποίες απαιτείται να αναλυθούν περισσότερο. Για την περίπτωση αυτή προτείνεται οι τιμές από -0.50 έως -0.99 να αποτελούν μια ακόμη κατηγορία, το ήπια ξηρή (Tigkas et al., 2008).

Μια ακόμη προσέγγιση των επιπέδων της ξηρασίας μπορεί να γίνει μέσα από τις περιόδους επαναφοράς που αντιστοιχούν σε κάθε επίπεδο ξηρασίας. Οι περίοδοι επαναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς η εκτεταμένη τους αποδοχή σε όλους τους κλάδους της υδρολογίας τους καθιστά άμεσα κατανοητούς από μεγάλο εύρος επιστημόνων ακόμα και ανθρώπους χωρίς εξοικείωση με φαινόμενα ξηρασίας, η ποιοτική απόδοση ωστόσο των επιπέδων ξηρασίας παραμένει κατανοητή σε ακόμη ευρύτερο κοινό.

### 3.2.5 Εξελίξεις στον RDI – Η κατάλληλη κατανομή για μηδενικές τιμές βροχής

Κατά τον υπολογισμό του δείκτη  $RDI_{st}$  για μικρές χρονικές περιόδους, όπως για παράδειγμα η μηνιαία, είναι πιθανό να δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα με τη χρήση της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Το πρόβλημα δημιουργείται στην περίπτωση μηδενικών τιμών βροχόπτωσης για το σύνολο της εξεταζόμενης περιόδου (π.χ. ενός καλοκαιρινού μήνα) που έχουν ως αποτέλεσμα τη μηδενική τιμή του  $a_k$ . Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση 3.4 δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί. Η κατανομή γάμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Εκτεταμένη έρευνα με τη χρήση διαφόρων χρονοσειρών δεδομένων από

διάφορες περιοχές και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες (3, 6, 9 και 12 μήνες) έδειξε ότι οι τιμές του  $a_k$  ακολουθούν ικανοποιητικά τόσο τη λογαριθμοκανονική κατανομή όσο και την κατανομή γάμα, σε όλες τις περιοχές και τις χρονικές κλίμακες. Ωστόσο, στις περισσότερες των περιπτώσεων η κατανομή γάμα προσαρμόζονταν ικανοποιητικότερα στα δεδομένα των χρονοσειρών. Επομένως, μπορούμε να δεχτούμε ότι ο υπολογισμός του  $RDI_{st}$  στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να επιτευχθεί καλύτερα με την προσαρμογή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (pdf) της κατανομής γάμα στις τιμές του  $a_k$ , ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής γάμα δίνεται από την εξίσωση:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad (3.5)$$

όπου  $\gamma$  η παράμετρος σχήματος,  $\beta$  η παράμετρος κλίμακας,  $x$  η τιμή της μεταβλητής και  $\Gamma(\gamma)$  η συνάρτηση γάμα:

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} y^{\gamma-1} e^{-y} dy \quad (3.6)$$

Οι παράμετροι  $\gamma$  και  $\beta$  της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής γάμα εκτιμούνται για κάθε χρονοσειρά και χρονική κλίμακα (1, 3, 6, 9, 12 μήνες, κλπ). Οι εκτιμήσεις με τη μέθοδο του μέγιστου πιθανοφάνειας (maximum likelihood method) των παραμέτρων  $\gamma$  και  $\beta$  είναι:

$$\gamma = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\gamma} \quad (3.7)$$

όπου  $A$  είναι:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3.8)$$

και  $n$  είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων.

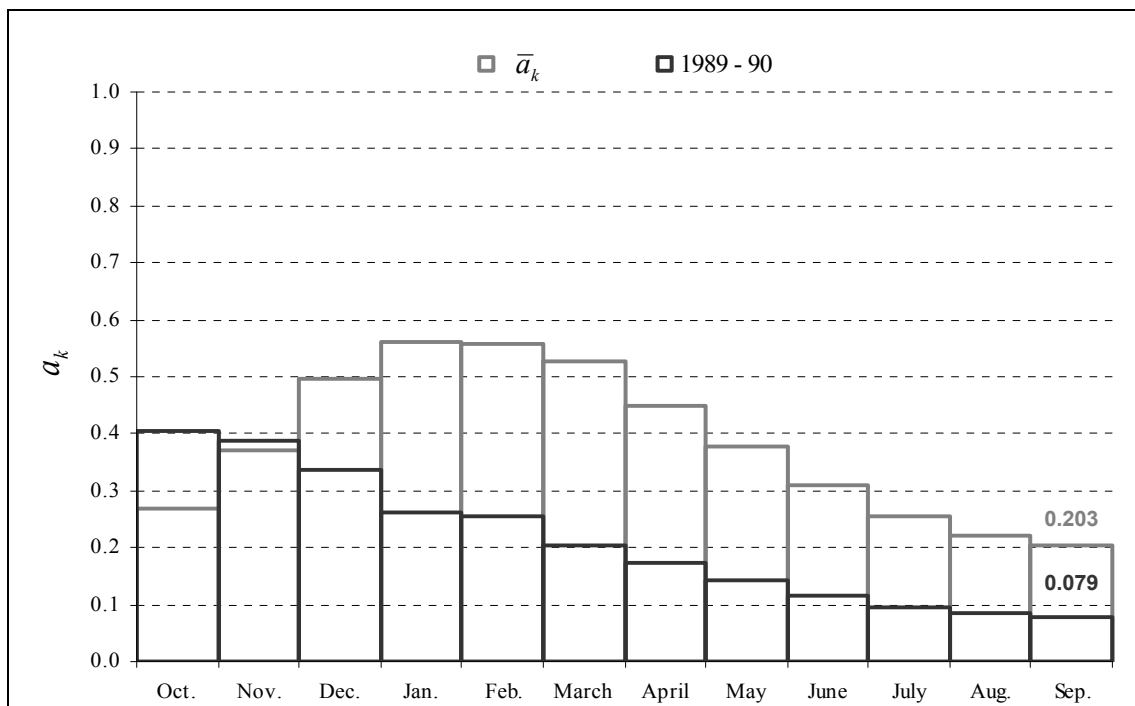
Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να βρεθεί η αθροιστική πιθανότητα του  $a_k$  για ένα συγκεκριμένο έτος στην περιοχή που εξετάζεται. Καθώς η συνάρτηση γάμα δεν ορίζεται για  $x = 0$  και η χρονοσειρά της μεταβλητής  $x$  μπορεί να περιέχει μηδενικά, η αθροιστική πιθανότητα γίνεται:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (3.9)$$

όπου  $q$  είναι η πιθανότητα μηδενικής βροχόπτωσης και  $G(x)$  είναι η αθροιστική πιθανότητα της μη ολοκληρωμένης συνάρτησης γάμα (incomplete gamma function). Αν  $m$  είναι ο αριθμός των μηδενικών στην στη χρονοσειρά  $a_k$ , τότε το  $q$  μπορεί να εκτιμηθεί ως  $m/n$ . Η αθροιστική πιθανότητα  $H(x)$  μετασχηματίζεται τότε στην τυπική κανονική τυχαία μεταβλητή  $z$ , με μέσο όρο «μηδέν» και τυπική απόκλιση «ένα» (Abramowitz and Stegun, 1965), η οποία αποτελεί την τιμή του  $RDI_{st}$ .

### 3.2.6 Παραδείγματα εφαρμογής για την κατανόηση του RDI

Χρησιμοποιώντας μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το υδρολογικό έτος 1989-90 από τον μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου στις Κυκλάδες, μιας περιοχής που είναι γνωστή για τα προβλήματα ξηρασίας και λειψυδρίας, κατασκευάστηκε το γράφημα του Σχήματος 3.3.

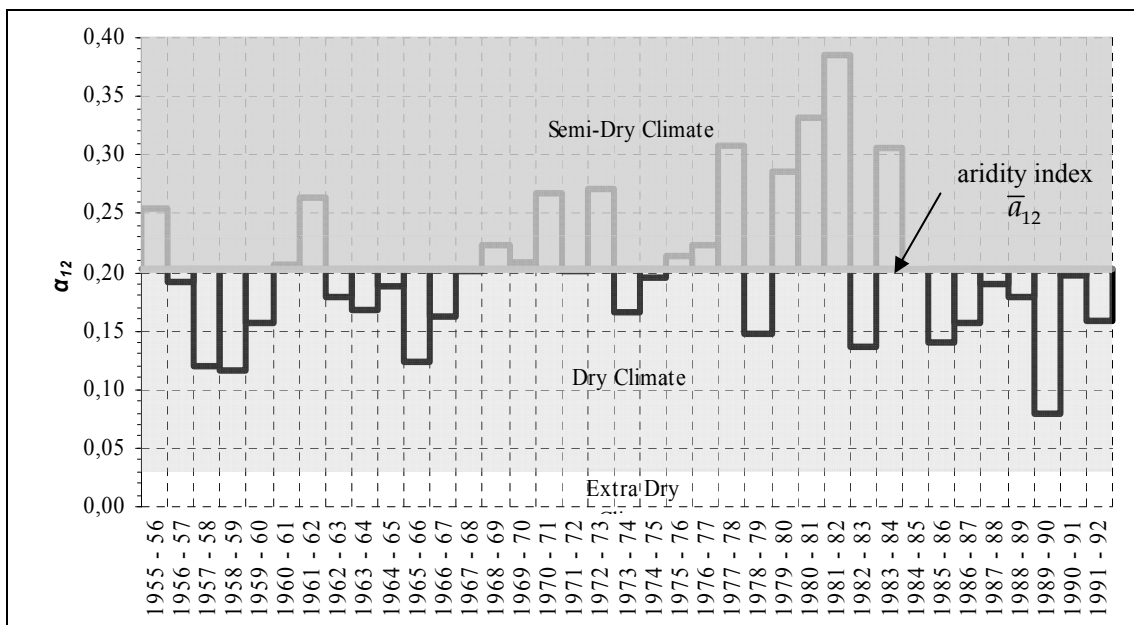


Σχήμα 3.3. Η εξέλιξη του  $a_k$  για το υδρολογικό έτος 1989-90 στο μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου σε σύγκριση με το  $\bar{a}_k$ .

Στο Σχήμα αυτό, παρουσιάζεται η τιμή του  $a_k$  σε μηνιαία χρονική κλίμακα, παράλληλα με την μέση τιμή  $\bar{a}_k$ . Εμπειρικά η τιμή  $0.70 \cdot \bar{a}_k$  συνήθως θεωρείται ως το κατώφλι κάτω από το οποίο η ξηρασία είναι σημαντική. Στο γράφημα αυτό μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως η ξηρασία εξελίσσεται κατά τη διάρκεια ενός ξηρού έτους. Αν και κατά τον Οκτώβριο και το Νοέμβριο το  $a_k$  είναι μεγαλύτερο

από το  $\bar{a}_k$ , κατά τη διάρκεια των επόμενων μηνών η κατάσταση έχει αντιστραφεί, καταλήγοντας σε  $a_{12} = 0.079$  σε σύγκριση με  $\bar{a}_{12} = 0.203$  (τιμή ίση με το δείκτη ξηρότητας) και με  $0.70 \cdot \bar{a}_{12} = 0.142$ .

Ο υπολογισμός του  $a_{12}$  για την περίοδο 1955-56 έως 1991-92 και η αποτύπωσή του σε διάγραμμα για κάθε χρόνο μπορεί εύκολα να αναδείξει τα έτη που θεωρούνται ξηρά, καθώς το  $a_{12}$  κάθε έτους είναι άμεσα συγκρίσιμο με το δείκτη ξηρότητας ( $\bar{a}_{12}$ ) της περιοχής. Η απόκλιση ( $\bar{a}_{12} - a_{12}$ ) δίνει επίσης ένα μέτρο της σφοδρότητας της ξηρασίας για το κάθε συγκεκριμένο έτος (Σχήμα 3.4). Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται επίσης οι κλάσεις του κλίματος με βάση τον δείκτη ξηρότητας για την περιοχή της Νάξου.



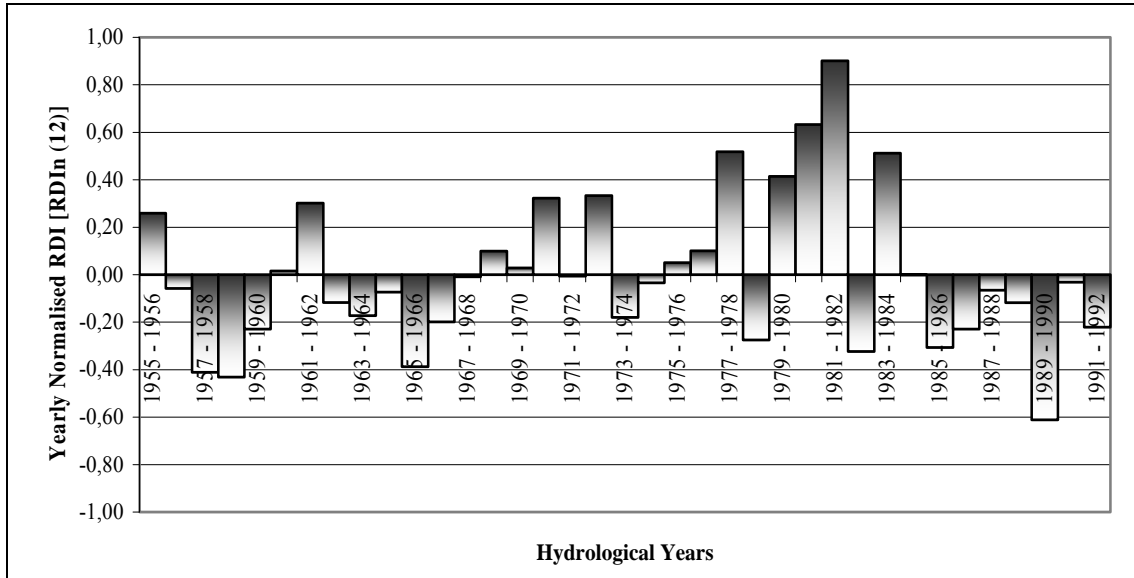
Σχήμα 3.4. Ετήσιος  $a_{12}$  σε σύγκριση με τον δείκτη ξηρότητας ( $\bar{a}_{12}$ ) στην περιοχή της Νάξου.

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται ο ετήσιος κανονικοποιημένος δείκτης RDI [ $RDI_n(12)$ ] για το μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου και για την περίοδο 1955-56 έως 1991-92. Οι αρνητικές τιμές δείχνουν τα ξηρά έτη της ιστορικής χρονοσειράς. Όπως είναι φανερό από το γράφημα, η πιο σημαντική ξηρασία συνέβη κατά το έτος 1989-90. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου 1985-86 έως το 1991-92, όλα τα χρόνια θεωρούνται ότι παρουσιάζουν ξηρασία, καθώς ο  $RDI_n(12)$  παίρνει συνεχώς αρνητικές τιμές.

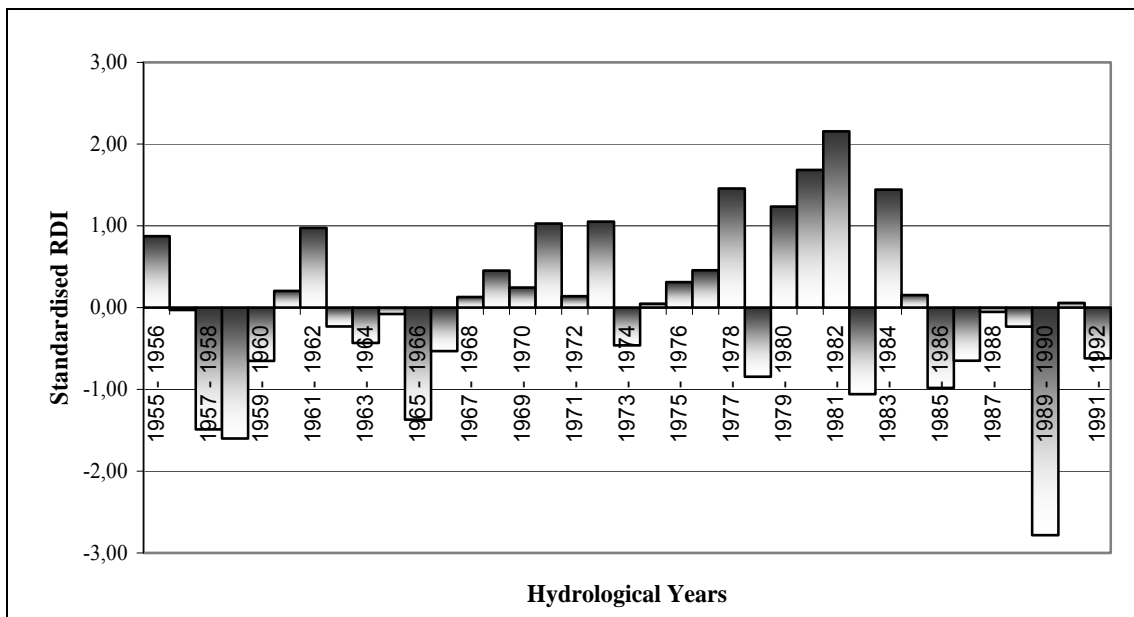
Ο τυποποιημένος RDI ( $RDI_{st}$ ) έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον δείκτη SPI και επομένως είναι άμεσα συγκρίσιμος με αυτόν, ενώ ακολουθεί και τα ίδια



όρια επιπέδων ξηρασίας με τον SPI, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ο ετήσιος  $RDI_{st}$  για το παραπάνω παράδειγμα της Νάξου.



Σχήμα 3.5. Κανονικοποιημένος ετήσιος RDI για τον μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου και για την περίοδο 1955-56 έως 1991-92.

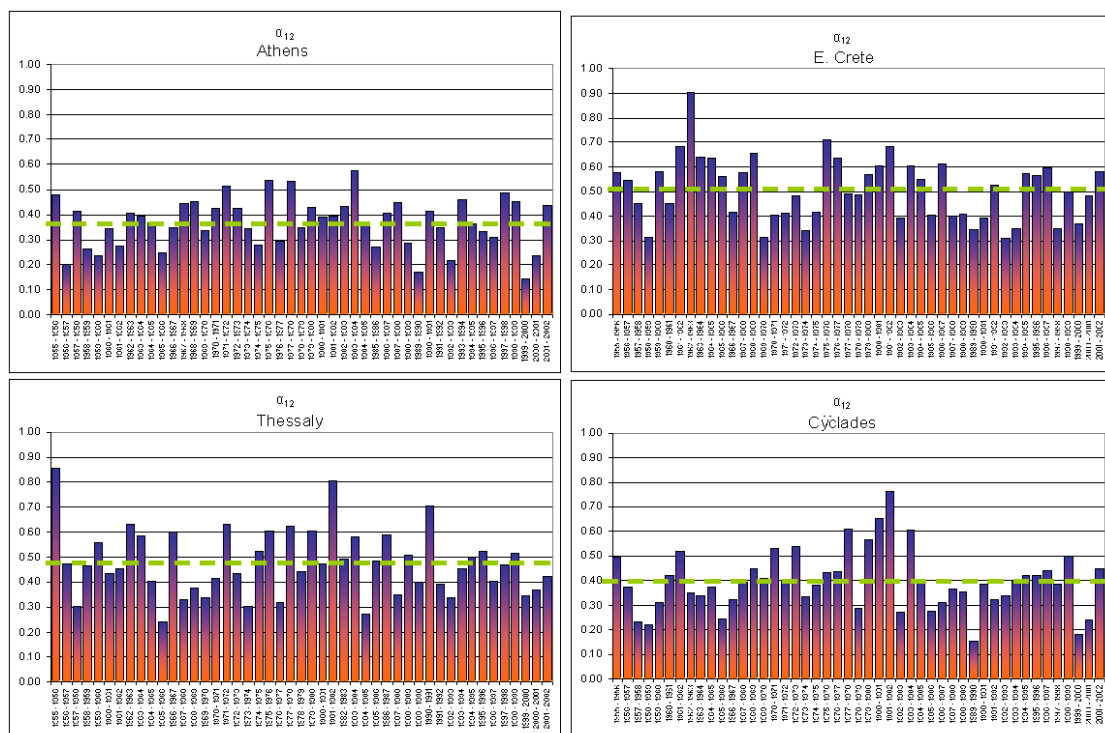


Σχήμα 3.6. Ετήσιος  $RDI_{st}$  για το μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου.

Σύμφωνα με την εξίσωση 3.4, η τυποποίηση του RDI επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι το  $\alpha_k$  ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή. Αν και η υπόθεση αυτή δοκιμάστηκε με επιτυχία με δεδομένα από διάφορες περιοχές στην Ελλάδα, δεν είναι δεσμευτική. Η κατανομή γάμα μπορεί να αποτελέσει (όπως παρουσιάστηκε) καταλληλότερη επιλογή κυρίως αν πρόκειται να

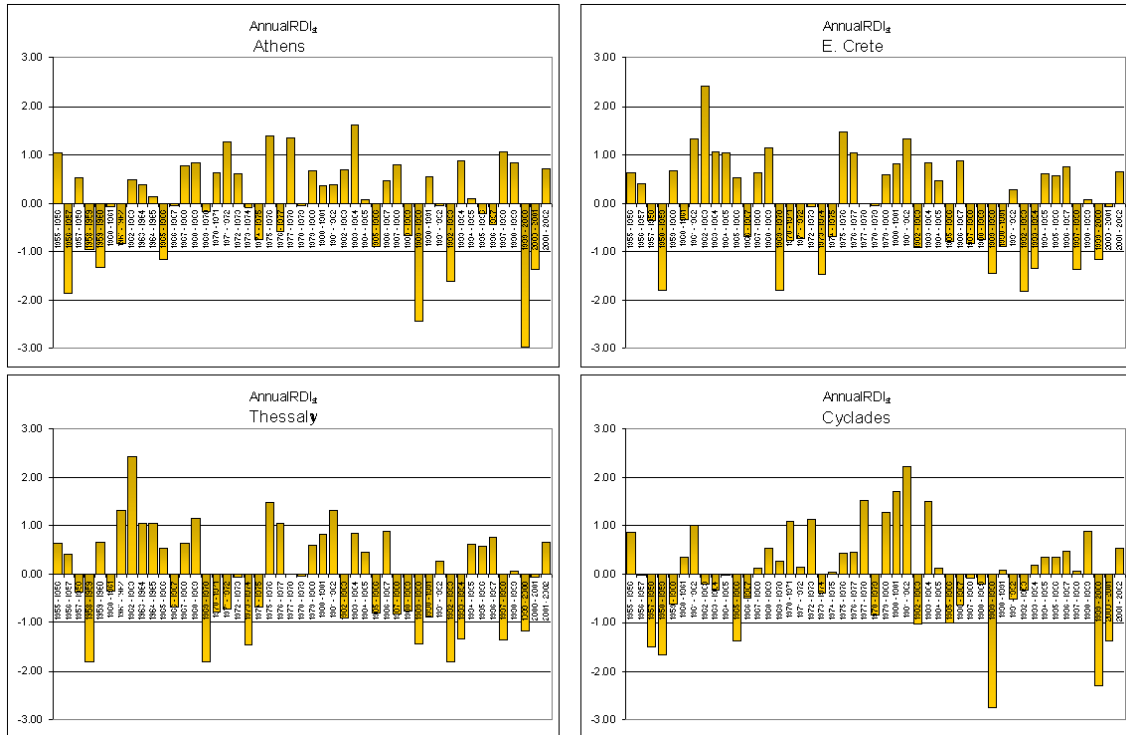
χρησιμοποιηθούν πολύ μικρές χρονικές κλίμακες. Προτείνεται ωστόσο να μην χρησιμοποιούνται άλλες κατανομές, ώστε η διαδικασία εκτίμησης της έντασης της ξηρασίας να είναι ομοιόμορφη σε κάθε περίπτωση χρήσης του δείκτη.

Σε μια πιο εμπειρισταωμένη προσπάθεια εφαρμογής του RDI που να καλύπτει μεγάλο μέρος του Ελληνικού χώρου, ώστε να εξεταστούν διαφορετικές τοπικές συνθήκες, επιλέχθηκαν τέσσερις περιοχές: η Θεσσαλία, η Αττική, οι Κυκλάδες και η Ανατολική Κρήτη, που θεωρείται μια από τις πιο επηρεαζόμενες στην ξηρασία περιοχές του Ελληνικού χώρου. Δεδομένα από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς κάθε περιοχής αξιοποιήθηκαν, ώστε να παραχθούν αντιπροσωπευτικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας (μέσης, μέγιστης και ελάχιστης) για κάθε περιοχή, για την περίοδο 1955-2002. Η αρχική μορφή του δείκτη RDI σε ετήσια βάση ( $a_{12}$ ) παρουσιάζεται για τις τέσσερις περιοχές στο Σχήμα 3.7, στο οποίο παρουσιάζεται επίσης και η μέση τιμή του δείκτη που αντιστοιχεί στο Δείκτη Ξηρότητας για κάθε περιοχή.



Σχήμα 3.7. Τιμές του  $a_{12}$  για την περίοδο 1955-2002 (η πράσινη γραμμή δηλώνει τη μέση τιμή [Δείκτη Ξηρότητας]).

Οι τιμές του  $RDI_{st}$ , που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8, δίνουν τη δυνατότητα ευκολότερης αναγνώρισης των ετών ξηρασίας για κάθε περιοχή, σε σχέση με το  $a_{12}$ . Είναι για παράδειγμα φανερό ότι για το έτος 1989-90 όλες οι υπό εξέταση περιοχές εμφάνισαν ξηρασία, η οποία μάλιστα μπορεί να καταταχθεί από σημαντική έως ακραία σύμφωνα με τα επίπεδα ξηρασίας του RDI.

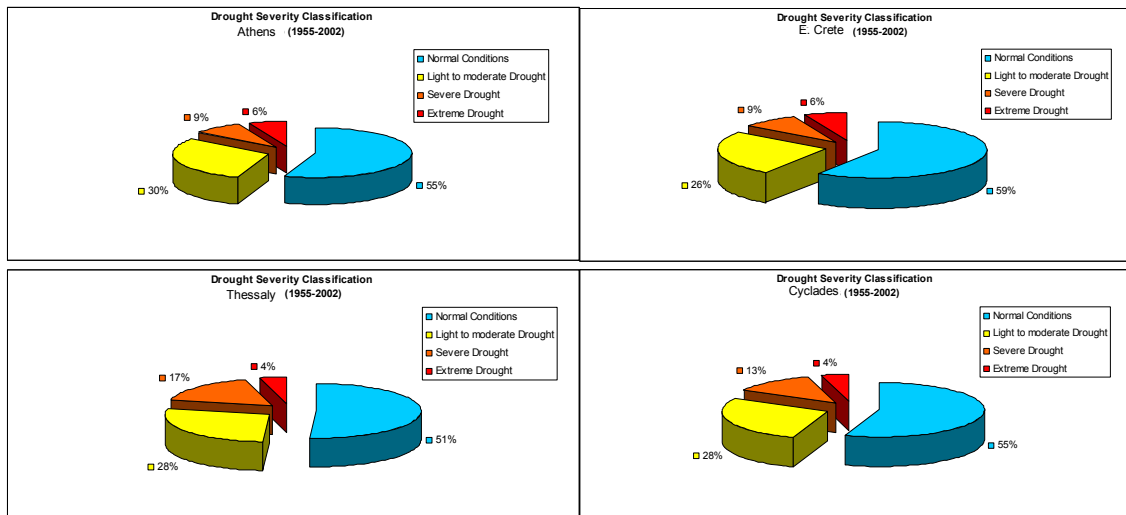


Σχήμα 3.8. Τιμές του  $RDI_{st}$  για τις υπό εξέταση περιοχές (περίοδος: 1955-2002).

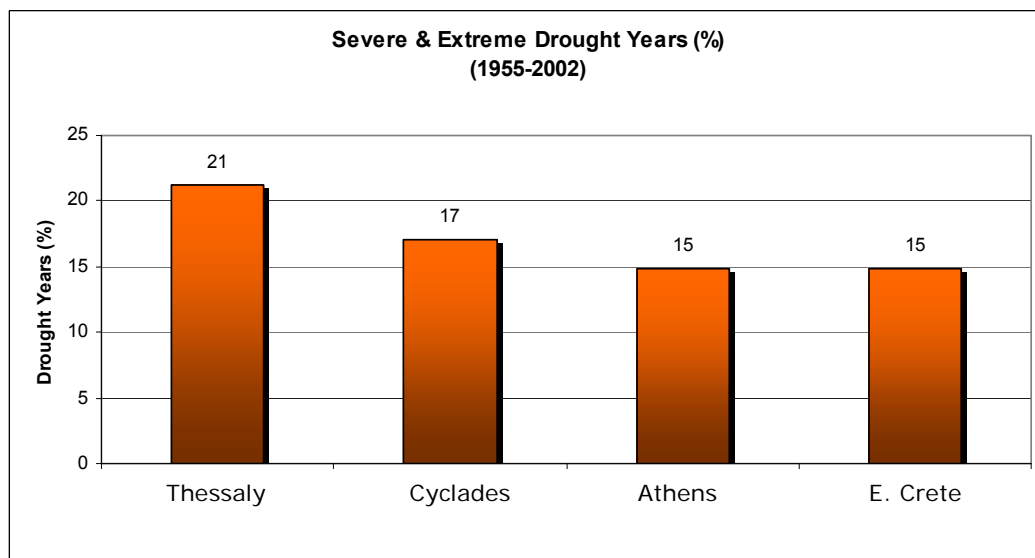
Άλλα σημαντικά γεγονότα ξηρασίας που μπορούν να εξαχθούν από το ίδιο Σχήμα είναι:

- Για τη Θεσσαλία τα υδρολογικά έτη και περίοδοι: 1958-59, 1969-70, 1970-74, 1992-94, 1997-98 και 1999-2000.
- Για την Αττική τα υδρολογικά έτη και περίοδοι: 1956-57, 1959-60, 1965-66, 1992-93 και 1999-2001.
- Για τις Κυκλάδες τα υδρολογικά έτη και περίοδοι: 1957-59, 1965-66 και 1999-2001.
- Για την Ανατολική Κρήτη τα υδρολογικά έτη και περίοδοι: 1958-59, 1969-70, 1973-74, 1992-94, 1997-98 και 1999-2000.

Οι συχνότητες εμφάνισης ετών ξηρασίας της περιόδου 1955-2002 για κάθε μία από τις υπό μελέτη περιοχές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται τα αθροιστικά ποσοστά των ξηρασιών που κατατάσσονται στα επίπεδα σημαντικής και ακραίας ξηρασίας για την ίδια περίοδο. Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο Σχήμα γίνεται φανερό ότι στη συγκεκριμένη περίοδο η Θεσσαλία αντιμετώπισε τα περισσότερα γεγονότα σημαντικής και ακραίας ξηρασίας με ποσοστό 21%, ακολουθούμενη από τις Κυκλάδες με ποσοστό 17%, την Αττική με ποσοστό 15% και την Ανατολική Κρήτη με ποσοστό 15%.



Σχήμα 3.9. Συχνότητα εμφάνισης ετών ξηρασίας (περίοδος: 1955-2002).



Σχήμα 3.10. Ποσοστά ετών σημαντικής και ακραίας ξηρασίας (1955-2002).

Μία ακόμη σημαντική πτυχή που πρέπει να εξετάζεται μαζί με την ένταση της ξηρασίας, είναι η διάρκεια της ξηρασίας, καθώς ακόμα και μια ήπια ξηρασία μπορεί να δημιουργήσει πολύ μεγάλα προβλήματα αν διαρκέσει για πολύ μεγάλη χρονική περίοδο (π.χ. μερικά χρόνια). Στην περίοδο που εξετάστηκε, τα μεγαλύτερης διάρκειας γεγονότα ξηρασίας εμφανίστηκαν στις Κυκλάδες, όπου καταγράφονται δύο γεγονότα ξηρασίας με διάρκεια πέντε έτη, ενώ γεγονότα σημαντικού και ακραίου επιπέδου ξηρασίας διήρκεσαν δύο συνεχόμενα έτη. Στην Ανατολική Κρήτη παρουσιάστηκαν πέντε γεγονότα ξηρασίας διάρκειας δύο ετών, ενώ καταγράφεται ένα γεγονός σημαντικού και ακραίου επιπέδου ξηρασίας διάρκειας δύο ετών. Παρόμοια είναι η κατάσταση στην Αττική για την περίοδο που εξετάστηκε με έξι γεγονότα ξηρασίας διάρκειας δύο ετών, ένα από τα οποία

στο επίπεδο της σημαντικής και ακραίας ξηρασίας. Τέλος, στη Θεσσαλία παρουσιάστηκαν τα περισσότερα γεγονότα ξηρασίας ενός έτους (23 γεγονότα), με μόνο ένα γεγονός μεγάλης διάρκειας (τεσσάρων ετών), ενώ δεν εμφανίστηκαν γεγονότα σημαντικού και ακραίου επιπέδου ξηρασίας διάρκειας μεγαλύτερης του ενός έτους.

### 3.2.7 Πλεονεκτήματα του δείκτη RDI

Ένας από τους δημοφιλέστερους δείκτες ξηρασίας, όπως είναι γνωστό, είναι ο SPI. Η ευρεία χρήση του SPI οφείλεται πιθανότατα στην απλή του χρήση που απαιτεί εύκολους υπολογισμούς και στις χαμηλές απαιτήσεις του σε δεδομένα που δίνουν τη δυνατότητα ευρείας εφαρμογής του σχεδόν σε όλα τα μέρη του κόσμου.

Παρόλα αυτά, το έλλειμμα νερού δεν είναι σωστό να εκτιμάται βασισμένο μόνο στη «εισορή» (π.χ. βροχόπτωση) αλλά και στην «εκροή» (π.χ. κατανάλωση νερού). Βασισμένος στη λογική αυτή, ο νέος δείκτης ξηρασίας Reconnaissance Drought Index, ενσωματώνει δύο καθοριστικούς παράγοντες του ισοζυγίου, τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Ο νέος δείκτης RDI είναι απλής μορφής, με δυνατότητα παγκόσμιας εφαρμογής και πιο κατανοητός από τον SPI, με ποιο ισχυρή επιστημονική βάση. Μερικά από τα πλεονεκτήματα του δείκτη είναι τα εξής:

1. Βασίζεται σε φυσική προσέγγιση, δεδομένου ότι υπολογίζει το συνολικό έλλειμμα μεταξύ της ζήτησης λόγω εξάτμισης της ατμόσφαιρας και της κατακρήμνισης (κυρίως βροχόπτωσης).
2. Μπορεί να υπολογιστεί για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα. Ωστόσο, προτείνεται να υπολογίζεται για χρονικές περιόδους 3, 6, 9 και 12 μηνών, καθώς οι περίοδοι αυτές είναι πιο χρήσιμες για συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων και τοποθεσιών. Ο Οκτώβριος, πρώτος μήνας του κάθε υδρολογικού έτους στη Μεσόγειο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ο μήνας έναρξης των περιόδων υπολογισμού του RDI.
3. Μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικός δείκτης για τη σύνδεσή του με υδρολογικές και γεωργικές ξηρασίες.
4. Η ετήσια τιμή της αρχικής μορφής του δείκτη  $a_k$  μπορεί να συγκριθεί άμεσα με τον Δείκτη Ξηρότητας της περιοχής.
5. Είναι ιδανικός δείκτης για τη μελέτη των επιπτώσεων της αστάθειας του κλίματος.

Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο δείκτης RDI είναι ένας πολλά υποσχόμενος νέος δείκτης για την εκτίμηση της σφοδρότητας της

ξηρασίας. Λόγω του εύκολου υπολογισμού του, ο RDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ξηρασίας και σε κάποιο βαθμό για μικρής χρονικής διάρκειας πρόβλεψη της ξηρασίας. Σε πολλές περιπτώσεις στη λεκάνη της Μεσογείου, στην οποία υπάρχει μια καλά καθορισμένη εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων, φαίνεται πολύ χρήσιμο για τους υπεύθυνους για τη διαχείριση του νερού, να γνωρίζουν την εξέλιξη της κατάστασης 3 ή 6 μήνες μετά την έναρξη του υδρολογικού έτους. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να προσαρμόσουν τα σχέδια διαχείρισης για το τέλος της άνοιξης και το καλοκαίρι, περιόδους κατά τις οποίες η ζήτηση σε νερό είναι συνήθως πολύ υψηλή και δεν υπάρχουν βροχοπτώσεις που να αναμένεται να συμβάλλουν σημαντικά στην ενίσχυση των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού.

Η σημαντικότητα του RDI ενισχύεται περισσότερο με τη σύνδεση του με τις επιπτώσεις της ξηρασίας. Η μελέτη των επιπτώσεων ειδικά σε σχέση με τον RDI για μικρές χρονικές διάρκειες (3 και 6 μηνών) και η σύνδεση του RDI με συναρτήσεις ζήτησης θα οδηγήσουν σε ένα πιο ορθολογικό προσδιορισμό των επιπέδων σφοδρότητας της ξηρασίας.

### 3.3 Ο ρόλος της εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον υπολογισμό του δείκτη RDI

Είναι πλέον σαφές, ειδικά σε μια εποχή με έντονα σημάδια κλιματικής αλλαγής, ότι η εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας θα πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον μια ακόμη καθοριστική παράμετρο εκτός της βροχόπτωσης, αυτή της εξατμισοδιαπνοής, ώστε να μπορεί να αποδώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση μια περιοχής σε σχέση με την ξηρασία, ενώ ταυτόχρονα να διατηρεί χαμηλές απαιτήσεις σε δεδομένα.

Όπως ήδη έχει περιγραφεί, ο Reconnaissance Drought Index (RDI) ενσωματώνει εκτός από την βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, για τον υπολογισμό του. Πρόκειται λοιπόν για υπολογισμό ο οποίος στηρίζεται σε μια μετρήσιμη (βροχόπτωση) και μια υπολογιζόμενη (δυνητική εξατμισοδιαπνοή) παράμετρο.

Καθώς η δυνητική εξατμισοδιαπνοή δεν είναι μετρήσιμη, τα αποτελέσματά της εξαρτώνται από τη μέθοδο εκτίμησής της. Είναι λοιπόν κρίσιμο να διερευνηθεί κατά πόσο διαφορετικές εκτιμήσεις της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα του RDI μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία του. Επειδή είναι προφανές ότι δεν είναι δυνατό να εξαντληθεί ο αρκετά μεγάλος κατάλογος μεθοδολογιών εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η επίδραση στον RDI

των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Στόχος σε κάθε περίπτωση είναι, είτε η επιλογή μιας μοναδικής μεθόδου εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για χρήση με τον δείκτη RDI, ώστε να επιτευχθεί η καθολικότητα στη χρήση του δείκτη με την παραγωγή ομοιογενών αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση, είτε η απόδειξη ότι ο RDI δεν επηρεάζεται από την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής διατηρώντας χωρίς παρέκκλιση τα συγκριτικά του πλεονεκτήματα.

### 3.3.1 Εκτίμηση της εξατμιδοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί βασική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου. Η εκτίμησή της είναι μια σημαντική πτυχή στη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους, δεδομένου ότι αποτελεί τον κυρίαρχο «συνδετικό κρίκο» μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου. Οποιαδήποτε εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους εξαρτάται από την ικανότητα συσχετισμού των μεταβολών στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή με τις προβλεπόμενες αλλαγές στη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (Yates and Strzepak, 1994). Προκειμένου να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη των αλλαγών στην εξατμισοδιαπνοή, η καλή εκτίμηση των κινητήριων μηχανισμών αυτής της αλλαγής θεωρείται το κατάλληλο σημείο εκκίνησης.

Μια σειρά από προσεγγίσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί σε όλο τον κόσμο για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Οι μέθοδοι αυτές εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: υδρολογικές ή ανάλυσης υδατικού ισοζυγίου, αναλυτικές μέθοδοι που βασίζονται στις κλιματικές μεταβλητές και εμπειρικές εκτιμήσεις. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από φυσικά βασιζόμενες προσεγγίσεις και η χρήση του στην εκτίμηση της αλλαγής του κλίματος περιορίζεται στο εργαστήριο. Στη δεύτερη κατηγορία, οι διαδικασίες εξάτμισης και διαπνοής περιγράφονται μέσα από μαθηματικές σχέσεις που εστιάζονται σε δύο κύρια κλιματολογικά στοιχεία, το ενεργειακό ισοζύγιο και τη μεταφορά μάζας (Strzepak and Yates, 1997). Γνωστά παραδείγματα μεθόδων αυτής της κατηγορίας είναι οι εξισώσεις Penman-Monteith και Priestly-Taylor. Τέλος, οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται κυρίως στην θερμοκρασία και έγιναν πολύ δημοφιλείς λόγω των περιορισμένων απαιτήσεων τους σε δεδομένα. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εφαρμόσιμες μόνο σε κάθε συγκεκριμένη τοποθεσία (με βάση τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες) με αποτέλεσμα να απαιτούν «βαθμονόμηση» (calibration) με τη συσχέτιση των εκτιμήσεών τους μετρημένες τιμές. Ωστόσο, δεδομένου ότι παρέχουν καλές εκτιμήσεις και τα

δεδομένα που απαιτούν είναι διαθέσιμα σχεδόν παντού, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Μέθοδοι σε αυτή την κατηγορία είναι οι πολύ γνωστές εξισώσεις Hargreaves, Thornthwaite και Blaney-Criddle.

Καθώς ο στόχος του RDI είναι η χρήση του μικρότερου δυνατού αριθμού δεδομένων, οι μέθοδοι εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) που τελικά επιλέχθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούν κατά το δυνατόν μόνο δεδομένα θερμοκρασίας και επομένως ανήκουν στην τελευταία από τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Εκτός από τις μεθόδους αυτές, χρησιμοποιήθηκε επίσης η μέθοδος Penman-Monteith όπως περιγράφεται από τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) και συγκεκριμένα η μέθοδος που απαιτεί μόνο δεδομένα θερμοκρασίας με κατάλληλη εκτίμηση των υπολοίπων παραμέτρων. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του RDI μέσω των διαφορετικών υπολογισμών της PET από τις τέσσερις παραπάνω μεθόδους, χρησιμοποιήθηκε η πλήρης μέθοδος Penman-Monteith του FAO, η οποία θεωρείται ότι παράγει τις «πραγματικές» τιμές του RDI, λαμβάνεται δηλαδή ως μέθοδος αναφοράς. Στη συνέχεια περιγράφονται σε συντομία οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι υπολογισμού της PET:

*Η μέθοδος FAO Penman-Monteith:* Η μέθοδος που στις μέρες μας θεωρείται ως η τυπική μέθοδος για τον προσδιορισμό της PET προτάθηκε αρχικά το 1948 από τον Penman, ο οποίος συνδύασε το ενεργειακό ισοζύγιο με τη μέθοδο μεταφοράς της μάζας και δημιούργησε μια εξίσωση για τον υπολογισμό της εξάτμισης από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού, από τυποποιημένα κλιματολογικά αρχεία ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιοφάνειας), θερμοκρασίας αέρα, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου. Η μέθοδος αυτή τροποποιήθηκε περαιτέρω από πολλούς ερευνητές και επεκτάθηκε ώστε να καλύπτει και καλλιεργούμενες επιφάνειες.

Τον Μάιο του 1990, μια επιτροπή εμπειρογνομόνων και ερευνητών συστάθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (Food and Agriculture Organization – FAO), σε συνεργασία με τη Διεθνή Επιτροπή για την Άρδευση και Αποστράγγιση (International Commission for Irrigation and Drainage) και τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (World Meteorological Organization - WMO), προκειμένου να επανεξετάσει τις μεθοδολογίες σχετικά με τις απαιτήσεις νερού των καλλιεργειών και να προτείνει αναθεωρήσεις και ενημερώσεις των διαδικασιών. Η επιτροπή εισηγήθηκε τελικά τη μέθοδο που είναι γνωστή ως μέθοδος FAO Penman-Monteith για την εκτίμηση της PET σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (Allen et al., 1998):

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.10)$$



όπου  $R_n$  είναι η καθαρή ακτινοβολία (net radiation) στην εξεταζόμενη καλλιεργούμενη επιφάνεια ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ),  $G$  είναι πυκνότητα της θερμικής ροής του εδάφους (soil heat flux density [ $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ]),  $T$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $e_s$  είναι η κορεσμένη πίεση ατμών (saturation vapour pressure [ $\text{kPa}$ ]),  $e_a$  είναι η πραγματική πίεση ατμών (actual vapour pressure [ $\text{kPa}$ ]),  $e_s - e_a$  είναι το έλλειμμα της κορεσμένης πίεσης ατμών (saturation vapour pressure deficit [ $\text{kPa}$ ]),  $\Delta$  είναι η κλίση της καμπύλης της πίεσης ατμών (slope vapour pressure curve [ $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ]) και  $\gamma$  είναι η ψυχομετρική σταθερά (psychrometric constant [ $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ]).

Η εξίσωση FAO Penman-Monteith αναπτύχθηκε θεωρώντας ως καλλιέργεια αναφοράς μία υποθετική καλλιέργεια με ύψος των 0.12 m., επιφανειακή αντίσταση 70 s/m και ανακλαστικότητα (albedo) 0.23, ενεργά αναπτυσσόμενη και επαρκώς αρδευόμενη.

*Η μέθοδος Thornthwaite:* Μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες σε παγκόσμιο επίπεδο μεθόδους προτάθηκε από τον Thornthwaite (1948). Αν και υπάρχουν αρκετές μελέτες που δείχνουν ότι η μέθοδος αυτή υποεκτιμά την PET, είναι ευρέως εφαρμόσιμη σε όλο τον κόσμο, χρησιμοποιούμενη ωστόσο συχνά με έναν πολλαπλασιαστικό συντελεστή ώστε να αυξάνεται σχετικά το μέγεθος των αποτελεσμάτων της. Η μέθοδος εκτιμά την PET με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$PET = 16 \cdot \left(\frac{N}{12}\right) \cdot \left(\frac{m}{30}\right) \cdot \left(10 \cdot \frac{T_{mean}}{I}\right)^a \quad (3.11)$$

όπου  $T_{mean}$  είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $N$  είναι οι μέσες μηνιαίες ώρες πιθανής ηλιοφάνειας ( $\text{h}/\text{day}$ ),  $m$  είναι ο αριθμός των ημερών κάθε μήνα και ο συντελεστής  $a$  δίνεται από την εξίσωση:

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} I + 0.49 \quad (3.12)$$

Τέλος,  $I$  είναι ο δείκτης θερμότητας που υπολογίζεται ως το άθροισμα των 12 μηνιαίων τιμών σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{imean}}{5}\right)^{1.514} \quad (3.13)$$

*Η μέθοδος Hargreaves:* Η εξίσωση του Hargreaves είναι μία ακόμη μεθοδολογία με βάση τη θερμοκρασία. Το Bureau of Reclamation των Ηνωμένων Πολιτειών ζήτησε το 1948 από τον Hargreaves να ετοιμάσει ένα εγχειρίδιο για τη χρήση των  $E_p$  και  $ET_c$  κατά τη φάση σχεδιασμού του Central Valley Project. Έκτοτε έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής

των καλλιεργειών με βάση τη μετρημένη ή εκτιμώμενη  $E_p$ , τροποποιήσεις της μεθόδου Blaney-Criddle ή απλοποιήσεις σε μια μέθοδο που αναπτύχθηκε αρχικά από τον J.E. Christiansen (Hargreaves and Allen, 2003). Τελικά, το 1975, ο Hargreaves δημοσίευσε την ακόλουθη εξίσωση:

$$PET = 0.135 \cdot R_s \cdot (T_{mean} + 17.8) \quad (3.14)$$

όπου  $R_s$  είναι η παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια (mm/day) και  $T_{mean}$  είναι η μέση θερμοκρασία (°C).

Καθώς το  $R_s$  δεν ήταν εύκολα διαθέσιμο και μετά την ανάλυση των στοιχείων του κλίματος και την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας ο Hargreaves κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το  $R_s$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξωγήινη ακτινοβολία ( $R_a$ ) και το ποσοστό πιθανής ηλιοφάνειας ( $S$ ). Μετά από πολλή έρευνα οι Hargreaves and Samani (1982) πρότειναν τον προγνωστικό τύπο:

$$R_s = K_{RS} \cdot R_a \cdot TR^{0.50} \quad (3.15)$$

όπου  $K_{RS}$  είναι ένας εμπειρικός συντελεστής του λόγου  $R_s/R_a$  έναντι στα δεδομένα για το  $TR$ , ενώ το  $TR$  είναι το εύρος της ημερήσιας θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου ( $TR=T_{max}-T_{min}$ ; όπου  $T_{max}$  είναι η μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία και  $T_{min}$  είναι η μέση ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία).

Συνδυάζοντας τις δύο προηγούμενες εξισώσεις και θέτοντας  $K_{RS}=0.16$  (τιμή που έχει εξαχθεί από τα κλιματικά δεδομένα της λεκάνης απορροής του ποταμού Senegal) οι Hargreaves et al (1985) πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση:

$$PET = 0.0022 \cdot R_a \cdot (T_{mean} + 17.8) \cdot TR^{0.50} \quad (3.16)$$

Προκειμένου να συμπεριληφθούν στην εξίσωση και οι μήνες με ζήτηση αιχμής, οι Hargreaves and Samani (1985) πρότειναν μια μικρή αύξηση στο συντελεστή, η οποία οδήγησε στην τελική εξίσωση της μεθόδου που έμεινε γνωστή ως η εξίσωση Hargreaves του 1985:

$$PET = 0.0023 \cdot R_a \cdot (T_{mean} + 17.8) \cdot TR^{0.50} \quad (3.17)$$

Η ελκυστικότητα της εξίσωσης έγκειται στο γεγονός ότι είναι απλή, αξιόπιστη, εύκολη στον υπολογισμό και απαιτεί ελάχιστο αριθμό δεδομένων, ενώ επηρεάζεται ελάχιστα από την ξηρότητα της περιοχής που εξετάζεται (Hargreaves and Allen, 2003).

*Η μέθοδος Blaney-Criddle:* Η εξίσωση των Blaney και Criddle είναι μια από τις παλαιότερες εξισώσεις για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής που αξιοποιεί τη θερμοκρασία. Αν και η μέθοδος έχει γίνει ευρύτατα γνωστή όπως

τροποποιήθηκε από τους Doorenbos and Pruitt (1977), ο συνηθισμένος τύπος της εξίσωσής της είναι:

$$PET = k \cdot p \cdot (0.46 \cdot T_{mean} + 8.13) \quad (3.18)$$

όπου  $T_{mean}$  είναι η μέση θερμοκρασία (°C),  $p$  είναι το ποσοστό των συνολικών ωρών διάρκειας της ημέρας για τη θεωρούμενη περίοδο (ημερήσια ή μηνιαία) σε σχέση με το συνολικό αριθμό ωρών διάρκειας της ημέρας του έτους και  $k$  είναι ένας μηνιαίος καταναλωτικός συντελεστής, που εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης, την τοποθεσία και την εποχή.

Η τιμή του  $p$  λαμβάνεται συνήθως από πίνακες, ωστόσο μπορεί να εκτιμηθεί για συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$p = 100 \cdot \left( \frac{\sum_{i=d_1}^{d_2} N_i}{365 \sum_{i=1} N_i} \right) \quad (3.19)$$

όπου  $N_i$  είναι οι θεωρητικές τιμές διάρκειας ημέρας της Ιουλιανής ημέρας  $i$  και  $d_1$  και  $d_2$  είναι η πρώτη και η τελευταία Ιουλιανή ημέρα του μήνα.

Σύμφωνα με τους Blaney και Criddle ο συντελεστής  $k$  κυμαίνεται για την καλλιεργητική περίοδο (Μάιος – Οκτώβριος) από 0.5 για τις πορτοκαλιές έως 1.2 για την πυκνή φυσική βλάστηση (Xu and Singh, 2001). Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.85.

*Η μέθοδος Penman-Monteith μόνο με χρήση της θερμοκρασίας:* Η μέθοδος FAO Penman-Monteith απαιτεί μια σειρά από κλιματικές μεταβλητές για τον υπολογισμό της, οι οποίες δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, είναι δυνατό να υπολογιστεί η PET από τη μέθοδο FAO Penman-Monteith χρησιμοποιώντας ένα μικρό αριθμό δεδομένων που περιλαμβάνει τουλάχιστον μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τους Allen et al. (1998), είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η μέθοδος FAO Penman-Monteith, ακόμη και με ένα περιορισμένο αριθμό δεδομένων, αντί μιας εναλλακτικής εμπειρικής μεθόδου υπολογισμού.

Εάν τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της PET με τη μέθοδο FAO Penman-Monteith λείπουν ή δεν μπορούν να υπολογιστούν, προτείνεται να εκτιμούνται σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται από τον FAO. Στην περίπτωσή μας η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της PET με τη χρήση εκτιμώμενων στοιχείων που λείπουν αναφέρεται στη

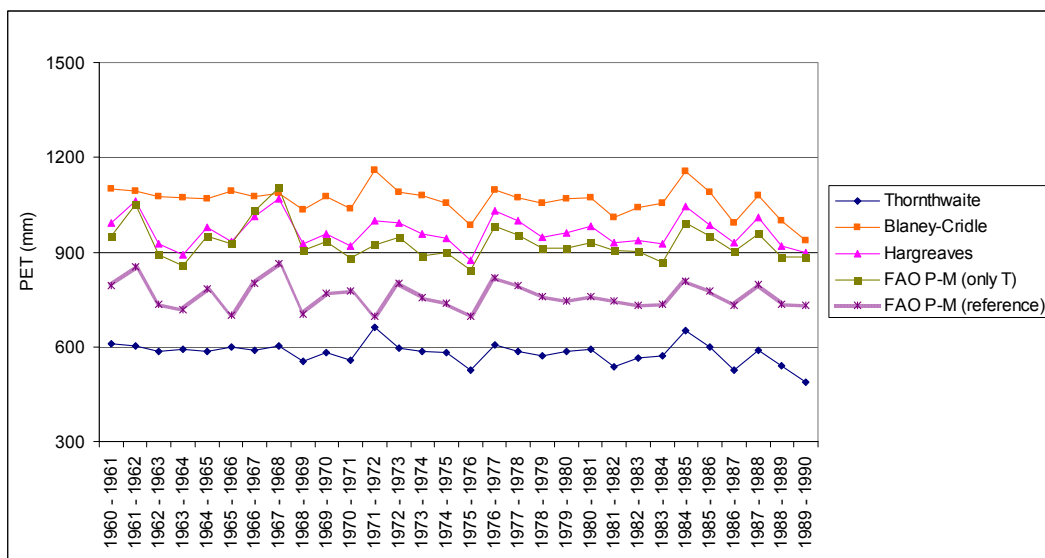
συνέχεια του κειμένου ως μέθοδος FAO P-M (only T). Όσον αφορά στα δεδομένα υγρασίας που λείπουν, η πραγματική πίεση ατμών ( $e_a$ ) μπορεί να εκτιμηθεί με την παραδοχή ότι η θερμοκρασία του σημείου δρόσου ( $T_{dew}$ ) είναι κοντά στην ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία ( $T_{min}$ ). Σε ξηρές περιοχές το  $T_{dew}$  μπορεί να προσεγγιστεί καλύτερα αφαιρώντας 2-3 °C από την  $T_{min}$ . Σχετικά με τα δεδομένα ακτινοβολίας που λείπουν, η μακρού μήκους κύματος και η καθαρή ακτινοβολία μπορούν να προέλθουν από την ηλιακή ακτινοβολία ή τις ώρες ηλιοφάνειας, τη θερμοκρασία του αέρα και την πίεση των ατμών, που αποτελούν κλιματικές παραμέτρους για τις οποίες είναι πιθανότερο να υπάρχουν μετρημένα στοιχεία. Τα δεδομένα ταχύτητα του ανέμου μπορούν επίσης να εκτιμηθούν, καθώς η διακύμανση της μέσης ταχύτητας του ανέμου σε μηνιαία βάση είναι σχετικά μικρή και κυμαίνεται γύρω στις μέσες τιμές. Οι γενικές τιμές ταχύτητας ανέμου που προτείνονται από τον FAO κυμαίνονται από λιγότερο από 1 m/s για περιοχές με ασθενείς ανέμους έως πάνω από 5 m/s για περιοχές με ισχυρούς ανέμους και παρουσιάζονται σε πίνακες διαθέσιμους από τον FAO. Αναφέρεται ωστόσο, ότι η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 2 m σε πάνω από 2000 μετεωρολογικούς σταθμούς είναι 2 m/s. Σε κάθε περίπτωση, οι εκτιμήσεις αυτές θα πρέπει να επικυρώνονται με βάση τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής που μελετάται.

### 3.3.2 Χρήση των διαφορετικών αποτελεσμάτων της PET στον RDI

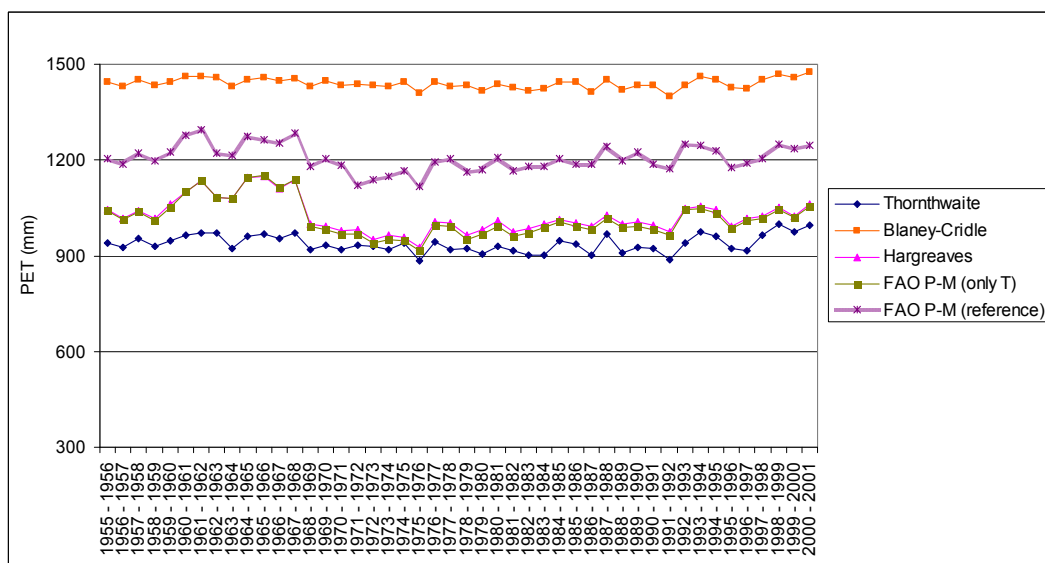
Για να ελεγχθεί η επίδραση της χρήσης διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της PET στις τιμές του RDI, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο μετεωρολογικούς σταθμούς στην Ελλάδα που αντιπροσωπεύουν τις ορεινές και τις παράκτιες μεσογειακές συνθήκες. Οι σταθμοί αυτοί θεωρήθηκαν αξιόπιστοι έχοντας μεγάλες χρονοσειρές δεδομένων για τις περισσότερες από τις μετεωρολογικές μεταβλητές που απαιτούνται για τον υπολογισμό της PET μέσω της μεθόδου Penman-Monteith. Ο πρώτος μετεωρολογικός σταθμός ονομάζεται «Ασπροπόταμος» και βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο (1050 m) σε ορεινή δασώδη περιοχή στην κεντρική Ελλάδα, ενώ ο δεύτερος σταθμός βρίσκεται στο Ηράκλειο της Κρήτης, σε χαμηλό υψόμετρο (39 m) και αντιπροσωπεύει μια πεδινή παράκτια περιοχή. Αξιόπιστα μηνιαία δεδομένα βροχοπτώσεων, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου είναι διαθέσιμα και για τους δύο σταθμούς.

Αρχικά, εξετάστηκαν τα δεδομένα και των δύο σταθμών για την εγκυρότητά τους και διασταυρώθηκαν με στοιχεία γειτονικών σταθμών (π.χ. με χρήση διπλής αθροιστικής καμπύλης). Πραγματοποιήθηκαν ορισμένες διορθώσεις και συμπλήρωση ελάχιστων κενών στην χρονοσειρά όπου απαιτήθηκε, σύμφωνα με τις γνωστές στατιστικές πρακτικές. Από τις διαδικασίες αυτές προέκυψαν τελικά

μια χρονοσειρά στοιχείων 30 ετών για το σταθμό του Ασπροπόταμου και μια λίγο μεγαλύτερη χρονοσειρά δεδομένων (46 ετών) για το σταθμό του Ηρακλείου. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας στη συνέχεια της παραγράφου χρησιμοποιούνται οι χαρακτηρισμοί «ορεινή περιοχή» για την περιοχή που καλύπτεται από το σταθμό του Ασπροπόταμου και «παράκτια περιοχή» για την περιοχή που καλύπτεται από το σταθμό του Ηρακλείου. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η PET σύμφωνα με τις πέντε μεθόδους που προαναφέρθηκαν και για τις δύο περιοχές. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών σε ετήσια βάση παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.11 και 3.12 για κάθε μια από τις δύο αντιπροσωπευτικές περιοχές αντίστοιχα (Vangelis and Tigkas, 2011).



Σχήμα 3.11. Τιμές της PET υπολογισμένες με τις διάφορες επιλεγμένες μεθόδους για την ορεινή περιοχή.



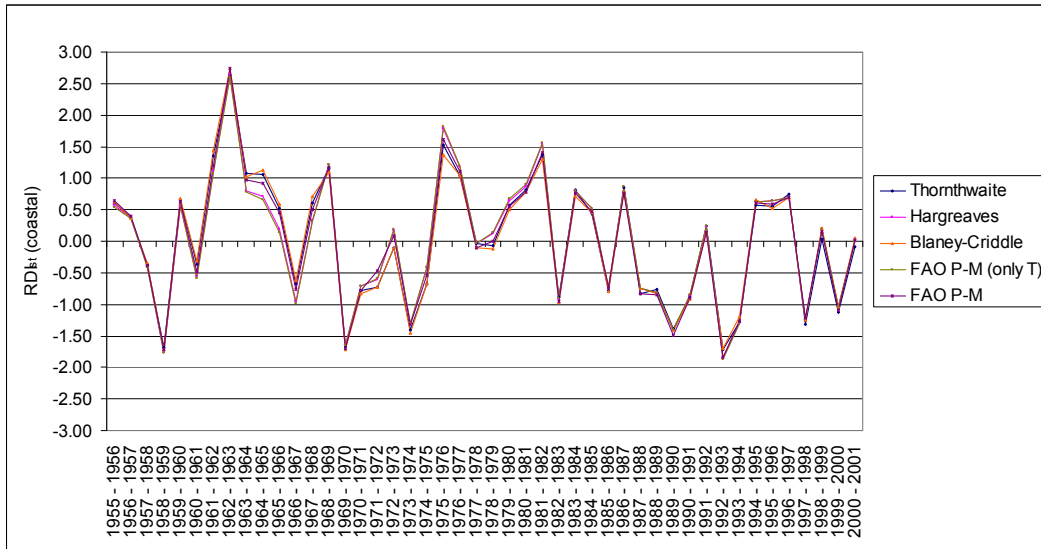
Σχήμα 3.12. Τιμές της PET υπολογισμένες με τις διάφορες επιλεγμένες μεθόδους για την πεδινή περιοχή.

Τα αποτελέσματα για την PET που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.11 και 3.12 θα μπορούσαν να θεωρηθούν λίγο πολύ αναμενόμενα. Τόσο στην ορεινή όσο και στην πεδινή περιοχή η εξίσωση Thornthwaite δίνει τις χαμηλότερες τιμές, ενώ η εξίσωση Blaney-Criddle τις υψηλότερες, με μια μάλλον σημαντική διαφορά μεταξύ τους της τάξης των περίπου 500 mm σε μέσες τιμές. Ένα άλλο ενδιαφέρον σημείο είναι ότι αυτές οι δύο εξισώσεις ακολουθούν το ίδιο ετήσιο μοτίβο διακυμάνσεων, με παρόμοιες διακυμάνσεις γύρω από τις μέσες τιμές τους στα ίδια χρονικά σημεία. Από την άλλη πλευρά, ένα διαφορετικό μοτίβο διακύμανσης ακολουθείται από τις άλλες μεθόδους (Penman-Monteith και Hargreaves). Η διαφορά μεταξύ των δύο περιοχών είναι ότι στην περίπτωση της ορεινής περιοχής η εξίσωση του Hargreaves δίνει υψηλότερες τιμές σε σχέση με την εξίσωση Penman-Monteith, ενώ στην παράκτια περιοχή παρατηρείται το αντίθετο. Τέλος, μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι στην περίπτωση της χρήσης μόνο δεδομένων θερμοκρασίας στην εξίσωση Penman-Monteith (η οποία παρουσιάζεται γενικά ως “FAO P-M (only T)” στα Σχήματα), όπως προτείνεται από τον FAO για την περίπτωση της έλλειψης στοιχείων, οι τιμές της PET που παράγονται είναι πολύ κοντά στις τιμές που δίνει η εξίσωση Hargreaves, ενώ για ένα μικρό χρονικό διάστημα στην πεδινή περιοχή οι τιμές που δίνονται από τις δύο εξισώσεις είναι σχεδόν πανομοιότυπες.

Οι διαφορές ωστόσο μεταξύ των διαφόρων μεθόδων εκτίμησης της PET δεν είναι αυτό που μας απασχολεί στο συγκεκριμένο σημείο, αλλά η επίδραση αυτών των διαφορών στον υπολογισμό του RDI. Με βάση λοιπόν τα διάφορα αποτελέσματα της PET υπολογίστηκε ο  $RDI_{st}$  σε ετήσια βάση για τις δύο περιοχές, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.13 και 3.14.



Σχήμα 3.13. Τιμές του  $RDI_{st}$  υπολογισμένες με τη χρήση των διάφορων τιμών της PET για την ορεινή περιοχή.



Σχήμα 3.14. Τιμές του  $RDI_{st}$  υπολογισμένες με τη χρήση των διάφορων τιμών της PET για την πεδινή περιοχή.

Όπως εξηγήθηκε πιο πάνω η μέθοδος Penman-Monteith θεωρείται ως η «μέθοδος αναφοράς» για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, καθώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφία θεωρείται ότι παράγει τις πιο αληθοφανείς τιμές της PET (Ventura et al., 1999; Yoder et al., 2005; Shenbin et al., 2006; Lopez-Urrea et al., 2006; Xu and Singh, 2002; Pereira and Pruitt, 2004; Trajkovic and Kolakovic, 2009).

Στο σημείο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο, εκτός της εξαγωγής συμπερασμάτων μέσω της οπτικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων στα Σχήματα, να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων και μέσω διερεύνησης με στατιστικούς δείκτες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο γνωστοί στατιστικοί δείκτες, η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error - RMSE) και το μέσο σφάλμα μεροληψίας (Mean Bias Error - MBE).

Το RMSE υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{est,i} - x_{obs,i})^2} \quad (3.20)$$

δίνοντας βραχυπρόθεσμη εκτίμηση για τις υπό ανάλυση τιμές. Η τιμή του RMSE είναι πάντα θετική και στην ιδανική περίπτωση παίρνει την τιμή «μηδέν» (Yapo et al., 1998).

Το MBE υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{est,i} - x_{obs,i}) \quad (3.21)$$

παρέχοντας μακροπρόθεσμη εκτίμηση για τη συσχέτιση, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση της πραγματικής απόκλισης μεταξύ των εκτιμώμενων και των μετρημένων τιμών της παραμέτρου που εξετάζεται. Η ιδανική τιμή του MBE είναι «μηδέν» (Gunhan et al., 2005).

Να σημειωθεί ότι και στις δύο εξισώσεις,  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων,  $x_{est}$  είναι η εκτιμώμενη τιμή για την κάθε μεθοδολογία που ελέγχεται και  $x_{obs}$  είναι η τιμή που υπολογίζεται με βάση τη μέθοδο αναφοράς.

Η σύγκριση με βάση τους παραπάνω στατιστικούς δείκτες απόδοσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης της PET για τις δύο περιοχές σε ετήσια βάση, που αντιστοιχούν στα Σχήματα 3.13 και 3.14, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

*Πίνακας 3.3. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς.*

<b>Τύπος περιοχής</b>	<b>Μέθοδος PET</b>	<b>RMSE</b>	<b>MBE</b>
Ορεινή	Hargreaves	0.06	$-10 \cdot 10^{-5}$
	Thorntwaite	0.13	$-57 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Cridde	0.12	$-46 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.07	$-6 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.10	$2 \cdot 10^{-5}$
	Thorntwaite	0.09	$4 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Cridde	0.11	$1 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.11	$3 \cdot 10^{-5}$

Όπως φαίνεται τόσο από τα Σχήματα 3.13 και 3.14, όσο και από τον Πίνακα 3.3, οι τιμές του  $RDI_{st}$  είναι σχεδόν οι ίδιες, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της PET. Μικρές διαφορές που εμφανίζονται σε ορισμένα χρόνια δεν μπορούν να θεωρηθούν σημαντικές, δεδομένου ότι δεν επηρεάζουν το μέγεθος της έντασης της ξηρασίας όπως αποτυπώνεται από τον RDI. Οι διάφορες τιμές του RDI, παρά τις διαφορές τους, παραμένουν σε όλες τις περιπτώσεις στην ίδια κλάση έντασης της ξηρασίας, χωρίς να υπερβαίνουν σε καμία περίπτωση τα καθορισμένα κατώφλια των κλάσεων. Μια σημαντική πτυχή είναι ότι στην παράκτια περιοχή παρουσιάζονται πολύ περισσότερα επεισόδια ξηρασίας σε συνδυασμό με υψηλότερες τιμές της PET από ότι στην ορεινή περιοχή. Η στατιστική σύγκριση, από την άλλη πλευρά, αποδεικνύει ότι στη μακροπρόθεσμη ανάλυση (όπως αποτυπώνεται από το MBE) οι τιμές του  $RDI_{st}$  με τις διάφορες εκτιμήσεις της PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς είναι πανομοιότυπες (όλες οι τιμές μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά ίσες με το μηδέν), ενώ για τη βραχυπρόθεσμη ανάλυση (όπως παρουσιάζεται από το RMSE) είναι επίσης σχεδόν ίδιες, καθώς οι ελάχιστες αποκλίσεις του RMSE



από την ιδανική τιμή «μηδέν» δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να θεωρηθούν σημαντικές.

Είναι λοιπόν σαφές ότι όσον αφορά στο ετήσιο χρονικό βήμα, οι τιμές του  $RDI_{st}$  που παράγονται με τη χρήση των διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της PET, δεν παρουσιάζουν διαφορές που να αξίζουν ενασχόλησης. Ωστόσο, η κατάσταση ενδέχεται να είναι διαφορετική για τα μικρότερα χρονικά διαστήματα. Για το λόγο αυτό, διερευνάται στη συνέχεια η επίδραση των διαφορετικών τιμών της PET και στις τιμές του  $RDI_{st}$  για περιόδους αναφοράς μικρότερες από την ετήσια. Η πρώτη προσέγγιση αφορά στην 6-μηνια χρονική κλίμακα, η οποία κατά προσέγγιση διαιρεί το έτος σε καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο.

Τα αποτελέσματα του  $RDI_{st}$  που υπολογίστηκαν για τις περιόδους Οκτωβρίου-Μαρτίου και Απριλίου-Σεπτεμβρίου τόσο για την ορεινή, όσο και για την πεδινή περιοχή παρουσιάζονται, αντίστοιχα, στα Σχήματα 3.15 και 3.16. Οι στατιστικοί δείκτες RMSE και MBE υπολογίζονται και σε αυτή την περίπτωση και παρουσιάζονται για μεν το εξάμηνο Οκτωβρίου-Μαρτίου στον Πίνακα 3.4, για δε το εξάμηνο Απριλίου-Σεπτεμβρίου στον Πίνακα 3.5.

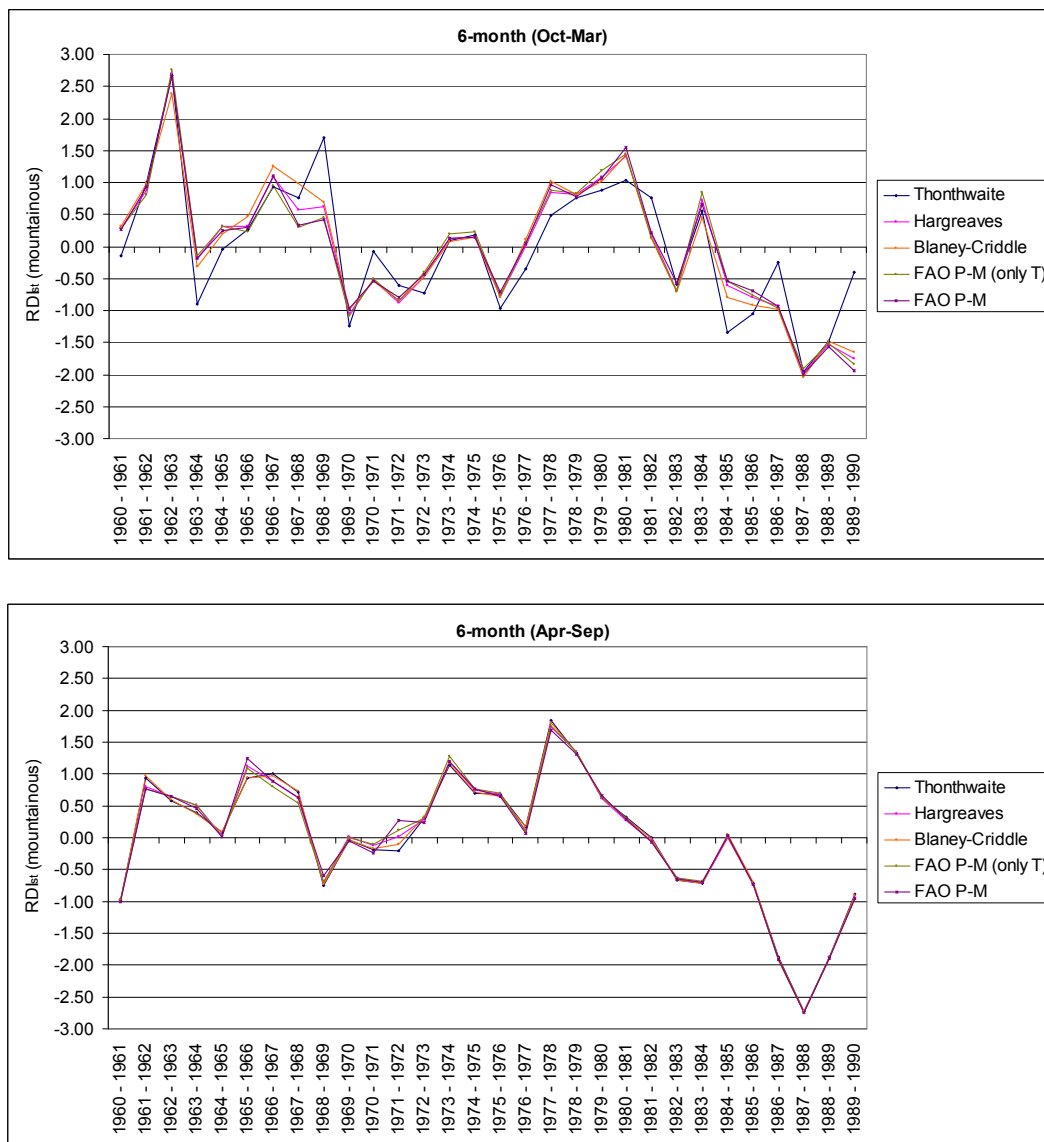
Από τα Σχήματα 3.15 και 3.16 καθώς και τους Πίνακες 3.4 και 3.5 μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι παρόλο που οι τιμές του  $RDI_{st}$  που παράγονται με βάση τις τιμές της PET από τις επιλεγμένες μεθόδους δεν είναι ταυτόσημες με εκείνες που παράγονται με βάση τη μέθοδο αναφοράς, είναι πολύ κοντινές. Όπως ήταν αναμενόμενο, κάποιες μικρές αποκλίσεις μπορούν να παρατηρηθούν για την πρώτη 6-μηνια περίοδο, κατά την οποία η αβεβαιότητα των καθοριστικών παραγόντων που χρησιμοποιούνται είναι υψηλότερη. Οι πιο σημαντικές αποκλίσεις παράγονται με τη χρήση της μεθόδου Thornthwaite.

Τέλος, η ίδια ανάλυση και οι ανάλογες συγκρίσεις γίνονται για τις τέσσερις 3-μηνια περιόδους (Οκτώβριος-Δεκέμβριος, Ιανουάριος-Μάρτιος, Απρίλιος-Ιούνιος και Ιούλιος-Σεπτέμβριος). Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 3.17 και 3.18, η επίδραση της μεθόδου υπολογισμού της PET στις τιμές του  $RDI_{st}$  είναι μικρή, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις και ιδίως κατά τους χειμερινούς μήνες συγκεκριμένων ετών, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημαντική. Μια από τις περιπτώσεις αυτές αφορά στην περίοδο Ιανουαρίου-Μαρτίου για την ορεινή περιοχή. Είναι άξιο να σημειωθεί, ότι σε όλες τις άλλες περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά κοντά σε αυτά που παράγονται με τη χρήση της μεθόδου αναφοράς.

Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί και από τους Πίνακες 3.6, 3.7, 3.8 και 3.9. Γενικά, θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι μόνο τα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση της μεθόδου Thornthwaite αποκλίνουν σημαντικά σε σχέση με τα αποτελέσματα που παράγονται με βάση τη μέθοδο αναφοράς,

## Reconnaissance Drought Index

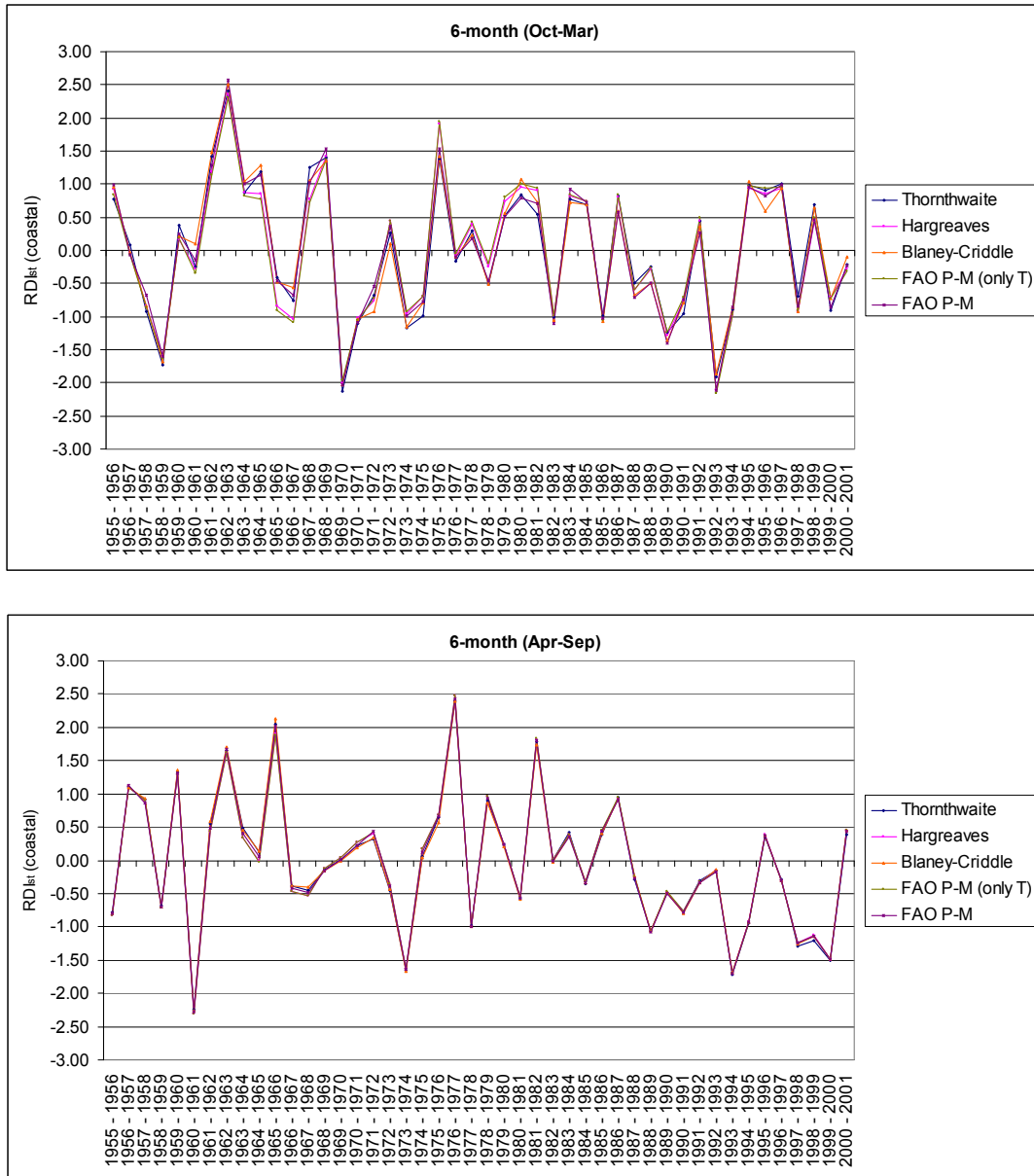
ωστόσο το συμπέρασμα αυτό αφορά κυρίως στην περίπτωση της ορεινής περιοχής και μόνο κατά τη διάρκεια του χειμώνα.



Σχήμα 3.15. Τιμές του  $RDI_{st}$  υπολογισμένες με τη χρήση των διάφορων τιμών της PET για περίοδο 6-μηνών (Οκτ.-Μαρ. και Απρ.-Σεπ.) για την ορεινή περιοχή.

Πίνακας 3.4. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το εξάμηνο Οκτ.-Μαρ.

Τύπος περιοχής	Μέθοδος PET	RMSE	MBE
Ορεινή	Hargreaves	0.09	$-36 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.51	$-67 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.18	$32 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.08	$-66 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.16	$-36 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.14	$-10 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.13	$23 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.19	$-24 \cdot 10^{-5}$

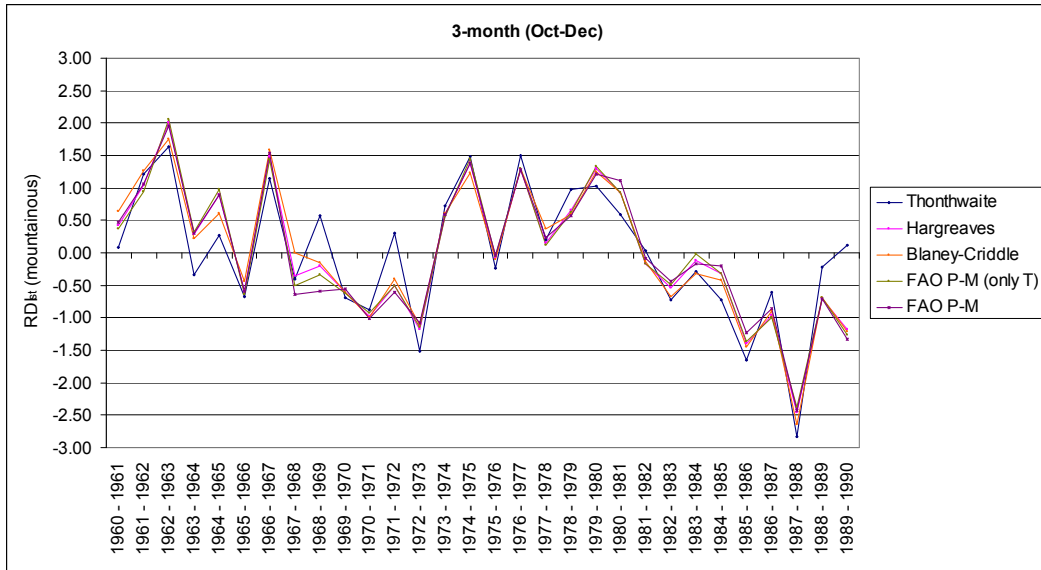


Σχήμα 3.16. Τιμές του  $RDI_{st}$  υπολογισμένες με τη χρήση των διάφορων τιμών της PET για περίοδο 6-μηνών (Οκτ.-Μαρ. και Απρ.-Σεπ.) για την πεδινή περιοχή.

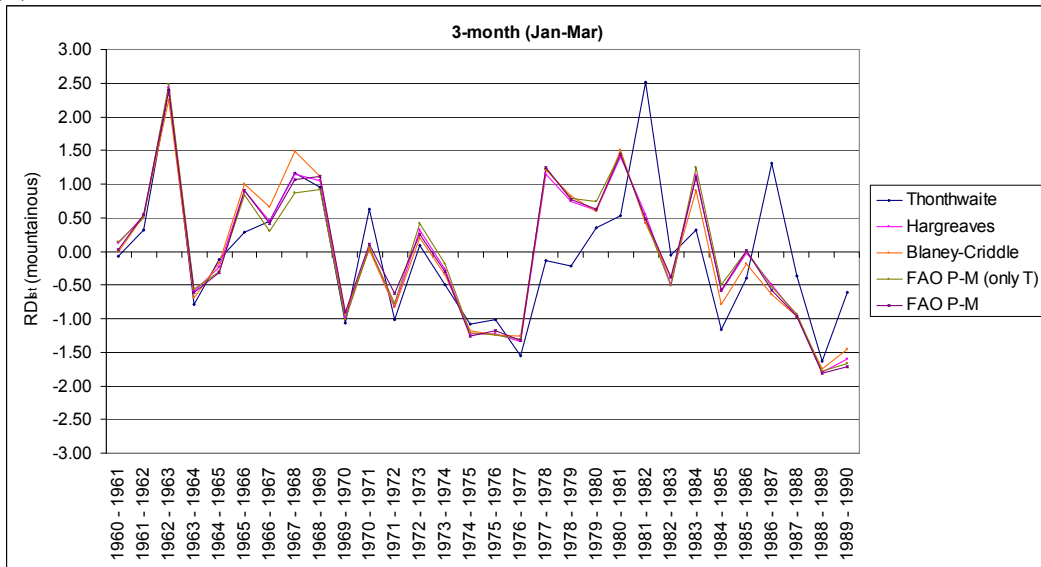
Πίνακας 3.5. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το εξάμηνο Απρ.-Σεπτ.

Τύπος περιοχής	Μέθοδος PET	RMSE	MBE
Ορεινή	Hargreaves	0.07	$-8 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.13	$-73 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Cridde	0.11	$-59 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.06	$-11 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.03	$2 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.04	$4 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Cridde	0.05	$43 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.04	$10 \cdot 10^{-5}$

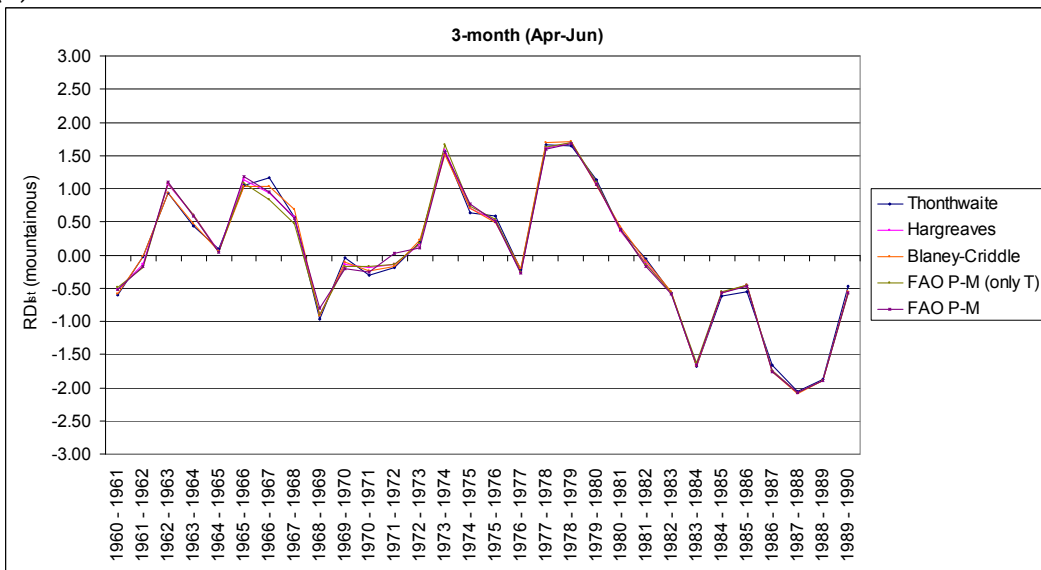
# Reconnaissance Drought Index



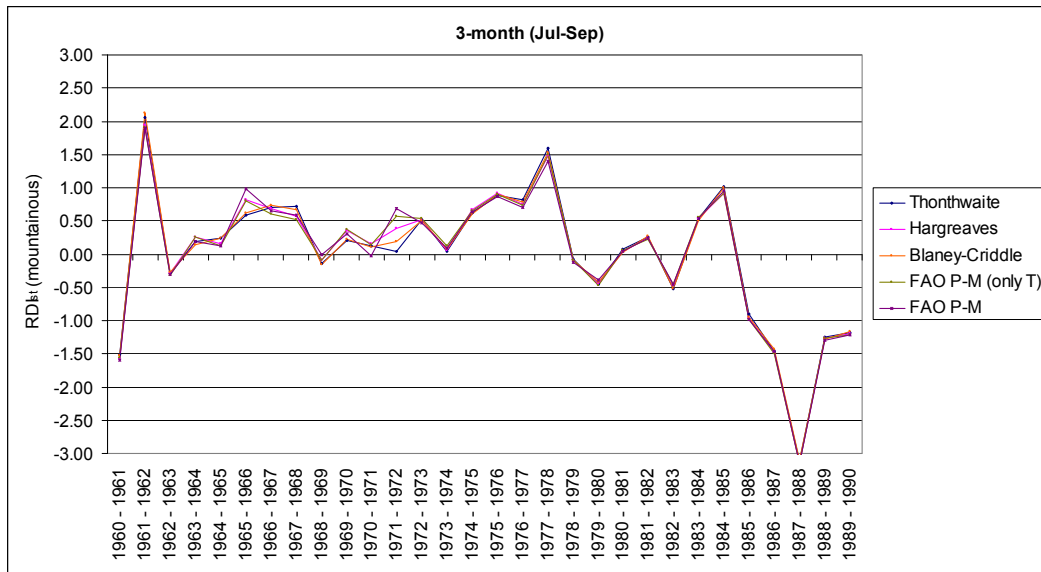
(a)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 3.17. Τιμές του  $RDI_{st}$  υπολογισμένες με τη χρήση των διάφορων τιμών της PET για τις 3-μηνες περιόδους (Οκτ-Δεκ, Ιαν-Μαρ, Απρ-Ιουν και Ιουλ-Σεπ) για την ορεινή περιοχή.

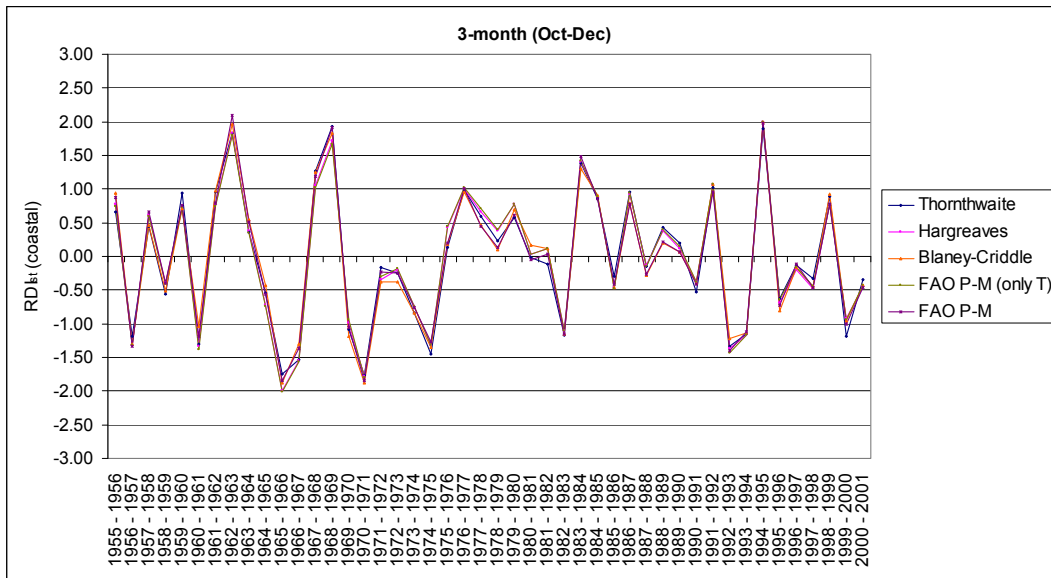
Πίνακας 3.6. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου.

Τύπος περιοχής	Μέθοδος PET	RMSE	MBE
Ορεινή	Hargreaves	0.12	$33 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.50	$273 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.20	$161 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.10	$-32 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.11	$12 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.12	$-30 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.10	$-188 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.13	$58 \cdot 10^{-5}$

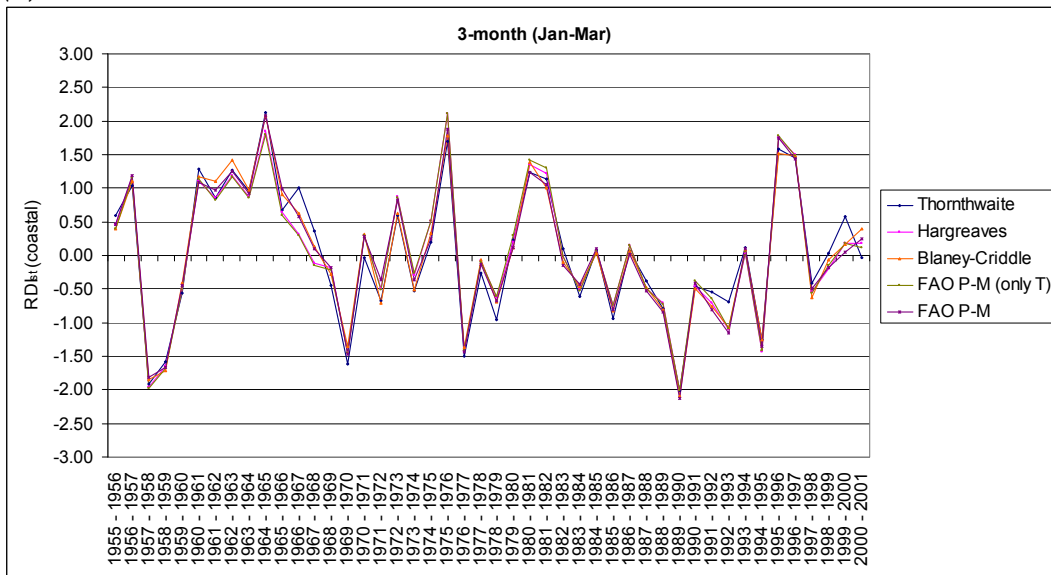
Πίνακας 3.7. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Ιανουαρίου-Μαρτίου.

Τύπος περιοχής	Μέθοδος PET	RMSE	MBE
Ορεινή	Hargreaves	0.07	$-55 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.72	$-1304 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.14	$-112 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.10	$-72 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.12	$91 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.20	$-15 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.10	$180 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.14	$101 \cdot 10^{-5}$

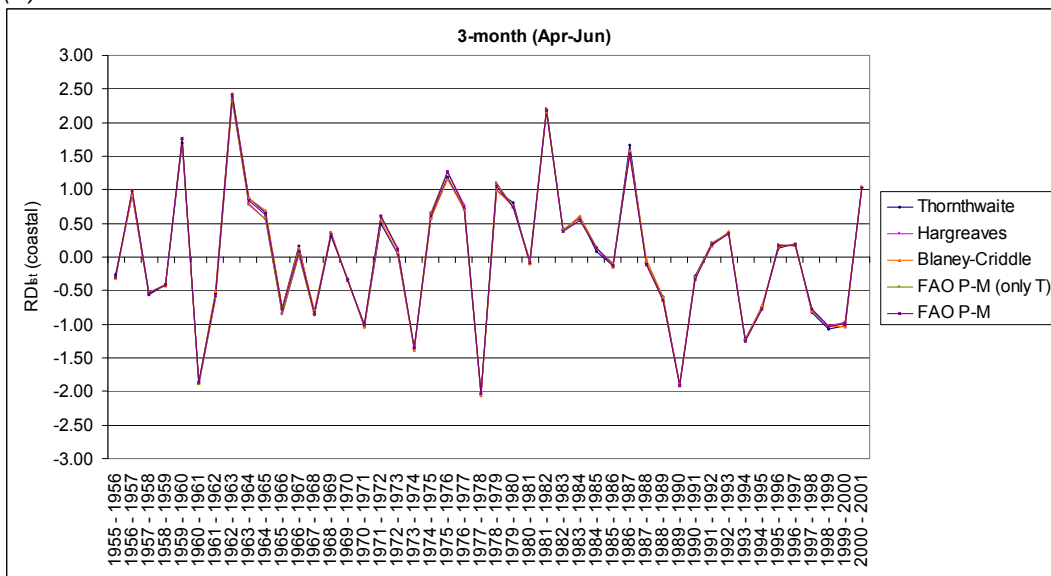
# Reconnaissance Drought Index



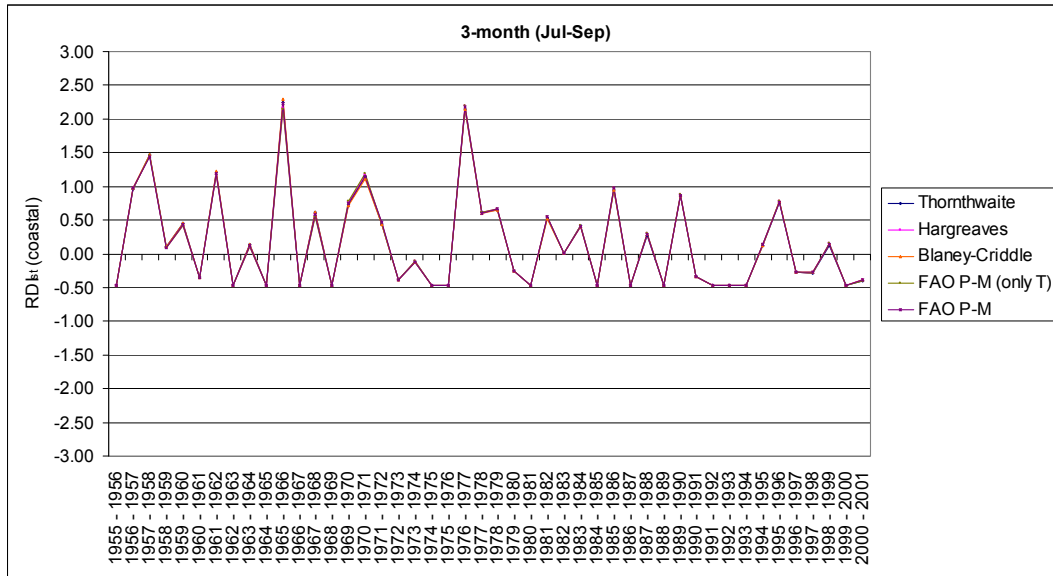
(a)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 3.18. Τιμές του  $RDI_{st}$  υπολογισμένες με τη χρήση των διάφορων τιμών της PET για τις 3-μηνες περιόδους (Οκτ-Δεκ, Ιαν-Μαρ, Απρ-Ιουν και Ιουλ-Σεπ) για την πεδινή περιοχή.

Πίνακας 3.8. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Απριλίου-Ιουνίου.

Τύπος περιοχής	Μέθοδος PET	RMSE	MBE
Ορεινή	Hargreaves	0.05	$-5 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.10	$-31 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.09	$34 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.06	$-52 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.03	$55 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.04	$-6 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.04	$98 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.03	$50 \cdot 10^{-5}$

Πίνακας 3.9. Στατιστικοί δείκτες για τις τιμές του  $RDI_{st}$  που υπολογίζονται για τις διάφορες μεθόδους PET σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς για το τρίμηνο Ιουλίου-Σεπτεμβρίου.

Τύπος περιοχής	Μέθοδος PET	RMSE	MBE
Ορεινή	Hargreaves	0.08	$-33 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.16	$-186 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.13	$-212 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.06	$-10 \cdot 10^{-5}$
Πεδινή	Hargreaves	0.01	$29 \cdot 10^{-5}$
	Thornthwaite	0.01	$1 \cdot 10^{-5}$
	Blaney-Criddle	0.02	$-5 \cdot 10^{-5}$
	FAO P-M (only T)	0.02	$38 \cdot 10^{-5}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, προτείνεται η χρήση οποιασδήποτε από τις υπό εξέταση μεθόδους εκτίμησης της PET για τον υπολογισμό του  $RDI_{st}$ , με την υπενθύμιση για την αποφυγή της μεθόδου Thornthwaite για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Μπορεί επίσης να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μέθοδος Hargreaves και σε μεγάλο βαθμό η μέθοδος FAO P-M (only T), παρέχουν τα πλέον αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση της μεθόδου Hargreaves συσχετίζονται πολύ καλύτερα με τα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση της μεθόδου FAO P-M (only T) σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, ενώ ακολουθούν και το ίδιο μοτίβο διακύμανσης.

### 3.3.3 Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης της PET για τον υπολογισμό του RDI

Αν και ο νέος δείκτης ξηρασίας Reconnaissance Drought Index, ο οποίος ενσωματώνει στον υπολογισμό του τόσο τη βροχόπτωση όσο και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, διαθέτει μια ισχυρή επιστημονική βάση για εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας, τα αποτελέσματά του αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο της επιρροής από τις διαφορετικές εκτιμήσεις της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, ως αποτέλεσμα των διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να δημιουργήσει ασάφεια στην εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας.

Για την αποφυγή αυτής της ασάφειας, οι τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που παράγονται από τέσσερις μεθόδους εκτίμησης της χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τιμών του  $RDI_{st}$  για δύο περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, μια ορεινή και μια πεδινή παραλιακή περιοχή. Τόσο η απεικόνιση των τιμών του  $RDI_{st}$  σε γραφήματα όσο και η στατιστική τους ανάλυση δείχνουν ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη επίδραση από τη χρήση των διαφορετικών μεθόδων δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που εξετάστηκαν (Hargreaves, Thornthwaite, Blaney-Criddle and FAO Penman-Monteith (only T)) στις τελικές τιμές του  $RDI_{st}$ , ανεξάρτητα από την εξεταζόμενη περίοδο αναφοράς. Αυτό ενισχύει ακόμη περισσότερο την άποψη ότι ο RDI είναι ένας ισχυρός δείκτης για την εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας, που δεν εξαρτάται από τη μέθοδο εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Ωστόσο, από τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν και για τις διάφορες περιόδους αναφοράς (12, 6 και 3 μήνες) παρατηρήθηκε ότι οι μέθοδοι Hargreaves και Penman-Monteith (only T) έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την προεπιλεγμένη μέθοδο αναφοράς. Φυσικά τα συμπεράσματα αυτά θα μπορούσαν να επαληθευτούν με παραδείγματα από περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

Καθώς ο RDI στοχεύει στην αξιοποίηση του σημαντικού στοιχείου της



εξατισμοδιαπνοής διατηρώντας ωστόσο τις απαιτήσεις για δεδομένα στο ελάχιστο, η εξίσωση του Hargreaves και εναλλακτικά η μέθοδος FAO P-M (only T) φαίνεται να είναι οι καλύτερες επιλογές για την εκτίμηση της PET για τον υπολογισμό του RDI.

### 3.4 Η κατανομή πιθανότητας δύο μεταβλητών στον RDI

#### 3.4.1 Η θεωρητική κατανομή στον RDI

Έστω δύο τυχαίες μεταβλητές  $X$  και  $Y$ , οι οποίες κατανέμονται με κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu_x$  και  $\mu_y$  αντίστοιχα. Έστω επίσης ότι η διασπορά των  $X$  και  $Y$  είναι  $\sigma_x^2$  και  $\sigma_y^2$  αντίστοιχα και ότι οι  $X$  και  $Y$  συσχετίζονται με συντελεστή συσχέτισης  $\rho$ . Η συνάρτηση πιθανότητας της διμεταβλητής κανονικής κατανομής του  $X$  και  $Y$  μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$f_{x,y}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[\frac{-1}{2(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \quad (3.22)$$

όπου:  $-\infty < x < \infty$  και  $-\infty < y < \infty$

Για περιόδους αναφοράς 3, 6, 9 και 12 μηνών μπορεί να υποτεθεί ότι τόσο η βροχοπτώση όσο και η δυνητική εξατισμοδιαπνοή μπορούν επαρκώς να περιγραφούν από κανονικές κατανομές πιθανότητας.

Για την αρχική τιμή  $a_k$  του δείκτη (εξίσωση 3.2) η συνδυασμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής  $A_k = \frac{X}{Y}$  δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση ολοκλήρωσης:

$$f_{A_k}(a_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{x,y}(a_k y, y) |y| dy \quad (3.23)$$

Μετά την ολοκλήρωση η συνδυασμένη πιθανότητα γίνεται (Fieller, 1932):

$$f_{A_k}(a_k) = \frac{b(a_k)d(a_k)}{\sqrt{2\pi}\sigma_x\sigma_y\omega^3(a_k)} \left[ \Phi\left\{\frac{b(a_k)}{\sqrt{(1-\rho^2)}\omega(a_k)}\right\} - \Phi\left\{-\frac{b(a_k)}{\sqrt{(1-\rho^2)}\omega(a_k)}\right\} \right] + \frac{\sqrt{(1-\rho^2)}\omega(a_k)}{\pi\sigma_x\sigma_y\omega^2(a_k)} \exp\left\{-\frac{c}{2(1-\rho^2)}\right\} \quad (3.24)$$

όπου:

$$\left. \begin{aligned} \omega(a_k) &= \left( \frac{a_k^2}{\sigma_X^2} - \frac{2\rho a_k}{\sigma_X \sigma_Y} + \frac{1}{\sigma_Y^2} \right)^{1/2} \\ b(a_k) &= \frac{\mu_X a_k}{\sigma_X^2} - \frac{\rho(\mu_X + \mu_Y a_k)}{\sigma_X \sigma_Y} + \frac{\mu_X}{\sigma_Y^2} \\ c &= \frac{\mu_X^2}{\sigma_X^2} - \frac{2\rho\mu_X\mu_Y}{\sigma_X \sigma_Y} + \frac{\mu_Y^2}{\sigma_Y^2} \\ d(a_k) &= \exp \left\{ \frac{b^2(a_k) - c\omega^2(a_k)}{2(1-\rho^2)\omega^2(a_k)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

και  $\Phi$  είναι η τυπική συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας της τυπικής κανονικής κατανομής.

Η αθροιστική πιθανότητα  $F(a_k)$  μπορεί τότε να υπολογιστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$F(a_k) = \int_{-\infty}^{a_k} f_{A_k}(a_k) da_k \quad (3.26)$$

Η  $F(a_k)$  μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση μιας αριθμητικής προσέγγισης όπως ο τραπεζοειδής κανόνας, ή οποιοσδήποτε άλλος κανόνας που χρησιμοποιεί πολύ μικρό βήμα ολοκλήρωσης (π.χ. [Burden and Faires, 1997](#)).

Στην περίπτωση που  $0 \leq \sigma_Y \ll \mu_Y$  ο Hinkley (1969) πρότεινε την ακόλουθη προσεγγιστική συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας ( $F^*(a_k)$ ):

$$F^*(a_k) = \Phi \left( \frac{\mu_Y a_k - \mu_X}{\sigma_X \sigma_Y \omega(a_k)} \right) \quad (3.27)$$

και αντικαθιστώντας το  $\omega(a_k)$  από την εξίσωση (3.25) έχουμε:

$$F^*(a_k) = \Phi \left( \frac{\mu_Y a_k - \mu_X}{\sqrt{a_k^2 \sigma_Y^2 - 2\rho a_k \sigma_X \sigma_Y + \sigma_X^2}} \right) \quad (3.28)$$

Για τη βελτίωση της παραπάνω προσέγγισης, η ακόλουθη διόρθωση προτάθηκε για την περίπτωση που  $F^*(a_k) > F(a_k)$ :

$$F^{**}(a_k) = \Phi \left( \frac{\mu_Y a_k - \mu_X}{\sigma_X \sigma_Y \omega(a_k)} \right) - \Phi \left( -\frac{\mu_Y}{\sigma_Y} \right) \quad (3.29)$$

Στην αντίθετη περίπτωση, ο διορθωτικός όρος στην Εξίσωση 3.29 προστίθεται όταν  $F^*(a_k) < F(a_k)$ .

Ωστόσο, όταν  $0 \leq \sigma_Y \ll \mu_Y$  ο διορθωτικός όρος  $\Phi\left(-\frac{\mu_Y}{\sigma_Y}\right)$  είναι αμελητέος.

Επομένως, η τελικά προτεινόμενη συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας για το λόγο  $P/PET$ , υπό την προϋπόθεση ότι τόσο η βροχόπτωση  $P$  όσο και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή  $PET$  (που αντιστοιχούν στα  $X$  και  $Y$  της προηγούμενης ανάλυσης) είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή, είναι η Εξίσωση 3.27 (Vangelis et al., 2011).

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι αν είναι γνωστές μεγάλες ιστορικές χρονοσειρές για τα  $P$  και  $PET$ , η αθροιστική πιθανότητα και επομένως η περίοδος επαναφοράς της ξηρασίας μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση:

$$T = \frac{1}{P(A_k \leq a_k)} = \frac{1}{F(a_k)} \quad (3.30)$$

Η λύση του αντίστροφου προβλήματος είναι επίσης χρήσιμη για τη σύνταξη σχεδίων προετοιμασίας (preparedness plans) για την αντιμετώπιση της ξηρασίας σε μια περιοχή. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς από μια προκαθορισμένη περίοδο επαναφοράς η οποία αντικατοπτρίζει την άποψη της κοινωνίας για το τουλάχιστον αποδεκτό επίπεδο προστασίας απέναντι στην ξηρασία, το επίπεδο του λόγου  $P/PET$  και επομένως το επίπεδο του δείκτη RDI είναι δυνατό να εκτιμηθεί.

Ακολουθώντας την παραπάνω προσεγγιστική διαδικασία και αντικαθιστώντας το  $X$  με  $P$  και το  $Y$  με  $PET$ , η Εξίσωση 3.30 λύνεται ως εξής:

$$\left(\sqrt{a_k^2 \sigma_{PET}^2 - 2\rho a_k \sigma_P \sigma_{PET} + \sigma_P^2}\right) \Phi^{-1} = \mu_{PET} a_k - \mu_P \Rightarrow$$

$$a_k^2 \left(\sigma_{PET}^2 (\Phi^{-1})^2 - \mu_{PET}^2\right) + 2a_k \left(-\rho \sigma_P \sigma_{PET} (\Phi^{-1})^2 + \mu_{PET} \mu_P\right) + \left(\sigma_P^2 (\Phi^{-1})^2 - \mu_P^2\right) = 0 \quad (3.31)$$

Από τις δύο λύσεις της Εξίσωσης 3.31 επιλέγεται η χαμηλότερη τιμή καθώς η άλλη λύση δεν έχει πρακτική σημασία. Επομένως:

$$a_k = \frac{\left(+\rho \sigma_P \sigma_{PET} (\Phi^{-1})^2 - \mu_{PET} \mu_P\right) \pm \sqrt{\rho^2 \sigma_P^2 \sigma_{PET}^2 (\Phi^{-1})^4 - 2\rho \sigma_P \sigma_{PET} (\Phi^{-1})^2 \mu_{PET} \mu_P - \sigma_{PET}^2 \sigma_P^2 (\Phi^{-1})^4 + \sigma_{PET}^2 (\Phi^{-1})^2 \mu_P^2 + \mu_{PET}^2 \sigma_P^2 (\Phi^{-1})^2}}{\left(\sigma_{PET}^2 (\Phi^{-1})^2 - \mu_{PET}^2\right)} \quad (3.32)$$

Τελικά η υπόθεση συσχέτισης μεταξύ του  $P$  και του  $PET$  ελέγχεται ακολουθώντας τη συμβατική διαδικασία χρησιμοποιώντας τον έλεγχο

κατανομής-t με n-2 βαθμούς ελευθερίας (π.χ. Haan, 1977 and Graybill, 1961). Στην περίπτωση  $\rho=0$ , η Εξίσωση 3.32 απλοποιείται αναλόγως.

### 3.4.2 Εφαρμογή της κατανομής από κοινού των δύο μεταβλητών του RDI

Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε πιο πάνω χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μηνιαίων βροχοπτώσεων και μέσης μηνιαίας θερμοκρασία από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους σταθμούς Ελληνικό (Αθήνα), Λάρισα, Ηράκλειο και Νάξο. Αρχικά υπολογίστηκαν οι μηνιαίες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Hargreaves, που βασίζεται σε μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες, όπως έχει αναπτυχθεί αναλυτικά σε προηγούμενη παράγραφο.

Οι μηνιαίες τιμές βροχοπτώσης (P) και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) αθροίστηκαν αντίστοιχα για περιόδους αναφοράς 3, 6, 9 και 12 μηνών. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών 47 ετών των παραπάνω ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών των P και PET για τις διαφορετικές περιόδους αναφοράς για τους υπό εξέταση σταθμούς.

Σταθμός		3-μηνιο		6-μηνιο		9-μηνιο		12-μηνιο	
		P	PET	P	PET	P	PET	P	PET
Ελληνικό	Μ. Τιμή	167.2	146.1	296.0	290.1	341.2	657.1	363.6	1069.1
	Διάμεσος	164.9	146.0	299.4	291.5	357.2	655.1	371.3	1066.6
	Τυπ. Απ.	64.1	8.2	91.1	14.2	90.6	22.4	95.1	34.9
	Μέγιστο	321.6	168.0	472.2	322.1	496.7	700.7	528.7	1150.4
	Ελάχιστο	49.2	132.6	120.3	252.0	146.4	614.5	155.1	998.7
Λάρισα	Μ. Τιμή	158.2	149.2	258.7	297.4	354.0	760.3	417.7	1262.6
	Διάμεσος	149.6	148.0	243.1	298.7	346.1	768.6	420.2	1259.4
	Τυπ. Απ.	65.9	9.8	91.0	20.6	105.4	32.6	110.0	40.1
	Μέγιστο	380.7	172.1	614.7	337.7	751.4	828.7	763.5	1350.4
	Ελάχιστο	40.3	128.5	100.6	249.8	185.4	691.8	216.2	1190.4
Ηράκλειο	Μ. Τιμή	203.7	157.2	419.4	313.6	464.2	672.7	483.7	1024.3
	Διάμεσος	193.8	154.5	416.2	311.3	466.7	663.7	490.2	1013.7
	Τυπ. Απ.	83.4	12.9	105.6	19.1	122.6	33.8	123.2	53.0
	Μέγιστο	402.9	195.9	739.3	357.3	890.2	744.5	890.2	1149.0
	Ελάχιστο	78.1	136.0	242.0	278.6	271.0	601.0	294.4	925.5
Νάξος	Μ. Τιμή	155.5	127.3	322.1	258.6	350.7	567.7	360.1	854.8
	Διάμεσος	146.1	125.8	300.3	255.3	351.3	569.9	360.4	849.4
	Τυπ. Απ.	60.1	11.8	102.5	15.8	110.0	22.7	111.4	29.8
	Μέγιστο	327.7	167.4	614.5	305.1	683.1	627.4	683.1	950.3
	Ελάχιστο	53.7	108.5	123.8	225.2	131.8	503.0	140.0	786.9

Πίνακας 3.11. Έλεγχος καταλληλότητας κανονικής κατανομής για τις χρονοσειρές των  $P$  και  $PET$  για τις διάφορες περιόδους αναφοράς.

Σταθμός	Έλεγχος κατανομής	3-μηνο	6-μηνο	9-μηνο	12-μηνο
Ελληνικό		<i>Βροχόπτωση (P)</i>			
	x - τετράγωνο	21.659	5.574	4.979	1.106
	$D_{max}$	0.145	0.073	0.086	0.077
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$
		<i>Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (PET)</i>			
	x - τετράγωνο	2.894	1.702	2.298	6.468
	$D_{max}$	0.099	0.072	0.080	0.122
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$
Λάρισα		<i>Βροχόπτωση (P)</i>			
	x - τετράγωνο	5.872	2.595	5.277	4.978
	$D_{max}$	0.092	0.099	0.138	0.075
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$
		<i>Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (PET)</i>			
	x - τετράγωνο	7.064	4.383	6.171	2.894
	$D_{max}$	0.109	0.069	0.129	0.089
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.10$
Ηράκλειο		<i>Βροχόπτωση (P)</i>			
	x - τετράγωνο	5.872	7.063	4.383	8.553
	$D_{max}$	0.078	0.114	0.096	0.106
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$
		<i>Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (PET)</i>			
	x - τετράγωνο	9.149	8.851	11.234	4.085
	$D_{max}$	0.109	0.128	0.132	0.127
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.10$
Νάξος		<i>Βροχόπτωση (P)</i>			
	x - τετράγωνο	5.872	4.978	7.361	4.084
	$D_{max}$	0.092	0.099	0.106	0.155
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$
		<i>Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (PET)</i>			
	x - τετράγωνο	4.085	7.362	8.851	7.064
	$D_{max}$	0.131	0.095	0.086	0.124
	Κατανομή που τελικά επιλέγεται	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή	Κανονική κατανομή
	Επ. εμπιστοσύνης	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.10$

Ως γνωστόν, ο λόγος της μέσης ετήσιας P/PET αντιστοιχεί στο Δείκτη Ξηρότητας (AI) της περιοχής. Από τον πίνακα 3.10 ο Δείκτης Ξηρότητας υπολογίζεται 0.34 για το Ελληνικό, 0.33 για τη Λάρισα, 0.47 για το Ηράκλειο και 0.42 για τη Νάξο. Στη συνέχεια, οι χρονοσειρές τόσο του P, όσο και της PET ελέγχθηκαν με επιτυχία για την παραδοχή ότι ακολουθούν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή (για διάφορα επιλεγμένα επίπεδα εμπιστοσύνης), όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.11.

Ο έλεγχος συσχέτισης μεταξύ της P και της PET πραγματοποιήθηκε για όλες τις παραπάνω περιόδους αναφοράς και τους υπό μελέτη σταθμούς. Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12, δείχνουν ότι οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται εκτός από ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες συσχέτιση δεν ήταν σημαντικά διαφορετική από το μηδέν σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=0.10$ . Από τους σταθμούς που εξετάστηκαν, ο σταθμός της Λάρισας εμφανίζει ισχυρή αρνητική συσχέτιση.

Πίνακας 3.12. Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας της συσχέτισης μεταξύ P και PET.

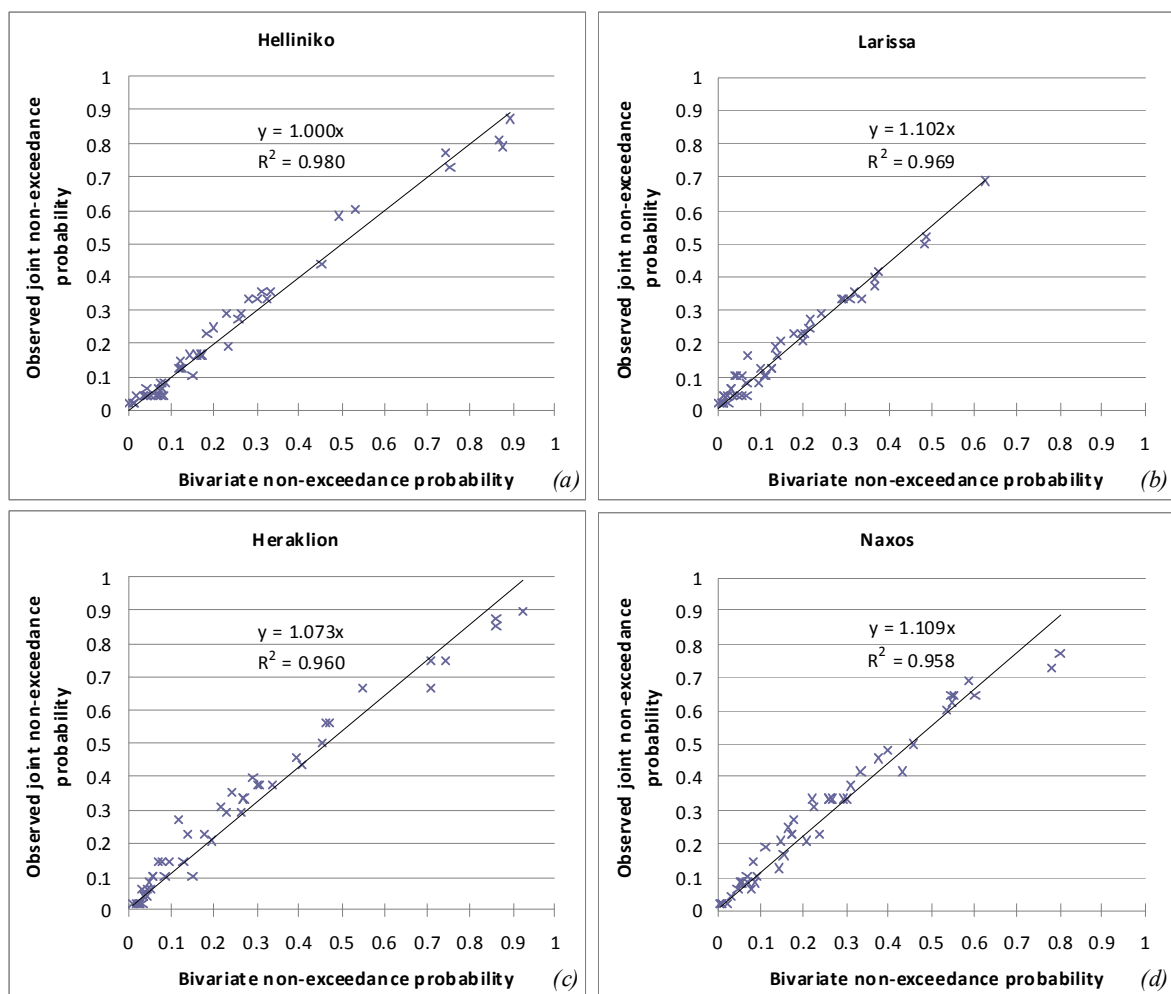
Σταθμός	3-μηνο	6-μηνο	9-μηνο	12-μηνο
<b>t</b>				
Ελληνικό	-1.056	-1.506	-1.356	-1.212
Λάρισα	-3.473	-5.588	-4.822	-3.639
Ηράκλειο	-0.859	1.780	1.001	2.085
Νάξος	0.809	0.658	1.003	0.640
$\alpha$	0.10	0.10	0.10	0.10
$t_{1-\alpha/2, v-2}$	1.68	1.68	1.68	1.68
Ελληνικό	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$
Λάρισα	Συσχέτιση	Συσχέτιση	Συσχέτιση	Συσχέτιση
Ηράκλειο	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Συσχέτιση	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Συσχέτιση
Νάξος	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$	Όχι σημαντικό $\rho \neq 0$

Ο Yue (2000) επιλύοντας παρόμοιο υδρολογικό πρόβλημα, πρότεινε τον έλεγχο γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της παρατηρούμενης και της θεωρητικής από κοινού πιθανότητας (joint probability). Η σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης και της θεωρητικής από κοινού πιθανότητας της ετήσιας βροχοπτώσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (περίοδος αναφοράς 12 μηνών) για όλους τους σταθμούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19. Τα αποτελέσματα δείχνουν ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ της παρατηρούμενης

και της θεωρητικής από κοινού πιθανότητας.

Για λόγους παρουσίασης, η αθροιστική πιθανότητα του λόγου ετήσιας P/PET στο σταθμό της Λάρισας υπολογίστηκε από την διμεταβλητή κανονική κατανομή, σύμφωνα με την Εξίσωση 3.28 (Σχήμα 3.20).

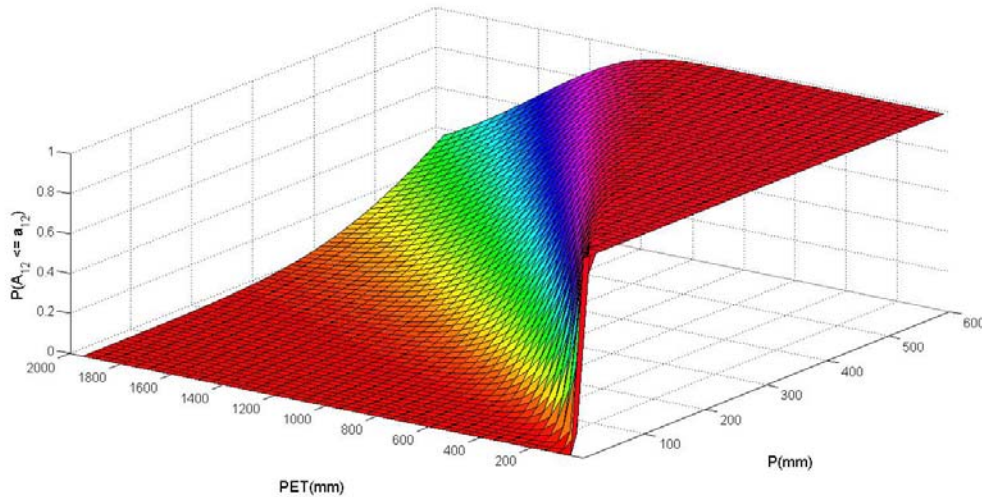
Επιπλέον, ακολουθώντας την προτεινόμενη διαδικασία και με βάση τις περιόδους αναφοράς 3, 6, 9 και 12 μηνών, οι τιμές του  $a_k$  συνδέθηκαν με τις περιόδους επαναφοράς της ξηρασίας, για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 20 και 50 έτη για τους τέσσερις επιλεγμένους σταθμούς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα. 3.21. Ο Δείκτης Ξηρασίας για κάθε σταθμό αντιστοιχεί στη στήλη της περιόδου 12 μηνών.



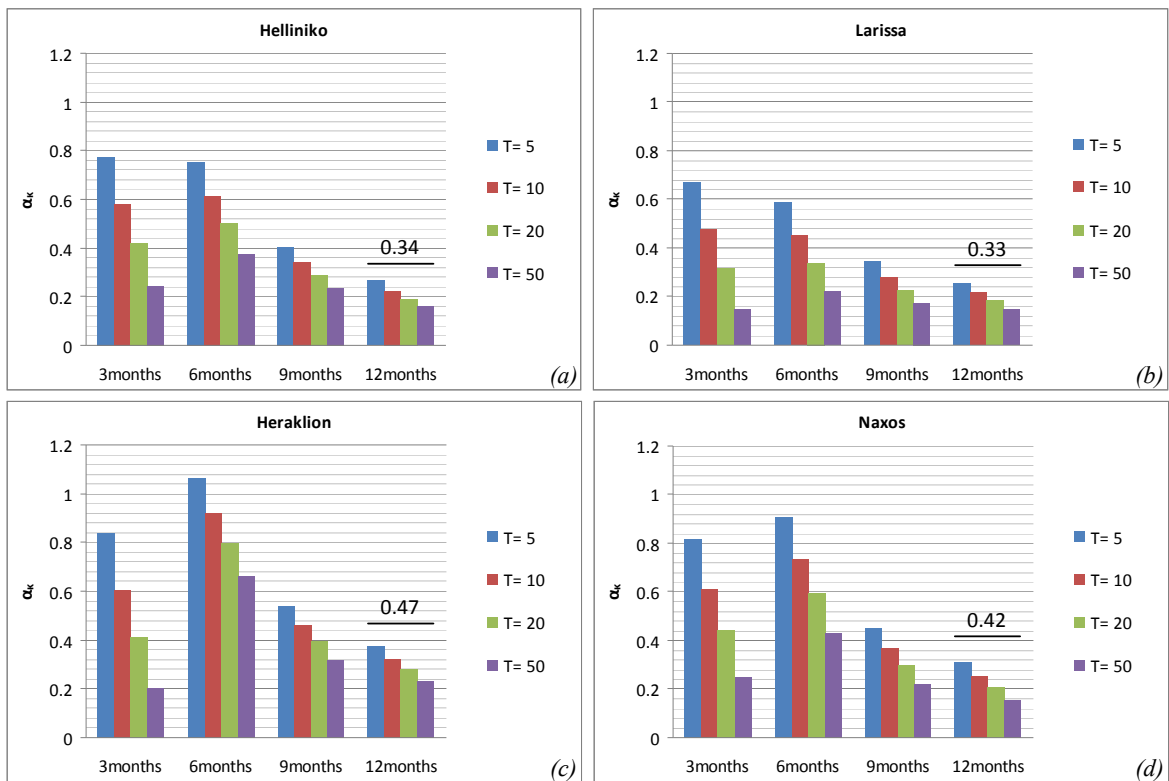
Σχήμα 3.19. Σχέση μεταξύ από κοινού παρατηρούμενης και θεωρητικής πιθανότητας μη υπέρβασης της ετήσιας βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στους σταθμούς (α) Ελληνικό, (β) Λάρισα, (γ) Ηράκλειο και (δ) Νάξος.

Μια σημαντική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός των πιθανοτήτων για κάθε ετήσιο ποσοστό  $a_{12}^i$  μπορεί να μας δώσει τη δυνατότητα για την εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας του

συγκεκριμένου έτους. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22, τα πιο σημαντικά επεισόδια ξηρασίας των τελευταίων ετών σημειώθηκαν στο σταθμό του Ελληνικού κατά τα υδρολογικά έτη 1999-2000 ( $T=88$  έτη), 1989-1990 ( $T=49$  έτη), 1956-1957 ( $T=25$  έτη), 1992-1993 ( $T=17$  έτη) και 2000-2001 ( $T=11$  έτη). Με βάση το Σχήμα 3.22 μπορεί να υποστηριχθεί ότι τα πιο ακραία επεισόδια ξηρασίας κατά τη διάρκεια της υπό εξέταση περιόδου σημειώθηκαν στο Ελληνικό παρά στους άλλους τρεις σταθμούς.



Σχήμα 3.20. Η διαδιάστατη γραφική παράσταση της αθροιστικής πιθανότητας του λόγου  $a_{12}$  σε προβολή προς τις μεταβλητές  $P$  και  $PET$  για το σταθμό της Λάρισας.

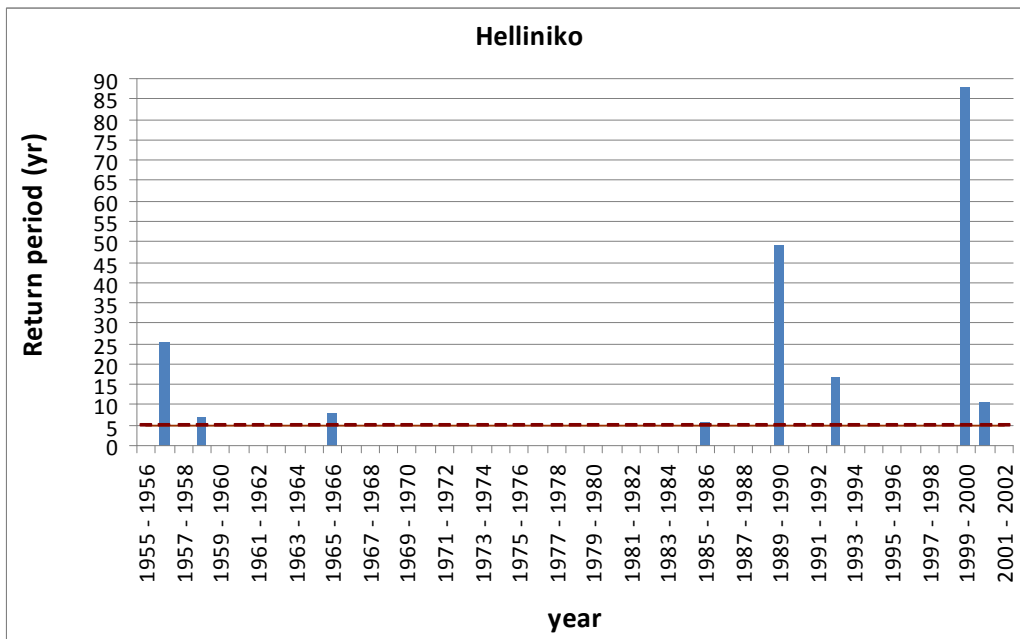


Σχήμα 3.21. Το  $\alpha_k$  για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 20 και 50 ετών για τους σταθμούς (a) Ελληνικό, (b) Λάρισσα, (c) Ηράκλειο και (d) Νάξος.

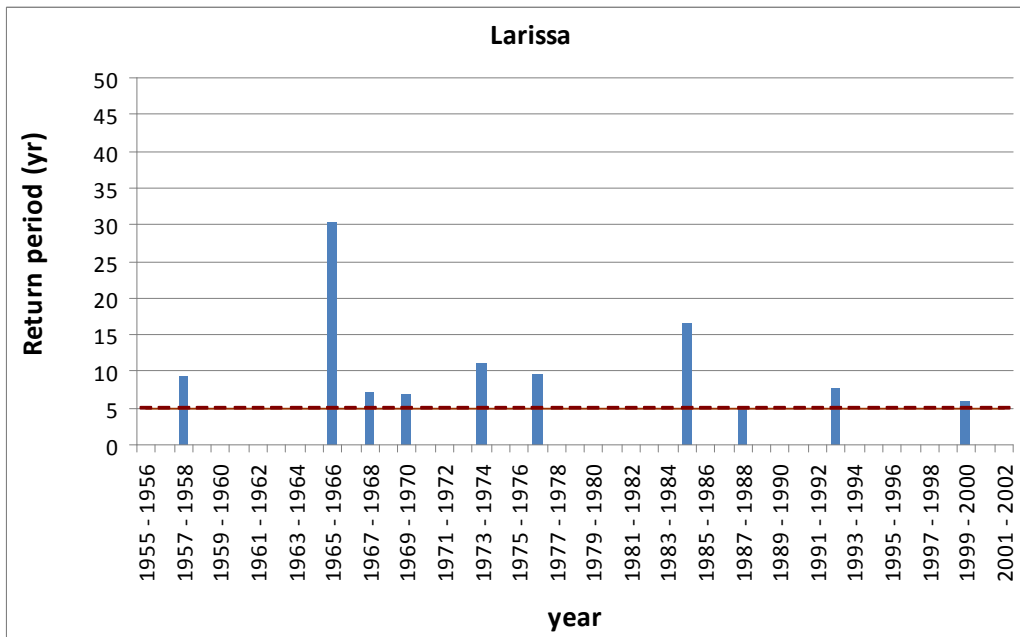


Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιώντας μια αριθμητική προσέγγιση ολοκλήρωσης (π.χ. ολοκλήρωση Simpson (Gerald and Wheatley, 1994)) ή χρησιμοποιώντας την «πλήρη» εξίσωση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Εξίσωση 3.24), τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ταυτόσημα.

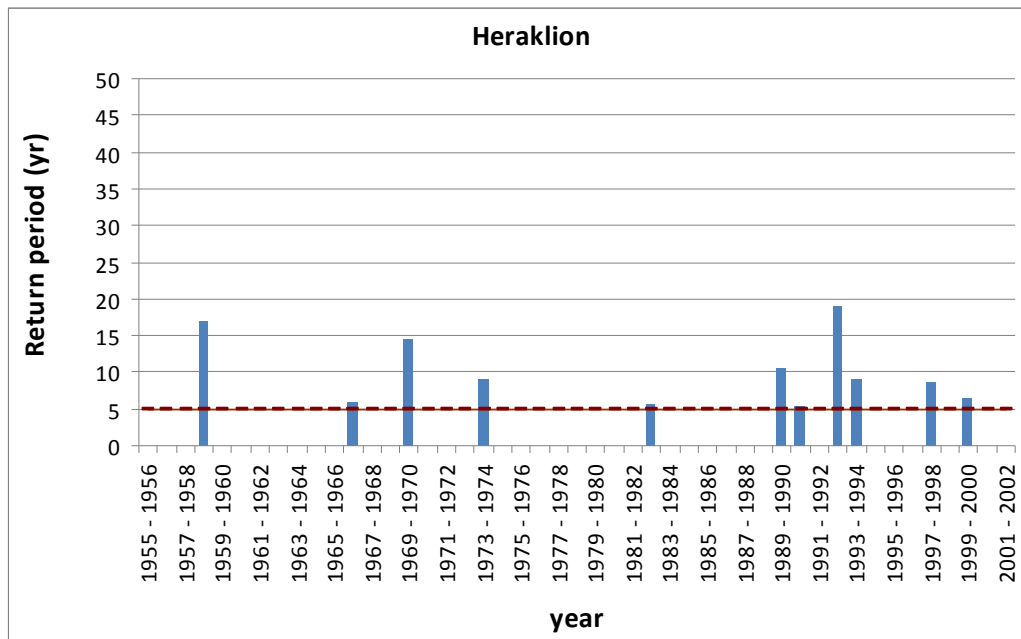
Ένα άλλο ενδιαφέρον σημείο είναι το γεγονός ότι ακολουθώντας την προσέγγιση του Hinkley, η μέση τιμή του  $\bar{a}_k$  σύμφωνα με την Εξίσωση 3.32 είναι ίση με το λόγο των μέσων τιμών του P και του PET, γιατί  $\sigma_{PET} \ll \mu_{PET}$ . Είναι φυσικά γνωστό ότι αυτό δεν ισχύει πάντα (π.χ. Ang and Tung, 1975).



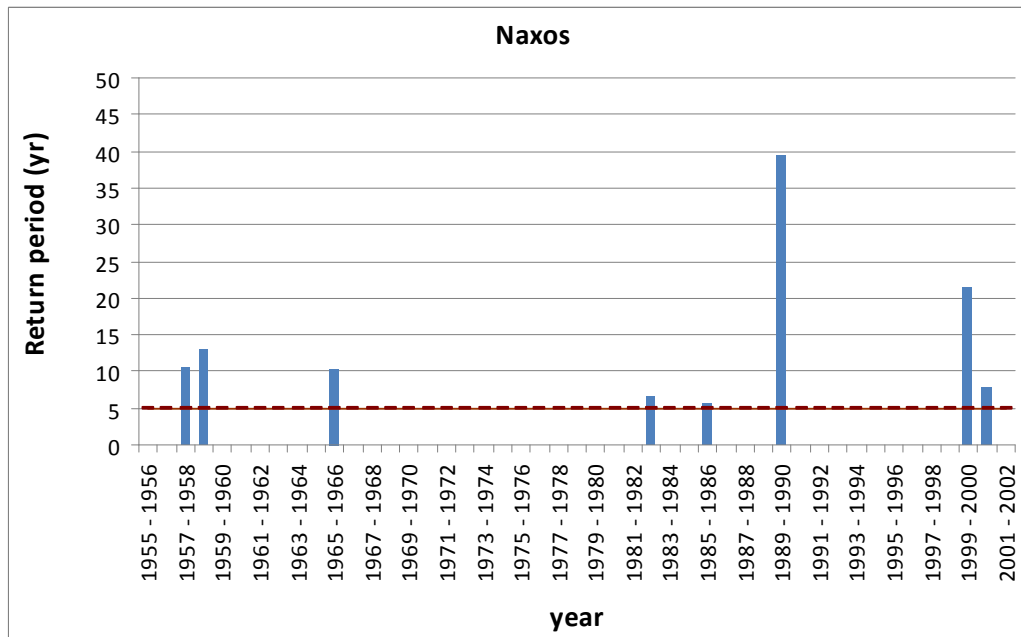
(a)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 3.22. Οι περίοδοι επαναφοράς για τα κύρια έτη ξηρασίας ( $T > 5$  ετών) στους σταθμούς (a) Ελληνικό, (b) Λάρισα, (c) Ηράκλειο και (d) Νάξος.

Στην παρούσα παράγραφο, ο RDI μελετάται ως διμεταβλητός δείκτης μέσα από μια αυστηρή πιθανολογική ανάλυση στην περίπτωση που τόσο η βροχοπτώση όσο και η δυνητική εξατμισοδοαπνοή ακολουθούν κανονική κατανομή. Όπως είναι γνωστό η υπόθεση αυτή ισχύει τουλάχιστον για τις ετήσιες τιμές σε πολλούς μετεωρολογικούς σταθμούς στην Ελλάδα. Εφαρμόζεται επομένως μια απλή διαδικασία υπολογισμού με βάση την διμεταβλητή ανάλυση πιθανότητας για την ορθολογική εκτίμηση του ετήσιου λόγου P/PET για

οποιαδήποτε περίοδο επαναφοράς της ξηρασίας στις υπό μελέτη περιοχές. Εναλλακτικά, με βάση τη διαδικασία αυτή, η σφοδρότητα οποιουδήποτε επεισοδίου ξηρασίας μπορεί να εκτιμηθεί ορθολογικά.

Το αποτέλεσμα είναι σημαντικό για τον καθορισμό του επιπέδου επιθυμητής προστασίας απέναντι στην ξηρασία, την οποία μπορούν να υιοθετήσουν τα κατάλληλα σχέδια ετοιμότητας για την αντιμετώπιση της ξηρασίας. Είναι επίσης απαραίτητο για την ιεράρχηση των ενεργειών, μέτρων και έργων, τα οποία θα πρέπει να εφαρμοστούν στο πλαίσιο της προληπτικής αντιμετώπισης της ξηρασίας και της λειψυδρίας. Η προτεινόμενη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί και για περιόδους αναφοράς μικρότερες από ένα έτος (π.χ. 3, 6, 9 μήνες), για τις οποίες ισχύει η παραδοχή ότι οι χρονοσειρές της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ακολουθούν την κανονική κατανομή χωριστά αλλά και από κοινού. Στην περίπτωση που η υπόθεση αυτή δεν ισχύει, οι χρήστες θα πρέπει να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν τον τυποποιημένο RDI σύμφωνα με την αρχική πρόταση, η οποία υποθέτει ότι ο λόγος P/PET ακολουθεί γενικά μια ασύμμετρη κατανομή.

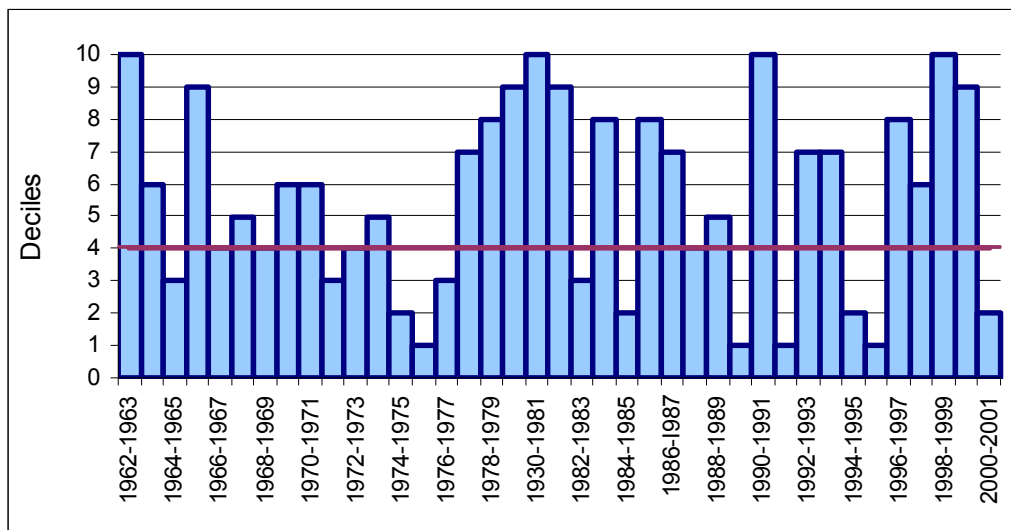
### 3.5 Ο RDI σε σύγκριση με τους άλλους δείκτες ξηρασίας

Ο Reconnaissance Drought Index, όπως έχει πλέον διεξοδικά παρουσιαστεί, βασίζεται σε φυσική προσέγγιση παρουσιάζοντας πιο ισχυρή επιστημονική βάση σε σχέση με άλλους (απλούς) δείκτες, πλεονεκτώντας σε διάφορα σημεία. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του βασίζεται στο γεγονός ότι υπολογίζει το συνολικό έλλειμμα μεταξύ της ζήτησης της ατμόσφαιρας λόγω εξάτμισης και της βροχόπτωσης.

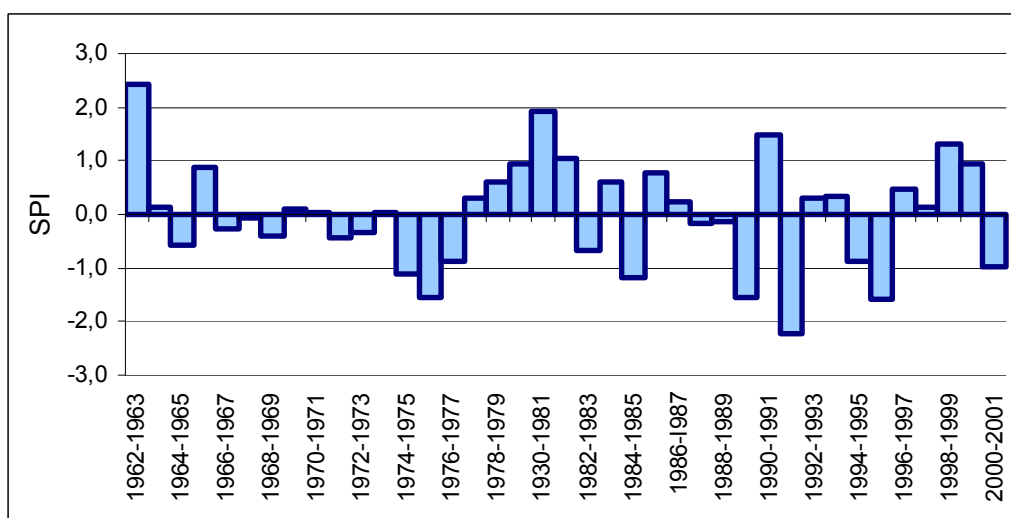
Ωστόσο, καθώς δεν υπάρχει μονοσήμαντος τρόπος φυσικής μέτρησης της ξηρασίας (π.χ. με τη χρήση μετρητικών διατάξεων ή συσκευών) όπως συμβαίνει με τις κλιματικές παραμέτρους, είναι προφανές ότι ένας καινούριος δείκτης θα πρέπει να παρουσιάζει συμβατότητα με την κατάσταση ξηρασίας που επικρατεί σε μια περιοχή. Ο έλεγχος της συμβατότητας αυτής μπορεί να είναι καθαρά υποκειμενικός, μέσα από την αίσθηση της ξηρασίας όπως την αντιλαμβάνεται ο ανθρώπινος οργανισμός, ή να έχει πιο υπολογιστική βάση, μέσα από τις επιπτώσεις της ξηρασίας στον οικονομικό περιβαλλοντικό ή κοινωνικό τομέα. Ένας πιο αξιόπιστος έλεγχος αυτής της συμβατότητας μπορεί να επιτευχθεί με τη συσχέτιση του νέου δείκτη με παλαιότερους δοκιμασμένους δείκτες, δείκτες δηλαδή που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι και έχουν ικανοποιητικά συνδεθεί με τις επιπτώσεις συγκεκριμένων γεγονότων ξηρασίας της ιστορικής χρονοσειράς δεδομένων. Η συσχέτιση φυσικά που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον

είναι αυτή μεταξύ του  $RDI_{st}$  και του SPI που ως γνωστόν παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

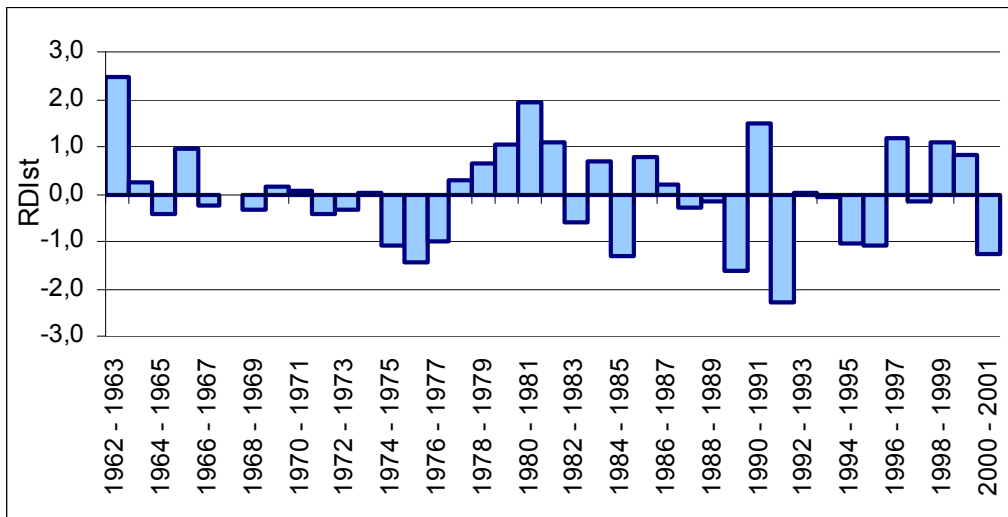
Για τη διερεύνηση της συσχέτισης θα αξιοποιηθεί το παράδειγμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου, που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.1. Στο Σχήμα 3.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δεικτών SPI και  $RDI_{st}$ , καθώς και του δημοφιλούς δείκτη Deciles, για τον μετεωρολογικό σταθμό Λιδορίκι της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου. Επίσης παρουσιάζεται η συσχέτιση του  $RDI_{st}$  τόσο με το δείκτη Deciles όσο φυσικά και με τον δείκτη SPI. Ομοίως, στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζονται οι δείκτες Deciles, SPI και  $RDI_{st}$ , καθώς και η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών για τον μετεωρολογικό σταθμό Πενταγιοί.



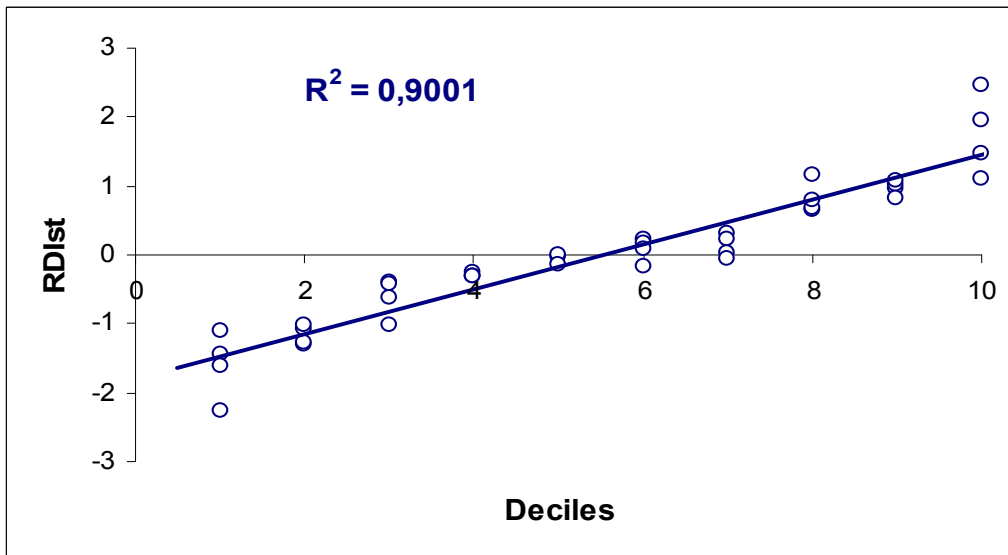
(a)



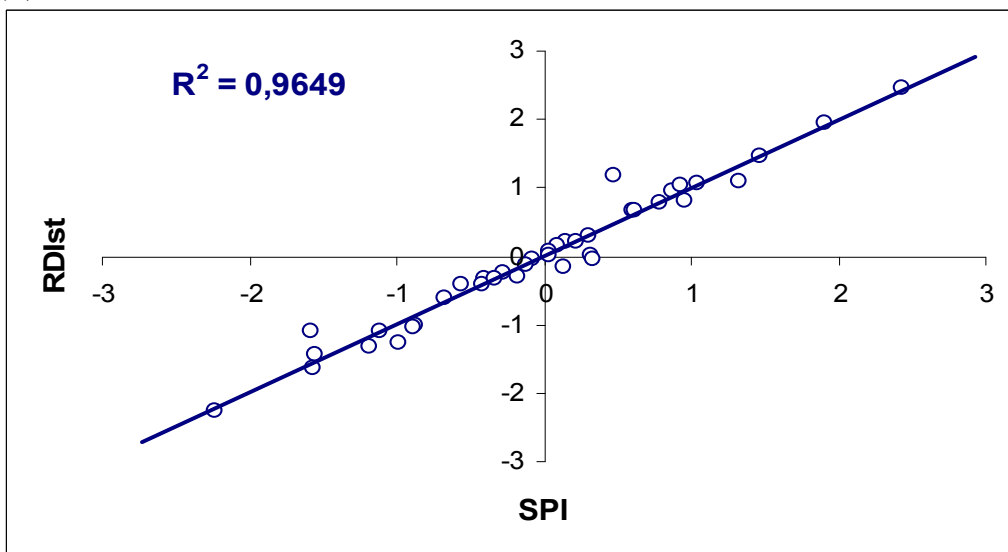
(b)



(c)

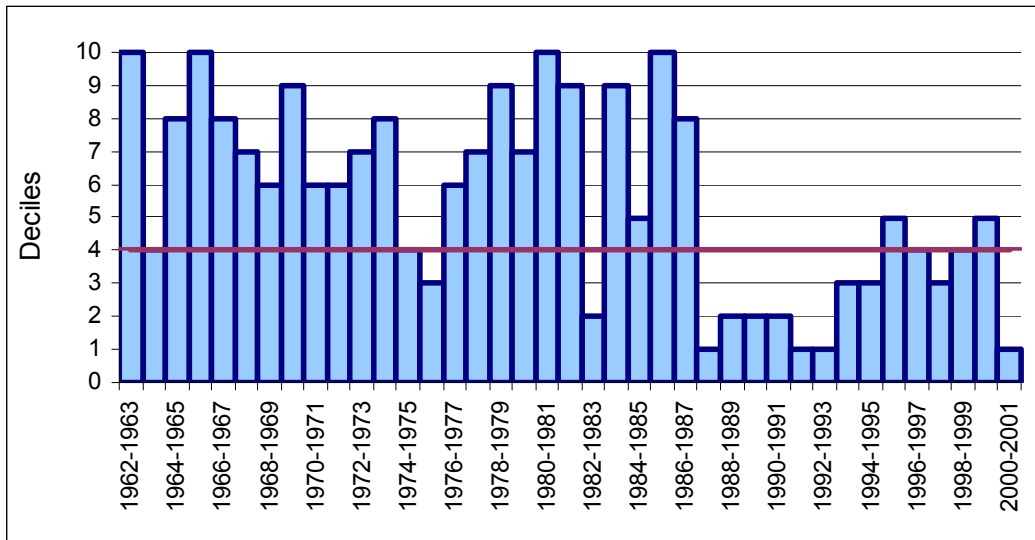


(d)

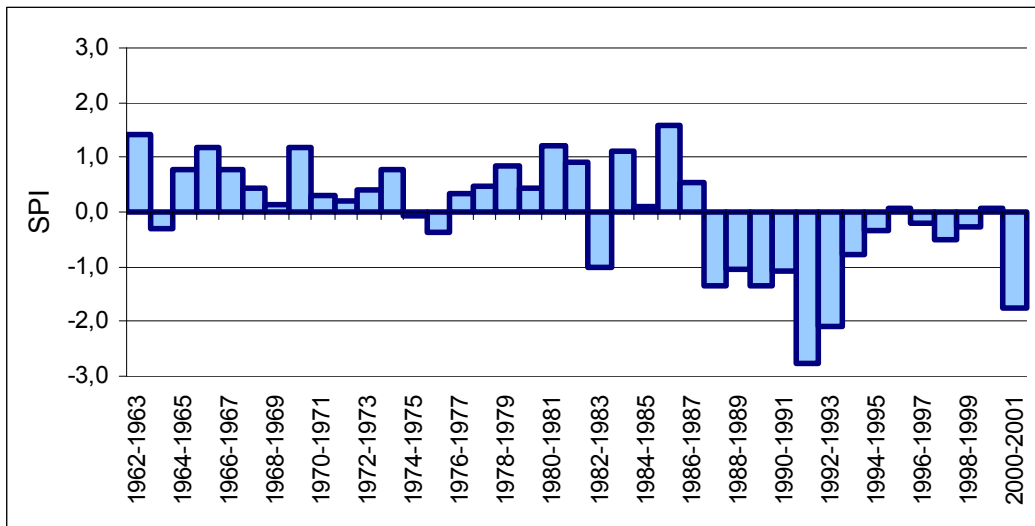


(e)

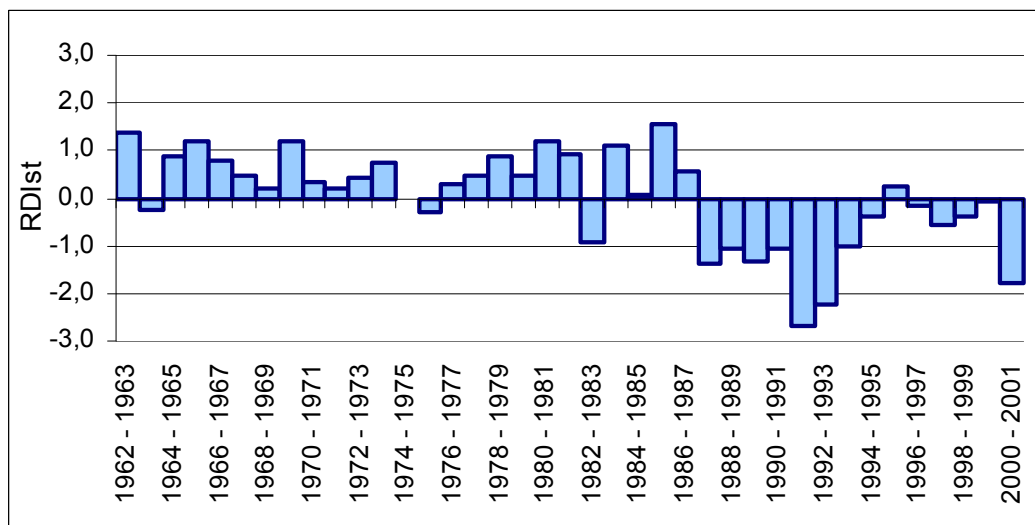
Σχήμα 3.23. Σύγκριση των δεικτών ξηρασίας Deciles, SPI και RDI για το σταθμό Λιδορίκι της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου.



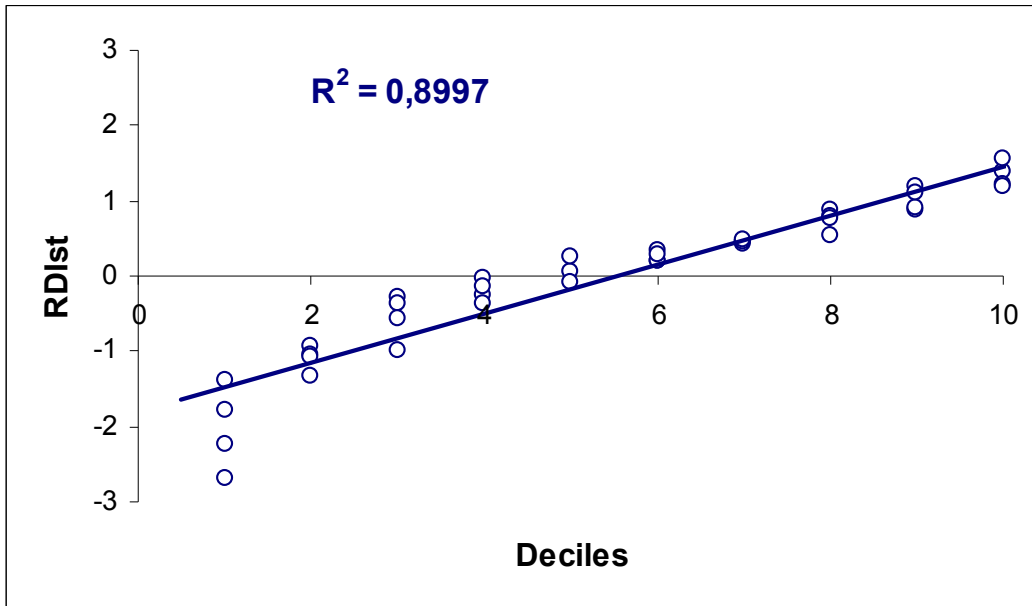
(a)



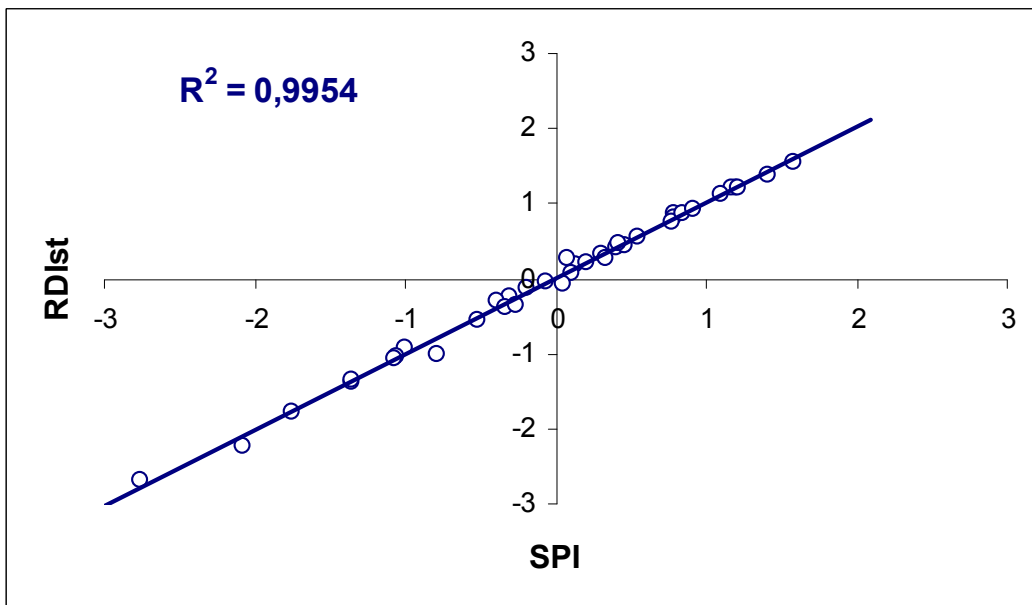
(b)



(c)



(d)



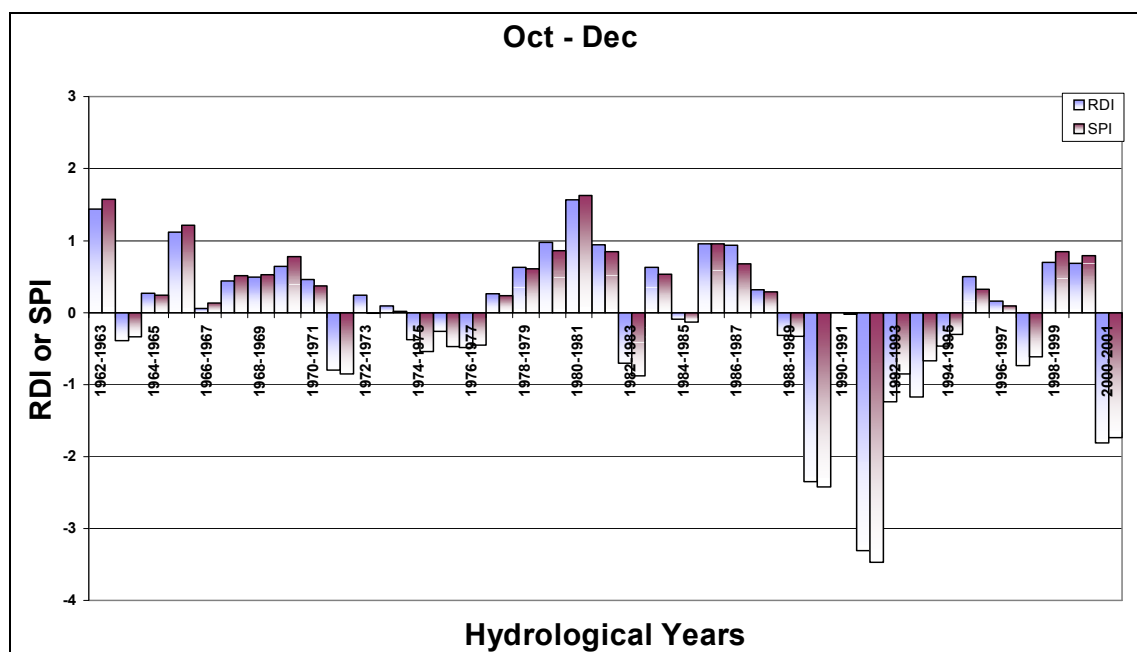
(e)

Σχήμα 3.24. Σύγκριση των δεικτών ξηρασίας *Deciles*, *SPI* και *RDI* για το σταθμό Πενταγιοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου.

Από τα Σχήματα 3.23 και 3.24 μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ του  $RDI_{st}$  και των άλλων δεικτών που θεωρείται ότι αποτυπώνουν επαρκώς τις συνθήκες ξηρασίας μιας περιοχής. Από τη γραφική απεικόνιση των δεικτών είναι προφανές ότι ο  $RDI_{st}$  ακολουθεί το μοτίβο του *SPI* αλλά και των *Deciles*. Η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών επιβαρυνώνει το συμπέρασμα αυτό, αφού ο συντελεστής συσχέτισης σε όλες τις περιπτώσεις κινείται σε πολύ υψηλές τιμές, με καλύτερη πάντα συσχέτιση μεταξύ  $RDI_{st}$  και *SPI* σε σχέση με τη συσχέτιση μεταξύ  $RDI_{st}$  και *Deciles*.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.23 και 3.24 επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικά, τόσο της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής όσο και γενικά των αποτελεσμάτων συσχέτισης για διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς του Ελληνικού χώρου. Μάλιστα, από τους σταθμούς της λεκάνης απορροής του ποταμού Μόρνου που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1, οι σταθμοί Λιδορίκι και Πενταγιοί που επιλέχθηκαν παρουσιάζουν την ελάχιστη και τη μέγιστη συσχέτιση αντίστοιχα μεταξύ  $RDI_{st}$  και SPI σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς της λεκάνης απορροής.

Είναι λοιπόν προφανές ότι ο RDI μπορεί να αποτυπώσει τις συνθήκες ξηρασίας μιας περιοχής με ακρίβεια που είναι συμβατή με παλαιότερους και δοκιμασμένους δείκτες, αλλά ίσως και καλύτερη λόγω της σιβαρής θεωρητικής του βάσης. Όπως άλλωστε φαίνεται από τους συντελεστές συσχέτισης, η συσχέτιση ανάμεσα στους δείκτες δεν είναι σε καμία περίπτωση απόλυτη. Η βαθύτερη μάλιστα ανάλυση των δεικτών μπορεί να μας αποκαλύψει ότι οι διαφορές αυτές μπορεί να είναι και σημαντικές. Η σύγκριση των δεικτών SPI και  $RDI_{st}$  για το πρώτο τρίμηνο του υδρολογικού έτους που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25 αποκαλύπτει μια τέτοια πρώτη προσέγγιση, καθώς η ένταση που αποτυπώνεται από τους δύο δείκτες είναι διαφορετική και για τα δύο υδρολογικά έτη (1989-1990 και 1991-1992) με σημαντική και ακραία ξηρασία χωρίς βέβαια να κρίνεται σημαντικά διαφορετική. Ωστόσο, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο μέσω χαρτών αποτύπωσης της χωρικής έκτασης της ξηρασίας ο  $RDI_{st}$  μπορεί να παρουσιάσει αισθητές διαφορές σε σχέση με άλλους δείκτες και σε χωρικό επίπεδο.



Σχήμα 3.25. Διαφορές μεταξύ SPI και  $RDI_{st}$  για το τρίμηνο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου.



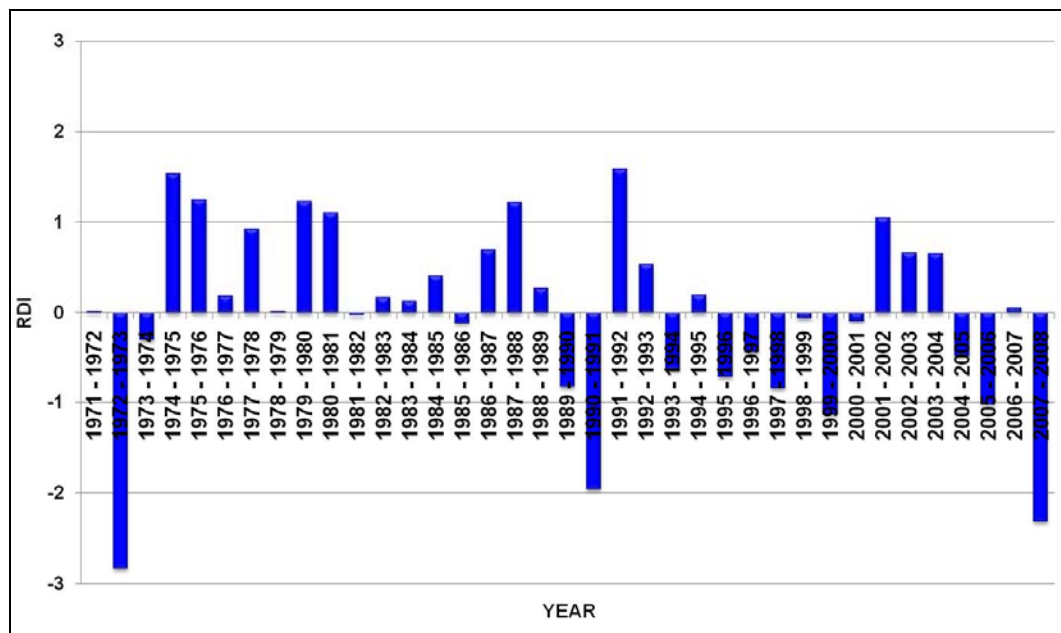
### 3.6 Απήχηση του RDI – Χρήση του RDI σε άλλες χώρες

Μια νέα μεθοδολογία που παρουσιάζεται σε κάποιον επιστημονικό χώρο αποτελεί αδιαμφισβήτη προσφορά στο συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα στον οποίο αναφέρεται, υπό την προϋπόθεση ότι ακολουθεί τις αρχές της επιστήμης και βασίζεται σε σταθερή επιστημονική βάση. Αυτό όμως που κάνει μια νέα μεθοδολογία να θεωρηθεί σημαντική και αξιόλογη είναι η απήχηση της στην επιστημονική κοινότητα και η αξιοποίησή της τόσο από τους επιστήμονες σε πρώτη φάση, όσο και από τα κέντρα αποφάσεων άμεσα ή έμμεσα σε επόμενη χρονική φάση.

Ο δείκτης ξηρασίας RDI παρουσιάστηκε επίσημα για πρώτη φορά στην επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με την ξηρασία μέσω της δημοσίευσής του σε επιστημονικό περιοδικό το 2005 (Tsakiris and Vangelis, 2005). Στα χρόνια που ακολούθησαν ο RDI δοκιμάστηκε σε διάφορες κλιματικές συνθήκες και βελτιώθηκε κυρίως μέσω της αποσαφήνισης διαφόρων σημείων που περιγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Αν και η ανάπτυξη (διατύπωση) του RDI αποτελεί καινοτόμο σημείο αυτής της διατριβής, η περίοδος που μεσολάβησε μέχρι την ολοκλήρωσή της, έδωσε την ευκαιρία, παράλληλα με τη βελτίωση του, να αξιολογηθεί και η αποδοχή του από την επιστημονική κοινότητα με αξιοσημείωτα αποτελέσματα.

Κατά την πρώτη περίοδο μετά τη διατύπωση του δείκτη, ο RDI δοκιμάστηκε σε διάφορες χώρες, κυρίως μέσω της συνεργασίας της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Ε.Μ.Π. με διάφορους επιστημονικούς και κρατικούς φορείς χωρών που συμμετείχαν σε ερευνητικά προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι σημαντικότερες από τις συνεργασίες αυτές αφορούν στα Ευρωπαϊκά Προγράμματα MEDROPLAN και PRODIM. Το πρόγραμμα MEDROPLAN (Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning) με συμμετέχοντες φορείς από την Ισπανία, την Ελλάδα, την Ιταλία, την Κύπρο, το Μαρόκο και την Τυνησία, δημοσίευσε τα τελικά του αποτελέσματα το 2007. Στο πλαίσιο αυτό, ο δείκτης RDI δοκιμάστηκε τόσο στις χώρες της βόρειας Αφρικής, όσο και στις Ευρωπαϊκές συνθήκες χωρίς ιδιαίτερη αποδοχή και αφήνοντας τους επιστήμονες σκεπτικούς απέναντί του, όπως ίσως αναμένονταν για κάθε καινούρια προσθήκη στα υπάρχοντα εργαλεία εκτίμησης της ξηρασίας. Χαρακτηριστική είναι μάλιστα η αντιμετώπιση από τους Amor et al (2009) που εφάρμοσαν τον RDI στην Ισπανία (Μαδρίτη) οι οποίοι εκτιμούν ότι η εισαγωγή της θερμοκρασίας με τη χρήση της εξατμισοδιαπνοής ενδέχεται να δημιουργήσει ασάφειες στην εκτίμηση της ξηρασίας, αποδέχονται ωστόσο ότι οι διαφορές μεταξύ του  $RDI_{st}$  και του SPI τουλάχιστον σε ετήσια βάση είναι ορατές και

μπορεί να υποδηλώνουν σημαντική εννοιολογική διαφορά. Το πρόγραμμα PRODIM (Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean) με συμμετοχή φορέων από την Ελλάδα, την Ιταλία, την Κύπρο και τη Μάλτα, με τα αποτελέσματά του να δημοσιεύονται το 2008, έδωσε τη δυνατότητα για πιο εκτεταμένη αξιοποίηση του RDI στην Ελλάδα (Θεσσαλία, Λακωνία, Κυκλάδες) αλλά και στις άλλες συμμετέχουσες χώρες. Στην περίπτωση αυτή οι επιστήμονες ήταν πιο θετικοί απέναντι στον RDI κυρίως στις δύο νησιωτικές χώρες Κύπρο και Μάλτα, καθώς η εννοιολογική διαφορά του RDI σε σχέση με άλλους δείκτες είναι εμφανέστερη κυρίως στις Μεσογειακές συνθήκες. Οι Pashiardis and Michaelides (2008) παρουσιάζουν μάλιστα τα αποτελέσματα της χρήσης του RDI στην Κύπρο (Σχήμα 3.26) με την παράλληλη χρήση του SPI σε ευρύ κοινό, ενώ μια αντίστοιχη προσπάθεια αξιοποίησης του RDI δημοσιεύεται για τη Μάλτα (Borg, 2009).



Σχήμα 3.26. Ο ετήσιος RDI για το σύνολο του νησιού της Κύπρου.

Η πρώτη ουσιαστική αναγνώριση του RDI έρχεται με τη σταδιακή ενσωμάτωση του στους καταλόγους αναγνωρισμένων δεικτών ξηρασίας. Ο Niemeyer (2008), ερευνητής του Institute of Environment and Sustainability – DG Joint Research Centre της European Commission, εντάσσει τον RDI στους μετεωρολογικούς δείκτες αναφέροντας τον ως την πιο πρόσφατη εξέλιξη στην εκτίμηση της ξηρασίας και τονίζοντας τη σύνδεσή του με τον SPI. Ο Clorpet (2011) του Meteo-France, κατατάσσει τον RDI στους Ευρωπαϊκούς δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της αγροτικής ξηρασίας, αναφέροντας την καταλληλότητα του κυρίως για τις μεσογειακές συνθήκες. Την

ίδια περίοδο ο RDI φεύγει από την καθαρά Ευρωπαϊκή του αναφορά, καθώς τον συναντάμε στην κοινή Τεχνική Αναφορά του Bureau of Meteorology of the Australian Government με το Centre for Australian Weather and Climate Research - CSIRO, όπου αναφέρεται σαν ένας από τους επτά κύριους δείκτες για χρήση στην εκτίμηση της ξηρασίας στην Αυστραλία (CAWCR, 2001).

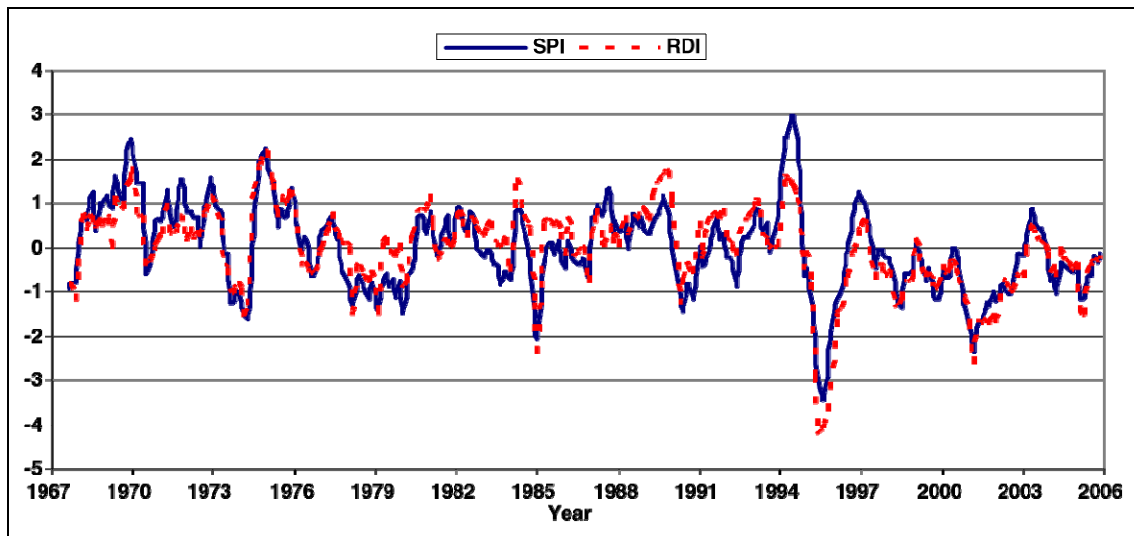
Η πραγματική όμως αναγνώριση του RDI έρχεται με την πλήρη χρήση του σε διάφορες χώρες με εκτεταμένα χωρικά παραδείγματα. Ο Jieliu Zhu (2009) μεταφέρει για πρώτη φορά τον RDI στον Καναδά (Trend University, Ontario) με τη διατριβή του για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα “Applications of Modelling in the Natural and Social Sciences”, αν και η εφαρμογή γίνεται με δεδομένα των ξηρών περιοχών της Κίνας. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται σταδιακά να αλλάζει η αντίληψη των επιστημόνων απέναντι στον RDI με τη σημαντικά ισχυρότερη θεωρητική βάση. Χαρακτηριστικός είναι και ο τίτλος του άρθρου “Is the SPI sufficient for monitoring meteorological droughts in extreme costal climates of Iran?” από τους Bazrafshan et al (2010), που αν και δεν διαπιστώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ του RDI και του SPI, φαίνεται να κατανοούν την ισχυρότερη επιστημονική βάση του RDI απέναντι σε άλλους δείκτες. Οι διαφορές αυτές θα γίνονται εμφανέστερες με την αλλαγή του κλίματος όπως παρουσιάζεται και σε επόμενο κεφάλαιο.

Στη Μέση Ανατολή (Ασία) ο RDI φαίνεται να γίνεται πολύ δημοφιλής στο Ιράν, με αρκετές αναφορές αλλά και πλήρεις εφαρμογές του δείκτη σε όλη την έκταση της χώρας. Οι Darani et al (2011) χρησιμοποίησαν τον RDI στην επαρχία Isfahan για την παρακολούθηση της ξηρασίας και δηλώνουν ότι αν και οι διαφορές από τον SPI δεν θεωρούνται σημαντικές, ο RDI είναι πιο σαφής στην εκτίμηση τη έντασης της ξηρασίας. Ένα βήμα πιο κάτω κινούνται οι Khalili et al (2011) που δηλώνουν ότι οι δύο δείκτες μπορεί να παρουσιάζουν ομοιότητες, ωστόσο ο RDI παρουσιάζει σημαντικότερες τιμές όταν πρόκειται για ακραία ξηρασία (Σχήμα 3.27), ενώ γενικά είναι πιο ευαίσθητος στις κλιματικές διακυμάνσεις αποτυπώνοντας τις συνθήκες αυτές καλύτερα από τον SPI.

Ένα σημείο που παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον είναι η διαφορά στη χωρική κατανομή της έντασης της ξηρασίας μεταξύ του SPI και του RDI (Σχήματα 3.28 και 3.29), όπως την παρουσιάζουν για το Ιράν οι Asadi Zarch et al (2011). Οι ερευνητές του Πανεπιστημίου του Yazd δηλώνουν ότι η ισχυρότερη θεωρητική βάση του RDI για ξηρές περιοχές τους οδηγεί στο να τον προτιμήσουν έναντι του SPI για τη εκτίμηση της ξηρασίας στη χώρα τους.

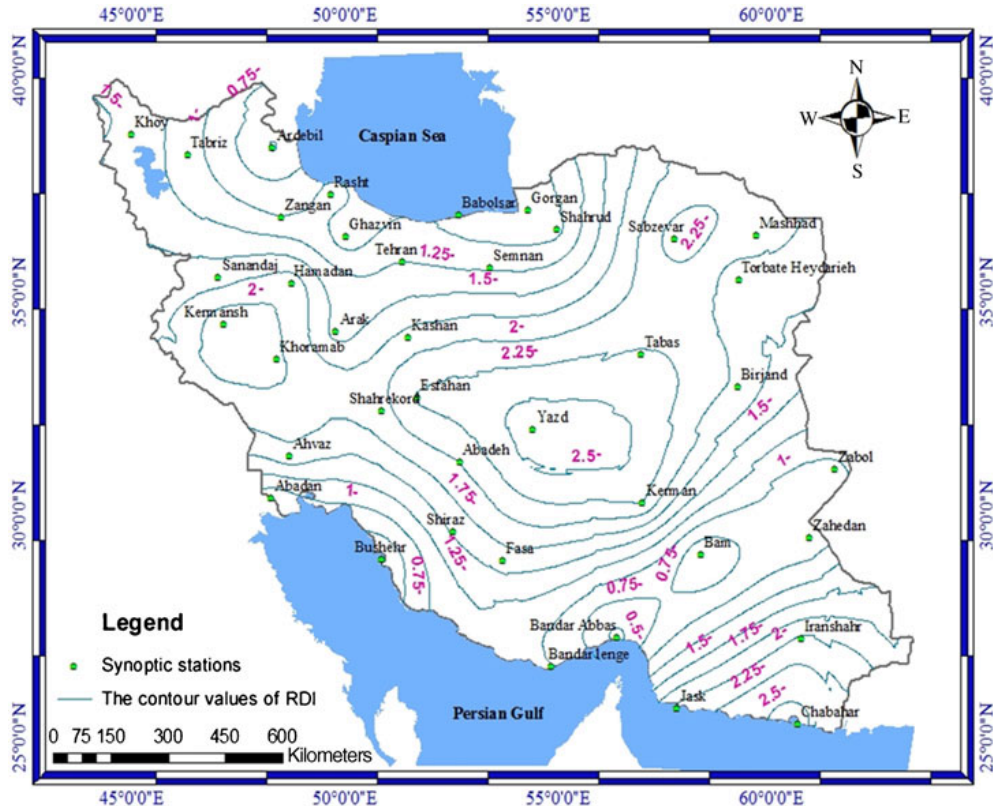
Ακόμα πιο σημαντική αναγνώριση έρχεται από το πέρασμα του δείκτη RDI στο Νότιο Ημισφαίριο με τη χρήση σχεδόν σε ολόκληρη την έκταση της Αυστραλιανής ηπείρου. Οι Kirono and Kent (2011) του Centre for Australian

Weather and Climate Research του CSIRO επιχειρήσαν την πρόβλεψη της ξηρασίας μέσω της εκτίμησης της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με παγκόσμιες κλίμακας κλιματικά μοντέλα. Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποίησαν τον δείκτη RDI, εφαρμόζοντάς τον στα δεδομένα που προέκυψαν από τα κλιματικά μοντέλα και για τις 12 περιφέρειες της Αυστραλίας (Σχήμα 3.30).

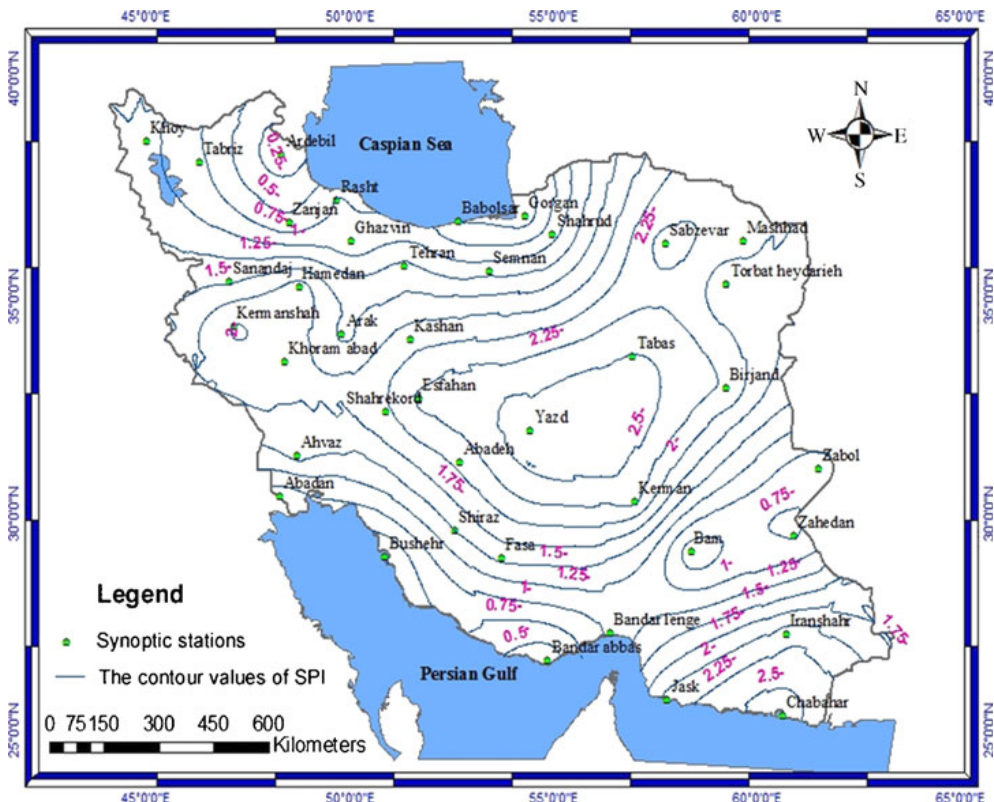


Σχήμα 3.27. Σύγκριση των ετήσιων τιμών των SPI και RDI για τον μετεωρολογικό σταθμό *Kermanshah* στο Ιράν.

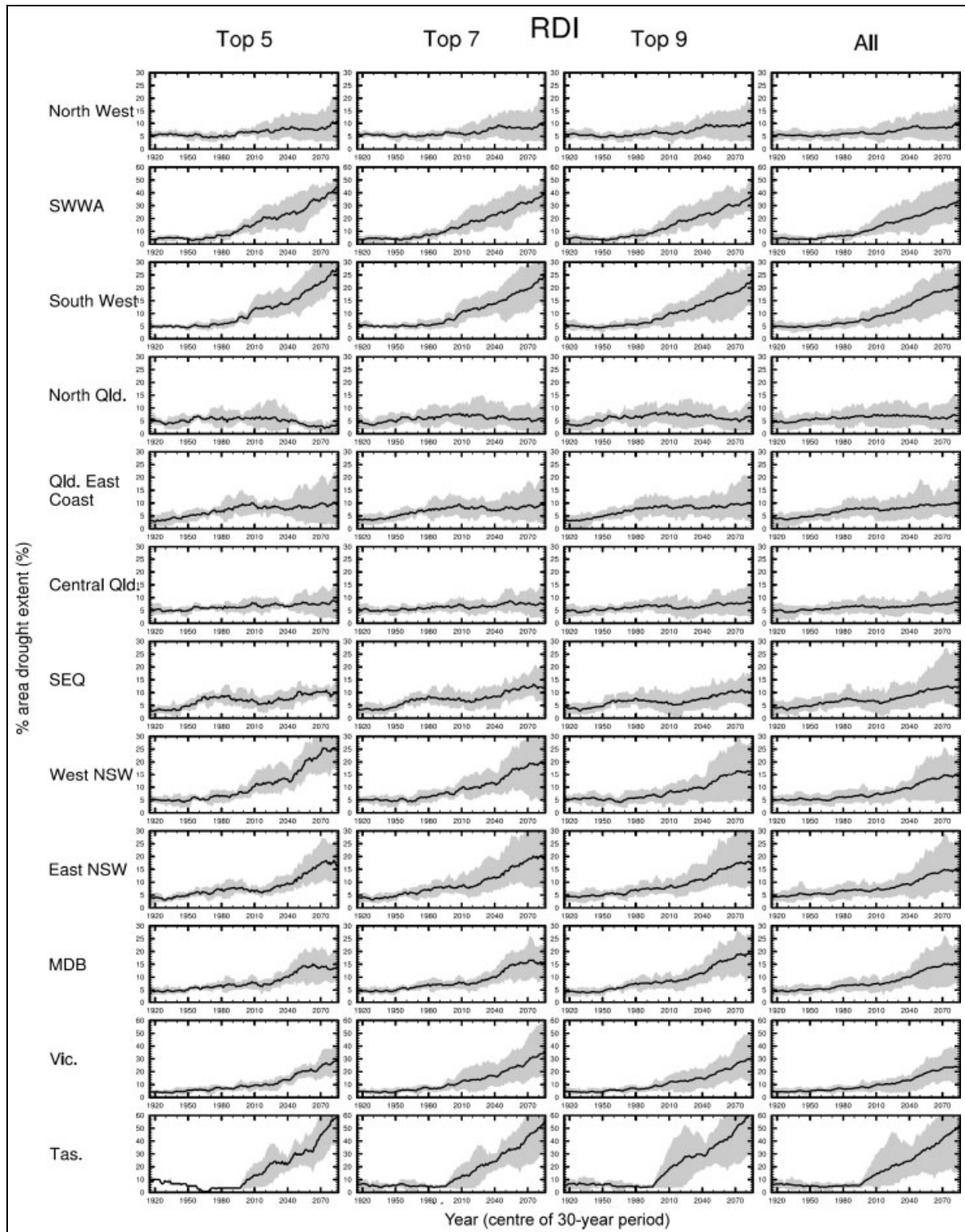
Οι ερευνητές του SCIRO ([Kirono et al., 2011](#)) ξεκαθαρίζουν ότι ο δείκτης RDI είναι ο πιο κατάλληλος για χρήση σε περιπτώσεις περιβαλλοντικών μεταβολών και για μελέτες ξηρασίας που βασίζονται σε σενάρια κλιματικής αλλαγής. Άλλωστε, σε κλιματικές συνθήκες όπως αυτές της Αυστραλίας, μετεωρολογικοί δείκτες που βασίζονται μόνο στη βροχόπτωση μπορεί να μην εκτιμήσουν επαρκώς την ένταση της ξηρασίας, αφού η θερμοκρασία θεωρείται χαρακτηριστικός παράγοντας στην εκτίμηση της ξηρασίας. Όπως διαπιστώθηκε από τον [Nicholls \(2004\)](#) κατά την ξηρασία του 2002-2003, η πολύ υψηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας αντανάκλα με σαφήνεια τον συνδυασμό μεταξύ των ετήσιων διακυμάνσεων του κλίματος και της μακροπρόθεσμης θέρμανσης του πλανήτη (*global warming*) και σε αυτό οφείλεται πιθανότατα το γεγονός ότι η συγκεκριμένη ξηρασία ήταν πολύ σφοδρότερη από προηγούμενες ξηρασίες, παρά το ότι οι βροχοπτώσεις δεν ήταν εμφανώς χαμηλότερες από τις αντίστοιχες προηγούμενων ετών με ξηρασία. Η καταλληλότητα του δείκτη έχει άλλωστε διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές, τόσο για την περίπτωση μελέτης της κλιματικής αλλαγής ([Rossi et al., 2008](#)), όσο και για την παρακολούθηση της ξηρασίας στο πλαίσιο του σχεδιασμού αντιμετώπισης της ([FAO/NDMC, 2008](#)).



Σχήμα 3.28. Χάρτης έντασης της ξηρασίας με βάση τον RDI για την ξηρή χρονιά 1999-2000 στο Ιράν.



Σχήμα 3.29. Χάρτης έντασης της ξηρασίας με βάση τον SPI για την ξηρή χρονιά 1999-2000 στο Ιράν.



Σχήμα 3.30. Προσομοίωση ποσοστού περιοχής με ξηρασία σε 12 περιφέρειες της Αυστραλίας με βάση τον δείκτη RDI (Kirono and Kent, 2011).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης RDI επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες χώρες, όπως στην περίπτωση της κοιλάδας Βεκαΐα στο Lebanon, όπου επιλέχθηκε λόγω της καταλληλότητάς του για τη μεσογειακή περιοχή και

της χαμηλής απαιτήσής του σε δεδομένα (Farajalla and Ziade, 2010), ενώ και στο Sudan θεωρείται κατάλληλη επιλογή για την παρακολούθηση της ξηρασίας (Elagib and Elhag, 2011). Πιο πρόσφατες δε αναφορές στον RDI τον βρίσκουν ως κατάλληλη επιλογή για χρήση στο σχεδιασμό αντιμετώπισης και την σύνταξη πολιτικής για την ξηρασία (Karamouz et al., 2012).

Στη χώρα μας, εκτός από την εκτεταμένη έρευνα που έχουν γίνει από το Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Ε.Μ.Π. στον τομέα της ξηρασίας με τη χρήση του RDI σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, ο RDI έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα από την ομάδα του Καθηγητή Ν. Δαλέζιου στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και από συνεργάτες του σε άλλα πανεπιστήμια της χώρας. Η ομάδα έχει χρησιμοποιήσει τόσο συμβατικά συλλεγόμενα δεδομένα όσο και δορυφορικά δεδομένα για να αποτυπώσει την ξηρασία σε όλη την έκταση της χώρας (Kanellou et al., 2008a, Kanellou et al., 2008b, Kanellou et al., 2011).

### 3.7 Αναφορές κεφαλαίου

- Abramovitz M. and Stegun, I., 1965. Handbook of Mathematical Functions. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series – 55, Washington, D.C.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1st Ed., Rome, Italy.
- Amor L.G., Carrasco A. and Ibanez J.C., 2009. Using and Testing Drought Indicators. In: A. Iglesias, L. Garrote, A. Cancelliere, F. Cubillo and D. Wilhite (Eds.), Coping with drought risk in Agriculture and Water Supply Systems, Drought Management and Policy Development in the Mediterranean, Springer (Advances in Natural and Technological Hazards Research, Volume 26), Springer Science+Business Media B.V. 2009, ISBN: 978-1-4020-9044-8, pp.257-272.
- Ang A. and Tung W., 1975. Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume I - Basic Principles. John Wiley & Sons.
- Asadi Zarch M. A., Malekinezhad H., Mobin M.H., Dastorani M.T. and Kousari M.R., 2011. Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25(13): 3485-3504.
- Bazrafshan J., Hejabi S. and Nokhandan M.H., 2010. Is the SPI sufficient for monitoring meteorological droughts in extreme costal climates of Iran? *Advances in Natural and Applied Sciences*, 4(3): 345-351.
- Borg D.S., 2009. An Application of Drought Indices in Malta, Case Study.

*European Water*, 25/26: 25-38.

Burden J. and Faires D., 1997. Study Guide for Numerical Analysis Brooks, Cole Publishing Company.

CAWCR, 2011. Approaches for generating climate change scenarios for use in drought projections – a review. CAWCR Technical Report No. 034, January 2011, 36 p.

Cloppet E., 2011. Agricultural Drought Indices in France and Europe: Strengths, Weaknesses, and Limitations. Agricultural Drought Indices - Proceedings of an Expert Meeting, 2-4 June 2010, Murcia, Spain, World Meteorological Organisation, pp. 83-94.

Darani S.M., Dastjerdi J.K., Parandeh A. and Ghatrehsamani M., 2011. Drought monitoring in Esfahan province (IRAN) by comparison of Standard Precipitation Index (SPI) & Reconnaissance Drought Index (RDI). EMS Annual Meeting Abstracts, 11th EMS / 10th ECAM, Vol. 8, EMS2011-229.

Doorenbos J. and Pruitt W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd Ed., Rome, Italy.

Elagib N.A. and Elhag M.M., 2011. Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409(3-4): 612–625.

FAO/NDMC, 2008. The Near East Drought Planning Manual: Guidelines for Drought Mitigation and Preparedness Planning. C.L. Knutson (Lead Author), Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for the Near East (Cairo, Egypt) and the National Drought Mitigation Centre (USA). FAO, Rome, Italy, 52 pp.

Farajalla N. and Ziade R., 2010. Drought Frequency under a Changing Climate in the Eastern Mediterranean: the Beka'a Valley, Lebanon. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-11653.

Fieller E.C., 1932. The distribution of the index in a normal bivariate population. *Biometrika*, 24: 428-440.

Gerald C. and Wheatley P., 1994. Applied Numerical Analysis. Addison – Wesley Publishing Company.

Graybill F.A., 1961. An Introduction to Linear Statistical Models. McGraw-Hill.

Gunhan T., Demir V., Hancioglu E. and Hepbasli A., 2005. Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11-12): 1667-1679.

Haan C., 1977. Statistical hydrology. The Iowa State University Press. Ames.

Hargreaves G.H. and Allen R.G., 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1): 53-63.

Hargreaves G.H. and Samani Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration.



- Journal of Irrigation and Drainage Division*, 108(3): 225-230.
- Hargreaves G.H. and Samani Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.
- Hargreaves G.L., Hargreaves G.H. and Riley J.P., 1985. Irrigation water requirements for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(3): 265-275.
- Hinkley D.V., 1969. On the Ratio of Two Correlated Normal Random Variables. *Biometrika*, 56 (3): 635-639.
- Kanellou E., Domenikiotis C., Blanta A., Hondronikou E. and Dalezios N.R., 2008a. Index-based Drought Assessment in Semi-Arid Areas of Greece based on Conventional Data. *European Water*, 23/24: 87-98.
- Kanellou E., Domenikiotis C., Tsiros E. and Dalezios N.R., 2008b. Satellite-based Drought Estimation in Thessaly. *European Water*, 23/24: 111-122.
- Kanellou E.C., Dalezios N.R. and Spyropoulos N.V., 2011. Geoinformatic Intelligence Methodologies for Drought Spatiotemporal Variability in Greece. *Water Resources Management*, online first, DOI 10.1007/s11269-011-9948-1.
- Karamouz M., Imen S. and Nazif S., 2012. Development of a Demand Driven Hydro-climatic Model for Drought Planning. *Water Resources Management*, 26(2): 329-357.
- Khalili D., Farnoud T., Jamshidi H., Kamgar-Haghighi A.A. and Zand-Parsa S., 2011. Comparability Analyses of the SPI and RDI Meteorological Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resources Management*, 25(6): 1737-1757.
- Kirono D.G.C. and Kent D.M., 2011. Assessment of rainfall and potential evaporation from global climate models and its implications for Australian regional drought projection. *International Journal of Climatology*, 31: 1295-1308.
- Kirono D.G.C., Kent D.M., Hennessy K.J. and Mpelasoka F., 2011. Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: Results from 14 global climate models. *Journal of Arid Environments*, 75(6): 566-575.
- Lopez-Urrea R., Martin de Santa Olalla F., Fabeiro C. and Moratalla A., 2006. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 86(3): 277-282.
- Nicholls N., 2004. The changing nature of Australian droughts. *Climatic Change*, 63(3), 323-336.
- Niemeyer S., 2008. New drought indices. Proceedings of the 1st International Conference "Drought management: Scientific and technological innovations" (Option Méditerranéennes, Series A, No. 80), 12-14 June 2008, Zaragoza

- (Spain), pp. 267-274.
- Pashiardis S. and Michaelides S., 2008. Implementation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance Drought Index (RDI) for Regional Drought Assessment: A case study for Cyprus. *European Water*, 23/24: 57-65.
- Pereira A.R. and Pruitt W.O., 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 66(3): 251-257.
- Rossi G., Nicolosi V. and Cancelliere A., 2008. Recent methods and techniques for managing hydrological droughts. Proceedings of the 1st International Conference "Drought management: Scientific and technological innovations" (Option Méditerranéennes, Series A, No. 80), 12-14 June 2008, Zaragoza (Spain), pp. 251-265.
- Shenbin C., Yunfeng L. and Thomas A., 2006. Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential Evapotranspiration Trends from 1961–2000. *Climatic Change*, 76(3): 291-319.
- Srikanthan R. and McMahon T.A., 1983. Stochastic Generation of Annual, Monthly and Daily Evaporation Data for Australia. Agricultural Engineering Report 63/83, University of Melbourne, 94 p.
- Strzepek K. and Yates D., 1997. Climate change impacts on the hydrologic resources of Europe: a simplified continental scale analysis. *Climatic Change*, 36(1): 79-92.
- Thornthwaite C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Tigkas D., Vangelis H., Pangalou D. and Tsakiris G., 2008. Drought Identification and Characterisation. Case study in Greek regions. In: G. Tsakiris (Ed.), Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM) – Final Report. CANaH Publication 6/08, Athens 2008, pp. 59-76.
- Trajkovic S. and Kolakovic S., 2009. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations under Humid Conditions. *Water Resources Management*, 23(14): 3057-3067.
- Tsakiris G. and Vangelis H., 2005. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water*, 9/10: 3-11.
- Tsakiris G., Pangalou D. and Vangelis H., 2007. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5): 821-833.
- UNEP, 1992. World Atlas of Desertification. Edward Arnold, London.
- Vangelis H. and Tigkas D., 2011. Evaluation of Different Methods for Calculating Potential Evapotranspiration in Drought Severity Assessment. Proceedings

- of the 6th International Symposium of EWRA “Water Engineering and Management in a Changing Environment”. Catania, June 29 - July 2, 2011, electronic format.
- Vangelis H., Spiliotis M. and Tsakiris G., 2011. Drought Severity Assessment Based on Bivariate Probability Analysis. *Water Resources Management*, 25(1): 357–371.
- Ventura F., Spano D., Duce P. and Snyder R.L., 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrigation Science*, 18: 163-170.
- Xu C.Y and Singh V.P., 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15: 305-319.
- Xu C.Y and Singh V.P., 2002. Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16(3): 197-219.
- Yapo P.O., Gupta H.V. and Sorooshian S., 1998. Multi – objective global optimisation for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204: 83-97.
- Yates D. and Strzepek K., 1994. Potential Evapotranspiration Methods and their Impact on the Assessment of River Basin Runoff under Climate Change. International Institute for Applied Systems Analysis, A-2361, Luxemburg, Austria; WP-94-46, July 1994.
- Yoder R.E., Odhiambo L.O. and Wright W.C., 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2): 197-202.
- Yue S., 2000. Joint probability distribution of annual maximum storm peaks and amounts as represented by daily rainfalls. *Hydrological Sciences Journal*, 45(2): 315-326.
- Zhu J., 2009. Modelling Drought Option Contract Prices. MSc Thesis, Trent University, Peterborough, Ontario, Canada.



## κεφάλαιο 4

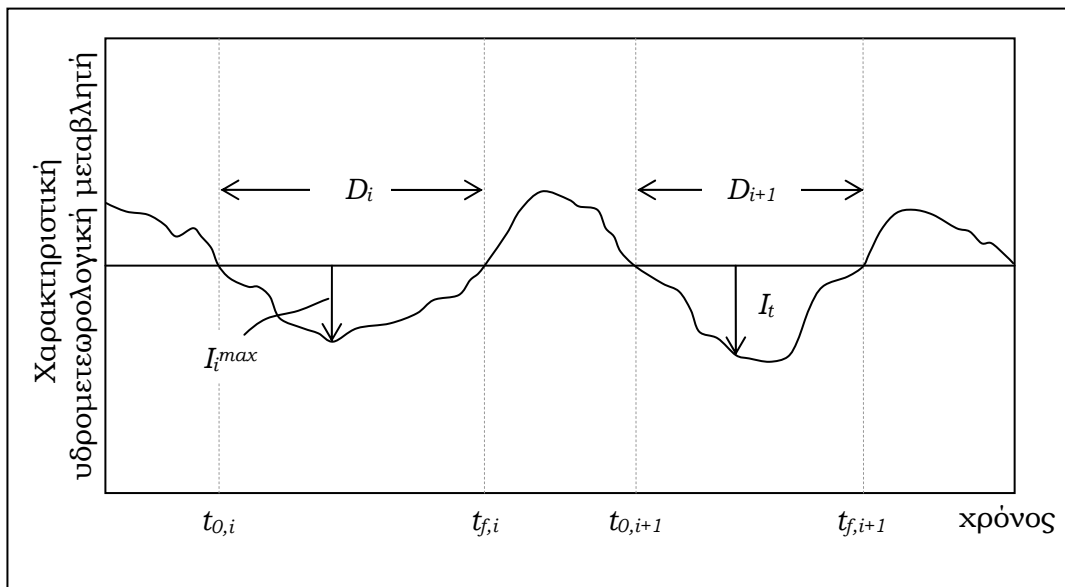
# Μονοδιάστατη Ανάλυση

### 4.1 Τρεις διαστάσεις της ξηρασίας: Αποτελούν πρόβλημα;

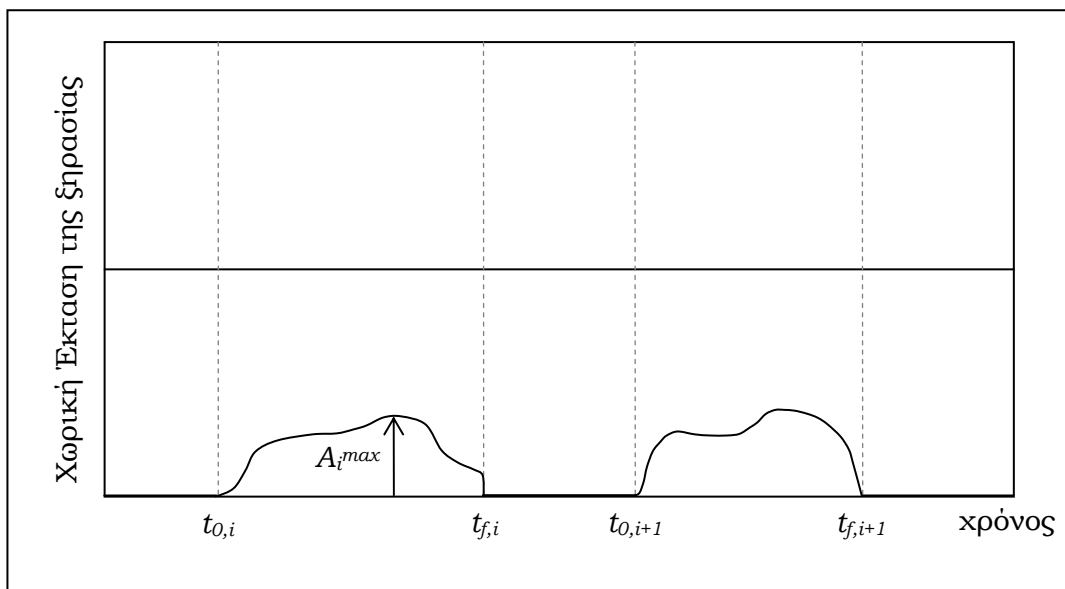
Η ξηρασία αποτελεί ένα πολύπλοκο και πολύ δύσκολο στην αναγνώρισή του φαινόμενο. Η έλλειψη ενός καθολικά αναγνωρισμένου ορισμού, όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής, δυσχεραίνει ακόμη περισσότερο την προσέγγισή της. Ωστόσο, όλοι οι ορισμοί που έχουν κατά καιρούς διατυπωθεί συγκλίνουν σε τρεις βασικές προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί μια κατάσταση ως γεγονός ξηρασίας. Πρέπει να παρατηρηθεί «κρίσιμη ελάττωση» της διαθεσιμότητας νερού σε σχέση με τις φυσιολογικές τιμές για «συγκεκριμένη χρονική περίοδο» και σε «μεγάλη γεωγραφική έκταση». Ο ορισμός που προτάθηκε από τους Beran and Rodier (1985) και που δηλώνει ότι ξηρασία είναι η «ελάττωση της διαθεσιμότητας νερού σε συγκεκριμένη περιοχή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου», φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα σε μια γενική προσέγγιση του φαινομένου της ξηρασίας. Από την προσέγγιση αυτή γίνεται σαφές ότι για την ανάλυση συχνότητας των φαινομένων ξηρασίας απαιτείται η μελέτη και μοντελοποίηση τριών διαστάσεων: της έντασης, της διάρκειας και της χωρικής έκτασης.

Για την κατανόηση των διαστάσεων της ξηρασίας, στα Σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη δύο επεισοδίων ξηρασίας, του  $i$  και του  $i+1$ . Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της έντασης της ξηρασίας κάθε επεισοδίου σε σχέση με το χρόνο. Όπως φαίνεται, η ένταση (της μεταβλητής που επιλέγεται για την εκτίμηση της ξηρασίας) είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό συνεχές μέγεθος που ισχύει στα διαστήματα των ξηρασιών  $D_i$  και  $D_{i+1}$ . Η ένταση

διακρίνεται για τη μεγάλη μεταβολή της σε σχέση με το χρόνο. Ως χαρακτηριστικά μεγέθη (όχι πάντα τελείως ανεξάρτητα μεταξύ τους) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μεγέθη  $I_t$  (ένταση ξηρασίας το χρόνο  $t$ ),  $TD_i$  (συνολικό έλλειμμα του γεγονότος ξηρασίας  $i$ ),  $I_t^{max}$  (μέγιστη ένταση της ξηρασίας κατά τη διάρκεια του επεισοδίου ξηρασίας  $i$ ) και  $I_t^{mean}$  (μέση ένταση της ξηρασίας κατά το επεισόδιο ξηρασίας  $i$ ).



Σχήμα 4.1. Η χρονική εξέλιξη της έντασης της ξηρασίας δύο επεισοδίων  $i$  και  $i+1$



Σχήμα 4.2. Η χρονική εξέλιξη της έντασης της ξηρασίας δύο επεισοδίων  $i$  και  $i+1$

Το συνολικό έλλειμμα του γεγονότος ξηρασίας  $i$  δίνεται από τη σχέση:

$$TD_i = \int_{t_{0,i}}^{t_{f,i}} I_t dt \quad (4.1)$$

Από το Σχήμα 4.1 ως προς το χρόνο και τη χρονική διάρκεια της ξηρασίας μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής ποσότητες:

- $t_{oi}$  χρόνος έναρξης του γεγονότος ξηρασίας  $i$
- $t_{fi}$  χρόνος λήξης του γεγονότος ξηρασίας  $i$
- $D_i$  χρονική διάρκεια του γεγονότος ξηρασίας  $i$   
(Προφανώς  $D_i = t_{fi} - t_{oi}$ )

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η μέση ένταση ενός γεγονότος ξηρασίας  $i$  υπολογίζεται ως το συνολικό έλλειμμα ξηρασίας του γεγονότος  $i$  προς τη χρονική διάρκεια του γεγονότος ξηρασίας  $i$ . Δηλαδή:

$$I_i^{mean} = \frac{TD_i}{D_i} \quad (4.2)$$

Η χρονική εξέλιξη της χωρικής έκτασης της ξηρασίας δύο γεγονότων ξηρασίας  $i$  και  $i+1$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Όπως είναι φανερό και εδώ πρόκειται για μια συνεχή μεταβλητή (όχι μεγάλης μεταβλητότητας όπως η ένταση) που τα χαρακτηριστικά της είναι αντίστοιχα όπως και για την ένταση:

- $A_t$  η χωρική έκταση κατά το χρόνο  $t$
- $A_i^{max}$  η μέγιστη χωρική έκταση του επεισοδίου ξηρασίας  $i$
- $A_i^{mean}$  η μέση χωρική έκταση ξηρασίας του επεισοδίου  $i$

Προφανώς

$$A_i^{mean} = \frac{\int_{t_{oi}}^{t_{fi}} A_t dt}{D_i} \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση μιας θεωρητικής (επιστημονικής) προσέγγισης του φαινομένου, τα τρία αυτά χαρακτηριστικά είναι εφικτό να προσδιορισθούν. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα που εισάγουν μπορεί να αποδειχθεί σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας τόσο στη λήψη αποφάσεων, όσο και στη σύνδεση του φαινομένου με τις επιπτώσεις του, κυρίως από τους κοινωνικούς εταίρους και όλους όσους πλήττονται τελικά από την εμφάνιση ενός γεγονότος ξηρασίας. Στο επίπεδο μάλιστα των υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων (π.χ. διαχειριστών σε θέματα υδατικών πόρων, κέντρων αντιμετώπισης κρίσεων κλπ.), η υιοθέτηση μοντέλων τριών διαστάσεων για την ανάλυση συχνότητας εμφάνισης της ξηρασίας και την εκτίμηση των συνεπειών της θα δημιουργούσε μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, ακατάλληλη για τη λήψη διαχειριστικών αποφάσεων και μάλιστα σε συνθήκες κρίσης που δημιουργούνται από ένα ακραίο γεγονός ξηρασίας. Ένα πιο άμεσο «μέτρο» της ξηρασίας θα μπορούσε να βοηθήσει τόσο στην πιο

αποδοτική σύνταξη των Σχεδίων Αντιμετώπισης της Ξηρασίας κατά τη φάση του σχεδιασμού, όσο και στην άμεση αντίδραση και εφαρμογή των κατάλληλων κάθε φορά μέτρων ανακούφισης από την ξηρασία κατά την επιχειρησιακή φάση. Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας (επιχειρησιακή φάση) οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται με ταχύτητα, σταθερότητα αλλά και διαφάνεια, ώστε να πείθουν τους πληττόμενους ότι είναι οι σωστές αλλά και οι κατάλληλες για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

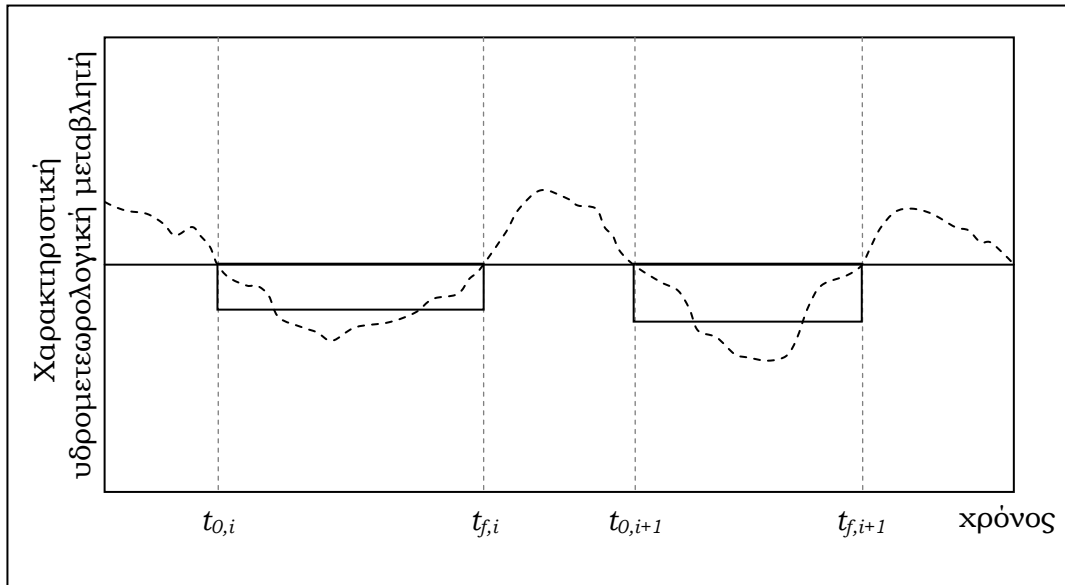
Σε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί μια πρακτική μεθοδολογία προς χρήση από τους υπεύθυνους διαχείρισης κρίσεων (καταστροφικών φαινομένων) και λήψης αποφάσεων, θα μπορούσε να προταθεί η αντικατάσταση των τριών διαστάσεων από μια μοναδική διάσταση. Για να επιτευχθεί μια τέτοια απλοποίηση, θα πρέπει να αντικατασταθούν η ένταση, η διάρκεια και η χωρική έκταση από μια μοναδική παράμετρο, επιτυχάνοντας έτσι τη μονοδιάστατη μελέτη και ανάλυση συχνότητας εμφάνισης της ξηρασίας. Εναλλακτικά, ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί με την αντικατάσταση δύο διαστάσεων από σταθερές ποσότητες ώστε να μην συμβάλουν στο τελικό «μέτρο» της ξηρασίας, το οποίο θα καθορίζεται μόνο από την εναπομένουσα τρίτη διάσταση.

Όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια, η πιο κατάλληλη επιλογή μοναδικής διάστασης είναι η ένταση της ξηρασίας, που μπορεί να «μετρηθεί» με τη χρήση δεικτών ξηρασίας. Οι δείκτες ξηρασίας είναι πολύτιμοι για σχεδιαστικούς και διαχειριστικούς σκοπούς καθώς παρέχουν μια μέτρηση της αρνητικής απόκλισης από τις φυσιολογικές συνθήκες της διαθεσιμότητας σε νερό. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου δείκτη για την υποστήριξη της προτεινόμενης απλοποιητικής διαδικασίας αποτελεί σημαντικό θέμα προς διερεύνηση. Υιοθετώντας μια μόνη διάσταση και έναν μόνο δείκτη έντασης ξηρασίας, δημιουργείται σταθερό έδαφος για διαφανείς αποφάσεις από τις συνεργαζόμενους ομάδες αντίδρασης σε ένα γεγονός ξηρασίας, που περιλαμβάνουν τις αρχές, τους κοινωνικούς εταίρους και το ευρύ κοινό.

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει ένα κατανοητό πλαίσιο για την υιοθέτηση μιας μονοδιάστατης προσέγγισης για την ανάλυση και την αποτίμηση των επεισοδίων ξηρασίας. Πριν όμως παρουσιασθεί αυτή η μεθοδολογία είναι σκόπιμο να απλοποιηθεί η λεπτομερειακή περιγραφή των γεγονότων ξηρασίας με τον τρόπο που περιγράφεται στο Σχήμα 4.3.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μέση ένταση της ξηρασίας για κάθε γεγονός ξηρασίας που αποτελεί μια απλοποιημένη παρουσίαση κάθε γεγονότος ξηρασίας. Συνεπώς αντί του μεταβαλλόμενου μεγέθους της έντασης, κάθε γεγονός ξηρασίας αντιπροσωπεύεται με τη μέση του έντασης που ισχύει για όλη τη διάρκεια του κάθε γεγονότος.





Σχήμα 4.3. Απλοποιημένη παράσταση των γεγονότων ξηρασίας (με μέση ένταση)

Αντίστοιχη απλοποίηση θα μπορούσε να γίνει σε σχέση με τη χωρική έκταση της ξηρασίας παίρνοντας τη μέση (ή τη μέγιστη) έκταση ως αντιπροσωπευτικό χωρικό μέγεθος του γεγονότος της ξηρασίας.

## 4.2 Η μεθοδολογία: Από τις τρεις στη μία διάσταση

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η προσπάθεια αντικατάστασης της διάρκειας, της χωρικής έκτασης και της έντασης ενός επεισοδίου ξηρασίας από μια μοναδική ενδεικτική παράμετρο, ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση της ξηρασίας ως μονοδιάστατο φαινόμενο. Οι προτεινόμενες προσαρμογές περιγράφονται για κάθε διάσταση ξεχωριστά.

### 4.2.1 Διάρκεια

Η διάρκεια ενός γεγονότος ξηρασίας  $i$  μετριέται συνήθως σε ημέρες ή μήνες από την εμφάνιση ( $t_{0,i}$ ) ως τη λήξη του ( $t_{f,i}$ ). Η εμπειρία έχει δείξει ότι ούτε η έναρξη αλλά ούτε και το τέλος μιας ξηρασίας μπορούν με ακρίβεια να προσδιορισθούν. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ένας μήνας είναι ξηρός (διαθεσιμότητα νερού κάτω του μέσου όρου) και ο επόμενος μήνας είναι υγρός (διαθεσιμότητα νερού πάνω από το μέσο όρο), οπότε στην πράξη δεν μπορεί να εκτιμηθεί κάποια ενιαία διάρκεια. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, η διάρκεια δεν θεωρείται ευθέως ως προσδιοριστικός παράγοντας της ξηρασίας. Αντιθέτως, προτείνεται μια προκαθορισμένη περίοδος, η «περίοδος αναφοράς», στην οποία αναφέρονται οι τιμές των μετεωρολογικών και/ή των

υδρολογικών μεταβλητών. Συνεπώς, εφόσον η έναρξη του υδρολογικού έτους είναι καθορισμένη (π.χ. 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου για την περιοχή της Μεσογείου), η 3-μηνη, 6-μηνη, 9-μηνη και 12-μηνη περίοδος μπορούν να επιλεγούν για την εκτίμηση των συνθηκών που επικρατούν και τον χαρακτηρισμό κάθε μιας από τις προαναφερθείσες περιόδους. Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης αυτών των περιόδων αναφοράς (που όλες αρχίζουν από την ίδια χρονική αφετηρία) είναι ότι η παρακολούθηση της ξηρασίας έχει μια σταθερή δεδομένη χρονική αναφορά, με αποτέλεσμα η σύγκριση των συνθηκών ξηρασίας μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών να διευκολύνεται σε υψηλό βαθμό.

Επιπρόσθετα, οι επιλεγμένες αθροιστικές περίοδοι διευκολύνουν την ανάλυση της ξηρασίας αποφεύγοντας την ξεχωριστή για κάθε χρονικό βήμα (μηνιαία ή τριμηνιαία περίοδος) εκτίμηση της ξηρασίας και στη συνέχεια την άθροιση για τη μεγαλύτερης διάρκειας χρονική περίοδο.

#### 4.2.2 Χωρική έκταση

Η δεύτερη διάσταση η οποία προτείνεται να αντικατασταθεί είναι η χωρική έκταση της ξηρασίας. Ο συμβατικός τρόπος συλλογής πληροφορίας για τις μετεωρολογικές παραμέτρους είναι μέσω μετεωρολογικών σταθμών. Οι σταθμοί αυτοί μπορούν να θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικοί για μια περιοχή επιρροής, όπως για παράδειγμα ορίζεται από τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen ή άλλη αντίστοιχη δόκιμη μέθοδο. Σύμφωνα με τον συμβατικό τρόπο εκτίμησης της έκτασης της ξηρασίας, οι περιοχές που επηρεάζονται από την ξηρασία αθροίζονται και το ποσοστό της έκτασης των περιοχών που έχουν επηρεαστεί σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν της υπό μελέτη περιοχής συγκρίνεται με το ποσοστό «κρίσιμης έκτασης». Η ξηρασία θεωρείται σημαντική όταν το ποσοστό της περιοχής που επηρεάζεται είναι μεγαλύτερο από το προκαθορισμένο ποσοστό για την κρίσιμη έκταση (Hisdal et al., 2006; Paulo et al., 2002; Tsakiris et al., 2007a).

Η προαναφερθείσα διαδικασία, αν και μπορεί να προσφέρει λεπτομερή πληροφορία για τη χωρική έκταση της ξηρασίας, παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτα μειονεκτήματα κυρίως όσον αφορά στη λήψη αποφάσεων:

- i. Το κρίσιμο ποσοστό έκτασης είναι αυθαίρετο, στερώντας από τα κέντρα λήψης αποφάσεων τη δυνατότητα μια ορθολογικής διαδικασίας προσδιορισμού του.
- ii. Το κρίσιμο ποσοστό έκτασης παραβλέπει τις φυσικές διαδικασίες όπως η διαδικασία βροχόπτωσης-απορροής, η οποία πραγματοποιείται μέσα σε κάθε λεκάνη απορροής ποταμού.
- iii. Η παραπάνω προσέγγιση δεν αναφέρεται στη διαχειριστική ενότητα, η

οποία είναι η λεκάνη απορροής ενός ποταμού. Όπως είναι γνωστό, η λεκάνη απορροής ενός ποταμού (ή ο συνδυασμός γειτονικών μικρών λεκανών απορροής) είναι η χωρική ενότητα (μονάδα) στην οποία οι διαχειριστικές αποφάσεις που συνδέονται με τους υδατικούς πόρους θα πρέπει να λαμβάνονται, σύμφωνα με την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τους υδατικούς πόρους.

Για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα αυτά, προτείνεται η ακόλουθη απλοποιημένη διαδικασία για την αντικατάσταση της χωρικής έκτασης της ξηρασίας από την έκταση της λεκάνης απορροής:

- α) Τα μετεωρολογικά δεδομένα μεταφέρονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στο επίπεδο της λεκάνης απορροής λαμβάνοντας υπόψη την περιοχική επιρροή του κάθε μετεωρολογικού σταθμού στη συνολική περιοχή.
- β) Γίνεται διόρθωση λόγω διαφοράς υψόμετρου, ώστε ο χωρικός μέσος όρος να αντιπροσωπεύει το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής.
- γ) Ο επιλεγμένος δείκτης έντασης ξηρασίας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν μεταφερθεί στο επίπεδο της λεκάνης απορροής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του επιλεγμένου δείκτη ξηρασίας σε κάθε μετεωρολογικό σταθμό και η μετέπειτα μεταφορά του στο μέσο επίπεδο της λεκάνης πρέπει να αποφεύγεται εξαιτίας της μη γραμμικότητας των συγκεκριμένων διαδικασιών.

#### 4.2.3 Δείκτης έντασης ξηρασίας

Είναι σύνηθες για το χαρακτηρισμό της ξηρασίας να χρησιμοποιούνται δείκτες έντασης της ξηρασίας, οι οποίοι είναι ειδικοί συνδυασμοί μετεωρολογικών, υδρολογικών και άλλων ενδείξεων. Οι δείκτες ξηρασίας μπορούν να απεικονίσουν τις ιστορικές ξηρασίες και επομένως να θέσουν τις τρέχουσες συνθήκες υπό ιστορική προοπτική.

Μεταξύ των διαφόρων δεικτών ξηρασίας, οι πιο δημοφιλείς είναι αυτοί του γενικού μετεωρολογικού τύπου. Πλήθος δεικτών έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Ο Palmer Drought Severity Index (PDSI; [Palmer, 1965](#)), που βασίζεται σε ένα απλοποιημένο μοντέλο ισοζυγίου εδάφους-νερού, καθώς και ο Standardized Precipitation Index (SPI; [McKee et al., 1993](#)), ο οποίος στηρίζεται στις κατακρημνίσεις, είναι οι πιο εκτεταμένα χρησιμοποιούμενοι δείκτες διεθνώς. Ο Reconnaissance Drought Index (RDI), που παρουσιάζεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της διατριβής,

είναι ένας νέος, πολλά υποσχόμενος δείκτης έντασης ξηρασίας, παρόμοιας φύσης με τον SPI, ο οποίος έχει προταθεί και χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε αρκετές χώρες της Μεσογείου (Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007b). Ο RDI βασίζεται στο λόγο της τιμής των αθροιστικών κατακρημνίσεων προς την τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε μια χρονική περίοδο. Χρησιμοποιούνται τρεις εκφράσεις τους RDI: η αρχική, η κανονικοποιημένη και η τυποποιημένη. Η τελευταία χρησιμοποιεί παρόμοιους κανόνες και κατώφλια με τον SPI. Λεπτομερείς περιγραφές των περισσότερων δεικτών ξηρασίας παρουσιάζονται σε αναλυτικές ανασκοπήσεις πάνω στο θέμα (αλλά και στο δεύτερο κεφάλαιο της συγκεκριμένης διατριβής), ενώ έχουν αναπτυχθεί και ειδικά λογισμικά (π.χ. DrinC) για τον υπολογισμό τους (Tsakiris and Pangalou, 2009; Tsakiris et al., 2007a).

Η προαναφερθείσα μεθοδολογία απλοποίησης είναι πιο αποδοτική, αν επιλεγεί ένας δείκτης ξηρασίας αθροιστικού τύπου, όπως δηλαδή ο Reconnaissance Drought Index (RDI). Η υιοθέτηση μάλιστα του τυποποιημένου RDI μπορεί απευθείας να ερμηνευτεί και με όρους «περιόδου επαναφοράς», η οποία είναι δημοφιλής έννοια για τους μηχανικούς και τις διαχειριστικές αρχές από την διαχείριση των πλημμυρών. Επομένως, αν υιοθετηθούν οι περίοδοι αναφοράς 3, 6, 9 και 12 μηνών (που έχουν προαναφερθεί), για τις Μεσογειακές περιοχές μπορούμε να υπολογίσουμε τους  $RDI_3$  (Οκτώβριος - Δεκέμβριος),  $RDI_6$  (Οκτώβριος - Μάρτιος),  $RDI_9$  (Οκτώβριος - Ιούνιος) και  $RDI_{12}$  (Οκτώβριος - Σεπτέμβριος). Δεν πρέπει να λησμονείται ότι η αρχική τιμή του  $RDI_{12}$  μπορεί να συγκρίνεται απευθείας με τον Δείκτη Ξηρότητας (Aridity Index, AI) του FAO για την περιοχή, ο οποίος χαρακτηρίζει το κλίμα της υπό μελέτη περιοχής.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις περιόδους αναφοράς, ιστορικά δεδομένα ξηρασιών μπορούν να καταγραφούν και πιθανές τάσεις μπορούν να εξεταστούν. Επίσης, επιλέγοντας έναν δείκτη ξηρασίας που βασίζεται σε αθροιστικές τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων, στην πράξη ξεπερνιέται το μειονέκτημα της ανάγκης χρήσης πιθανοτήτων μετάβασης (transition probabilities) από μια περίοδο στην επόμενη, όπως στις διαδικασίες που ακολουθούνται σε τέτοιου είδους προσεγγίσεις.

Σχετικά με την παρακολούθηση της ξηρασίας, αν στο πρώτο τρίμηνο η τιμή του τυποποιημένου RDI ( $RDI_{st}$ ) είναι αρνητική, τότε πρέπει να ακολουθηθεί μια πιο συστηματική παρακολούθηση της ξηρασίας σε μηνιαία βάση. Τότε ο  $RDI_{st}$  θα υπολογιστεί για περιόδους αναφοράς που ξεκινούν από τρεις μήνες έως δώδεκα μήνες με βήμα αύξησης της περιόδου τον ένα μήνα (π.χ. 3, 4, 5 μήνες κλπ.).

Ακολουθώντας τις παραπάνω απλοποιήσεις και επιλέγοντας έναν μοναδικό δείκτη ξηρασίας, τα κέντρα λήψης αποφάσεων έχουν έναν μοναδικό τρόπο

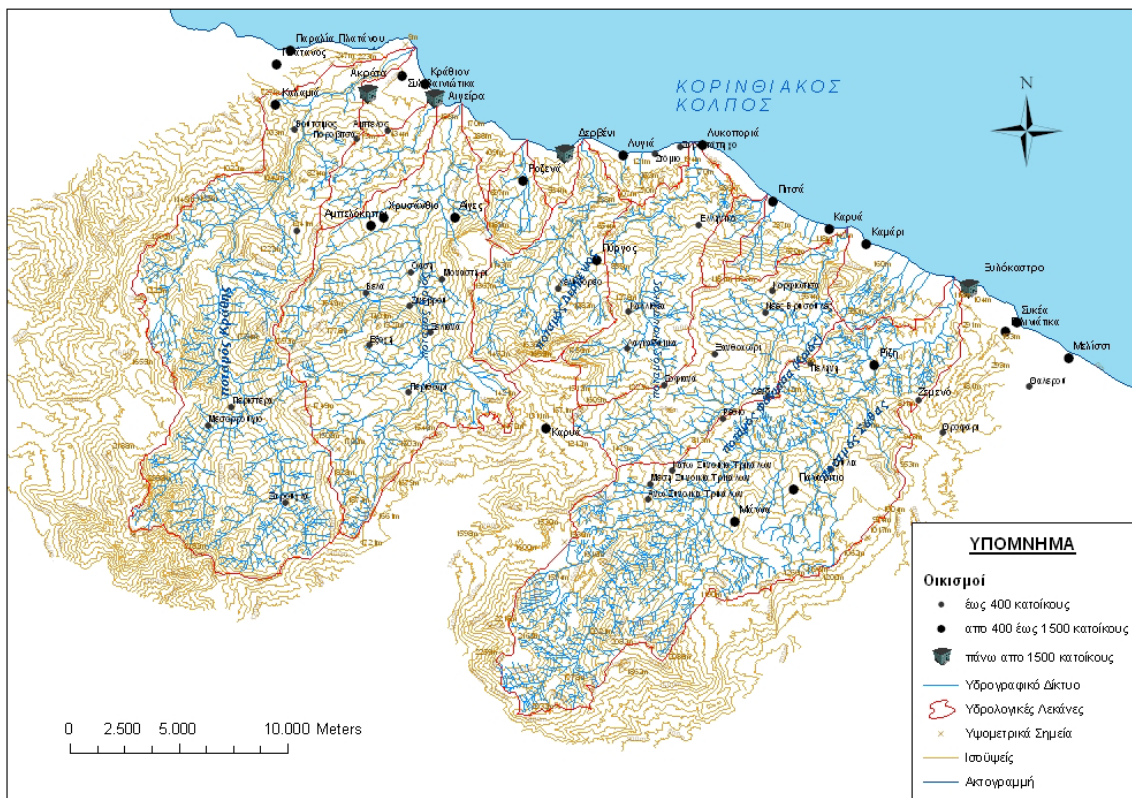
εκτίμησης της ξηρασίας, ο οποίος μπορεί να συσχετιστεί αποτελεσματικά με την απορροή ή τα αποθέματα νερού μέσα στη λεκάνη απορροής ενός ποταμού.

Η χρήση του SPI ως συμπληρωματικού δείκτη εξασφαλίζει ότι η διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχουν μόνο δεδομένα βροχόπτωσης. Παρόλα αυτά, ο SPI θα χρησιμοποιηθεί όχι ως «κυλιόμενος» δείκτης σταθερής διάρκειας, αλλά ως αντικαταστάτης του RDI αναφερόμενος στις επιλεγμένες περιόδους αναφοράς.

### 4.3 Εφαρμογές

#### 4.3.1 Συνδέοντας την μετεωρολογική με την υδρολογική ξηρασία

Η περίπτωση μικρών λεκανών στη βόρεια Πελοπόννησο μελετήθηκε για την εκτίμηση των επιπτώσεων της ξηρασίας και σεναρίων κλιματικών αλλαγών στην απορροή (Tsakiris et al., 2005). Οι λεκάνες απορροής που επιλέγονται για τη χρήση της προαναφερθείσας διαδικασίας είναι αυτές των ποταμών Κράθη, Κριού και Σύθα. Οι θέσεις των λεκανών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4, ενώ ορισμένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

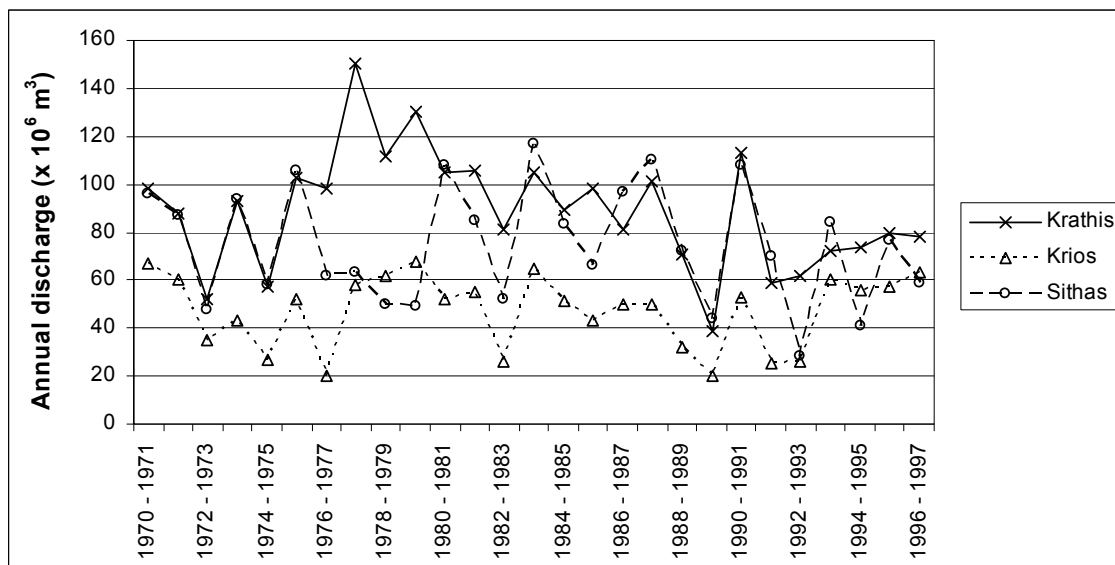


Σχήμα 4.4. Οι λεκάνες απορροής των ποταμών Κράθη, Κριού και Σύθα, στη Βόρεια Πελοπόννησο.

Πίνακας 4.1. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής των ποταμών.

Λεκάνη απορροής ποταμού	Έκταση A (km <sup>2</sup> )	Περίμετρος P (km)	Μέσο υψόμετρο H (m asl)	Μήκος ποταμού L (km)	Πυκνότητα υδατορευμάτων D (km/km <sup>2</sup> )
Κράθης	1453.0	74.9	+1105.5	33.0	2.31
Κριός	112.7	55.9	+1015.0	23.5	1.89
Σύθας	164.3	72.5	+ 960.8	35.5	2.90

Για την εφαρμογή αξιοποιήθηκαν δεδομένα απορροών, που έχουν υπολογιστεί με την εφαρμογή μοντέλων τα οποία βαθμονομήθηκαν με χρονοσειρές μετρήσεων πεδίου. Δυο απλά εννοιολογικά μοντέλα, το Medbasin (ημερήσιου βήματος; [Tigkas and Tsakiris, 2004](#)) και το SWBM (μηνιαίου βήματος; [Giakoumakis et al., 1991](#)) θεωρήθηκαν κατάλληλα και σε συμφωνία μεταξύ τους αλλά και με τα διαθέσιμα δεδομένα. Τα ετήσια δεδομένα απορροών παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6 για τους τρεις ποταμούς με τη χρήση ετήσιων χρονοσειρών και των διαγραμμάτων Box-and-Whisker.

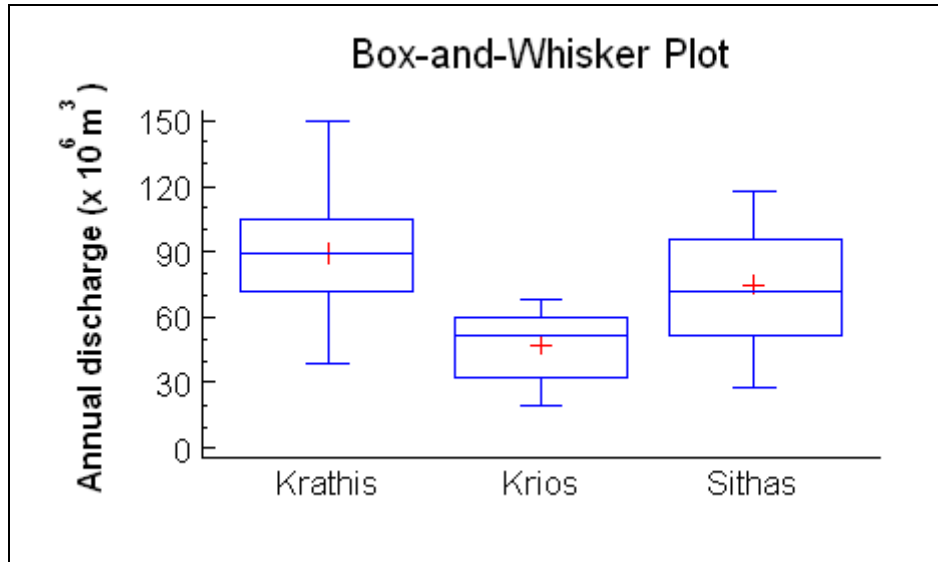


Σχήμα 4.5. Χρονοσειρά δεδομένων ετήσιων απορροών (1970/71-1996/97) για τους ποταμούς Κράθη, Κριό και Σύθα.

Ως περίοδος αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας RDI θεωρήθηκε ολόκληρος ο υδρολογικός κύκλος (Οκτώβριος-Σεπτέμβριος). Στον Πίνακα 4.2, η μείωση του ετήσιου όγκου απορροής υπολογίζεται με τη χρήση των μοντέλων Medbasin και SWBM, με βάση έναν αριθμό σεναρίων μείωσης της βροχόπτωσης και αύξησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, που επίσης αντιπροσωπεύονται από τον ετήσιο τυποποιημένο RDI<sub>12</sub>.

Πρέπει να γίνει ξεκάθαρο ότι ο RDI<sub>12</sub> υπολογίζεται με τη χρήση δεδομένων

μέσης τιμής για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του κάθε ποταμού. Η βροχόπτωση και η θερμοκρασία από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής μεταφέρθηκε στην κλίμακα της λεκάνης απορροής με τη χρήση της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen ακολουθούμενη από διόρθωση λόγω διαφοράς υψομέτρου, όπως προτείνεται και από τη μεθοδολογία απλοποίησης.



Σχήμα 4.6. Διαγράμματα Box-and-Wisker για τα δεδομένα απορροών των ποταμών Κράθη, Κριού και Σύθα.

Ο Πίνακας 4.2 επομένως παρουσιάζει μια μονοδιάστατη εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας, που αντιστοιχεί στην ετήσια περίοδο αναφοράς (αντί της διάρκειας) και σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του κάθε ποταμού (αντί της χωρικής έκτασης).

Όπως αναμένονταν, διαπιστώθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του  $RDI_{12}$  και του ποσοστού της μείωσης του όγκου απορροής για κάθε λεκάνη απορροής ποταμού. Καθώς η μείωση του όγκου της απορροής είναι αδιάστατη και οι κλιματικές συνθήκες παρόμοιες για όλες τις λεκάνες απορροής (αφού ανήκουν στην ίδια γεωγραφική περιοχή), μια μοναδική ευθεία γραμμικής συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συσχέτιση του  $RDI_{12}$  και της ετήσιας ελάττωσης της απορροής  $\Delta Q/Q$ :

$$\frac{\Delta Q}{Q} \cdot 100 = -17.355 \cdot RDI_{12} \quad (RDI_{12} < 0) \quad (4.4)$$

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι 0.962 που υποδηλώνει μια εξαιρετικά υψηλή συσχέτιση, με δεδομένο βέβαια ότι όλα τα στοιχεία του όγκου της ετήσιας απορροής έχουν προέλθει από υπολογιστική διαδικασία με χρήση μοντέλων.

Πίνακας 4.2. Ετήσια ελάττωση της απορροής σχετιζόμενη με τις αλλαγές των μετεωρολογικών παραμέτρων και του ετήσιου σταθεροποιημένου RDI.

Λεκάνη απορροής ποταμού	Μείωση βροχόπτωσης (%)	Αύξηση ΡΕΤ (%)	RDI <sub>12</sub>	Μείωση του όγκου απορροής (%)
Κράθης	6.0	4.0	-0.41	8.8
	14.0	6.0	-1.00	19.5
	20.0	10.0	-1.59	27.8
	26.0	14.0	-2.21	36.0
	36.0	18.0	-3.18	48.8
Κριός	6.0	4.0	-0.44	9.5
	14.0	8.0	-1.05	21.2
	20.0	12.0	-1.57	29.8
	26.0	16.0	-2.11	38.3
	38.0	22.0	-3.19	55.1
Σύθας	8.0	6.0	-0.51	11.9
	16.0	8.0	-1.08	23.4
	20.0	12.0	-1.53	29.7
	26.0	16.0	-2.11	38.3
	38.0	20.0	-3.21	54.7

Αν και αυτή η σχέση προέρχεται από δεδομένα των τριών προαναφερθέντων ποταμών, μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία και σε αρκετές άλλες λεκάνες απορροής της Βόρειας Πελοποννήσου. Σε κάθε περίπτωση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γενική περίπτωση ή σε άλλες περιοχές με διαφορετικές κλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες.

Πρακτικά, για την υπό μελέτη περιοχή η χρήση της παραπάνω εξίσωσης παλινδρόμησης σημαίνει πως για ξηρασίες στις οποίες  $-1.00 > \text{RDI} > -1.50$ , η ετήσια μείωση του όγκου της απορροής είναι μεταξύ 17.4% και 26%, ενώ για πιο σφοδρή ξηρασία,  $-1.50 > \text{RDI} > -2.00$ , η μείωση του όγκου της απορροής μπορεί να φτάσει και το 34.7%. Αυτοί οι αριθμοί μπορούν να ενισχύσουν τους υπεύθυνους για τη διαχείριση των υδατικών πόρων να λάβουν τις κατάλληλες δράσεις στην περίπτωση που υπάρχει ένδειξη για επερχόμενη ξηρασία. Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιηθεί η ίδια λογική και να προβλεφθούν συνθήκες ξηρασίας μετά από 3 ή 6 μήνες, ακόμη και από την έναρξη του υδρολογικού έτους.

#### 4.3.2 Εκτίμηση έντασης ξηρασίας για περιόδους αναφοράς 3, 6, 9 και 12 μηνών

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε επίσης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου. Όπως είναι γνωστό, η λεκάνη απορροής του



συγκεκριμένου ποταμού είναι πολύ σημαντική καθώς αποτελεί τον κύριο προμηθευτή πόσιμου νερού της ευρύτερης περιοχής του λεκανοπεδίου Αθηνών, περιοχή στην οποία ζουν περίπου τέσσερα εκατομμύρια άνθρωποι. Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόστηκε στην υπολεκάνη απορροής του ποταμού που αντιστοιχεί στη θέση υπάρχοντος φράγματος, το οποίο κατασκευάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του '70.

Τα κύρια δεδομένα για την υπό μελέτη λεκάνη είναι τα ακόλουθα:

Εμβαδόν: 571 km<sup>2</sup>

Ανάγλυφο: Ορεινό

Μέσο υψόμετρο: 1020 m από τη στάθμη της θάλασσας

Γεωλογία: Φλύσχης και ασβεστόλιθοι

Μετεωρολογικοί σταθμοί: 8

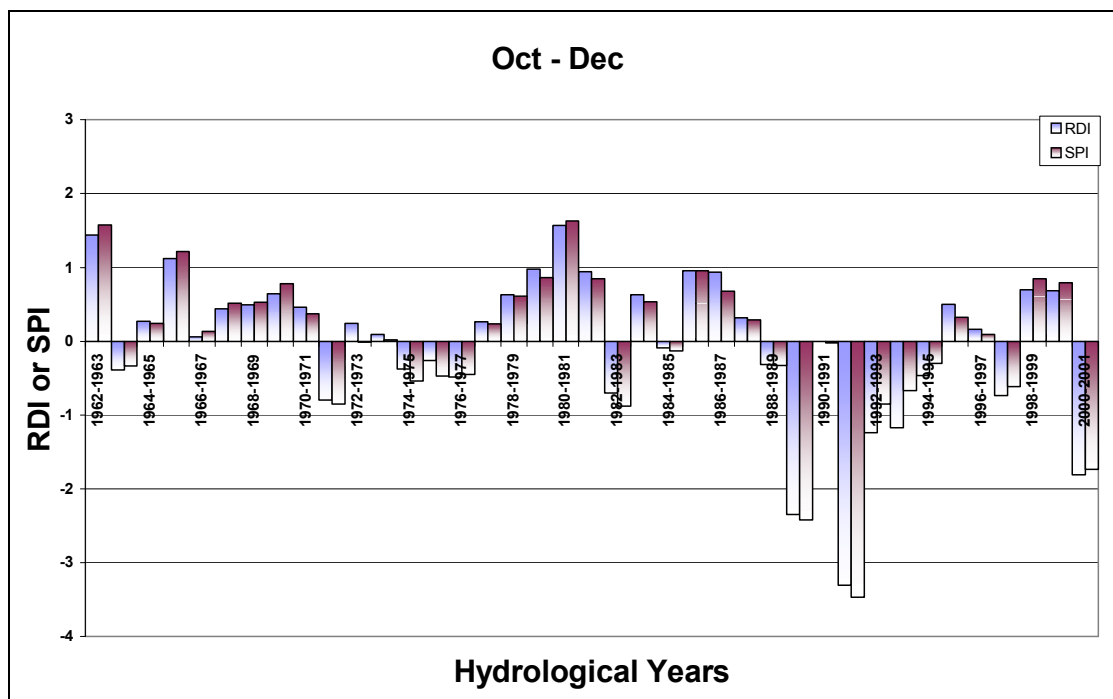
Διάρκεια λειτουργίας των σταθμών: > 40 έτη

Περίοδος ανάλυσης: 1962-2001

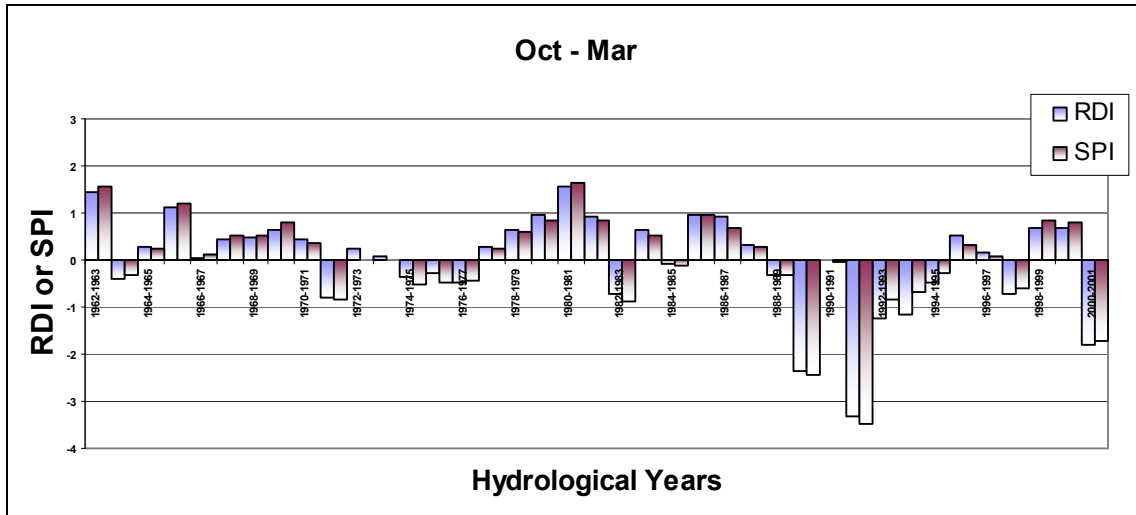
Μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη: 1140 mm

Μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή: 1238 mm.

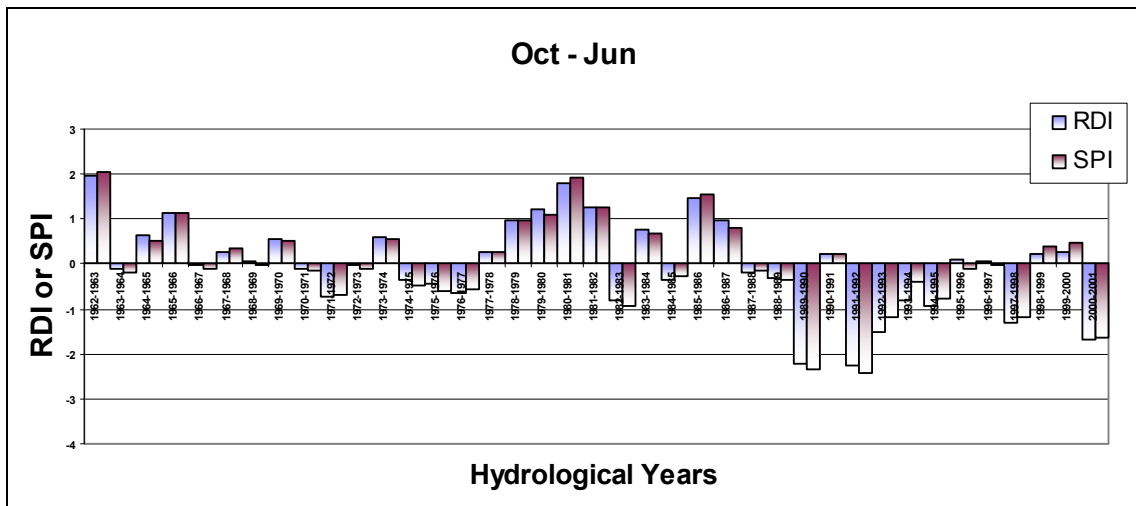
Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, τα μετεωρολογικά δεδομένα μεταφέρθηκαν στο επίπεδο της λεκάνης απορροής και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι RDI<sub>3</sub>, RDI<sub>6</sub>, RDI<sub>9</sub> και RDI<sub>12</sub> για την περίοδο 1982-2001. Οι τιμές του RDI<sub>st</sub> (και οι αντίστοιχες τιμές του SPI) παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7α-4.7δ (Tsakiris, 2008).



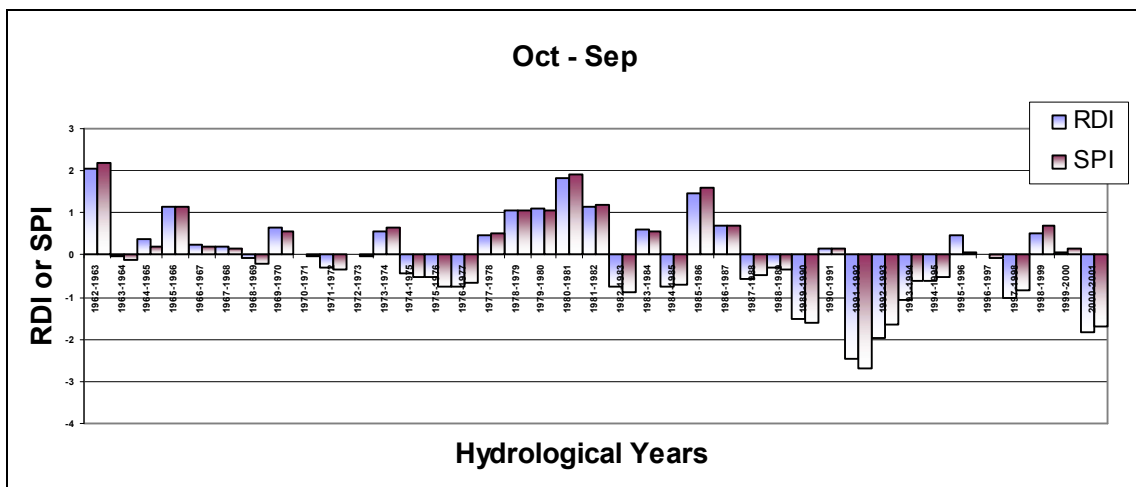
Σχήμα 4.7α. RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Δεκ κάθε έτους.



Σχήμα 4.7β. RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Μαρ κάθε έτους.



Σχήμα 4.7γ. RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Ιουν κάθε έτους.



Σχήμα 4.7δ. RDI και SPI για τη λεκάνη απορροής του Ποταμού Μόρνου (1982-2001) για περίοδο αναφοράς Οκτ-Σεπ κάθε έτους.

Οι τιμές του RDI παρουσιάζονται στα Σχήματα μαζί με τις τιμές του SPI για τις ίδιες περιόδους αναφοράς, για λόγους σύγκρισης. Όπως είναι φανερό, εκτός μικρών διαφοροποιήσεων οι δύο δείκτες συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως δυνατότητα χρήσης του SPI στην περίπτωση που ο RDI δεν είναι δυνατό να υπολογισθεί, όπως προαναφέρθηκε.

Ωστόσο, το πιο σημαντικό συμπέρασμα από τα Σχήματα 4.7 βρίσκεται στο γεγονός ότι υπάρχει μια πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν αυτά τα δεδομένα με σκοπό την πρόγνωση επερχόμενης ξηρασίας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δεικτών ξηρασίας για 3, 6, 9 και 12 μήνες, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η πρόγνωση της έντασης της ξηρασίας για το σύνολο του έτους μπορεί να γίνει αρκετά νωρίς (π.χ. μετά από 3 ή 6 μήνες από την έναρξη του υδρολογικού έτους).

#### 4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Η προτεινόμενη απλοποιημένη προσέγγιση για την εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας έχει προφανώς σημαντικά πλεονεκτήματα από την άποψη της πρακτικής εκτίμησης και λήψης αποφάσεων για την αντιμετώπιση της ξηρασίας. Από τις δύο εφαρμογές που παρουσιάστηκαν γίνεται φανερό ότι κατανοητά αποτελέσματα για την ξηρασία μπορούν να παραχθούν για ολόκληρες λεκάνες απορροής ποταμών (χωρική ολοκλήρωση) και για προαποφασισμένες περιόδους αναφοράς (χρονική ολοκλήρωση). Εντούτοις, υπάρχουν αρκετές υποθέσεις για τις οποίες απαιτούνται περαιτέρω διευκρινήσεις καθώς εισάγουν περιορισμούς στη γενική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Το γεγονός ότι η ανάλυση της ξηρασίας βασίζεται σε μεμονωμένα έτη δημιουργεί αμφιβολίες ως προς την ορθότητα και την αμεροληψία της εκτίμησης της ξηρασίας, αφού στα περισσότερα συστήματα τα ξηρά έτη έχουν πολύ σημαντικότερες επιπτώσεις όταν ακολουθούν κάποιο επίσης ξηρό έτος, από ότι όταν ακολουθούν ένα κανονικό ή υγρό έτος. Επίσης, μια παρατεταμένη επίμονη ξηρασία που διαρκεί για αρκετά χρόνια δεν μπορεί να εκτιμηθεί μέσα από την προτεινόμενη ετήσιας βάσης ανάλυση ξηρασίας. Η επίδραση της πολυετούς ξηρασίας μπορεί να μοντελοποιηθεί θεωρώντας μια αθροιστική ή πολλαπλασιαστική διαδικασία διαδοχικών επιπτώσεων (Tsakiris et al., 2009; Tsakiris et al., 2010). Μια προσέγγιση των επιπτώσεων της πολυετούς ξηρασίας παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Αν και ως ξηρασία θεωρείται η αρνητική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες διαθεσιμότητας νερού, είναι προφανές ότι οι «κανονικές» συνθήκες διαφέρουν από τόπο σε τόπο. Οι κανονικές συνθήκες συνήθως

αντιπροσωπεύονται από τον αριθμητικό μέσο όρο ή τον διάμεσο μιας αντιπροσωπευτικής μεταβλητής της διαθεσιμότητας νερού. Για λόγους σύγκρισης, το επίπεδο διάκρισης κάτω από το οποίο θεωρείται ότι συμβαίνει ένα γεγονός ξηρασίας, θα έπρεπε να είναι ένας αριθμός κατά προτίμηση ίδιος για κάθε περιοχή. Για μόνιμες (stationary) χρονοσειρές μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια καθορισμένη τιμή, ενώ για χρονοσειρές που παρουσιάζουν περιοδικότητα μια ομάδα εποχικά μεταβαλλόμενων τιμών διάκρισης φαίνεται καταλληλότερη. Παραδείγματα τέτοιου τύπου επιπέδων έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Για παράδειγμα, για την ετήσια χρονοσειρά βροχόπτωσης (P) και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET), θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το επίπεδο  $P/PET=0.200$ . Το επίπεδο αυτό είναι το όριο μεταξύ ύφυγων και ημίξηρων συνθηκών.

Ένα σημαντικό τελικό σημείο προς συζήτηση είναι η αντικατάσταση του RDI από τον SPI, στην περίπτωση της μη διαθεσιμότητας δεδομένων σε μεταβλητές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Όπως είναι φανερό από τα Σχήματα της δεύτερης εφαρμογής, μια μικρή απόκλιση μεταξύ RDI και SPI μπορεί να παρατηρηθεί. Ωστόσο, οι δύο δείκτες συμπεριφέρονται, στις περισσότερες από τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί, με παρόμοιο τρόπο. Στατιστικά μπορεί να αποδειχθεί μέσα από ένα μεγάλο αριθμό υπολογισμένων τιμών ότι ο RDI και ο SPI τουλάχιστον για τις ετήσιες τιμές, συνήθως δεν διαφέρουν σημαντικά. Αυτό σημαίνει ότι η ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) κατανέμεται με μικρότερο συντελεστή διακύμανσης σε σχέση με τις ετήσιες τιμές της βροχόπτωσης. Επομένως, στις ετήσιες χρονοσειρές η επιρροή της PET είναι σχετικά μικρή, υπό την προϋπόθεση ότι οι χρονοσειρές είναι μόνιμες. Για μικρότερες περιόδους ωστόσο, η αντικατάσταση του RDI από τον SPI θα πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών των δύο δεικτών μπορούν να παρατηρηθούν.

Τέλος, εξίσου σημαντικό είναι και το ερώτημα σχετικά με την κατηγοριοποίηση των γεγονότων ξηρασίας και των ορίων μεταξύ των διαφόρων επιπέδων ξηρασίας. Δύο σημεία πρέπει να αναφερθούν εδώ. Πρώτον, φαίνεται πως τα όρια των κλάσεων του RDI και του SPI δεν είναι απολύτως ανεξάρτητα από τη διάρκεια της ξηρασίας. Με άλλα λόγια υπάρχουν αμφιβολίες σχετικά με την ανεξαρτησία μεταξύ των ορίων των κατηγοριών ξηρασίας και της διάρκειας της ξηρασίας. Δεύτερον, η χρήση της έννοιας της «περιόδου επαναφοράς» ως ένδειξη της έντασης της ξηρασίας σε σχέση με τη χρήση σταθεροποιημένων μεταβλητών, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται από τον RDI ή τον SPI, μπορεί να θεωρηθεί πιο κατανοητή σε μηχανικούς και υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων. Οι περίοδοι επαναφοράς ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν,

αφού συνδέονται άμεσα με τον RDI ή τον SPI. Επίπεδα περιόδων επαναφοράς 5, 10 ή 20 χρόνων θα μπορούσαν ίσως να χρησιμοποιηθούν ως όρια για τη μέτρια, σημαντική και ακραία ξηρασία, αν και μια τέτοια επιλογή προϋποθέτει γνώση των συνθηκών μιας περιοχής και βαθύτερη μελέτη της σύνδεσης των επιπτώσεων ιστορικών ξηρασιών με τα επίπεδα έντασης των ξηρασιών αυτών.

#### 4.5 Σχολιασμός της μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία αντικατάστασης της ανάλυσης τριών διαστάσεων για την εκτίμηση γεγονότων ξηρασίας από μια μονοδιάστατη ανάλυση, μπορεί να υποστηρίξει τόσο τις αρχές όσο και τους ενδιαφερόμενους φορείς στη λήψη ορθολογικών αποφάσεων για την αντιμετώπιση της ξηρασίας.

Οι απλοποιητικές υποθέσεις που υιοθετούνται αφορούν στην αντικατάστασή της χωρικής και χρονικής διάστασης από σταθερές, οι οποίες είναι η λεκάνη απορροής και η περίοδος αναφοράς αντίστοιχα. Για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάστασης, της έντασης της ξηρασίας, χρησιμοποιείται ο δείκτης ξηρασίας Reconnaissance Drought Index (RDI). Ο Standardized Precipitation Index (SPI) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που είναι αδύνατος ο υπολογισμός του RDI.

Χρησιμοποιώντας τη μονοδιάστατη προσέγγιση, εξασφαλίζεται ένας πιο αποδοτικός τρόπος για την εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας. Η προτεινόμενη απλοποιητική μέθοδος διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ υπευθύνων λήψης αποφάσεων και διαχείρισης υδατικών πόρων και όλων όσων πλήττονται ή παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την αντιμετώπιση της ξηρασίας με ορθολογικό τρόπο.

#### 4.6 Αναφορές κεφαλαίου

Beran M.A. and Rodier J.A., 1985. Hydrological Aspects of Drought. Studies and Reports in Hydrology 39, Unesco-WMO, ISBN: 92-3-102288-1, France, 151 p.

Giakoumakis S., Tsakiris G. and Efremides D., 1991. On the rainfall-runoff modelling in a mediterranean region environment. Proceedings of the Conference "Advances in Water Resources Technology", Tsakiris G. (Ed.), A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, pp.137-148.

Hisdal H., Tallaksen L.M., Clausen B., Peters E. and Gustard A., 2006. Hydrological Drought Characteristics. In: L.M. Tallaksen and H.A.J. van Lanen (Eds.), Hydrological drought: processes and estimation methods for

- streamflow and groundwater, Elsevier (Developments in Water Science 48), The Netherlands, ISBN: 978-0-444-51688-6, pp. 139-198.
- McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim (CA), 17-22 January 1993, AMS, pp. 179-184.
- Palmer W.C., 1965. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper No. 45, Washington D.C., 58 p.
- Paulo A.A., Pereira L.S. and Matias, P.G., 2002. Analysis of the regional droughts in southern Portugal using the theory of runs and the Standardised Precipitation Index. Proceedings of the International Conference of ICID and UNESCO "Drought Mitigation and Prevention of Land Desertification", Bled, Slovenia, 21 – 24 April 2002, Slovenian National Committee on Irrigation and Drainage, Ljubljana, CD-ROM paper 64.
- Tigkas D. and Tsakiris G., 2004. Medbasin: A Mediterranean rainfall – runoff software package. *European Water*, 5/6: 3-11.
- Tsakiris G. and Pangalou D., 2009. Drought Characterisation in the Mediterranean. In: A. Iglesias, L. Garrote, A. Cancelliere, F. Cubillo and D. Wilhite (Eds.), Coping with drought risk in Agriculture and Water Supply Systems, Drought Management and Policy Development in the Mediterranean, Springer (Advances in Natural and Technological Hazards Research, Volume 26), Springer Science+Business Media B.V. 2009, ISBN: 978-1-4020-9044-8, pp.69-80.
- Tsakiris G. and Vangelis H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10: 3-11.
- Tsakiris G., 2008. Uni-dimensional Analysis of Droughts for Management Decisions. *European Water*, 23/24: 3-11.
- Tsakiris G., Pangalou D. and Vangelis H., 2007b. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5): 821-833.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H. and Sioras P., 2005. Surface water potential and impacts from climate instability and change. In: H. Vangelis and D. Tigkas (Eds.), Assessment of Hazards in Corinthian Gulf, CANAH Publication 2/06, Athens 2005, pp. 1-27.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H., Pangalou D., 2007a. Regional Drought Identification and Assessment. Case Study in Crete. In: G. Rossi, T. Vega and B. Bonaccorso (Eds.), Methods and tools for drought analysis and management, Springer (Water Science and Technology Library, Volume 62), Dordrecht 2007, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-5923-0, pp. 169-191
- Tsakiris G., Vangelis H. and Tigkas D., 2009. Assessment of Water Systems Vulnerability to Drought. Proceedings of the Seventh International

Conference of EWRA “Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Uncertainty”, Limassol, 25-27 June 2009, Cyprus, pp. 333-340.

Tsakiris G., Vangelis H. and Tigkas D., 2010. Assessing Water System Vulnerability to Multi-year Droughts. *European Water*, 29: 21-29.





## κεφάλαιο 5

# Ο RDI στην παρακολούθηση της ξηρασίας

## 5.1 Γενικές αρχές (κύρια στάδια) της παρακολούθησης της ξηρασίας

Μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες στις οποίες οι δείκτες ξηρασίας έχουν εφαρμογή, είναι η παρακολούθηση της ξηρασίας. Η παρακολούθηση της ξηρασίας αποτελεί βασικό εργαλείο στη λήψη αποφάσεων καθώς είναι σε θέση να παρέχει την απαραίτητη πληροφορία τόσο σε επίπεδο ιστορικών χρονοσειρών, όσο και σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, μπορεί να δώσει και μια εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την εκτίμηση της κατάστασης μέχρι το τέλος του έτους, με βάση το πρώτο τρίμηνο ή εξάμηνο. Είναι προφανές ότι η πληροφορία αυτή είναι σημαντική για τις διαχειριστικές αρχές και τα κέντρα αντιμετώπισης επικινδυνών φαινομένων (αλλά και για όσους εμπλέκονται ή πλήττονται από την ξηρασία), αφού μπορεί τόσο να βοηθήσει στην καλύτερη σύνταξη των Σχεδίων Αντιμετώπισης της Ξηρασίας, όσο και στον καθορισμό των τιμών των κατωφλίων στα οποία θα ενεργοποιούνται τα προκαθορισμένα μέτρα αντιμετώπισης ή ανακούφισης των συνεπειών της ξηρασίας κατά την επιχειρησιακή φάση αντιμετώπισης της ξηρασίας.

Αν και ο στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου δεν είναι η πλήρης περιγραφή ενός συστήματος παρακολούθησης ξηρασίας, αλλά ο ρόλος του RDI σε ένα τέτοιο σύστημα, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή του συνόλου των διαδικασιών ενός συστήματος παρακολούθησης.

Η ανάπτυξη ενός Συστήματος Παρακολούθησης της Ξηρασίας (Drought Monitoring System) στηρίζεται σε μια σειρά συστατικών στοιχείων και

παραμέτρων που συνδέονται μεταξύ τους και λειτουργούν παράλληλα με σκοπό την απόδοση του επιθυμητού αποτελέσματος. Ένα σύστημα παρακολούθησης ακολουθεί τρία κύρια στάδια:

1. Επιλογή των απαραίτητων προς παρακολούθηση μετεωρολογικών δεδομένων και επομένως του δείκτη (ή των δεικτών) ξηρασίας που κρίνεται απαραίτητος για την παρακολούθηση. Η επιλογή αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον επιθυμητό στόχο.
2. Σχεδιασμός του δικτύου σταθμών παρακολούθησης σύμφωνα με τον επιλεγμένο δείκτη. Επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας σχεδιασμού και βελτιστοποίησης του δικτύου. Το δίκτυο αποτελεί στην ουσία, τον πυρήνα του Συστήματος Παρακολούθησης της Ξηρασίας. Εμπειρία από την αντιμετώπιση καταστάσεων ξηρασίας σε παλαιότερες εποχές ή άλλες είναι σημαντικό να ενσωματωθεί στα κριτήρια σχεδιασμού.
3. Συλλογή και αποθήκευση δεδομένων, καθώς και διατήρηση της διασύνδεσης μεταξύ των υπάρχοντων ή των προγραμματισμένων προς κατασκευή συστημάτων πληροφοριών. Υπολογισμός του δείκτη ξηρασίας και αξιοποίηση των δεδομένων είτε σε πραγματικό χρόνο, είτε προληπτικά μέσω διαδικασίας πρόγνωσης της ετήσιας κατάστασης.

Τέλος, η επιλογή του κατάλληλου φορέα που θα στεγάσει το Σύστημα Παρακολούθησης της Ξηρασίας αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της ορθής λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, ωστόσο, στην παρούσα αντιμετώπιση του θέματος δεν θα εξεταστεί διεξοδικά. Ο φορέας, εκτός των άλλων, είναι υπεύθυνος και για την υλοποίηση του συστήματος που περιλαμβάνει το σχεδιασμό των υπολογιστικών συστημάτων και του απαραίτητου λογισμικού, αλλά και τη διάρθρωση του προσωπικού και της απαιτούμενης εκπαίδευσής του. Αξίζει ίσως να σημειωθεί ότι θεωρείται γενικά καλύτερο η ανάλυση των κλιματικών δεδομένων να γίνεται από έναν ενιαίο φορέα (υπηρεσία, υπουργείο ή διυπουργική αρχή) ώστε να παράγονται έγκαιρα και αξιόπιστα αποτελέσματα για τη λήψη αποφάσεων (WMO, 2006).

Συνοψίζοντας, μπορεί να υποστηριχθεί ότι το σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας είναι δυνατόν να υλοποιηθεί μέσα από τρεις βασικές προσεγγίσεις, που περιλαμβάνουν το σύνολο των στοιχείων και παραμέτρων του. Τη θεωρητική, μέσα από την οποία θα απαντηθούν ερωτήματα σχετικά με την αξιοποίηση των υδρολογικών, μετεωρολογικών και λοιπών στοιχείων, την τεχνολογική, που θα οργανώσει τη μετάδοση της πληροφορίας και θα αναζητήσει τον απαιτούμενο εξοπλισμό και τέλος τη διοικητικο-οργανωτική, που θα αναζητήσει λύσεις σχετικές με την οργάνωση του φορέα και τη διαχείρισή του, τη χρηματοδότησή του και την εξασφάλιση της σωστής και ομαλής λειτουργίας του.

Προφανώς, το κύριο αντικείμενο του κεφαλαίου που είναι η παρακολούθηση της ξηρασίας μέσω του δείκτη RDI θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια, ωστόσο, αρχικά θα διατυπωθούν κάποια συνοπτικά στοιχεία πάνω στα διάφορα στάδια υλοποίησης ενός συστήματος παρακολούθησης.

## 5.2 Θεωρητική προσέγγιση ενός Συστήματος Παρακολούθησης

Πριν ξεκινήσει η από τεχνική και διοικητική σκοπιά υλοποίηση και λειτουργία ενός συστήματος παρακολούθησης, πρέπει να έχουν απαντηθεί διάφορα θεωρητικά ερωτήματα για το είδος του Συστήματος που πρόκειται να υλοποιηθεί, με την αξιοποίηση όλης της υπάρχουσας γνώσης και πληροφορίας σχετικά με την ξηρασία. Ποιες είναι οι απαραίτητες παράμετροι, πως θα επιλεγούν, πως θα αξιοποιηθούν και ποια θα είναι η τελική τους μορφή πριν τη χρήση; Ποια τα απαραίτητα φίλτρα, μέθοδοι και τρόποι που θα οδηγήσουν στον τελικό στόχο και ποιες μαθηματικές προσεγγίσεις θα ακολουθηθούν ή θα αξιοποιηθούν;

Η βασικότερη ίσως γνώση που απαιτείται για να προσεγγιστεί το είδος του Συστήματος προς υλοποίηση είναι ο ίδιος ο ορισμός του φαινομένου. Καθώς, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν ποικίλες προσεγγίσεις του φαινομένου, πρέπει να αποφασιστεί ποιος είναι ο κύριος τύπος ξηρασίας που θα παρακολουθεί το Σύστημα. Είναι προφανές ότι εκτός των κύριων μετεωρολογικών παραμέτρων που θα παρακολουθούνται, άλλο είδος ανάλυσης απαιτείται για τη μετεωρολογική ξηρασία και άλλο για την κοινωνικο-οικονομική, όπου δεδομένα αλλά και αναλύσεις κοινωνικών και οικονομικών στοιχείων υπεισέρχονται στο σύστημα. Τα δεδομένα βεβαίως αυτά μπορεί να μην είναι πάντα μετρήσιμα ή να μην μπορούν να αντιμετωπιστούν με απλές μαθηματικές προσεγγίσεις.

Η χωρική έκταση κάλυψης του Συστήματος είναι ένα ακόμη βασικό ερώτημα που πρέπει εδώ να απαντηθεί. Διαφορετική υποδομή, βασικό τμήμα της οποίας αποτελεί το δίκτυο συλλογής των δεδομένων, θα χρησιμοποιηθεί για ένα μικρό Σύστημα επιπέδου λεκάνης απορροής σε σχέση με ένα εθνικό ή περιφερειακό Σύστημα παρακολούθησης. Επίσης διαφορετικός τεχνικός εξοπλισμός μπορεί να απαιτηθεί ανάλογα και με το πλήθος και είδος των παραμέτρων που πρέπει να παρακολουθούνται. Διαφορετικό δίκτυο θα δημιουργηθεί για παράδειγμα μόνο για μετεωρολογικές παραμέτρους και διαφορετικό αν απαιτείται η συλλογή και διαχείριση επίσης υδρολογικών, ποιοτικών, περιβαλλοντικών ή και κοινωνικών και οικονομικών στοιχείων. Επίσης σε περίπτωση δικτύου μεγάλης έκτασης, πρέπει να δοθεί προσοχή στο

γεγονός ότι το σύστημα παρακολούθησης απαιτεί μόνιμη και διαρκή παρακολούθηση και συλλογή των απαιτούμενων στοιχείων, ενέργεια που ίσως χρειαστεί τη συμμετοχή αρκετών διαφορετικών φορέων, απαιτώντας μια αρκετά μεγάλη προσπάθεια για συνεργασία των φορέων αυτών.

Η κλίμακα συλλογής των διαφόρων στοιχείων είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας, που συχνά δεν γίνεται και ικανοποιητικά κατανοητός. Η «κλίμακα» μπορεί να ληφθεί ως απόλυτο ή σχετικό μέγεθος, ως χωρική ανάλυση ή ως διάρκεια. Είναι μια από τις πιο θεμελιώδεις αλλά και αμφιλεγόμενες έννοιες σε όσα αφορούν στην γεωγραφική και περιβαλλοντική πληροφορία. Σε οποιαδήποτε περίπτωση η κλίμακα που χρησιμοποιείται για τη συλλογή των διαφόρων υδρομετεωρολογικών και λοιπών στοιχείων μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα του Συστήματος Παρακολούθησης στην ανίχνευση και παρακολούθηση της ξηρασίας (Viau and Vogt, 2000). Παράλληλα, πρέπει να αναπτυχθούν και κάποια κριτήρια και τρόποι επιλογής για τις περιπτώσεις που δεν είναι προφανής η αναγκαιότητα ή η μη αναγκαιότητα ενός στοιχείου, ενώ θα πρέπει ακόμη να καταταγούν τα στοιχεία που κρίθηκαν ως απαραίτητα, σε στοιχεία πρώτης και δεύτερης προτεραιότητας, ανάλογα με την βαρύτητά τους στον τελικό υπολογισμό της ξηρασίας. Για παράδειγμα, η βροχόπτωση και η θερμοκρασία είναι στοιχεία άμεσης προτεραιότητας τα οποία πρέπει να είναι πάντα διαθέσιμα τόσο σε χωρική, όσο και σε χρονική κλίμακα.

Οι μεθοδολογίες που θα χρησιμοποιηθούν σε διάφορες περιπτώσεις είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας του σχεδιασμού του Συστήματος. Οι μεθοδολογίες αφορούν κυρίως στην προετοιμασία και ανάλυση των δεδομένων. Η συμπλήρωση χρονοσειρών, ο έλεγχος της αξιοπιστίας τους, η διαγραφή λαθών, η ομαδοποίηση και κατάταξη δεδομένων και άλλες παρόμοιες διεργασίες θα ήταν καλό να τυποποιηθούν ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος. Η τυποποίηση αυτή θα έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη του κινδύνου των σφαλμάτων που εισάγονται συνήθως με την αλλαγή των χρηστών ή των διαχειριστών του Συστήματος, αλλά και τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των στοιχείων με στοιχεία άλλων Συστημάτων. Η επιλογή του κατάλληλου δείκτη ξηρασίας και επομένως και των παραμέτρων που απαιτούνται, μπορεί επίσης να διερευνηθεί στο πλαίσιο των μεθοδολογιών. Επειδή όμως αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο του Συστήματος που αναλύεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναλύεται διεξοδικά στη συνέχεια.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αποτελεί φυσικά ίσως το τελικό, αλλά πολύ σημαντικό στάδιο της θεωρητικής προσέγγισης του συστήματος. Η ένταση της ξηρασίας μπορεί να απεικονίζεται σε διαγράμματα διαφόρων μορφών, ενώ διαγράμματα που συνδυάζουν την ένταση με τη χωρική έκταση της ξηρασίας είναι επίσης δυνατό να παραχθούν. Η πιο εποπτική όμως παρουσίαση των

αποτελεσμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω θεματικών χαρτών ξηρασίας, που δείχνουν ποια τμήματα της υπό παρακολούθηση περιοχής υποφέρουν από ξηρασία και φυσικά σε ποιο βαθμό. Σε κάθε τέτοιας μορφής χάρτη, θα πρέπει να υπάρχει και ένα υπόμνημα που να περιγράφει την ένταση της ξηρασίας στις διάφορες περιοχές όπου εμφανίζεται ξηρασία καθώς και το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται ο χάρτης (Svoboda, 2000). Μια πιο εξελιγμένη μορφή του Συστήματος θα μπορούσε να συνοδεύει το χάρτη με ένα κείμενο που περιγράφει τις επιπτώσεις της ξηρασίας για τη χρονική περίοδο στην οποία αναφέρεται ο χάρτης, τις μελλοντικές απειλές και τις προοπτικές βελτίωσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο χάρτης που εκδίδει ο Φορέας Παρακολούθησης της Ξηρασίας (U.S. Drought Monitor - National Drought Mitigation Center) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (Wilhite, 2009).

Μια συνεχής διαδικασία στο πλαίσιο του Συστήματος είναι η επίλυση προβλημάτων και η διόρθωση λαθών. Πρόκειται για προβλήματα που μπορεί να προκύψουν σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας, όπως λάθη στη συλλογή ή επεξεργασία των δεδομένων ή σφάλματα των οργάνων μέτρησης και μετάδοσης της πληροφορίας. Επίσης, πρέπει να γίνει μια πρόβλεψη, όσο αυτό βέβαια είναι ανθρωπίνως δυνατό, για προβλήματα που μπορούν να προκύψουν κατά τη διάρκεια υλοποίησης και λειτουργίας του συστήματος και απαιτούν θεωρητική προσέγγιση. Αυτό θα βοηθήσει στην ομαλή υλοποίηση και λειτουργία του Συστήματος με την αποφυγή καθυστερήσεων στην κατασκευή και λειτουργία, με τις ανάλογες συνέπειες. Η ύπαρξη και ο εντοπισμός σφαλμάτων ή αστοχιών στο σύστημα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι έχουν ληφθεί λάθος αποφάσεις για τα διάφορα συστατικά του μέρη. Συχνά μπορεί να απαιτηθεί επαρκής χρόνος προσαρμογής για τους χειριστές, χρήστες, διαχειριστές και αρμόδιους φορείς, ώστε να μπορούν να φτάσουν σε επίπεδα ομαλής συνεργασίας.

Είναι προφανές ότι ένα Σύστημα παρακολούθησης δεν μπορεί να τυποποιηθεί απόλυτα, ως προς όλες δηλαδή τις παραμέτρους και τα επί μέρους τμήματά του. Διαφορετικοί στόχοι ή επιλογές δεικτών ξηρασίας, αλλά και διαφορετικές τοπικές ιδιαιτερότητες οδηγούν στην υλοποίηση διαφορετικής μορφής επί μέρους τμημάτων του Συστήματος. Όσον αφορά για παράδειγμα στη συλλογή μετεωρολογικών πληροφοριών, πολλές χώρες έχουν ήδη αναπτύξει δίκτυα συλλογής δεδομένων πολλαπλού σκοπού με μεγάλη μάλιστα πυκνότητα, η διαχείριση των οποίων γίνεται από κεντρικούς εθνικούς φορείς. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν και η προσπάθεια απόλυτης προσαρμογής τους σε αυστηρή τυποποίηση, θα δημιουργούσε περισσότερα προβλήματα παρά όφελος. Από την άλλη πλευρά, σε χώρες στις οποίες τα δίκτυα συλλογής δεν έχουν γίνει ακολουθώντας κάποιον κεντρικό σχεδιασμό, όπως για παράδειγμα στη χώρα μας, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.

Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογικές εξελίξεις που βελτιώνουν τον απαραίτητο εξοπλισμό, αλλά και η ανάπτυξη τεχνογνωσίας, καθώς και η συσσώρευση μεγαλύτερης εμπειρίας, δίνουν τη δυνατότητα για συνεχή βελτίωση του Συστήματος με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, η βελτίωση της συνεργασίας των διαφόρων εμπλεκομένων φορέων θα δίνει τη δυνατότητα έρευνας σε καινούριους τομείς και εξέλιξης των διαφόρων τμημάτων του Συστήματος. Η έρευνα αποτελεί σημαντικό τμήμα της όλης προσπάθειας, καθώς το Σύστημα πρέπει συνεχώς να βελτιώνεται χρησιμοποιώντας τις νέες εξελίξεις στο χώρο της ξηρασίας με αποτέλεσμα την πληρέστερη και επομένως πιο αξιόπιστη αλλά και ταχύτερη εξαγωγή και απόδοση των αποτελεσμάτων. Τέλος, η ευρεία διάδοση των αποτελεσμάτων με την άμεση ενημέρωση του κοινού θα πρέπει να απασχολήσει το Σύστημα παρακολούθησης. Η ευρεία αυτή διάδοση των αποτελεσμάτων θα βοηθήσει τόσο στη λήψη αποφάσεων, αφού θα διευκολύνει την αποδοχή των απαιτούμενων μέτρων από το ευρύ κοινό, όσο και στη δημιουργία εξειδικευμένων τμημάτων διαχείρισης και παροχής πληροφορίας, τα οποία ίσως βοηθήσουν και προς την κατεύθυνση της αυτοχρηματοδότησης του Συστήματος.

### 5.3 Τεχνικός εξοπλισμός και Διοικητική Οργάνωση ενός Συστήματος Παρακολούθησης

Η τεχνική προσέγγιση αφορά στη δημιουργία αλλά και στην οργάνωση και διασύνδεση των κατάλληλων υποδομών ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του Συστήματος. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στις τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών και η τηλεπισκόπηση έχουν αυξήσει θεαματικά την ικανότητά μας στην παρακολούθηση τόσο των χαρακτηριστικών όσο και των επιπτώσεων των καιρικών φαινομένων.

Ο τεχνικός εξοπλισμός αναφέρεται κυρίως στην υλοποίηση του κύριου μέρους της υποδομής του Συστήματος. Πρόκειται, δηλαδή, για τα συστήματα υπολογιστών, τους αισθητήρες των μετεωρολογικών οργάνων και τον εξοπλισμό διασύνδεσης των συστημάτων αυτών. Τα συστήματα υπολογιστών πρέπει να είναι ικανά να υποστηρίξουν τη διατήρηση της βάσης δεδομένων, όπου θα καταγράφονται τα στοιχεία που συλλέγονται, αλλά και τις διαδικασίες επεξεργασίας των στοιχείων αυτών. Τέλος, θα πρέπει να μπορούν να διαχειριστούν το σύστημα απεικόνισης των αποτελεσμάτων που θα λειτουργεί σε μια πλατφόρμα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

Ο εξοπλισμός που απαιτείται εξαρτάται, όπως είναι αναμενόμενο, τόσο από τη χωρική και χρονική κλίμακα όσο και από το στόχο που θα εξυπηρετηθεί. Είναι προφανές ότι όσο το χρονικό διάστημα μεταξύ της συλλογής δύο

διαδοχικών μετρήσεων μικραίνει τόσο ισχυρότερη υπολογιστική δομή απαιτείται. Από την άλλη πλευρά, ένα εκτεταμένο χωρικά δίκτυο, δεν μπορεί να παρακολουθείται με συμβατικές μεθόδους. Σε μια τέτοια περίπτωση θα απαιτηθούν σύγχρονα αυτόματα όργανα συλλογής με δυνατότητα τηλεμετάδοσης της πληροφορίας σε κεντρικό σταθμό συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας.

Τις τελευταίες δεκαετίες, με την εξέλιξη της θεωρητικής βάσης της τηλεπισκόπησης και τη χρήση δορυφορικών δεδομένων είναι εφικτή η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων που μπορούν να καλύπτουν ολόκληρο τον πλανήτη. Η χρήση μιας ολόκληρης ομάδας νέων συσκευών και οργάνων τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει σε μεγάλη πρόοδο στην εξαγωγή σημαντικών επιφανειακών παραμέτρων. Η μετατροπή ωστόσο αυτών των δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία για τον προσδιορισμό και την παρακολούθηση της ξηρασίας, απαιτεί την άριστη κατανόηση της φυσικής των μετρήσεων καθώς και των πολύπλοκων εργαλείων ανάλυσης (Vogt et al., 2000).

Η Διοικητική Οργάνωση ενός Συστήματος παρακολούθησης και η δημιουργία του κατάλληλου φορέα λειτουργίας του είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα, που για τα Ελληνικά δεδομένα μπορεί να είναι και δυσεπίλυτο. Ο φορέας λειτουργίας θα πρέπει να έχει την αποδοχή τόσο των επιστημονικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών φορέων, όσο και των κέντρων εξουσίας. Θα πρέπει να διαθέτει την εμπειρία και τη γνώση ώστε να συμβάλλει στη λήψη αποφάσεων για την ανάπτυξη μέτρων αντιμετώπισης της ξηρασίας, αλλά και την κατανόηση των πολιτών για τα προτεινόμενα μέτρα. Η επίτευξη μιας τέτοιας ισορροπίας, με την πολυδιάσπαση των αρμοδιοτήτων σε διάφορους φορείς που υπάρχει στη χώρα μας, είναι μάλλον ένα δύσκολο εγχείρημα.

Το Σύστημα θα πρέπει να διαθέτει μια κεντρική δομή, αλλά και αποκεντρωμένα κλιμάκια για επίλυση πρακτικών προβλημάτων κυρίως όσον αφορά σε μεγάλης χωρικής κάλυψης Συστήματα. Θα πρέπει να διαθέτει παράλληλες διασυνδέσεις και εναλλακτικούς τρόπους αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων ώστε να είναι πάντα λειτουργικό. Κυρίως όμως, πρέπει να διαθέτει ανθρώπινο δυναμικό με διεπιστημονική σύνθεση και σύγχρονες διοικητικές αντιλήψεις, ώστε όλοι οι κοινωνικοί και επιστημονικοί χώροι να εκπροσωπούνται και να εισακούγονται. Επίσης, πρέπει να διαθέτει διαφανείς τρόπους διάδοσης της πληροφορίας, ώστε κάθε ενδιαφερόμενος να μπορεί να ενημερωθεί για τα αποτελέσματα που παράγει το Σύστημα και την τρέχουσα κατάσταση απέναντι στην ξηρασία, αλλά ακόμη και για λεπτομέρειες του Συστήματος που απευθύνονται μόνο σε εξειδικευμένους επιστήμονες. Πρέπει να γίνει σαφές, ότι κανένας μηχανισμός που απευθύνεται στο ευρύ κοινό δεν είναι δυνατό να λειτουργήσει αποτελεσματικά, αν δεν απευθύνεται σε όλες τις κοινωνικές ομάδες. Η σύγχρονη αντιμετώπιση του θέματος απαιτεί τη συνεχή

ενημέρωση του κοινού, αλλά και την οργάνωση αλληλεπιδραστικών εκδηλώσεων, ώστε να επιλύονται κάθε μορφής συγκρούσεις μεταξύ κοινωνικών ομάδων πριν από την τελική λήψη αποφάσεων.

Απαιτείται τέλος, η οργανωτική δομή του Συστήματος να ενσωματώνει επιστημονικές επιτροπές που θα μπορούν να προσαρμόζουν τα ευρήματα της επεξεργασίας των δεδομένων στις επικρατούσες συνθήκες και να προτείνουν λύσεις κατάλληλες για την κάθε περίπτωση, λαμβάνοντας πάντα υπόψη την υπάρχουσα εμπειρία από άλλα παρόμοια Συστήματα. Οι ενέργειες της τελευταίας στιγμής για την αντιμετώπιση της ξηρασίας και των επιπτώσεών της όχι μόνο δεν οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα, αλλά αποδεδειγμένα είναι πιο δαπανηρές από την κατασκευή και λειτουργία ενός Συστήματος παρακολούθησης της ξηρασίας ή/και οδηγούν σε επιζήμια για την κοινωνία και το φυσικό περιβάλλον αποτελέσματα.

#### 5.4 Επιλογή δείκτη ξηρασίας και μετεωρολογικών παραμέτρων

Οι κύριες μετεωρολογικές ποσότητες έχουν διακυμάνσεις σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες και κατά συνέπεια μπορούν να έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες σε τόπο και χρόνο. Η χωρο-χρονική διακύμανση δεν αφορά μόνο στη βροχόπτωση και στη θερμοκρασία, αλλά σε όλες τις ποσότητες που είναι ικανές να υποδείξουν πιθανές κλιματικές αλλαγές και επομένως είναι χρήσιμες και στη μελέτη φαινομένων ξηρασίας. Επομένως, ο σωστός χαρακτηρισμός των φαινομένων ξηρασίας απαιτεί τη μελέτη διαφορετικών μετεωρολογικών μεταβλητών και τη συστηματική παρακολούθησή τους. Η συστηματική παρακολούθηση των μεταβλητών αυτών μπορεί να οδηγήσει τόσο στην ακριβέστερη αναγνώριση των περιόδων ξηρασίας όσο και των επιρρεπών στην ξηρασία περιοχών.

Η επιλογή των προς παρακολούθηση μεταβλητών και η βέλτιστη θέση μετρήσεων εξαρτάται κυρίως από το στόχο που πρέπει να επιτευχθεί και τον τύπο του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για να συνθέσει ή να αναπαραστήσει το υπό εξέταση σύστημα. Επομένως, τα προβλήματα που αφορούν σε ένα σύστημα παρακολούθησης δεν μπορούν να εξετάζονται χωριστά από τον αρχικό προγραμματισμό και τη μοντελοποίηση του υπό διαχείριση συστήματος. Συχνά, η εγκυρότητα της συλλεγόμενης πληροφορίας είναι συνέπεια των συνθηκών, της ακρίβειας των μετρήσεων και της χωρικής και χρονικής διακύμανσης των φαινομένων.

Όπως είναι φανερό από την παρουσίαση των δεικτών ξηρασίας, που έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο της Διατριβής, οι δείκτες χωρίζονται σε δύο



κατηγορίες ως προς τις απαιτούμενες για τον υπολογισμό τους μεταβλητές. Στους απλούς δείκτες που απαιτούν μικρό αριθμό παραμέτρων και στους πολύπλοκους δείκτες που απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων για τον υπολογισμό τους. Οι κύριες παρόλα αυτά παράμετροι που εμφανίζονται σε όλους τους δείκτες, αλλά κυρίως στους πιο διαδεδομένους είναι τα κατακρημνίσματα κάθε μορφής (βροχόπτωση, χιονόπτωση κλπ.) και η θερμοκρασία. Ο δείκτης RDI στον οποίο θα βασιστεί το σύστημα παρακολούθησης ξηρασίας που θα παρουσιαστεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, βασίζεται ουσιαστικά στη βροχόπτωση και στη θερμοκρασία μέσω της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Υπάρχει ωστόσο μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές μεταβλητές. Ενώ η βροχόπτωση είναι μια άμεσα μετρήσιμη μεταβλητή, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή μπορεί μόνο έμμεσα να εκτιμηθεί από άλλες μετρούμενες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμική ροή κλπ. Η μέθοδος Penman και οι παραλλαγές της (Allen et al., 1998) αξιοποιούν τις περισσότερες από τις μετρούμενες παραμέτρους για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Στην περίπτωση έλλειψης των απαιτούμενων δεδομένων, είναι αποδεκτή και η χρήση άλλων μεθόδων όπως η μέθοδος Blaney-Criddle (Doorenbos and Pruitt, 1977), η μέθοδος Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), απλοποιημένες μορφές της μεθόδου Penman (FAO) ή ακόμη και η μέθοδος Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), οι οποίες χρησιμοποιούν μόνο τιμές θερμοκρασίας κυρίως σε μηνιαία βάση. Συμπερασματικά, στη χειρότερη περίπτωση, ο σχεδιασμός ενός συστήματος παρακολούθησης ξηρασίας μπορεί τελικά να βασιστεί στη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία του αέρα.

Οι δύο αυτές μεταβλητές (όπως και οι περισσότερες μεταβλητές που σχετίζονται με το κλίμα) παρουσιάζουν σημαντική τόσο χρονική όσο και χωρική διακύμανση. Η χρονική ανάλυση που εξαρτάται και από τη χρήση των δεδομένων γίνεται σε διάφορες χρονικές κλίμακες: μηνιαία, εποχιακή (ανεξάρτητα από το πώς ορίζεται η εποχή) και ετήσια. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η χρονική κλίμακα των μετρήσεων κυμαίνεται από μερικά λεπτά για τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς αισθητήρες έως και μια ημέρα για τις συμβατικές μεθόδους μετρήσεων. Επομένως, η χρήση δεδομένων υπόκειται σε κάποια διαδικασία χρονικής ολοκλήρωσης. Η χωρική διακύμανση μπορεί να μελετηθεί με τη χρήση μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Γνωστές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής είναι η μέθοδος της πολυωνυμικής παλινδρόμησης (polynomial regression), η μέθοδος στάθμισης με το αντίστροφο της απόστασης (inverse distance weighting – IDW), η πολυπαραγοντική προσαρμογή καμπυλών παλινδρόμησης (multivariate adaptive regression splines - MARS) και οι γεωστατιστικές παρεμβολές όπως η kriging και η co-kriging κλπ (Hutchinson

and Corbett, 1995; Collins and Bolstad, 1996; Hartkamp et al., 1999).

Καθώς η επιλογή του RDI ως του κατάλληλου δείκτη για τη μελέτη και ανάλυση της ξηρασίας θεωρείται η προτεινόμενη στη συγκεκριμένη Διατριβή, ο δείκτης αυτός θα θεωρηθεί και ως η κατάλληλη επιλογή για το σχεδιασμό του συστήματος παρακολούθησης, θα αποτελέσει δηλαδή τη βασική παράμετρο για την τελική επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας. Επομένως, οι απαραίτητες μετεωρολογικές παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία. Ωστόσο, η διακύμανση της βροχόπτωσης σε γενικές γραμμές είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη διακύμανση της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός του δικτύου παρακολούθησης της ξηρασίας θα βασιστεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο ουσιαστικά στο σχεδιασμό ενός δικτύου παρακολούθησης της βροχόπτωσης, που είναι η πιο έντονα μεταβαλλόμενη μεταβλητή.

## 5.5 Στόχοι ενός δικτύου συλλογής δεδομένων

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού ενός δικτύου συλλογής δεδομένων (π.χ. βροχομετρικών δεδομένων) είναι ο προσδιορισμός τόσο του βέλτιστου αριθμού θέσεων δειγματοληψίας όσο και της ακριβούς γεωγραφικής θέσης των σημείων δειγματοληψίας στην περιοχή ενδιαφέροντος, για την επίτευξη συγκεκριμένου στόχου, συγκεκριμένης δηλαδή χρήσης. Διαφορετική για παράδειγμα θα ήταν η επιλογή θέσεων τοποθέτησης βροχογράφων αλλά και ο συνολικός τους αριθμός για την παρακολούθηση ενός φαινομένου ξηρασίας σε σχέση με την παρακολούθηση της απορροής μιας λεκάνης ποταμού για την κατασκευή κάποιου υδραυλικού έργου. Επομένως, διαφορετικοί στόχοι σχεδιασμού οδηγούν σε διαφορετικές προσεγγίσεις σχεδιασμού του δικτύου.

Ένα καλό παράδειγμα για το σχεδιασμό δικτύων συλλογής δεδομένων δίνεται από το Office of Data Water Coordination (OWDC) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, το οποίο θέτει τρία διαφορετικά επίπεδα για τρεις διαφορετικούς στόχους (Nalbantis et al., 2006). Το Επίπεδο I είναι το βασικό επίπεδο. Αφορά σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές για το σχεδιασμό εκτεταμένων δικτύων (π.χ. σε εθνικό επίπεδο) με στόχο την εκτίμηση των υδατικών πόρων, την άντληση πληροφοριών σε επίπεδο περιφερειών ή στη συνολική εκτίμηση της διακινδύνευσης από την έλλειψη των κατάλληλων υδατικών πόρων. Επίσης μπορεί να αξιοποιηθεί ως πληροφορία υποβάθρου για το σχεδιασμό πιο πυκνών και εξειδικευμένων δικτύων. Συνήθως η πληροφορία που συλλέγεται χρησιμοποιείται για εκτιμήσεις σε μεγάλες χρονικές περιόδους (μηνιαίες, εποχιακές ή ετήσιες). Το Επίπεδο II αφορά σε υποπεριφερειακό επίπεδο, για

δίκτυα παρακολούθησης που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση κάποιου συγκεκριμένου υδατικού πόρου και με χρονικούς ορίζοντες ημερήσιους ως μηνιαίους. Τέλος, το Επίπεδο III αφορά σε τοπικό επίπεδο, για χρήση σε εξειδικευμένες ενέργειες σχεδιασμού και διαχείρισης και κυρίως για εκτίμηση και έλεγχο υδρογεωλογικής διακινδύνευσης. Στην περίπτωση αυτή, η χρονική κλίμακα παρατήρησης είναι πολύ λεπτομερής.

Είναι προφανές ότι το θέμα του σχεδιασμού υδρομετεωρολογικών δικτύων είναι τελείως διαφορετικό ανάλογα με τους στόχους που πρέπει να επιτυγχάνονται, επομένως η εγκατάσταση ενός δικτύου εξίσου αποτελεσματικού για κάθε στόχο είναι γενικά ένα δύσκολο εγχείρημα. Αν για παράδειγμα ο κύριος στόχος είναι η βέλτιστη οικονομικά λύση, τότε στο επίπεδο III ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα. Η μέτρηση του οικονομικού αποτελέσματος απόκτησης της πληροφορίας (και επομένως και των δεδομένων) βασίζεται στην υπόθεση ότι η αξία της πληροφορίας μπορεί να εκτιμηθεί μόνο αν μπορεί να επιφέρει αλλαγές σε μια ενέργεια ή απόφαση και η αξία της μετριέται με τα οικονομικά αποτελέσματα που παράγονται από τη αλλαγή που επέρχεται στην ενέργεια ή την απόφαση. Επειδή στη λεπτομερή κλίμακα του επιπέδου III το όφελος που παράγεται από την προσθήκη νέων δεδομένων είναι ανώτερο από το κόστος συλλογής των δεδομένων, ο στόχος έστω και οριακά επιτυγχάνεται πάντα. Αντίθετα, όταν ένα δίκτυο πρέπει να επιτύχει τους στόχους των επιπέδων I και II, όπως για παράδειγμα ένα δίκτυο για την ανάλυση και πρόβλεψη της ξηρασίας, η εκτίμηση του οικονομικού κριτηρίου δεν είναι τόσο απλή και πρέπει να ακολουθούνται διάφοροι κανόνες όπως:

- Η λειτουργία ενός δικτύου συγκεκριμένου (προαποφασισμένου) προϋπολογισμού πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να ελαχιστοποιεί το σφάλμα εκτίμησης της σχετικής μετεωρολογικής παραμέτρου.
- Η λειτουργία ενός δικτύου με κριτήριο την ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος (εγκατάσταση και διαχείρισης).

Επομένως ο σχεδιασμός δικτύων των επιπέδων I και II πρέπει να περιλαμβάνει είτε την εκτίμηση του σφάλματος του συστήματος είτε τη μέτρηση της ποσότητας της πληροφορίας που παρέχεται από το δίκτυο.

## 5.6 Μεθοδολογίες σχεδιασμού του δικτύου συλλογής δεδομένων

Ο σχεδιασμός ενός μετεωρολογικού δικτύου αποτέλεσε πεδίο ενεργού έρευνας για πολλά χρόνια. Περιλαμβάνει τόσο τεχνολογικές όσο και οικονομικές

πτυχές. Παραδοσιακά, τα μετεωρολογικά δίκτυα συλλογής δεδομένων ήταν πολλαπλού σκοπού. Η πρόγνωση του καιρού έδωσε αρχικά το έναυσμα ώστε ο σχεδιασμός των δικτύων να οδηγηθεί προς την εξυπηρέτηση ειδικών αναγκών, όπως η εξυπηρέτηση των αερομεταφορών και της γεωργίας, ή απλώς η καλύτερη πληροφόρηση του κοινού. Καθώς η έρευνα πιο συγκεκριμένων κλιματικών συνθηκών και φαινομένων αυξήθηκε, σε μεγάλο βαθμό και εξαιτίας του ενδιαφέροντος που αναπτύσσεται συνεχώς από το ευρύ κοινό, η ανάγκη για εξειδικευμένα δίκτυα μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων άρχισε να γίνεται εντονότερη.

Το εξειδικευμένο δίκτυο το οποίο απασχολεί στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένα δίκτυο παρακολούθησης ξηρασίας. Όπως αναπτύχθηκε στις προηγούμενες παραγράφους η κύρια παράμετρος ενδιαφέροντος είναι η μηνιαία βροχόπτωση. Επομένως, η κρίσιμη επιλογή στο σημείο αυτό είναι αυτή της χωρικής κλίμακας. Καθώς η εκτίμηση της ξηρασίας απαιτείται σε χωρικές κλίμακες από λίγα  $\text{km}^2$  έως μερικές εκατοντάδες  $\text{km}^2$ , η κύρια παράμετρος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η μέση χωρική βροχόπτωση για αυτού του μεγέθους τις εκτάσεις, η οποία στη συνέχεια θα αναφέρεται ως  $\bar{P}_a$ . Για το σχεδιασμό ενός δικτύου για την εκτίμηση της παραμέτρου  $\bar{P}_a$ , αρχικά θα οριστούν οι ακόλουθες ποσότητες:

1. Ο αριθμός των σταθμών του δικτύου,  $K$ .
2. Το όφελος από τη λειτουργία του δικτύου, το οποίο αυξάνεται σε συνάρτηση με την ακρίβεια της  $\bar{P}_a$ ,  $B(K)$ .
3. Το κόστος (εγκατάστασης, λειτουργίας, κλπ.) του δικτύου,  $C(K)$ .
4. Το καθαρό όφελος  $NB(K)$ , το οποίο είναι  $NB(K) = B(K) - C(K)$ .

Τελικά, το πρόβλημα του σχεδιασμού του δικτύου περιορίζεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου απαιτείται η μεγιστοποίηση του  $NB(K)$  υπό την προϋπόθεση ότι η ακρίβεια της  $\bar{P}_a$  θα είναι μεγαλύτερη ή ίση της απαιτούμενης ακρίβειας.

Εντούτοις, μια τέτοια βελτιστοποίηση δεν είναι πάντα δυνατή καθώς:

1. Τα περισσότερα δίκτυα είναι σχεδιασμένα (ή τελικά καταλήγουν) ως δίκτυα πολλαπλού σκοπού.
2. Δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ οφέλους και ακρίβειας της  $\bar{P}_a$  για πολλούς από τους εξυπηρετούμενους σκοπούς.
3. Ακόμη κι αν αυτό ήταν πιθανό, το ερώτημα της ολοκλήρωσης των σχέσεων αυτών παραμένει ανοιχτό.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, είναι προφανές ότι η εκτίμηση του καθαρού οφέλους είναι αδύνατη. Επομένως η μόνη συνθήκη που απομένει είναι η ακρίβεια της  $\bar{P}_a$  να είναι μεγαλύτερη ή ίση της απαιτούμενης ακρίβειας, οπότε το πρόβλημα του σχεδιασμού του δικτύου μειώνεται σε δύο υπολογιστικά βήματα:

1. Την εκτίμηση της ακρίβειας της  $\bar{P}_a$  σε ένα δοκιμαστικό δίκτυο, και
2. Τον ορισμό της απαιτούμενης ακρίβειας από τον χρήστη, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο αναλυτής της ξηρασίας.

Το πρόβλημα της εκτίμησης της ακρίβειας της  $\bar{P}_a$  έχει μελετηθεί εκτεταμένα τις προηγούμενες δεκαετίες. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που ακολουθεί εξετάστηκαν τρεις ιδιαίτερα δοκιμασμένες μεθοδολογίες, οι οποίες ταυτόχρονα στηρίζονται σε αυστηρά μαθηματική αντιμετώπιση της χωρικής διακύμανσης της βροχόπτωσης. Αυτό σημαίνει ότι δεν αξιοποιήθηκαν εμπειρικές προσεγγίσεις, όπως της δοκιμής και απόρριψης (trial-and-error) που βασίζονται στη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen, αλλά μόνο οι μέθοδοι με αναπαραγόμενες αναλυτικές λύσεις. Μεταξύ των μεθοδολογιών που καλύπτουν αυτό το κριτήριο, αναζητήθηκε στη βιβλιογραφία η πρώτη εμφάνιση της κάθε μεθοδολογίας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη πιθανή εξέλιξή τους ως ξεχωριστή μεθοδολογία. Τελικά, διερευνήθηκε η πιθανότητα αξιοποίησης τριών μεθοδολογιών που ακολουθούν τα προηγούμενα κριτήρια:

*Μεθοδολογία Α:* Πρόκειται για την πρώτη απόπειρα εκτίμησης της μέσης χωρικής βροχόπτωσης μέσα σε ένα αυστηρό μαθηματικό πλαίσιο, που διεξήχθη από τους ερευνητές Bras and Rodriguez-Iturbe (1976) του MIT στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η συνεισφορά αυτής της έρευνας ήταν καταλυτική για τις επόμενες εξελίξεις.

*Μεθοδολογία Β:* Βασισμένοι στα αποτελέσματα της μεθοδολογίας Α, ερευνητές από το Institute of Hydrology του Ηνωμένου Βασιλείου (Jones et al., 1979) διαμόρφωσαν το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύων σε ένα πλαίσιο προσανατολισμένο περισσότερο προς την εφαρμογή, πριν εφαρμόσουν τη μεθοδολογία που ανέπτυξαν σε μια εκτεταμένη μελέτη για την αναδιάρθρωση ολόκληρου του βροχομετρικού δικτύου του Ηνωμένου Βασιλείου.

*Μεθοδολογία Γ:* Βασισμένοι στα παραπάνω ερευνητικά αποτελέσματα και την ισχύ των νέων γεωστατιστικών εργαλείων, μια ομάδα ερευνητών από το National Polytechnic Institute of Grenoble στη Γαλλία (Lebel et al., 1987) ανέπτυξε μια μεθοδολογία για το σχεδιασμό δικτύων βασισμένη στα δεδομένα μιας Γαλλικής πειραματικής λεκάνης απορροής, πριν αποπειραθεί μια ευρείας

κλίμακας εφαρμογή στο πλαίσιο του πειράματος παγκόσμιας κλίμακας HAPEX-Sahel στη Δυτική Αφρική.

Η επιλογή της μεθοδολογίας που αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του απαραίτητου δικτύου συλλογής δεδομένων για την παρακολούθηση της ξηρασίας στην περιοχή της Ανατολικής Κρήτης με τη χρήση του δείκτη RDI, όπως παρουσιάζεται από τους Tsakiris et al (2008), στηρίχθηκε σε απλοποιητικές παραδοχές που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Η ανάλυση αλλά και η προσαρμογή των τριών αυτών μεθοδολογιών στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει πραγματοποιηθεί από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Nalbantis et al., 2006). Για το λόγο αυτό δεν κρίνεται σκόπιμη η αναλυτική περιγραφή των μεθοδολογιών, αλλά η παρουσίαση της κεντρικής ιδέας στην οποία στηρίζεται η κάθε μεθοδολογία.

### 5.6.1 Μεθοδολογία Α

Η κεντρική ιδέα σε αυτή τη μεθοδολογία συνοψίζεται στα ακόλουθα:

1. Το πρόβλημα του σχεδιασμού του δικτύου τίθεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία προσπαθεί να συμβιβάσει την ακρίβεια της μέσης χωρικής βροχοπτώσης με το κόστος του δικτύου.
2. Η εκτίμηση της μέσης χωρικής βροχοπτώσης γίνεται σε δύο στάδια: αρχικά, το ολοκλήρωμα της βροχοπτώσης για το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος προσεγγίζεται από το άθροισμα των τιμών σημειακής βροχοπτώσης ενός πεπερασμένου αριθμού προαποφασισμένων σημείων και στη συνέχεια, η βροχοπτώση στα σημεία αυτά εκτιμάται με μια γραμμική συνάρτηση των σημειακών μετρήσεων βροχοπτώσης λαμβάνοντας υπόψη και τα σφάλματα μέτρησης.
3. Η μέση χωρική βροχοπτώση αντιπροσωπεύεται από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE: mean square error) της εκτίμησης για όλα τα βήματα της εκτίμησης.
4. Το πρόβλημα εκτίμησης της μέσης χωρικής βροχοπτώσης απαιτεί ένα μέτρο της χωρικής διακύμανσης των σημειακών βροχοπτώσεων, το οποίο επιλέγεται να είναι η συνδιακύμανση του πεδίου (field covariance).
5. Ένα θεωρητικό μοντέλο συνδιακύμανσης (covariance) θεωρείται απαραίτητο.
6. Απαιτείται συστηματική έρευνα σε ιδεατά δίκτυα.

Ουσιαστικά, ο σχεδιασμός του δικτύου ελαχιστοποιείται σε ένα πρόβλημα

βελτιστοποίησης εντελώς ανάλογο με αυτό της μεγιστοποίησης του καθαρού οφέλους από το δίκτυο ( $NB(K)$ ) υπό την προϋπόθεση ότι η ακρίβεια της μέσης χωρικής βροχόπτωσης θα είναι μεγαλύτερη ή ίση της απαιτούμενης ακρίβειας. Το όφελος λαμβάνεται ως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) της εκτίμησης της μέσης χωρικής βροχόπτωσης και το κόστος μετατρέπεται σε μια ποσότητα ανάλογη της μέσης χωρικής βροχόπτωσης μέσα από μια παράμετρο ευαισθησίας (trade-off sensitivity parameter).

### 5.6.2 Μεθοδολογία B

Τα ερευνητικά αποτελέσματα της μεθοδολογίας A αξιοποιήθηκαν από το Ινστιτούτο Υδρολογίας (Institute of Hydrology) του Ηνωμένου Βασιλείου, για τη διαμόρφωση μιας μεθοδολογίας πιο πρακτικής από τη μεθοδολογία A. Πολλές από τις παραδοχές της μεθοδολογίας A παραμένουν ίδιες και στη μεθοδολογία B, υπάρχουν ωστόσο και κάποιες που έχουν τροποποιηθεί ώστε να αυξηθεί η εφαρμοσιμότητά της. Οι τροποποιημένες παραδοχές είναι οι εξής:

1. Το πρόβλημα δεν τίθεται πλέον ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, αφού η ακρίβεια της μέσης χωρικής βροχόπτωσης και το κόστος του δικτύου δεν είναι ανάλογες ποσότητες. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην εκτίμηση μόνο της ακρίβειας της μέσης χωρικής βροχόπτωσης.
2. Αντίθετα με τη μεθοδολογία A, η μέση χωρική βροχόπτωση εκτιμάται σε ένα μόνο στάδιο: το πραγματικό ολοκλήρωμα της σημειακής βροχόπτωσης για το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος εκτιμάται ως γραμμική συνάρτηση των σημειακών μετρήσεων βροχόπτωσης, που περιλαμβάνει επίσης τα σφάλματα μέτρησης.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού του δικτύου συλλογής σε μια περιοχή όπου προϋπάρχει πυκνό δίκτυο σταθμών τίθεται ως εξής:

1. Αρχικά, ένα υποψήφιο δίκτυο επιλέγεται βασισμένο σε ένα αυθαίρετο κριτήριο.
2. Εκτιμάται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μέσης χωρικής βροχόπτωσης.
3. Η εκτίμηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος συγκρίνεται με μια ελάχιστη απαιτούμενη τιμή.
4. Αν το δίκτυο δεν ικανοποιεί τη συνθήκη, ένα άλλο δίκτυο επιλέγεται με έναν προκαθορισμένο τρόπο και η διαδικασία ξεκινάει και πάλι από την αρχή.

Η μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί σε πλήθος δικτύων κυρίως στο έδαφος του Ηνωμένου Βασιλείου.

### 5.6.3 Μεθοδολογία Γ

Η μεθοδολογία Γ αξιοποιεί τις εξελίξεις στις γεωστατιστικές μεθόδους από τους ερευνητές του School of Mines, στο Fontainebleau, Paris, France. Συγκεκριμένα, η μέθοδος kriging και οι παραλλαγές της διαμόρφωσαν τη βάση για τη μελέτη της χωρικής ανάλυσης της βροχόπτωσης.

Η χωρική δομή της βροχόπτωσης αντιπροσωπεύεται από ένα ημι-βαριόγραμμα (semi-variogram). Η εισαγωγή του ημι-βαριογράμματος οδηγεί στην υιοθέτηση παραδοχών για τη βροχόπτωση που είναι τελείως διαφορετικές από αυτές που απαιτούνται στην περίπτωση της χρήσης της συνδιακύμανσης. Με την εξαίρεση αυτών των παραδοχών, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας παραμένουν τα ίδια με αυτά της μεθοδολογίας Β. Όπως και στη μεθοδολογία Β, η ανάλυση ξεκινά με την προσαρμογή ενός θεωρητικού μοντέλου στο «εμπειρικό» υπό κλίμακα κλιματολογικό ημι-βαριόγραμμα που λαμβάνεται από τα δεδομένα. Πλήθος τέτοιων μοντέλων μπορούν να βρεθούν στα εγχειρίδια που αναφέρονται στη μέθοδο kriging.

Η μεθοδολογία δοκιμάστηκε εκτεταμένα σε πολλές περιοχές της Γαλλίας, που διαθέτουν σημαντικό αριθμό μετεωρολογικών σταθμών. Η πιο σημαντική της ωστόσο εφαρμογή έγινε κατά τη διάρκεια του Υδρολογικού – Ατμοσφαιρικού Πιλοτικού Πειράματος στη Sahel της Αφρικής (Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment in Sahel (HAPEX – Sahel)). Το πείραμα έλαβε χώρα σε μια περιοχή  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , εξοπλισμένη με συνολικό αριθμό 107 μετεωρολογικών σταθμών. Η κύρια χρονική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή του γεγονότος βροχόπτωσης (έως μερικές ώρες), ενώ χρησιμοποιήθηκαν επίσης και μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες.

## 5.7 Προτεινόμενη μεθοδολογία για το σχεδιασμό του δικτύου συλλογής

Οι τρεις μεθοδολογίες για το σχεδιασμό μετεωρολογικών (βροχομετρικών) δικτύων που προαναφέρθηκαν παρουσιάζουν κοινά μεθοδολογικά βήματα, τα οποία είναι:

- προσαρμογή θεωρητικών μοντέλων για τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης
- εκτίμηση της μέσης χωρικής βροχόπτωσης μέσω ενός γραμμικού συνδυασμού σημειακών βροχοπτώσεων, και
- αναλυτική εκτίμηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της μέσης χωρικής βροχόπτωσης.



Οποιαδήποτε δοκιμασμένη μεθοδολογία μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για το σχεδιασμό ενός δικτύου συλλογής δεδομένων. Η μεθοδολογία Α περιλαμβάνει μια διαδικασία πολύπλοκης διακριτοποίησης η οποία μάλλον δεν έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα αφού δεν αυξάνει την απόδοση του δικτύου. Η μεθοδολογία Β θα μπορούσε να ικανοποιήσει απόλυτα τις απαιτήσεις του σχεδιασμού του δικτύου, όμως παρουσιάζει δυσκολίες στην εφαρμογή της εξαιτίας κυρίως:

- α) της έλλειψης κατάλληλου λογισμικού
- β) της σημαντικής πολυπλοκότητας του μοντέλου συνδιακύμανσης που αξιοποιεί
- γ) την έλλειψη δημοσιευμένων ερευνητικών αποτελεσμάτων για την περιοχή της Μεσογείου
- δ) την θεώρηση των σφαλμάτων μέτρησης, τα οποία για τη μηνιαία κλίμακα που ενδιαφέρει στην περίπτωση μας, δεν έχουν χρησιμότητα.

Για τις συγκεκριμένες ανάγκες των δικτύων που μας ενδιαφέρουν, η μεθοδολογία Γ είναι ισάξια της μεθοδολογίας Β ως προς το επιθυμητό αποτέλεσμα και τις υπολογιστικές απαιτήσεις που περιλαμβάνει. Ωστόσο, η μεθοδολογία Γ θα γίνει αποδεκτή ως τελική επιλογή κυρίως για τους εξής λόγους (Nalbantis et al., 2006):

1. Βασίζεται στη μέθοδο kriging, η οποία περιλαμβάνεται σε πολλά λογισμικά γενικής χρήσης.
2. Μπορεί να αξιοποιήσει μια μεγάλη ποικιλία επεκτάσεων της μεθόδου kriging.
3. Δημοσιευμένα αποτελέσματα εφαρμογών της μεθόδου είναι διαθέσιμα για περιοχές κοντά στη Μεσόγειο.
4. Δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα μετρήσεων, γεγονός που είναι απόλυτα ρεαλιστικό για τις χρονικές κλίμακες που μας απασχολούν.
5. Έχει εφαρμοστεί εκτενώς σε ευρύ φάσμα χωρικών και χρονικών κλιμάκων, όπως για παράδειγμα στο πείραμα HAPEX-Sahel.

Τα τυπικά μεθοδολογικά βήματα που ακολουθούνται για τον σχεδιασμό δικτύου συλλογής με τη χρήση της μεθοδολογίας Γ είναι:

1. Εκτίμηση του εμπειρικού ημι-βαριόγραμματος με βάση δεδομένα του προϋπάρχοντος δικτύου σταθμών.
2. Προσαρμογή του θεωρητικού αναλυτικού μοντέλου στο εμπειρικό ημι-βαριόγραμμα.
3. Επιλογή των θέσεων των σταθμών του υποψήφιου δικτύου συλλογής δεδομένων.
4. Εκτίμηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της μέσης χωρικής

βροχόπτωσης.

5. Αποδοχή του δικτύου αν πληρούνται οι προϋποθέσεις, διαφορετικά επανάληψη της διαδικασίας από το βήμα 3 και μετά.

Εντούτοις, η διαδικασία μπορεί και να απλοποιηθεί, καθώς σε πρώτη φάση δεν απαιτείται η εκτίμηση της μέσης χωρικής βροχόπτωσης, αλλά επαρκεί για το σχεδιασμό του δικτύου μόνο η απαραίτητη πυκνότητα του δικτύου, ο αριθμός δηλαδή των σταθμών ανά km<sup>2</sup>.

Οι Lebel and Le Barbe (1997) συνοψίζουν τις εμπειρίες τους από την εφαρμογή της μεθοδολογίας Γ στη Γαλλία και τη Δυτική Αφρική στα εξής: «Για περιοχές μέχρι 1000 km<sup>2</sup>, απαιτείται ο ίδιος αριθμός σταθμών, που σημαίνει ότι εφ' όσον η απόσταση μεταξύ των σταθμών είναι μεγαλύτερη από το μισό μήκος αποσυσχέτισης, το κύριο κριτήριο που λαμβάνεται υπόψη είναι ο απόλυτος αριθμός σταθμών που υπάρχουν στην υπό μελέτη επιφάνεια παρά η πυκνότητα του δικτύου. Για ακόμη μικρότερες περιοχές, ο αριθμός των σταθμών στην περιοχή μπορεί να εκτιμηθεί επιβάλλοντας απόσταση των σταθμών ίση με το μισό της απόστασης αποσυσχέτισης, που σημαίνει τοποθέτηση ενός σταθμού μέτρησης κάθε 15 km. Ωστόσο, κάτω από τα 10 km<sup>2</sup>, η χωρική διακύμανση που συνδέεται με τα κύτταρα μετάδοσης (convective cells) δεν εξομαλύνεται περαιτέρω από το χωρικό μέσο όρο».

Σύμφωνα με τη θέση αυτή, τα τυπικά μεθοδολογικά βήματα 1 έως 5 που παρουσιάστηκαν παραπάνω απλοποιούνται στα ακόλουθα:

1. Εκτίμηση του εμπειρικού ημι-βαριογράμματος με βάση δεδομένα του προϋπάρχοντος δικτύου σταθμών.
2. Προσαρμογή του θεωρητικού αναλυτικού μοντέλου στο εμπειρικό ημι-βαριόγραμμα και εκτίμηση του μήκους αποσυσχέτισης που τυπικά είναι ίσο με το βεληνεκές του ημι-βαριογράμματος.
3. Επιλογή των θέσεων των σταθμών του υποψήφιου δικτύου συλλογής δεδομένων.
4. Εκτίμηση της μέγιστης απόστασης μεταξύ των σταθμών.
5. Αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από το μισό του μήκους αποσυσχέτισης, τότε γίνεται αποδεκτός ο σχεδιασμός του δικτύου, διαφορετικά η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 3.

Χρησιμοποιείται το σφαιρικό μοντέλο που δίνεται από την εξίσωση:

$$\gamma(u) = \begin{cases} c_0 + c(1.5u/a - 0.5(u/a)^3) & u \leq a \\ c_0 + c & u > a \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου  $c_0$  είναι το ύψος του άλματος (nugget) του ημι-βαριογράμματος (ασυνέχεια για μηδενική απόσταση),  $c+c_0$  είναι το άνω όριο (sill) του ημι-βαριογράμματος,  $a$  είναι το βεληνεκές (range) και  $u$  είναι η απόσταση. Το μοντέλο έχει τρεις παραμέτρους:  $c$ ,  $c_0$  και  $a$ .

Το βεληνεκές ορίζεται ως η απόσταση στην οποία η διαφορά  $\delta = |c+c_0-a|$  γίνεται αμελητέα. Σε μοντέλα με σταθερό άνω όριο, είναι η μικρότερη απόσταση στην οποία η διαφορά  $\delta$  μηδενίζεται. Για τα μοντέλα με ασυμπτωτικό άνω όριο λαμβάνεται συμβατικά ως η απόσταση, στην οποία  $\delta = 0.95(c+c_0)$ .

Η μεθοδολογία που προτείνεται βασίζεται σε δύο σημαντικές υποθέσεις:

- η μέση σημειακή βροχόπτωση δεν έχει διακύμανση στο χώρο, και
- η βροχόπτωση είναι ισοτροπική.

Οι υποθέσεις, αν και πολύ χρήσιμες, θα πρέπει να αμφισβητηθούν όταν χρησιμοποιούνται σε γεωγραφικές περιοχές όπως η Μεσόγειος, καθώς:

- η έντονη διακύμανση του υψόμετρου εξ αιτίας της έντονης τοπογραφίας αναμένεται να προκαλέσει διακύμανση στη μέση σημειακή βροχόπτωση, η οποία ονομάζεται μετατόπιση (drift), και
- εμμονή στην εμφάνιση της υγρασίας που μεταφέρουν τα καιρικά μοτίβα με συγκεκριμένες τροχιές μπορεί να οδηγήσει σε ανισότροπη συμπεριφορά της χωρικής βροχόπτωσης.

Το πρόβλημα της μετατόπισης αντιμετωπίζεται μέσω αφαίρεσης των τάσεων (detrending) της σημειακής βροχόπτωσης μέσα από μια απλή διαδικασία η οποία περιλαμβάνει:

- Βαθμονόμηση ενός γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης με το χρονικό μέσο όρο του ύψους βροχόπτωσης ως εξαρτημένη μεταβλητή και το υψόμετρο ως ανεξάρτητη μεταβλητή.
- Αφαίρεση των τάσεων από όλα τα δεδομένα με τη μείωσή τους σε ένα κοινό υψόμετρο αναφοράς  $H_0$  (π.χ. στο επίπεδο της θάλασσας) με τη χρήση του παραπάνω μοντέλου παλινδρόμησης.
- Εφαρμογή των βημάτων 1 έως 5 της μεθοδολογίας με βάση τα δεδομένα χωρίς τάσεις.

Το πρόβλημα της ανισοτροπίας αντιμετωπίζεται τροποποιώντας το βήμα 2 της μεθοδολογίας ως εξής:

- Ο κύκλος γύρω από κάθε σταθμό χωρίζεται σε τέσσερις τομείς, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μία επικρατούσα κατεύθυνση (1 = Δύση - Ανατολή, 2 = Νοτιοδυτικά - Βορειοανατολικά, 3 = Βορειοδυτικά -

Νοτιοανατολικά, 4 = Βορράς - Νότος).

- Μια συγκεκριμένη κατεύθυνση επιλέγεται.
- Όλοι οι υπολογισμοί για τα ημι-βαριογράμματα περιορίζονται στα ζεύγη σταθμών που ικανοποιούν τον ορισμό των επιλεγμένων κατευθύνσεων.

Για να αποφευχθεί η σύγχυση, η εφαρμογή όλων των παραπάνω μεθοδολογικών παραλλαγών απαιτούν συστηματικές δοκιμές. Επομένως:

- Μια σειρά από δοκιμές χωρίς αφαίρεση των τάσεων εκτελείται αρχικά με βάση την υπόθεση ισοτροπίας.
- Αυτό ακολουθείται από μια σειρά δοκιμών σε δεδομένα χωρίς τάσεις και πάλι με την υπόθεση ισοτροπίας.
- Δοκιμές με ανισοτροπία και για τις δύο σειρές δεδομένων επαναλαμβάνονται για κάθε μία από τις βασικές κατευθύνσεις.

## 5.8 Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων

Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αποτελεί κατά κάποιον τρόπο το τελευταίο στάδιο του σχεδιασμού ενός Συστήματος Παρακολούθησης. Η αντιμετώπιση αυτή εξαιρεί φυσικά τον τεχνικό εξοπλισμό και τη διοικητική δομή του Συστήματος, που στην παρούσα φάση δεν είναι δόκιμο να αναλυθεί περαιτέρω, καθώς δεν συνδέεται άμεσα με τον δείκτη RDI.

Είναι προφανές ότι μετά την επιλογή των παραμέτρων προς παρακολούθηση (δηλαδή του Δείκτη ξηρασίας) και τον σχεδιασμό του δικτύου συλλογής των δεδομένων, η αξιοποίηση των δεδομένων και η τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων ολοκληρώνουν τα βασικά στάδια του σχεδιασμού του Συστήματος και κάνουν κατανοητή την αξία ενός τέτοιου Συστήματος τόσο στη λήψη αποφάσεων και στη σύνταξη των Σχεδίων Αντιμετώπισης της ξηρασίας, όσο και στην άμεση ενημέρωση όλων των ενδιαφερομένων και του κοινού.

Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων θα γίνει καλύτερα αντιληπτή μέσα από μια συγκεκριμένη εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την υλοποίηση του βασικού κορμού ενός Συστήματος Παρακολούθησης, που ακολουθεί.

### 5.8.1 Περιοχή εφαρμογής και αρχικές επιλογές

Η περιοχή που επιλέχθηκε για την εφαρμογή είναι η περιοχή της Ανατολικής Κρήτης. Η γνώση των συνθηκών του γενικότερου περιβάλλοντος του Αιγαίου και των νησιωτικών περιοχών, έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η

Ανατολική Κρήτη είναι μια επιρρεπής στην ξηρασία περιοχή και επομένως υψηλού ενδιαφέροντος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Επιπλέον, η Ανατολική Κρήτη αποτελεί κατά κάποιον τρόπο μια αυτόνομη υδρολογική περιοχή, αφού περιβάλλεται από θάλασσα. Δεν υπάρχουν δηλαδή γειτονικές περιοχές που να επιδρούν με κάποιο τρόπο στο υδρολογικό της ισοζύγιο, ενώ τα δεδομένα που μπορούν να συλλέγουν προέρχονται μόνο από σταθμούς στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης διευκολύνοντας την επιλογή τους.

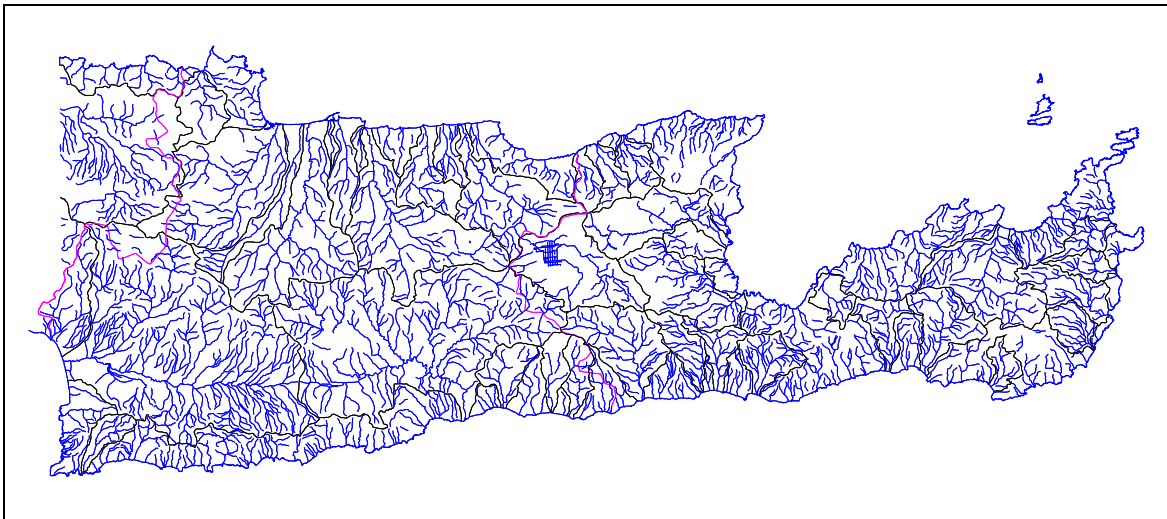
Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ένας χάρτης με το ανάγλυφο της Ανατολικής Κρήτης, κυρίως για να γνωστοποιηθεί η μορφή (σχήμα) της περιοχής, ώστε να μπορεί να γίνει αντιληπτή η χωρική αποτύπωση των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο και οι υδρολογικές λεκάνες απορροής της περιοχής, ώστε να παρουσιαστεί μια αρχική εικόνα της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου και μια γενική προσέγγιση της υδρολογικής κατάστασης της περιοχής.



Σχήμα 5.1. Χάρτης αναγλύφου της Ανατολικής Κρήτης.

Ένα Σύστημα Παρακολούθησης απαιτεί μια σειρά επιλογών συστατικών στοιχείων και παραμέτρων, που συνδέονται μεταξύ τους και λειτουργούν παράλληλα με σκοπό την απόδοση του επιθυμητού αποτελέσματος. Κυρίαρχη παράμετρος είναι φυσικά ο δείκτης ξηρασίας, ο οποίος δηλώνει την κατάσταση ξηρασίας της εξεταζόμενης περιοχής και «πυροδοτεί» τα προκαθορισμένα μέτρα αντιμετώπισης ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει κάθε φορά. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται ο δείκτης RDI για λόγους που αναπτύσσονται αναλυτικά σε προηγούμενη παράγραφο. Μια δεύτερη βασική παράμετρος σε ένα σύστημα παρακολούθησης είναι η σύνθεση του κατάλληλου δικτύου παρακολούθησης της ξηρασίας. Το δίκτυο αποτελεί στην ουσία τον πυρήνα του Συστήματος

Παρακολούθησης της Ξηρασίας (Rossi, 1994). Η επιλογή παρουσιάζεται στη συνέχεια, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που επιλέχθηκε προηγουμένα. Μια ακόμη σημαντική παράμετρος αφορά στη συλλογή και επεξεργασία των πάσης φύσεως δεδομένων, αλλά και της διασύνδεσης των συστημάτων πληροφοριών μεταξύ τους και με τα κέντρα λήψης αποφάσεων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα παρουσιαστεί η επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων που αφορούν στον υπολογισμό του δείκτη RDI. Τέλος πρέπει να δοθεί η απαιτούμενη προσοχή στη δομή του συστήματος που περιλαμβάνει το σχεδιασμό των υπολογιστικών συστημάτων και του απαραίτητου λογισμικού, αλλά και τη διάρθρωση του προσωπικού και της απαιτούμενης εκπαίδευσής του, καθώς και στην επιλογή του κατάλληλου φορέα που θα στεγάσει το Σύστημα Παρακολούθησης της Ξηρασίας. Η δομή ωστόσο του συστήματος δεν εξετάζεται στην παρούσα εφαρμογή.



Σχήμα 5.2. Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της Ανατολικής Κρήτης.

Η εφαρμογή θα βασιστεί σε ιστορικές χρονοσειρές δεδομένων, αφού ως στόχο έχει να παρουσιάσει απλώς τη διαδικασία υλοποίησης των μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν και όχι να δημιουργήσει ένα Σύστημα Παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης προς χρήση. Δεν πρέπει ωστόσο να παραβλέπουμε το γεγονός ότι η κατανόηση των χαρακτηριστικών των ιστορικών ξηρασιών μπορεί να αποδειχθεί ευεργετική στην αποκάλυψη των πιθανών επιπτώσεων των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών, κυρίως σε ένα ακραίο κλιματικό φαινόμενο όπως η ξηρασία και είναι απαραίτητη και κατά τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου Συστήματος Παρακολούθησης.

### 5.8.2 Εφαρμογή της μεθοδολογίας για το σχεδιασμό του δικτύου συλλογής

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για το σχεδιασμό ενός δικτύου συλλογής δεδομένων, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, εφαρμόστηκε στην επιλεγμένη περιοχή μελέτης για διάφορες χρονικές κλίμακες. Αρχικά επιλέχθηκε η ετήσια χρονική κλίμακα. Η επιλογή αυτή αναμένεται να αποφέρει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς τα ετήσια δεδομένα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να κατανέμονται με κανονική κατανομή σε σχέση με τα δεδομένα μικρότερων χρονικών κλιμάκων. Το γεγονός ότι στο Μεσογειακό χώρο, η διάκριση ανάμεσα σε μια ξηρή και μια υγρή εποχή είναι σαφής, οδήγησε επίσης στην επιλογή δεδομένων για την υγρή περίοδο. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια χρονική κλίμακα εξαμήνου, που αποτελείται από δεδομένα από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάρτιο. Στην προσπάθειά να περάσουμε σε κλίμακα τριμήνου, η υγρή περίοδος χωρίστηκε σε δύο περιόδους τριών μηνών (Οκτώβριος - Δεκέμβριος και Ιανουάριος - Μάρτιος). Τέλος, δοκιμάστηκε και η μηνιαία κλίμακα, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν μόνο δεδομένα των μηνών της υγρής περιόδου (Οκτώβριος - Μάρτιος). Συνοπτικά, οι χρονικές περιόδοι εντός του υδρολογικού έτους που εξετάστηκαν είναι:

1. Ετήσια περίοδος
2. Υγρή περίοδος: Οκτώβριος – Μάρτιος
3. Τρίμηνη περίοδος: Οκτώβριος – Δεκέμβριος
4. Τρίμηνη περίοδος: Ιανουάριος – Φεβρουάριος
5. Μηνιαία περίοδος: Οκτώβριος
6. Μηνιαία περίοδος: Νοέμβριος
7. Μηνιαία περίοδος: Δεκέμβριος
8. Μηνιαία περίοδος: Ιανουάριος
9. Μηνιαία περίοδος: Φεβρουάριος
10. Μηνιαία περίοδος: Μάρτιος

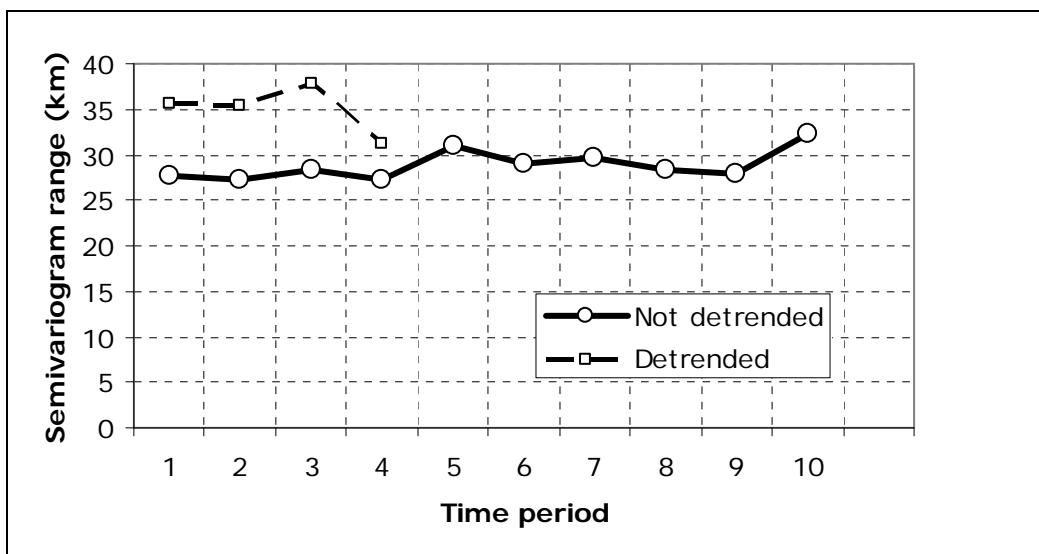
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιοι επιπλέον περιορισμοί:

1. Δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση νέων μετεωρολογικών σταθμών, επομένως η μόνη εναλλακτική λύση είναι να γίνει επιλογή από τους υπάρχοντες μετεωρολογικούς σταθμούς.
2. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς, επομένως τα χαρακτηριστικά τους και η λειτουργία τους δεν μπορούν να εξυπηρετούν κατ' αποκλειστικότητα την εκτίμηση της ξηρασίας.
3. Εξαιτίας των δύο προηγούμενων περιορισμών δεν είναι δυνατή η οικονομική βελτιστοποίηση.

4. Ο τύπος του κάθε σταθμού όσον αφορά στα τεχνικά του χαρακτηριστικά δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη καθώς αποτελεί έναν παράγοντα ο οποίος δεν μπορεί να τροποποιηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Αρχικά, μια σειρά από αριθμητικές δοκιμές βασίστηκε σε δεδομένα χωρίς αφαίρεση τάσεων. Για κάθε χρονική περίοδο εκτιμήθηκε το βεληνεκές του ημι-βαριογράμματος. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.3. Για μεγάλες χρονικές κλίμακες (ετήσιες και τρίμηνες) το βεληνεκές (range) βρίσκεται λίγο κάτω από τα 30 km, ενώ για τη μηνιαία χρονική κλίμακα κυμαίνεται γύρω στα 30 km.

Περνώντας στα δεδομένα στα οποία έχουν αφαιρεθεί οι τάσεις, το βεληνεκές αυξάνεται σε τιμές ελαφρώς υψηλότερες από τα 35 km για ετήσιες και εξαμηνιαίες κλίμακες και αρχίζει τις διακυμάνσεις για τις μικρότερες κλίμακες. Αυτές οι διακυμάνσεις είναι μάλλον ήπιες για την τρίμηνη κλίμακα, αλλά γίνονται σημαντικές για τη μηνιαία κλίμακα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται μόνο από ετήσια έως τρίμηνες κλίμακες.



Σχήμα 5.3. Εύρος ημι-βαριογράμματος (σε km) για διάφορες χρονικές περιόδους (1 = Ετήσια περίοδος, 2 = Υγρή περίοδος από τον Οκτώβριο – Μάρτιο, 3 = Οκτώβριος – Δεκέμβριος, 4 = Ιανουάριος – Φεβρουάριος, 5 = Οκτώβριος, 6 = Νοέμβριος, 7 = Δεκέμβριος, 8 = Ιανουάριος, 9 = Φεβρουάριος, 10 = Μάρτιος).

Έλεγχοι για την ανισοτροπία της χωρικής βροχόπτωσης αποκάλυψαν σημαντικές διακυμάνσεις στο βεληνεκές των ημι-βαριογραμμάτων για τις διαφορετικές κατευθύνσεις. Η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων είναι υψηλή για δύο κυρίως λόγους (Nalbantis et al., 2006):

- Ο αριθμός των ζευγαριών των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς περιορίζεται σημαντικά για οποιαδήποτε συγκεκριμένη



κατεύθυνση σε σχέση με τη λήψη όλων των πιθανών ζευγαριών.

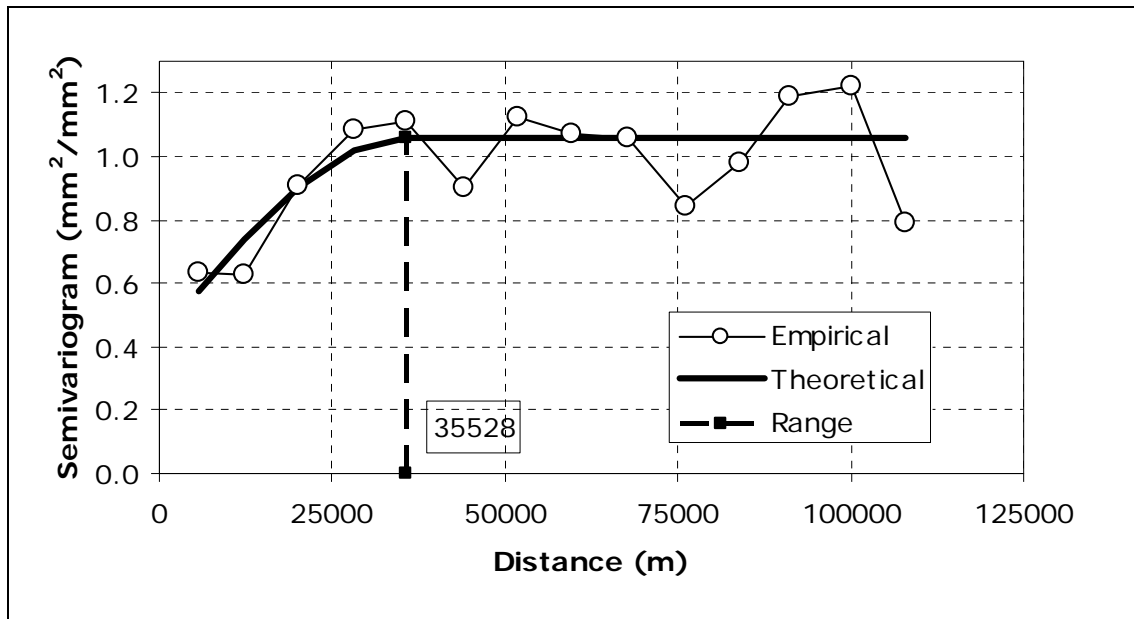
- Το σχήμα της περιοχής μελέτης (επίμηκες από Ανατολικά προς τα Δυτικά και μικρής διάστασης στην κατεύθυνση Βορρά - Νότου) αποδείχθηκε πολύ περιοριστικό για την απόκτηση οποιασδήποτε αξιόπιστης εκτίμησης των εμπειρικών ημι-βαριογραμμμάτων.

Τα αποτελέσματα με τη μικρότερη διακύμανση μεταξύ των διαφόρων κατευθύνσεων αντιστοιχούν στην ετήσια χρονική κλίμακα. Για τα δεδομένα χωρίς αφαίρεση των τάσεων, το εύρος από 28 km για όλες τις κατευθύνσεις ανεβαίνει σε 55 km για την κατεύθυνση Ανατολή-Δύση και παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερη άνοδο σε 76 km για την Νοτιοδυτική - Βορειοανατολική κατεύθυνση. Αντίθετα, μειώνεται σε 24 km για την Βορειοδυτική - Νοτιοανατολική κατεύθυνση, με ακόμη μεγαλύτερη πτώση σε 15 km για την κατεύθυνση Βορρά - Νότου. Το βεληνεκές των διαφόρων ημι-βαριογραμμμάτων που βασίζονται στα δεδομένα από τα οποία έχουν αφαιρεθεί οι τάσεις είναι γενικά υψηλότερα.

Υψηλή αβεβαιότητα στα αποτελέσματα των δοκιμών ανισοτροπίας οδήγησαν στην αποδοχή των αποτελεσμάτων αυτών μόνο για την ποιοτική αξιολόγηση του σχεδιασμού του δικτύου. Ως εκ τούτου, υιοθετήθηκε η περίπτωση με την υπόθεση ισοτροπίας ως βάση για τον σχεδιασμό του δικτύου. Προτιμήθηκε η εξέταση μεγάλων χρονικών κλιμάκων (ετήσιας και εξαμηνιαίας) στις οποίες ταιριάζουν καλύτερα οι μεθοδολογικές παραδοχές. Επίσης διατηρήθηκαν τα αποτελέσματα των δεδομένων με αφαίρεση των τάσεων καθώς η επίδραση της μορφολογίας αναμένεται να παίξει αναμφίβολα σημαντικό ρόλο στην Ανατολική Κρήτη. Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές, το βεληνεκές του ημι-βαριογράμματος για το σχεδιασμό του συγκεκριμένου δικτύου εκτιμήθηκε στα 35.5 km για την ετήσια κλίμακα και στα 35.3 km για την εξάμηνη κλίμακα. Με τις δύο αυτές τιμές να είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους, η μέγιστη απόσταση μεταξύ των σταθμών για το σχεδιασμό του δικτύου είναι  $(35.3/2)=17.6$  km. Το σχετικό ημι-βαριόγραμμα που προσαρμόζεται για την ετήσια κλίμακα χρόνου δίνεται στο Σχήμα 5.4.

Έχοντας κατά νου το τελικό κριτήριο σχεδιασμού, διάφορα δίκτυα κατασκευάστηκαν αριθμητικά μέσω τυχαίας χωρικής δειγματοληψίας. Την τυχαία επιλογή της «ακριβούς» θέσης των σταθμών ακολούθησε η επιλογή των σταθμών που υπήρχαν ήδη στο χώρο γύρω από την επιλεγμένη θέση σταθμού, η οποία θεωρείται πλέον η «κατά προσέγγιση» θέση σταθμού. Αν θυμηθεί κανείς και τα αποτελέσματα από τους ελέγχους ανισοτροπίας, θα μπορούσε να πει ότι η απόσταση μεταξύ των σταθμών θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη στην κατεύθυνση Ανατολή - Δύση. Αυτό, ωστόσο, δεν λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό των δικτύων που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένα

παράδειγμα ενός δικτύου με 10 σταθμούς δίνεται στο Σχήμα 5.5. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ σταθμών σε αυτό το δίκτυο είναι 15.2 km.



Σχήμα 5.4. Προσαρμογή ενός θεωρητικού ημι-βαριογράμματος στο εμπειρικό ημι-βαριόγραμμα για δεδομένα με αφαίρεση τάσεων και ετήσια χρονική κλίμακα.



Σχήμα 5.5. Παράδειγμα ενός βροχομετρικού δικτύου στην Ανατολική Κρήτη με 10 σταθμούς, το οποίο σχεδιάστηκε μέσω τυχαίας χωρικής δειγματοληψίας.

Τελικά, επιλέγεται ένα δίκτυο με βάση και άλλα κριτήρια όπως: η προσβασιμότητα στους σταθμούς, η ποιότητα των δεδομένων, καθώς και η κάλυψη των υψομετρικών ζωνών.

Η εφαρμογή στην Ανατολική Κρήτη έδειξε τα εξής:

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των σταθμών είναι της τάξης των 17 km.

- Με βάση το κριτήριο σχεδιασμού, το υφιστάμενο δίκτυο 44-σταθμών είναι πολύ πυκνό.
- Ένα υποσύνολο των σταθμών θα πρέπει να χρησιμοποιείται στις εκτιμήσεις της ξηρασίας.
- Τα υποψήφια δίκτυα που πληρούν το κριτήριο σχεδιασμού και είναι αριθμητικά κατασκευασμένα μέσω τυχαίας χωρικής δειγματοληψίας, έδειξαν ότι ο απαιτούμενος αριθμός των σταθμών είναι της τάξης των 10 έως 15.

### 5.8.3 Μαθηματική και χαρτογραφική προσέγγιση

Η μαθηματική προσέγγιση του συστήματος στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αφορά στο τμήμα της μαθηματικής επεξεργασίας για την κατάλληλη τροφοδοσία με δεδομένα της βάσης δεδομένων που δημιουργείται και την ανάκτηση των δεδομένων για τη δημιουργία χαρτών ξηρασίας. Οι θεματικοί χάρτες ξηρασίας, αποτελούν τον κύριο τρόπο απεικόνισης των αποτελεσμάτων του συστήματος και βασίζονται στην τεχνολογία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), ενώ και η βάση δεδομένων που αναπτύσσεται λειτουργεί ουσιαστικά σαν τμήμα του χρησιμοποιούμενου Γεωγραφικού Συστήματος. Τα τελικά αποτελέσματα με τη μορφή θεματικών χαρτών παράγονται ανακαλώντας τα στοιχεία της βάσης δεδομένων στη χωρική ανάλυση που παρέχει το GIS, μέσα από μια σειρά κατάλληλα διατυπωμένων ερωτημάτων.

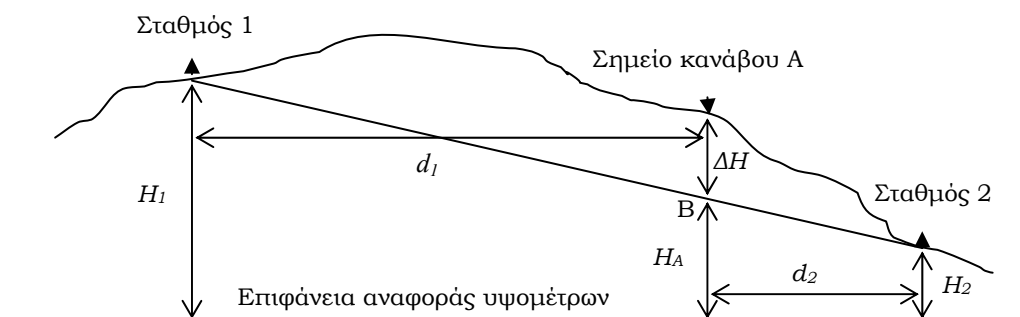
Η διαδικασία ξεκινά φυσικά με τη συλλογή και την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Η απαιτούμενη επεξεργασία των δεδομένων για την ποιοτική τους ανάλυση, διόρθωση και συμπλήρωση τους γίνεται σύμφωνα με τις κλασικές υδρολογικές και στατιστικές μεθόδους και δεν θα αναλυθεί στην παρούσα παράγραφο. Τα δεδομένα μεταφέρονται στη βάση δεδομένων με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι άμεσα αξιοποιήσιμα και να μπορούν να υποστούν την απαραίτητη επεξεργασία για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την ξηρασία.

Η βάση δεδομένων δομείται σε σχέση με τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που θα γίνει με τη μορφή θεματικού χάρτη ξηρασίας. Ο χάρτης αναλύεται σε τετράγωνα επιθυμητού μήκους πλευράς ανάλογα με τη χωρική κλίμακα που έχει προεπιλεγεί, δημιουργώντας ουσιαστικά ένα κানাβο στην προαναφερθείσα κλίμακα. Κάθε εγγραφή στη βάση δεδομένων αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο τετράγωνο του κανάβου, το οποίο συσχετίζεται με τη βάση μέσω ενός αναγνωριστικού κλειδιού. Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει στο σημείο αυτό είναι η κλίμακα διακριτοποίησης της περιοχής, δηλαδή η διάσταση αυτών

των τετραγώνων. Τα τελικά αποτελέσματα θα εμφανίζονται με βάση την κλίμακα αυτή και επομένως το επιθυμητό αποτέλεσμα συμβάλλει στην επιλογή της.

Στην επιλογή αυτή λαμβάνονται επίσης υπόψη η υψομετρική κατανομή του αναγλύφου, η ομοιομορφία της φυτοκάλυψης της περιοχής, η κατανομή των οικονομικών δραστηριοτήτων, η χρήση της γης και το μέγεθος της υπό μελέτη περιοχής, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε κάθε τετραγωνική μονάδα να αντιστοιχεί σε ένα ενιαίο τμήμα της γης (Tsakiris and Vangelis, 2004). Όσο μικρότερη είναι η διάσταση των τετραγώνων τόσο πυκνότερος ο κανάβος και επομένως τόσο καλύτερη η χωρική ανάλυση και η τελική εικόνα των αποτελεσμάτων. Φυσικά, η ανάλυση δεν έχει νόημα να υπερβαίνει τη δυνατότητα αποτύπωσης των αποτελεσμάτων που εξαρτάται και από το δίκτυο συλλογής δεδομένων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε τετραγωνισμός με ακμή 2 km, που κρίνεται υπερεπαρκής για διαχειριστικές διαδικασίες και λήψη μέτρων αντιμετώπισης.

Το τελικό βήμα πριν από τη χρήση της βάσης για την παραγωγή αποτελεσμάτων είναι ο εμπλουτισμός της με στοιχεία. Για τη διαδικασία αυτή απαιτείται η χρήση γεωγραφικών συντεταγμένων, κυρίως για τις θέσεις των τετραγώνων στα οποία γίνεται η απεικόνιση, αλλά και των μετεωρολογικών σταθμών. Απαραίτητο επίσης στοιχείο είναι και το υψόμετρο του κάθε σημείου. Η μεταφορά των δεδομένων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας στη βάση, δηλαδή οι εγγραφές στη βάση σε αντιστοιχία προς τα τετράγωνα του κανάβου, γίνεται σε συνάρτηση με τις χωρικές συντεταγμένες. Για το λόγο αυτό θεωρούμε ότι κάθε τετράγωνο του κανάβου αντιπροσωπεύεται από το κέντρο του. Η συμμετοχή των μετεωρολογικών σταθμών στη διαμόρφωση της τιμής μεγέθους σε κάθε τετράγωνο, εξαρτάται μόνο από την απόστασή τους από το κάθε σημείο του κανάβου, αφού οι τελικοί σταθμοί που επιλέχθηκαν θεωρούνται ίδιας αξίας. Η βαρύτητα λοιπόν με την οποία κάθε σταθμός συμμετέχει στη διαμόρφωση της ζητούμενης τιμής ισούται με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης αυτής. Για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος μεταφοράς παρατίθεται το πιο κάτω σχήμα για τη μοναδιαία περίπτωση των δύο μετεωρολογικών σταθμών.



Σχήμα 5.6. Σκαρίφημα για την κατανόηση της μεθόδου μεταφοράς δεδομένων.

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση της μεταφοράς σε ένα σημείο του κανάβου A της τιμής της βροχόπτωσης βάσει των μετεωρολογικών σταθμών 1 και 2. Αρχικά μέσω μιας σταθμισμένης γραμμικής παρεμβολής μπορούμε να βρούμε μια θεωρητική τιμή του υψόμετρου του σημείου A του κανάβου. Η τιμή αυτή δεν αντικατοπτρίζει το πραγματικό ανάγλυφο, αλλά στην πραγματικότητα την τιμή του υψόμετρου του σημείου B του σχήματος που εξαρτάται από τη γραμμική παρεμβολή και μόνο μεταξύ των σταθμών. Η μαθηματική σχέση που δίνει το προσωρινό αυτό μέγεθος είναι η ακόλουθη:

$$H_A = \frac{H_1 \frac{1}{d_1^2} + H_2 \frac{1}{d_2^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2}} \quad (5.2)$$

όπου  $H_A$  το υψόμετρο του σημείου A του κανάβου,  $H_1$  και  $H_2$  τα υψόμετρα των σταθμών που συμμετέχουν και  $d_1$  και  $d_2$  οι αποστάσεις τους από το σημείο A.

Η χρησιμότητα του υψόμετρου αυτού μπορεί να συνδεθεί με την αντίστοιχη τιμή της βροχόπτωσης  $P$  στο σημείο B, που αποτελεί και πάλι μια θεωρητική τιμή. Η αντίστοιχη αυτή τιμή  $P_A$  δίνεται από την εξίσωση:

$$H_A = \frac{P_1 \frac{1}{d_1^2} + P_2 \frac{1}{d_2^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2}} \quad (5.3)$$

όπου  $P_A$  το υψόμετρο του σημείου A του κανάβου,  $P_1$  και  $P_2$  τα ύψη βροχής των σταθμών που συμμετέχουν και  $d_1$  και  $d_2$  οι αποστάσεις τους από το σημείο A.

Η τιμή της βροχόπτωσης στο σημείο A που τελικά μας ενδιαφέρει θα δοθεί αν διορθώσουμε τη θεωρητική τιμή της βροχόπτωσης για την υψομετρική διαφορά των σημείων A και B χρησιμοποιώντας τη βροχοβαθμίδα. Το πραγματικό υψόμετρο του σημείου είναι ήδη καταχωρημένο στη βάση. Το θεωρητικό υπολογίζεται από την εξίσωση 5.2, επομένως μπορούμε άμεσα να υπολογίσουμε την υψομετρική διαφορά  $\Delta H$ . Η τελική τιμή της βροχόπτωσης στο σημείο A δίνεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$P'_A = P_A + \Delta H \cdot \beta \quad (5.4)$$

όπου  $P'_A$  η τελική τιμή της βροχόπτωσης στο σημείο A,  $P_A$  η θεωρητική τιμή της βροχόπτωσης (βροχόπτωση στο σημείο B),  $\Delta H$  η υψομετρική διαφορά μεταξύ A και B και  $\beta$  η τιμή της βροχοβαθμίδας.

Επεκτείνοντας τις εξισώσεις αυτές ώστε να περιλαμβάνουν όλους τους

διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς, η τιμή του προσωρινού υψομέτρου σημείο  $i$  δίνεται από τη σχέση:

$$H_i = \frac{H_1 \frac{1}{d_1^2} + H_2 \frac{1}{d_2^2} + \dots + H_n \frac{1}{d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}} \quad (5.5)$$

όπου  $H_i$  το υψόμετρο του σημείου  $i$  του κανάβου,  $H_1$  έως  $H_n$  τα υψόμετρα των σταθμών που συμμετέχουν και  $d_1$  έως  $d_n$  οι αποστάσεις τους από το σημείο  $i$ .

Αντίστοιχα, η θεωρητική-προσωρινή τιμή της βροχόπτωσης στο σημείο  $i$ , λαμβάνοντας υπόψη όλους τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς, δίνεται από τη σχέση (Tsakiris and Vangelis, 2004; Ronchi et al., 2007):

$$P_i = \frac{P_1 \frac{1}{d_1^2} + P_2 \frac{1}{d_2^2} + \dots + P_n \frac{1}{d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}} \quad (5.6)$$

όπου  $P_i$  το ύψος βροχής του σημείου  $i$  του κανάβου,  $P_1$  έως  $P_n$  τα ύψη βροχής των σταθμών που συμμετέχουν και  $d_1$  έως  $d_n$  οι αποστάσεις τους από το σημείο  $i$ .

Η τελική τιμή της βροχόπτωσης στο κάθε σημείο που τελικά μας ενδιαφέρει θα δοθεί αν διορθώσουμε την προσωρινή τιμή της βροχόπτωσης για την υψομετρική διαφορά μεταξύ πραγματικού και προσωρινού υψομέτρου, χρησιμοποιώντας τη βροχοβαθμίδα. Η εξίσωση που θα μας δώσει την τελική τιμή της βροχόπτωσης σε κάθε σημείο είναι, σε αντιστοιχία με την εξίσωση 5.4, η ακόλουθη:

$$P'_i = P_i + \Delta H \cdot \beta \quad (5.7)$$

όπου  $P'_i$  (mm) η τελική (πραγματική) τιμή της βροχόπτωσης στο σημείο  $i$ ,  $P_i$  (mm) η προσωρινή (αρχική) τιμή της βροχόπτωσης,  $\Delta H$  (m) η διαφορά μεταξύ πραγματικού και προσωρινού υψομέτρου και  $\beta$  η βροχοβαθμίδα σε mm/100m γεωγραφικού υψομέτρου.

Στο κάθε ένα από τα σημεία  $i$  μπορούμε με παρόμοιο τρόπο να μεταφέρουμε την τιμή οποιουδήποτε μετεωρολογικού μεγέθους επιθυμούμε (π.χ. της θερμοκρασίας) υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το υψόμετρο. Επειδή το μέγεθος αυτό δεν θα αναφέρεται στο σημείο του αναγλύφου αλλά στο σημείο προσωρινού υψομέτρου θα πρέπει να διορθωθεί για την υψομετρική διαφορά. Από την άποψη της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, οποιαδήποτε γνωστή μέθοδος για τον υπολογισμό των

μετεωρολογικών μεγεθών στο σημείο ενδιαφέροντος  $i$  θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. Οι Singh and Chowdhury (1986) μελέτησαν 13 διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όλες οι μέθοδοι δίνουν συγκρίσιμα αποτελέσματα ειδικά για μεγάλου μήκους χρονοσειρές. Όπως αναφέρουν, δεν υπάρχει ουσιαστική βάση στον ισχυρισμό ότι κάποια μέθοδος υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες, όμως για συγκεκριμένη περίπτωση κάποια μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί προτιμότερη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέθοδος που περιγράφηκε θεωρείται ότι παρέχει την καλύτερη δυνατή μεταφορά των δεδομένων στα σημεία ενδιαφέροντος.

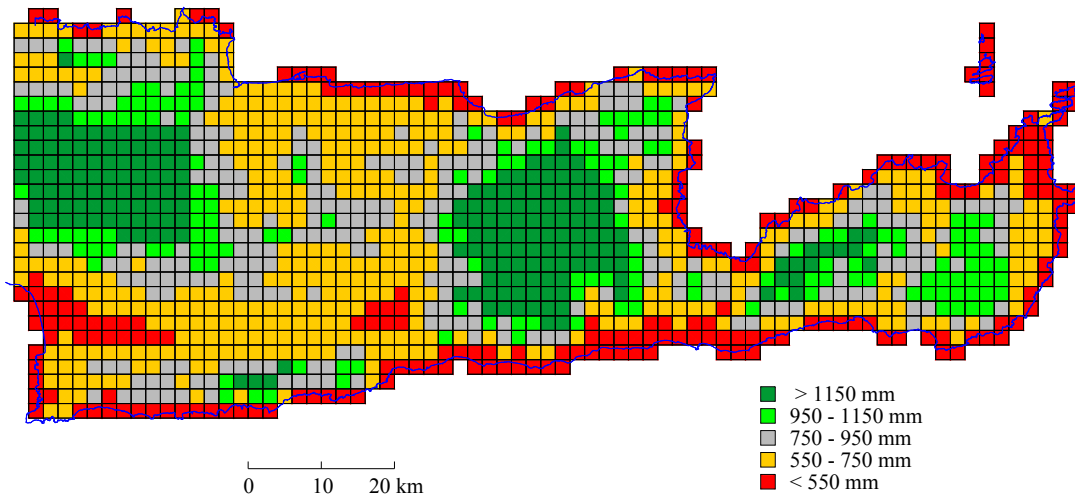
Με την καταγραφή όλων των απαιτούμενων δεδομένων στη βάση, το σύστημα μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση των τελικών αποτελεσμάτων. Το μόνο που απαιτείται είναι ο υπολογισμός του δείκτη ξηρασίας που θα γίνει βάσει των στοιχείων που ήδη είναι καταχωρημένα στη βάση. Με τη διατύπωση των κατάλληλων ερωτημάτων προς τη βάση μέσω της πλατφόρμας GIS θα αποδοθούν τα τελικά αποτελέσματα στους ζητούμενους χάρτες της ξηρασίας.

#### 5.8.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

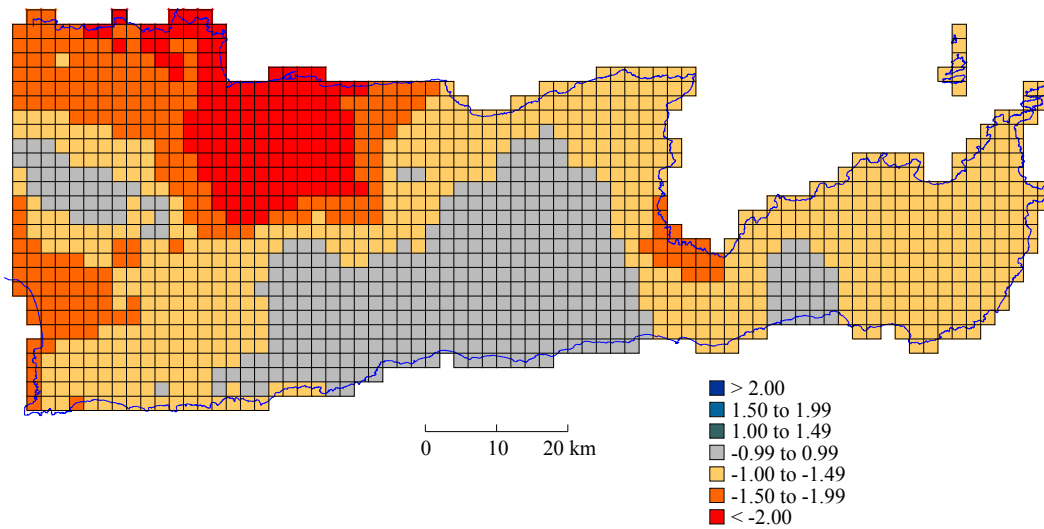
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε θεματικούς χάρτες αποτελεί μια από τις καλύτερες μορφές οπτικοποίησης της ξηρασίας, καθώς είναι άμεση και εύκολα κατανοητή ακόμα και από μη ειδικούς στην ξηρασία. Μπορεί λοιπόν να αποτελέσει εξαιρετικό εργαλείο τόσο για τα κέντρα λήψης αποφάσεων όσο και για την ενημέρωση του κοινού σε σχέση με τη σφοδρότητα της ξηρασίας. Αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο υποστήριξης των μέτρων αντιμετώπισης που πρέπει να ληφθούν σε σχέση με ένα γεγονός ξηρασίας, αφού κάνει άμεσα κατανοητή την κατάσταση.

Για την κατανόηση της χωρικής κατανομής της ξηρασίας παρουσιάζεται αρχικά (Σχήμα 5.7) η υπερετήσια κατανομή της βροχόπτωσης στην έκταση της υπό μελέτη περιοχής. Πρέπει να γίνει σαφές ότι η ξηρασία υπολογίζεται για το κάθε κελί του κανάβου και επομένως οι υψηλές ή χαμηλές τιμές βροχόπτωσης δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ξηρασίας.

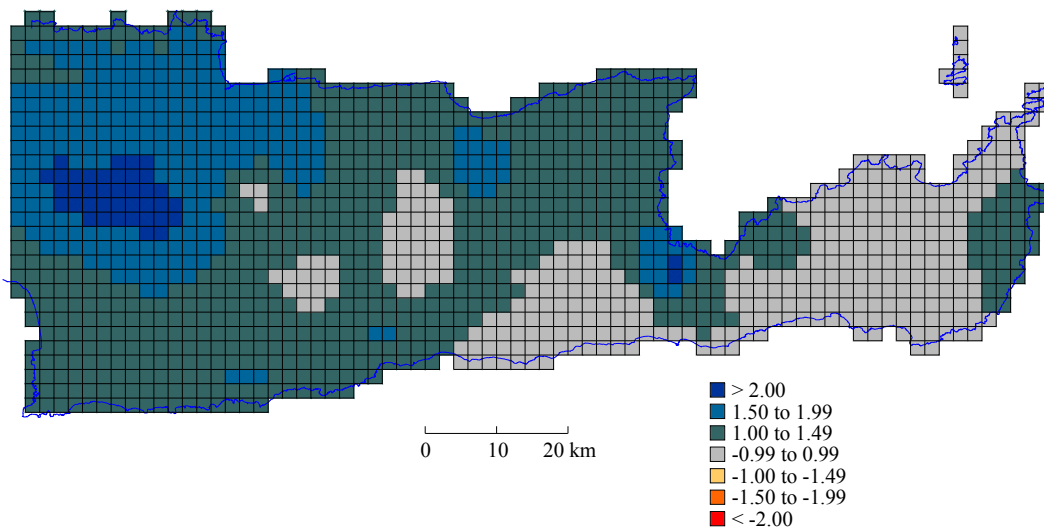
Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται ένας χάρτης χωρικής κατανομής της ξηρασίας με βάση το δείκτη RDI για μια χρονιά με ξηρασία που δεν ήταν από τις σφοδρότερες, ενώ στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται μια σχετικά υγρή χρονιά ώστε να γίνει κατανοητή η διαφορά αλλά και ο τρόπος κατανόησης της ξηρασίας.



Σχήμα 5.7. Χάρτης κατανομής υπερετήσιας βροχόπτωσης.



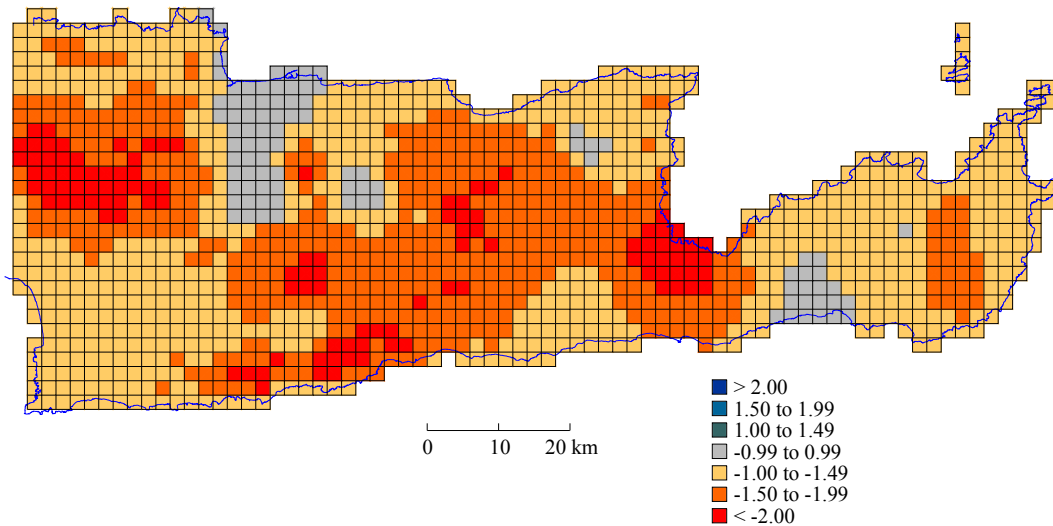
Σχήμα 5.8. Χάρτης χωρικού RDI για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1969-1970.



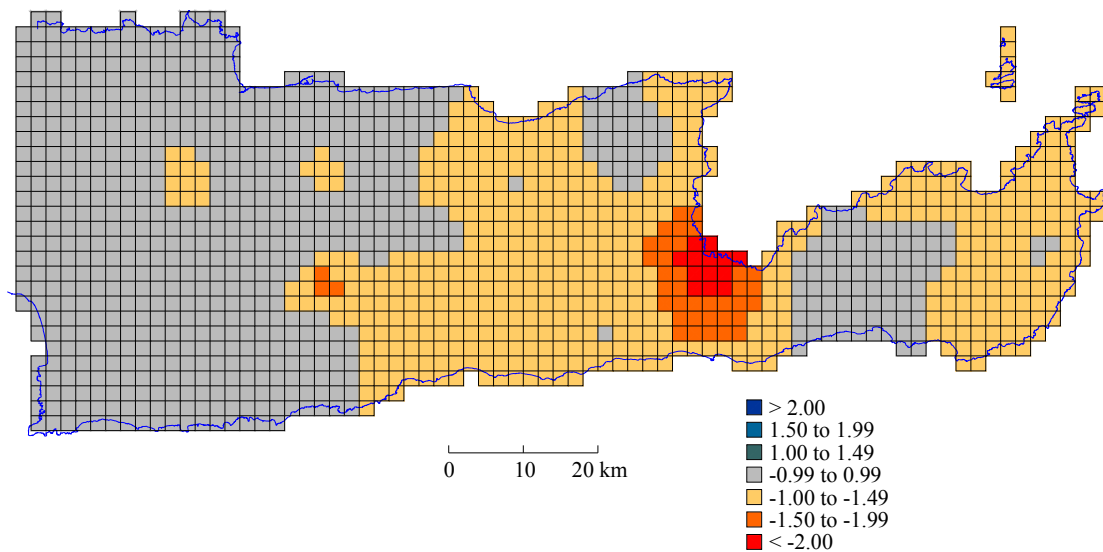
Σχήμα 5.9. Χάρτης χωρικού RDI για το σχετικά υγρό υδρολογικό έτος 1975-1976.



Ένα σημείο που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η χωρική διαφοροποίηση της ξηρασίας σε σχέση με το μέσο όρο της έντασης της ξηρασίας της περιοχής. Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται ένα έτος που κατά μέσο όρο θεωρείται μέτριας ξηρασίας. Μπορεί ωστόσο να παρατηρήσει κανείς ότι το νότιο τμήμα της περιοχής βρίσκεται στη φυσιολογική ζώνη ή παρουσιάζει μέτρια ξηρασία, ενώ στο βόρειο τμήμα η ξηρασία είναι εντονότερη και σε ένα τμήμα ξεπερνά το όριο για το χαρακτηρισμό της ως ακραία ξηρασία. Από την άλλη πλευρά στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται ένα έτος που επίσης χαρακτηρίζεται κατά μέσο όρο ως μέτριας ξηρασίας, κατά το οποίο η ξηρασία έχει πιο ομοιόμορφη χωρική κατανομή, με το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής να χαρακτηρίζεται μεταξύ μέτριας και σημαντικής ξηρασίας.

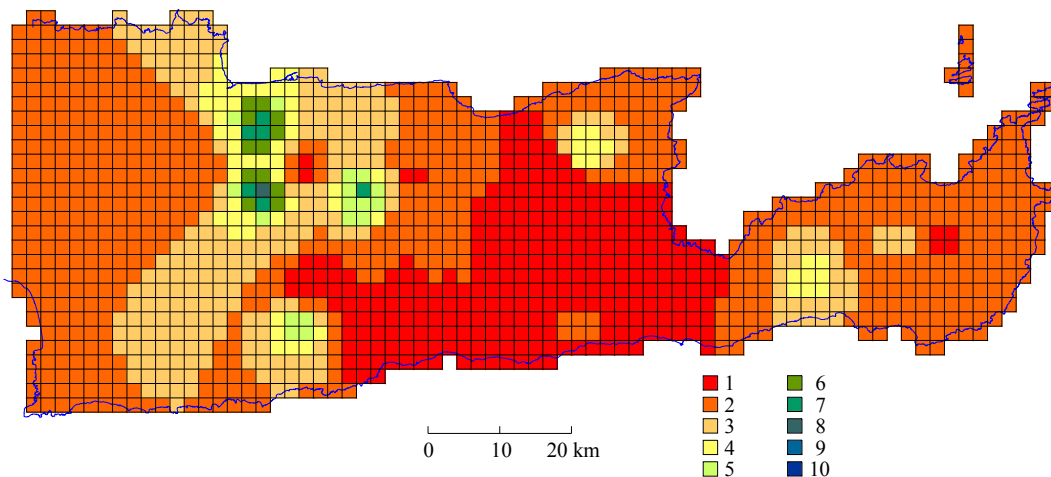


Σχήμα 5.10. Χάρτης χωρικού RDI για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1965-1966.

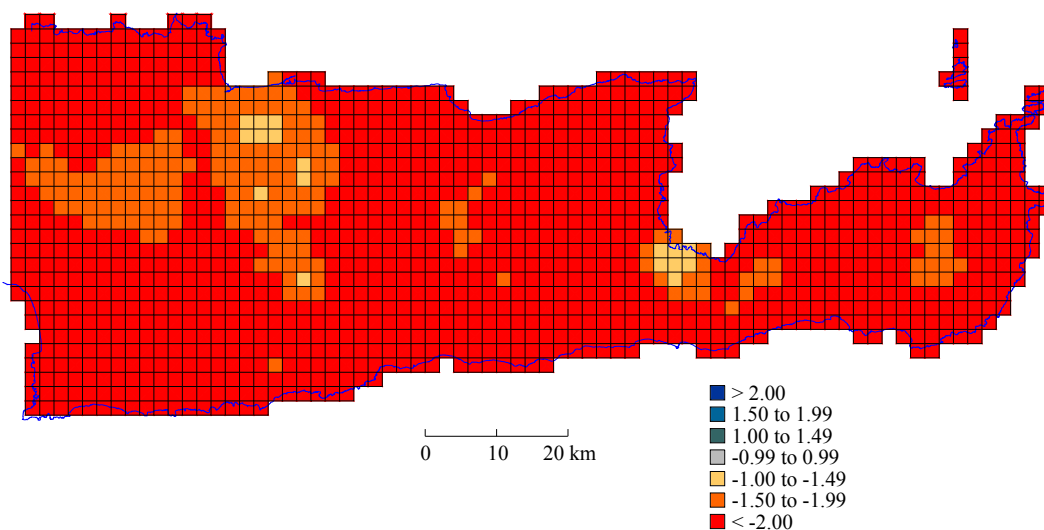


Σχήμα 5.11. Χάρτης χωρικού SPI για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1965-1966.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί η διαφοροποίηση του RDI σε σχέση με άλλους δείκτες ως προς τη χωρική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση σε μια χρονοσειρά 30 ετών που απεικονίστηκε σε χάρτες είναι αυτή του έτους 1965-1966 κατά το οποίο παρουσιάστηκε μέτρια ξηρασία. Η διαφορά στη χωρική απεικόνιση ανάμεσα στο δείκτη RDI (Σχήμα 5.10) και στον SPI (Σχήμα 5.11) μπορεί να χαρακτηριστεί σημαντική για τη συγκεκριμένη χρονιά, ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι τέτοια διαφορά δεν εμφανίζεται συνήθως. Σημαντική διαφορά παρουσιάζεται επίσης και στη χωρική κατανομή της ξηρασίας σε σχέση με τον δείκτη Deciles (Σχήμα 5.12). Οι χάρτες χωρικής κατανομής της ξηρασίας για ολόκληρη τη χρονοσειρά των 30 ετών που εξετάστηκε παρουσιάζονται στο Παράρτημα II αυτού του τόμου. Τέλος στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται ο χάρτης χωρικής κατανομής του δείκτη RDI για το πιο ακραία ξηρό έτος (1989-1990) της χρονοσειράς που εξετάστηκε.



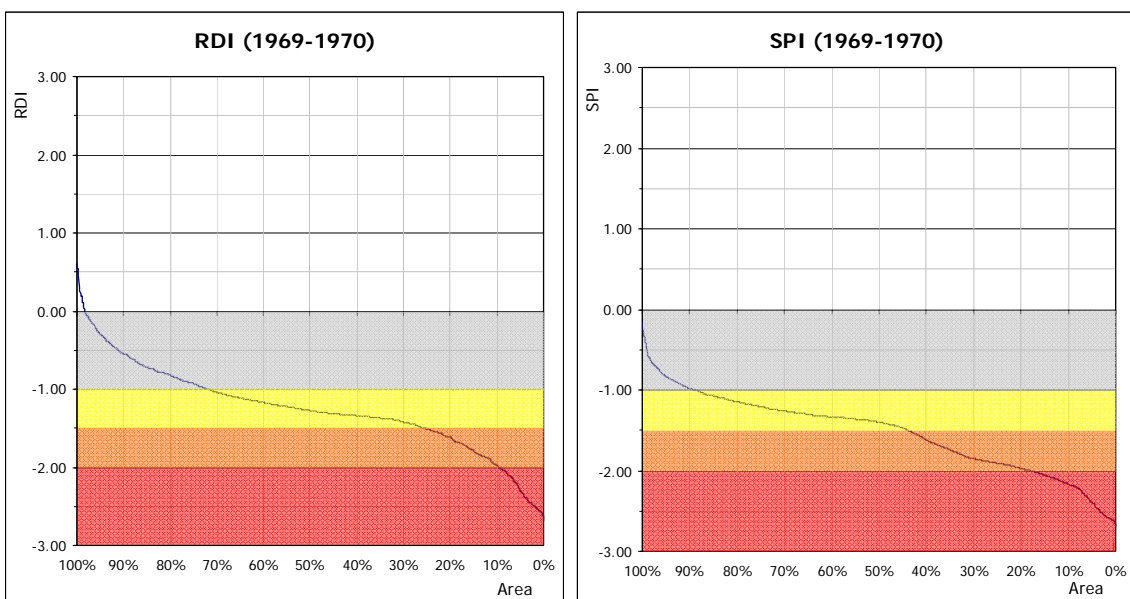
Σχήμα 5.12. Χάρτης χωρικού Deciles για το σχετικά ξηρό υδρολογικό έτος 1965-1966.



Σχήμα 5.13. Χάρτης χωρικού RDI για το ακραία ξηρό υδρολογικό έτος 1989-1990.

Ένας εναλλακτικός τρόπος απεικόνισης της χωρικής έκτασης της ξηρασίας, που πρακτικά παράγεται από τα δεδομένα των χαρτών, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση καμπυλών που είναι γνωστές ως «αθροιστικές καμπύλες» (cumulative 'or more' curves [ogives]). Οι καμπύλες αυτές μπορούν να παραχθούν με τη γραφική αναπαράσταση της έντασης της ξηρασίας (άξονας y) προς το αθροιστικό ποσοστό της πληγείσας περιοχής (άξονας x), που υφίσταται το επίπεδο έντασης της ξηρασίας στο οποίο αντιστοιχεί. Η ένταση της ξηρασίας παρουσιάζεται με βάση την τιμή του δείκτη ξηρασίας (RDI και για λόγους σύγκρισης του SPI), ενώ το ποσοστό της περιοχής καθορίζεται ανάλογα με την επιφάνεια που επηρεάζεται από την ξηρασία κάθε διαφορετικού επιπέδου έντασης. Αυτού του είδους τα διαγράμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για το χαρακτηρισμό της ξηρασίας και τον προσδιορισμό της χωρικής της έκτασης, αλλά και για την άμεση σύγκριση με το ποσοστό «κρίσιμης περιοχής» (σε σχέση πάντα με την ένταση της ξηρασίας). Προφανώς, τα επίπεδα της έντασης της ξηρασίας μπορούν να καθοριστούν μέσα από επιλεγμένα «κατώφλια» του ποσοστού κρίσιμης περιοχής. Για παράδειγμα, ένα γεγονός της ξηρασίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως επιπέδου «σημαντικής» ξηρασίας για μια περιοχή, εάν πάνω από το 50% της περιοχής πλήττεται από ξηρασία και πάνω από το 30% πλήττεται από «σημαντική» ξηρασία (Tsakiris et al., 2007).

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η αθροιστική καμπύλη με βάση τους δείκτες RDI και SPI αντίστοιχα, για το υδρολογικό έτος 1969-1970 που αντιστοιχεί στο χάρτη χωρικής κατανομής της ξηρασίας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8.

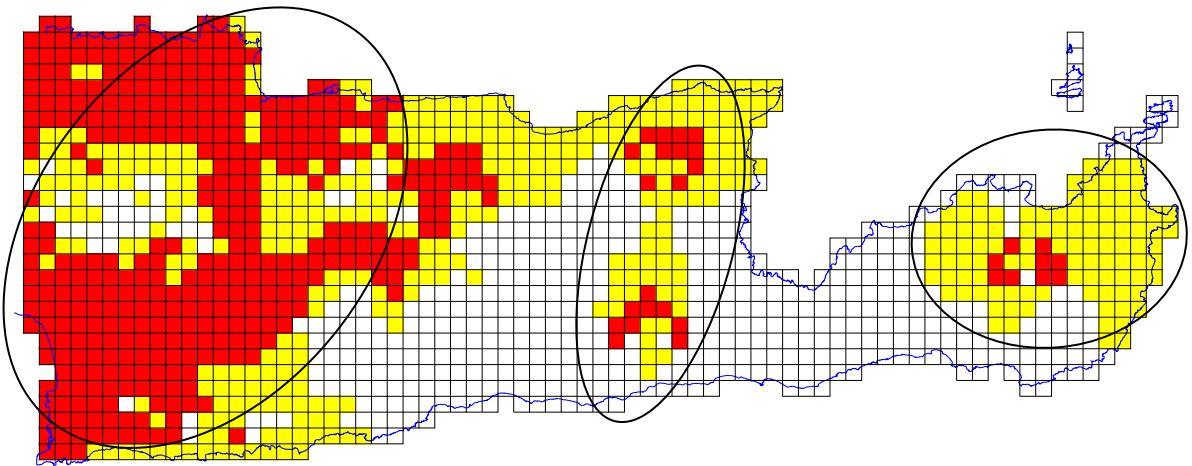


Σχήμα 5.14. Αθροιστική καμπύλη για τους δείκτες RDI και SPI αντίστοιχα για το υδρολογικό έτος 1969-1970.

Οι καμπύλες δείχνουν ότι σύμφωνα με τον RDI το 10% της περιοχής πλήττεται από ακραία ξηρασία, το 26% από σημαντική ξηρασία, ενώ το 72% από μέτρια ξηρασία. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τον SPI είναι 19%, 44% και 89%.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι οι αθροιστικές καμπύλες παρουσιάζουν τη χωρική έκταση της ξηρασίας με τρόπο βολικό για την απευθείας εκτίμηση της «κρίσιμης περιοχής» ξηρασίας. Οι αθροιστικές καμπύλες για ολόκληρη τη χρονοσειρά των 30 ετών που εξετάστηκε παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι.

Τέλος, μια σημαντική εφαρμογή της χωρικής ανάλυσης της ξηρασίας είναι η παραγωγή χαρτών που παρουσιάζουν τις επιρρεπείς στην ξηρασία περιοχές (drought prone areas). Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται ο χάρτης επιρρεπών περιοχών ξηρασίας που παράγεται με τη χρήση του RDI.

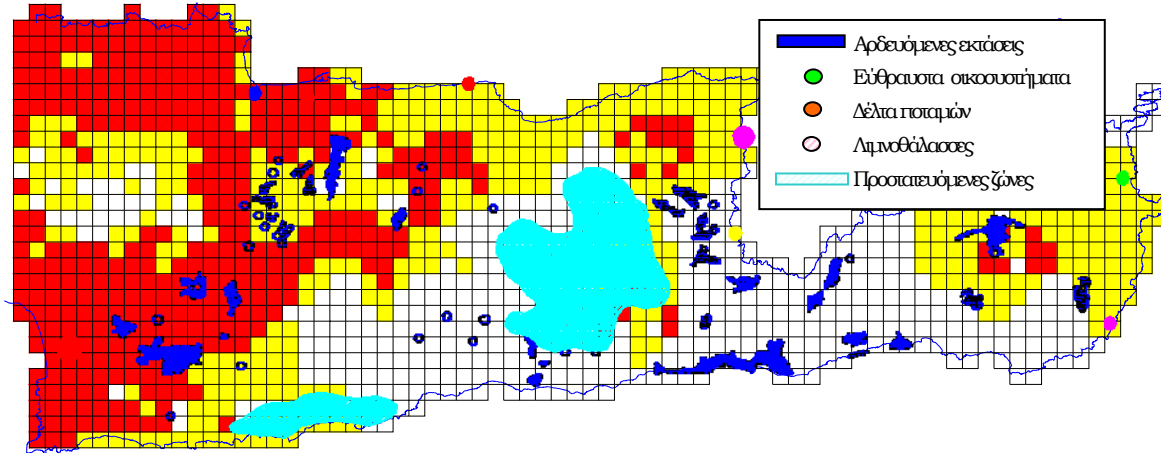


Σχήμα 5.15. Επιρρεπείς στην ξηρασία περιοχές με βάση τον RDI (επίπεδο 1: κίτρινο χρώμα, επίπεδο 2: κόκκινο χρώμα).

Η εκτίμηση των επιρρεπών στην ξηρασία περιοχών πραγματοποιείται με τη διερεύνηση των γεγονότων ξηρασίας που εμφανίζονται σε μια περιοχή. Ως μονάδα επιφάνειας λαμβάνεται το κελί (τετράγωνο) του κανάβου επιφάνειας 4 km<sup>2</sup>. Για την οριοθέτηση των επιπέδων επιρρέπειας έχουν τεθεί δύο κατώφλια που αντιπροσωπεύουν το 15% και 20% των ξηρών ετών ως προς το συνολικό αριθμό ετών και αντιστοιχούν στα επίπεδα 1 και 2 αντίστοιχα (Tsakiris et al., 2005).

Μια καλύτερη εικόνα για τη σημασία που έχει η αναγνώριση των επιρρεπών στη ξηρασία περιοχών δίνεται από το Σχήμα 5.16, στο οποίο παρουσιάζονται περιοχές συγκεκριμένου ενδιαφέροντος (όπως αρδευόμενες εκτάσεις, περιοχές οικολογικού ενδιαφέροντος, προστατευόμενες ζώνες, κλπ) που περιέχονται στις

επιρρεπείς προς την ξηρασία περιοχές.



Σχήμα 5.16. Πολυεπίπεδος χάρτης επιρρεπών περιοχών ξηρασίας που περιλαμβάνει αρδευόμενες περιοχές και περιοχές οικολογικού ενδιαφέροντος.

## 5.9 Αναφορές κεφαλαίου

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1st Ed., Rome, Italy.

Bras R.L. and Rodriguez-Iturbe I., 1976. Network design for the estimation of area mean of rainfall events. *Water Resources Research*, 12(6): 1185-1195.

Collins F.C. and Bolstad P.V., 1996. A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. NCGIA Third International Conference/Workshop on Integrated GIS and Environmental Modelling.

Doorenbos J. and Pruitt W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd Ed., Rome, Italy.

Hargreaves G.H. and Samani Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.

Hartkamp A.D., De Beurs K., Stein A. and White J.W., 1999. Interpolation Techniques for Climate Variables. NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F.: CIMMYT.

Hutchinson M.F. and Corbett J.D., 1995. Spatial interpolation of climate data using thin late smoothing splines. In Coordination and harmonization of databases and software for agroclimatic applications. Agroclimatology Working Paper Series, no. 13, Rome, FAO.

Jones D.A., Gourney R.J. and O'Connell P.E., 1979. Network design using

- optimal estimation procedures. *Water Resources Research*, 15(6): 1801-1812.
- Lebel T. and Le Barbe L., 1997. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel: 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales. *Journal of Hydrology*, 188-189: 97-122.
- Lebel T., Bastin G., Obled C. and Creutin J.D., 1987. On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study. *Water Resources Research*, 23(11): 2123-2138.
- Nalbantis I., Tsakiris G., La Loggia G., Noto L.V., Viola F., Iiritano G. and Caloiero T., 2006. Meteorological Monitoring Networks. In: G. La Loggia, L.V. Noto, F. Viola, G. Monacelli and T. Vega (Eds) Acquisition and Processing of hydrometeorological data for drought monitoring and management, Volume I: Design, organization and management of a hydrometeorological network under quality criteria, Project SEDEMED II, Palermo (Sicily), pp. 29-56.
- Ronchi C., Rabuffetti D., Saladin A., Vargiu A., Barbero S. and Pelosini R., 2007. In: G. Rossi, T. Vega and B. Bonaccorso (Eds.), Methods and tools for drought analysis and management, Springer (Water Science and Technology Library, Volume 62), Dordrecht 2007, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-5923-0, pp. 49-65.
- Rossi G., 1994. Role and Requisites of a Drought Watch System. In: Proceedings of Workshop on Climate Change and Hydrological Hazards in the Mediterranean Area, Colombella, Perugia, June 1994, pp. 95-102.
- Singh V.P. and Chowdhury P.K., 1986. Comparing some Methods of Estimating Mean Areal Rainfall. *Water Resources Bulletin*, 22(2): 275-282.
- Svoboda M., 2000. An Introduction to the Drought Monitor. *Drought Network News* (Newsletter of IDIC and NDMC), 12(1): 15-20.
- Thorntwaite C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Tsakiris G. and Vangelis H., 2004. Towards a drought Watch System based on Spatial SPI. *Water Resources Management*, 18(1): 1-12.
- Tsakiris G., Nalbantis I., Pangalou D., Tigkas D. and Vangelis H., 2008. Drought Meteorological Monitoring Network Design for the Reconnaissance Drought Index (RDI). In Proceedings of 1st International Conference “Drought Management: Scientific and Technological Innovations”, (Option Méditerranéennes, Series A, No. 80), Zaragoza – Spain, 14-16 June 2008, pp. 57-62.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H. and Pangalou D., 2005. Drought Identification: Spatial and Temporal Analysis. Case study in Crete. Technical Report of SEDEMED II project (Action 1.3), INTERREG IIIB – MEDOCC, Athens 2005.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H. and Pangalou D., 2007. Regional Drought

- Identification and Assessment. Case Study in Crete. In: G. Rossi, T. Vega and B. Bonaccorso (Eds.), *Methods and tools for drought analysis and management*, Springer (Water Science and Technology Library, Volume 62), Dordrecht 2007, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-5923-0, pp. 169-191.
- Viau A.A., and Vogt J.V., 2000. *Scale Issues in Drought Monitoring*". In J.V. Voght and F. Somma (eds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, The Netherlands, pp. 185-193.
- Vogt J.V., Niemeyer S., Somma F., Beaudin I. and Viau A.A., 2000. *Drought Monitoring from Space*. In J.V. Voght and F. Somma (eds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, The Netherlands, pp. 167-183.
- Wilhite D., 2009. *Drought Monitoring as a Component of Drought Preparedness Planning*. In: A. Iglesias, L. Garrote, A. Cancelliere, F. Cubillo and D. Wilhite (Eds.), *Coping with drought risk in Agriculture and Water Supply Systems, Drought Management and Policy Development in the Mediterranean*, Springer (Advances in Natural and Technological Hazards Research, Volume 26), Springer Science+Business Media B.V. 2009, ISBN: 978-1-4020-9044-8, pp.3-19.
- WMO, 2006. *Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. Weather and climate information for sustainable agricultural development*. World Meteorological Organization, ISBN 92-63-11006-9, WMO-No. 1006.





## κεφάλαιο 6

# Σχεδιασμός Αντιμετώπισης της Ξηρασίας

### 6.1 Γενικά περί σχεδιασμού

Ο Σχεδιασμός για την Αντιμετώπιση της ξηρασίας δεν έχει παρουσιάσει ιδιαίτερη πρόοδο στα περισσότερα μέρη του κόσμου. Η έλλειψη αυτή Σχεδιασμού οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη σύγχυση που υπάρχει στο επίπεδο της λήψης αποφάσεων, αλλά συχνά και στους επιστήμονες, σχετικά με την εμφάνιση και τα χαρακτηριστικά του φαινομένου. Όπως άλλωστε είναι γνωστό, η ξηρασία είναι ο πιο πολύπλοκος και λιγότερο κατανοητός φυσικός κίνδυνος, που επηρεάζει περισσότερο κόσμο από οποιαδήποτε άλλο ακραίο φαινόμενο.

Οι επιπτώσεις της ξηρασίας δεν είναι άμεσα αντιληπτές καθώς δεν επηρεάζουν ευθέως τις υποδομές μιας περιοχής και εξαπλώνονται σε μεγάλη χωρική έκταση σε σχέση με άλλους φυσικούς κινδύνους. Οι λόγοι αυτοί εμποδίζουν σε σημαντικό βαθμό την ακριβή, αξιόπιστη και έγκαιρη εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας και κατά συνέπεια την ανάπτυξη Σχεδίων Αντιμετώπισής της από τις κυβερνήσεις των περισσότερων χωρών. Πρέπει ωστόσο να γίνει κατανοητό ότι και οι επιπτώσεις της ξηρασίας, όπως και άλλων φυσικών κινδύνων, μπορούν να μειωθούν με σωστή προετοιμασία και κατάλληλα μέτρα ανακούφισης.

Οι περιοχές (και τα κράτη) που επιθυμούν να κάνουν πραγματικά βήματα προόδου προς τη μείωση των επιπτώσεων της ξηρασίας, πρέπει να βελτιώσουν το επίπεδο κατανόησης τους απέναντι στο συγκεκριμένο φυσικό κίνδυνο και να καταλάβουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την τρωτότητα (vulnerability) του

συστήματος που πλήττεται. Είναι σημαντικό, κυρίως για τις επιρροές στην ξηρασία περιοχές, να κατανοήσουν τις κλιματολογικές συνθήκες που συνδέονται με την ξηρασία και να εγκαταστήσουν ολοκληρωμένα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, που να ενσωματώνουν δείκτες για το κλίμα, το έδαφος και την διαθεσιμότητα νερού, όπως για παράδειγμα τη βροχόπτωση, τη θερμοκρασία, την εδαφική υγρασία, τη χιονόπτωση, τη στάθμη του νερού σε λίμνες, ταμιευτήρες και υπόγειους υδροφορείς, καθώς και την απορροή των υδατορευμάτων (Glinni et al., 2001).

Η αντιμετώπιση της ξηρασίας μπορεί να γίνει είτε με δράσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου, είτε με προληπτική προσέγγιση. Η προσέγγιση της ξηρασίας με δράσεις κατά τη διάρκεια του φαινομένου αποτελεί την παραδοσιακή πρακτική στην αντιμετώπιση της ξηρασίας, που στηρίζεται στη γενική τακτική της αντιμετώπισης κρίσεων. Η προσέγγιση αυτή έχει αποδειχθεί αναποτελεσματική, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι έγκαιρη, δεν είναι επαρκώς σχεδιασμένη και δεν στοχεύει στις περιοχές που πραγματικά πλήττονται από το φαινόμενο. Επιπλέον, η αντιμετώπιση της ξηρασίας με τον τρόπο αυτό τείνει να ενισχύσει τις υπάρχουσες μεθόδους διαχείρισης των υδατικών πόρων και όχι πραγματικά να αντιμετωπίσει τις συνέπειες του φαινομένου. Οι μέθοδοι αυτές διαχείρισης των πόρων είναι μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις υπεύθυνες για την αύξηση της τρωτότητας της κοινωνίας (societal vulnerability) απέναντι στην ξηρασία. Η δε παροχή βοήθειας για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της ξηρασίας χρησιμεύει μόνο για να ενισχύσει την κατεστημένη κατάσταση όσον αφορά στη διαχείριση των πόρων. Πολλές κυβερνήσεις και κέντρα λήψης αποφάσεων κατανοούν τώρα την πλάνη της διαχείρισης των κρίσεων και προσπαθούν να μάθουν πώς να χρησιμοποιούν κατάλληλες τεχνικές διαχείρισης της διακινδύνευσης (risk) για τη μείωση της κοινωνικής τρωτότητας απέναντι στην ξηρασία και κατά συνέπεια για τη μείωση των επιπτώσεων που σχετίζονται με γεγονότα ξηρασίας που αναμένονται στο μέλλον.

Καθώς η τρωτότητα απέναντι στην ξηρασία έχει αυξηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο, όλο και μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στη μείωση της διακινδύνευσης (risk) που σχετίζεται με την εμφάνιση της ξηρασίας μέσα από το Σχεδιασμό και τα μέτρα που στοχεύουν στη μείωση των επιπτώσεων της ξηρασίας. Η αλλαγή αυτή στη φιλοσοφία αντιμετώπισης του φυσικού κινδύνου έχει ήδη καθυστερήσει πολύ. Η διαχείριση της κρίσης δεν θεωρείται πλέον επαρκής για την αντιμετώπιση της ξηρασίας. Στο παρελθόν, όταν ένας φυσικός κίνδυνος και η επακόλουθη καταστροφή είχε συμβεί, οι κυβερνήσεις αντιδρούσαν με την εκτίμηση των επιπτώσεων και επεμβάσεις αποκατάστασης και ανασυγκρότησης με σκοπό να επανέλθει η περιφέρεια ή η περιοχή στην κατάσταση που

βρίσκονταν πριν την καταστροφή. Μικρή ήταν η προσοχή που δίνονταν σε δράσεις προετοιμασίας και πρόβλεψης (συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης) που θα μπορούσαν να μειώσουν τις μελλοντικές επιπτώσεις και να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για κυβερνητικές παρεμβάσεις στο μέλλον. Εξαιτίας της έμφασης που είχε δοθεί στη διαχείριση της κρίσης, η κοινωνία περνούσε ουσιαστικά από τη μία καταστροφή στην άλλη με μικρή αν όχι ανύπαρκτη μείωση της διακινδύνευσης.

Απαραίτητα εργαλεία κυρίως για τον Επιχειρησιακό Σχεδιασμό αντιμετώπισης της ξηρασίας αποτελούν: α) ένα απλοποιημένο σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας, β) ένα σύστημα πρόγνωσης (forecasting) για την εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας σε ετήσια βάση, γ) ένας ντετερμινιστικός μηχανισμός για την εκτίμηση των επιπτώσεων και δ) μια μεθοδολογία ιεράρχησης των προτεραιοτήτων ικανοποίησης της ζήτησης βασισμένη στην ετησιοποιημένη μέση διακινδύνευση.

Κύρια στοιχεία του Προληπτικού Σχεδιασμού για την αντιμετώπιση φαινομένων ξηρασίας είναι:

1. Το Σύστημα Παρακολούθησης της ξηρασίας.
2. Η υπολογιστική διαδικασία.
3. Το Σύστημα Πρόγνωσης (κύριο στοιχείο και για τον Επιχειρησιακό Σχεδιασμό).
4. Η Εκτίμηση των επιπτώσεων του φαινομένου (περιλαμβάνει την εκτίμηση επιπτώσεων για μεμονωμένα έτη ξηρασίας και παρατεταμένη ξηρασία με περισσότερα του ενός ξηρά έτη).
5. Οι δυνητικές επιλογές.
6. Η ιεράρχηση στην ικανοποίησης της ζήτησης.
7. Το θεσμικό και νομικό πλαίσιο.
8. Οι συμμετοχικές διαδικασίες και η ανάδραση.

Τα στοιχεία που κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί στο Σχεδιασμό για την αντιμετώπιση της ξηρασίας είναι πολλά, αφορούν όμως κυρίως στον Επιχειρησιακό Σχεδιασμό και στις προσεγγίσεις διαχείρισης των φαινομένων μετά την εμφάνισή τους. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα κύρια στοιχεία που θεωρούνται απαραίτητα για τον Προληπτικό Σχεδιασμό ομαδοποιημένα σε τρεις κύριους άξονες:

1. Σύστημα Προειδοποίησης: περιλαμβάνει το Σύστημα Παρακολούθησης της ξηρασίας, την απαιτούμενη υπολογιστική διαδικασία και το Σύστημα Πρόγνωσης.
2. Επιπτώσεις και Επιλογές: περιλαμβάνουν την Εκτίμηση των επιπτώσεων

του φαινομένου, τις δυνητικές επιλογές και την ιεράρχηση στην ικανοποίηση της ζήτησης.

3. Οργανωτική Διάσταση: περιλαμβάνει το θεσμικό και νομικό πλαίσιο και τις συμμετοχικές διαδικασίες.

Στην παρουσίαση των επί μέρους τμημάτων των τριών αυτών κύριων αξόνων περιλαμβάνονται καινοτόμες ιδέες που μπορούν να ενισχύσουν τις προληπτικές δράσεις στο μέλλον.

## 6.2 Σύστημα προειδοποίησης

### 6.2.1 Σύστημα Παρακολούθησης

Ο σχεδιασμός για την αντιμετώπιση της ξηρασίας δεν θα ήταν εφικτός χωρίς την ύπαρξη ενός Συστήματος Παρακολούθησης της ξηρασίας που τροφοδοτεί την οποιαδήποτε αντίδραση των αρμοδίων σε επιχειρησιακή φάση, αλλά και τις κατάλληλες επιλογές κατά τον Στρατηγικό Σχεδιασμό.

Καθώς το Σύστημα Παρακολούθησης αποτέλεσε την κεντρική εφαρμογή του νέου δείκτη ξηρασίας RDI, τα επί μέρους τμήματά του αναλύονται διεξοδικά σε προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της διατριβής.

### 6.2.2 Υπολογιστική διαδικασία

Ουσιαστικά πρόκειται για μια σειρά υπολογισμών που ξεκινούν από τις μετρηθείσες ποσότητες των μετεωρολογικών παραμέτρων και καταλήγουν σε όλα τα απαραίτητα μεγέθη που απαιτούνται για την υλοποίηση του προγράμματος πρόγνωσης.

Η υπολογιστική διαδικασία είναι απαραίτητη τόσο για την προετοιμασία του συστήματος πρόγνωσης όσο και για τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο.

Οι επιμέρους υπολογισμοί αναφέρονται κατά σειρά στα εξής:

- α) Επεξεργασία των συλλεχθέντων και συλλεγόμενων δεδομένων των μετεωρολογικών μεταβλητών.
- β) Υπολογισμός παραμέτρων για την εκτίμηση των δεικτών ξηρασίας (π.χ. υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής).
- γ) Υπολογισμός δεικτών ξηρασίας σε διάφορες περιόδους αναφοράς (3-μηνα, 6-μηνα, 9-μηνα, κλπ).
- δ) Υπολογισμός συχνότητας μετάβασης του δείκτη ξηρασίας RDI από τη μια στην άλλη περίοδο αναφοράς. (χρήση ιστορικής σειράς).

- ε) Υπολογισμός δείκτη ξηρασίας για το έτος με βάση την σε πραγματικό χρόνο γνώση της ξηρασίας σε μικρότερη χρονικά περίοδο αναφοράς. (εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο).
- στ) Συσχέτιση της κατάστασης ξηρασίας με τις επιπτώσεις.

### 6.2.3 Σύστημα πρόγνωσης

Με δεδομένο ένα δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών, θα παρουσιασθεί εδώ περιληπτικά το μέρος του συστήματος πρόγνωσης που αναφέρεται στη μετεωρολογική ξηρασία. Ως δείκτης ξηρασίας επιλέγεται ο RDI ενώ ως τελική εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας επιλέγεται η κατάσταση στο έτος. Είναι λογικό η περίοδος αναφοράς των 12 μηνών να αποτελεί την τελική εκτίμηση, γιατί συσχετίζεται ικανοποιητικά με τα μεγέθη της απορροής και εν γένει με τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα τέσσερις (4) κλάσεις σφοδρότητας της ξηρασίας μέσω του  $RDI_{st}$ : (1):  $> 0$ , (2):  $0$  έως  $-0.5$ , (3):  $-0.5$  έως  $-1.5$  και (4):  $< -1.5$ , που ισχύουν ανεξάρτητα από την περίοδο αναφοράς. Η κατάσταση ξηρασίας στο πρώτο τρίμηνο είναι:

$$S_i^{(3)} = \{ \text{κλάση } RDI_{st}^{(3)}(i) \} \quad i = 1 (1) 4 \quad (6.1)$$

όπου  $i$  είναι η αντίστοιχη κλάση σφοδρότητας της ξηρασίας (από 1 έως 4) και ο δείκτης (3) στον εκθέτη σημαίνει περίοδος αναφοράς 3 μήνες.

Αν είναι διαθέσιμη μια μεγάλη χρονοσειρά τιμών του  $RDI_{st}$  για το πρώτο τρίμηνο κάθε έτους και ολόκληρου του αντίστοιχου έτους μπορούν να υπολογισθούν οι συχνότητες μετάβασης από την κατάσταση του τριμήνου στην κατάσταση του έτους. Έτσι για παράδειγμα υπολογίζονται οι  $f_{1-1}$ ,  $f_{1-2}$ ,  $f_{1-3}$  και  $f_{1-4}$ , που αντιστοιχούν σε συχνότητες μετάβασης από την πρώτη κλάση του  $RDI_{st}$  για το τρίμηνο σε όλες τις δυνατές κλάσεις για το έτος.

Όμοια από την ιστορική χρονοσειρά υπολογίζονται και οι λοιπές συχνότητες μετάβασης. Συνολικά οι συχνότητες μετάβασης για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι:

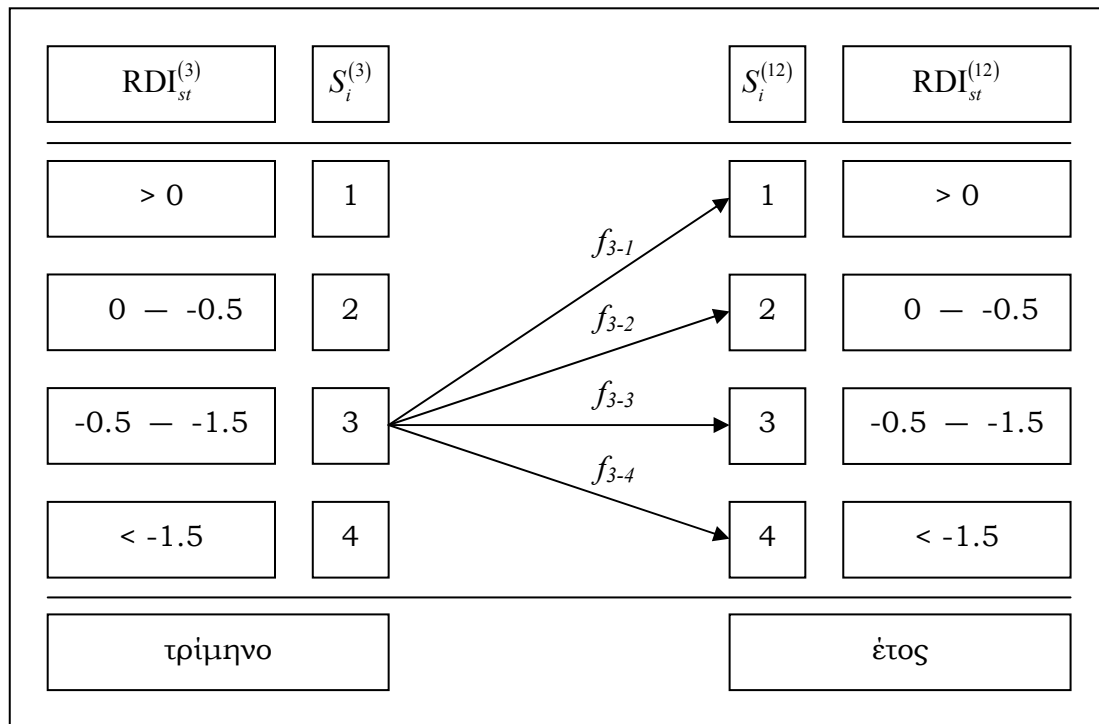
$$\left. \begin{array}{cccc} f_{1-1} & f_{1-2} & f_{1-3} & f_{1-4} \\ f_{2-1} & f_{2-2} & f_{2-3} & f_{2-4} \\ f_{3-1} & f_{3-2} & f_{3-3} & f_{3-4} \\ f_{4-1} & f_{4-2} & f_{4-3} & f_{4-4} \end{array} \right\} \quad (6.2)$$

Στο Σχήμα 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται σχηματικά οι συχνότητες

μετάβασης  $f_{3-1}$ ,  $f_{3-2}$ ,  $f_{3-3}$  και  $f_{3-4}$ . Είναι προφανές ότι:

$$\sum_{i=1}^4 f_{1-i} = \sum_{i=1}^4 f_{2-i} = \sum_{i=1}^4 f_{3-i} = \sum_{i=1}^4 f_{4-i} = 1 \quad (6.3)$$

Με βάση τις γνωστές από το ιστορικό δείγμα συχνότητες μετάβασης η Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της ξηρασίας (Drought Task Force) μπορεί να προγνώσει την κατάσταση της ξηρασίας του έτους από το πρώτο τρίμηνο με πιθανότητες που αντιστοιχούν στις συχνότητες μετάβασης.



Σχήμα 6.1. Οι συχνότητες μετάβασης της κατάστασης σφοδρότητας της ξηρασίας  $f_{3-1}$ ,  $f_{3-2}$ ,  $f_{3-3}$  και  $f_{3-4}$  από το πρώτο τρίμηνο στο έτος.

Αν για παράδειγμα η κατάσταση ξηρασίας του πρώτου τριμήνου του έτους που εξετάζουμε είναι  $S_3^{(3)}$  και οι συχνότητες μετάβασης (από την ιστορική σειρά) από την κατάσταση 3 του τριμήνου στο έτος είναι:

$$f_{3-1} = 0.05, f_{3-2} = 0.10, f_{3-3} = 0.50 \text{ και } f_{3-4} = 0.35$$

τότε η προσοχή της Ειδικής Επιτροπής Αντιμετώπισης της ξηρασίας πρέπει να εστιάσει στις μεγάλες πιθανότητες που είναι οι 0.50 και 0.35, που αντιστοιχούν σε κατάσταση σφοδρότητας ξηρασίας 3 και 4. Αυτή η πρόγνωση θα πρέπει να θέτει την Ειδική Επιτροπή σε κατάσταση επιφυλακής και συστηματικής προετοιμασίας.

Η πρόγνωση αυτή γίνεται με αβεβαιότητα λόγω της σημαντικά μεγάλης διαφοράς στη χρονική κλίμακα. Η πρόγνωση αυτή μπορεί να βελτιωθεί αν αντί

για 3-μηνο χρησιμοποιήσουμε το 6-μηνο. Στην περίπτωση αυτή, υπολογίζονται από τη διαθέσιμη χρονοσειρά των δεικτών  $RDI_{st}$  οι συχνότητες μετάβασης από το 6-μηνο στο έτος. Τέλος, ακόμη καλύτερη (σχεδόν βέβαιη) πρόβλεψη μπορεί να γίνει από το 9-μηνο στο έτος.

Όλες οι παραπάνω προγνώσεις μπορούν να χρησιμοποιούνται από την Ειδική Επιτροπή και καθώς από το 3-μηνο προχωρούμε στο 6-μηνο και μετά στο 9-μηνο οι προγνώσεις αυτές γίνονται όλο και περισσότερο αξιόπιστες, με την πιθανότητα να μετατρέπεται σταδιακά σε βεβαιότητα για την τελική κατάσταση ξηρασίας.

Η μέθοδος αυτή πρόγνωσης έχει το πλεονέκτημα της σταδιακής σύγκλισης, λόγω του ότι η αρχική κατάσταση κάθε φορά προκύπτει για αθροιστικό διάστημα που περιλαμβάνει την προηγούμενη κατάσταση. Έτσι, η εξάμηνη αρχική κατάσταση περιλαμβάνει την τριμήνη κατάσταση και ούτω καθεξής.

Προσπάθειες για τη στοχαστική εκτίμηση της κλάσης ξηρασίας μιας περιόδου με βάση την εκτίμηση της ξηρασίας στις προηγούμενες περιόδους με τη χρήση του δείκτη ξηρασίας SPI και των πιθανοτήτων μετάβασης έχει γίνει από τους Cancelliere et al. (2007). Όμως στην εργασία αυτή δεν ενσωματώθηκαν στην πρόγνωση οι προηγούμενες περίοδοι και δεν χρησιμοποιήθηκε ο RDI.

Στην περίπτωση που από την ιστορική χρονοσειρά δεν μπορούν να εξαχθούν αξιόπιστα οι συχνότητες μετάβασης, προτείνεται η παραγωγή μεγάλων συνθετικών χρονοσειρών μηνιαίων τιμών βροχοπτώσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τα γνωστά στοχαστικά μοντέλα. Από τις μεγάλες αυτές συνθετικές χρονοσειρές υπολογίζονται οι τιμές του  $RDI_{st}$  για 3, 6, 9 και 12 μήνες και επομένως μπορούν να υπολογισθούν όλες οι συχνότητες μετάβασης (από 3-μηνο στο έτος, από 6-μηνο στο έτος και από 9-μηνο στο έτος) που είναι απαραίτητες, από μεγάλο αριθμό δεδομένων.

Αν δεν ακολουθηθεί η παραπάνω μέθοδος παραγωγής συνθετικών δεδομένων και παραμείνουμε στην κατά περίπτωση διαθέσιμη χρονοσειρά, μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση των συχνοτήτων μετάβασης μπορεί να προέλθει με τη μείωση του αριθμού καταστάσεων σφοδρότητας της ξηρασίας (π.χ. από 4 σε 3). Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται ο αριθμός των γεγονότων από τα οποία θα προκύψουν οι συχνότητες μετάβασης.

Τελευταίο αλλά σημαντικό για την επιτυχή πρόγνωση της κατάστασης της ξηρασίας στο έτος είναι η Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της ξηρασίας να έχει επεξεργασθεί τη σχέση μεταξύ τελικής κατάστασης ξηρασίας για το έτος και των αντίστοιχων αναμενόμενων επιπτώσεων. Το ύψος αυτών των επιπτώσεων αποτελεί τη διακινδύνευση (risk) που οφείλεται στο αντίστοιχο επίπεδο σφοδρότητας της ξηρασίας. Η γνώση αυτής της σχέσης και της διακινδύνευσης, θα βοηθήσει στη

διαμόρφωση των μέτρων που πρέπει να λαμβάνονται κατά περίπτωση, ώστε να μειώνεται η διακινδύνευση σε επίπεδα ανεκτά από το φυσικό και κυρίως το ανθρωπογενές σύστημα.

### 6.3 Επιπτώσεις και επιλογές

Ο όρος «επιπτώσεις» αναφέρεται στις διάφορες συνέπειες μιας καταστροφής. Οι επιπτώσεις σχετίζονται συνήθως με την αδυναμία διαθεσιμότητας αγαθών και υπηρεσιών στο επιθυμητό επίπεδο. Η πιο συνηθισμένη κατηγοριοποίηση των επιπτώσεων είναι σε οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές, αν και τις περισσότερες φορές η διάκριση δεν είναι προφανής.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί, ότι οι επιπτώσεις μιας φυσικής καταστροφής στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν αποτελούν άμεσες συνέπειες του φαινομένου, καθώς πολλές άλλες δευτερεύουσες αιτίες είναι δυνατό να συμβάλλουν προς την παρατηρούμενη επίπτωση. Για παράδειγμα, η μείωση της στάθμης του νερού σε έναν ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος ξηρασίας είναι μια σαφής επίπτωση του φυσικού αυτού φαινομένου, μπορεί όμως επίσης να οφείλεται στην υπερκατανάλωση νερού κατά την περίοδο πριν την ξηρασία, που με τη σειρά της μπορεί να οφείλεται σε δημογραφικές (αστικοποίηση) και οικονομικές αλλαγές.

Αν και οι επιπτώσεις της ξηρασίας δεν είναι ξεκάθαρες αλλά ούτε και μπορούν όλες να καταγραφούν, επιχειρείται εδώ μια προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης των κυριότερων επιπτώσεων στις τρεις κατηγορίες που προαναφέρθηκαν (προσαρμογή από [Tsakiris et al., 2007](#); [Wilhite, 1993](#)).

#### (i) Οικονομικές επιπτώσεις:

- Αύξηση του κόστους παροχής νερού.
- Κόστος εξεύρεσης νέων πηγών νερού για την κάλυψη των αναγκών.
- Αύξηση του κόστους μεταφοράς νερού.
- Αύξηση των αντλούμενων υπόγειων ποσοτήτων νερού και υποβάθμιση του εδάφους.
- Μείωση της οικονομικής ανάπτυξης.
- Υποβάθμιση της αξίας της γης.
- Απώλειες εσόδων από τον τουριστικό τομέα και τις υπηρεσίες αναψυχής.
- Απώλειες εσόδων των κατασκευαστών και μεταπωλητών ειδών αναψυχής.
- Μείωση της αγροτικής παραγωγής.
- Αύξηση της ανεργίας λόγω της μείωσης της παραγωγής και των σχετιζόμενων με το νερό υπηρεσιών.
- Αύξηση της ζήτησης για ενέργεια.



- Αύξηση των τιμών των τροφίμων λόγω μείωσης της παραγωγής.
- Αύξηση του εισαγωγής τροφίμων.
- Διακοπτόμενη αστική παροχή νερού.
- Μείωση του κέρδους των υπηρεσιών παροχής νερού.
- Απώλειες εσόδων των κυβερνήσεων μέσω των φόρων λόγω μείωσης δραστηριοτήτων.

(ii) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:

- Προβλήματα σε είδη φυτών και ζώων.
- Υποβάθμιση υγροτόπων.
- Αύξηση του πλαγκτόν και της άλγης
- Πιέσεις στους πληθυσμούς των υπό εξαφάνιση οργανισμών.
- Αύξηση γεγονότων και σφοδρότητας πυρκαγιών.
- Διάβρωση των εδαφών.
- Υποβάθμιση των υπόγειων υδροφορέων (και λόγω της υπεράντλησης).
- Πτώση της στάθμης του νερού λιμνών και ταμιευτήρων.
- Ελάττωση της ροής από πηγές.
- Μεταβολές στις περιοχές εκβολής των ποταμών.
- Επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού (π.χ. αύξηση της αλατότητας, αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, pH, διαλυμένου οξυγόνου).
- Επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα (π.χ. σκόνη, ρύποι).
- Υποβάθμιση του τοπίου.

(iii) Κοινωνικές επιπτώσεις:

- Αύξηση των διενέξεων μεταξύ κοινωνικών ομάδων για την προτεραιότητα στη χρήση του νερού.
- Αύξηση των διενέξεων σε πολιτικό, διαχειριστικό, επιστημονικό επίπεδο.
- Ψυχολογική και σωματική πίεση (π.χ. ανησυχία, κατάθλιψη, αίσθηση απώλειας της ασφάλειας, κοινωνικές ταραχές)
- Προβλήματα υγείας λόγω χαμηλής παροχής νερού (π.χ. αύξηση των συγκεντρώσεων σε ρύπους).
- Μείωση της πρόσληψης θρεπτικών ουσιών (υψηλό κόστος τροφής, αλλαγή διατροφικών συνηθειών εξαιτίας του στρες).
- Απειλές για τη δημόσια ασφάλεια λόγω δασικών πυρκαγιών.
- Αυξημένος κίνδυνος απωλειών ανθρώπινων ζώων.
- Εκ νέου ιεράρχηση κοινωνικών αξιών (προτεραιότητες, δικαιώματα, κλπ).
- Αναδιάρθρωση των πολιτιστικών πεποιθήσεων (θρησκευτικές και επιστημονικές απόψεις για τη φυσική καταστροφή).
- Μείωση ή αλλαγή στις δραστηριότητες αναψυχής.

- Δυσαρέσκεια του κοινού απέναντι στις ηγεσίες και κοινωνικές αναταραχές.
- Απώλεια πολιτιστικών και αισθητικών αξιών.
- Μείωση της ποιότητας ζωής και αλλαγή των καθημερινών συνηθειών.
- Εξάπλωση της φτώχειας και της μετανάστευσης.

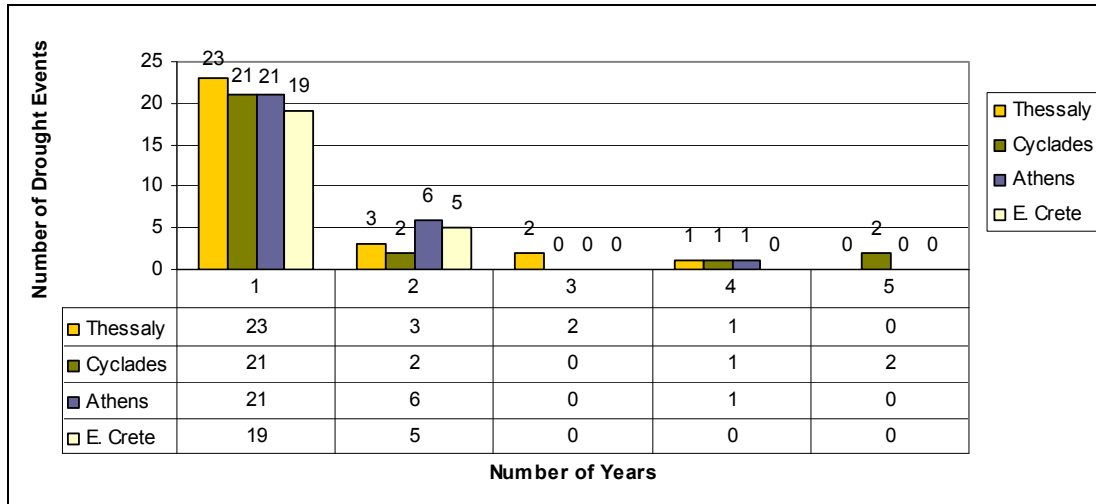
### 6.3.1 Εκτίμηση των επιπτώσεων

Η εκτίμηση της ξηρασίας γίνεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, με βάση προκαθορισμένες περιόδους αναφοράς. Πολλές φορές ωστόσο ένα γεγονός ξηρασίας που επηρεάζει μια λεκάνη απορροής ενός ποταμού (ή μια οποιαδήποτε περιοχή) μπορεί να συνεχίζεται με κυμαινόμενη ένταση για περισσότερο από ένα χρόνο. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν καταγραφεί αρκετά γεγονότα ξηρασίας που διαρκούν για αρκετά χρόνια με αυξανόμενη συχνότητα.

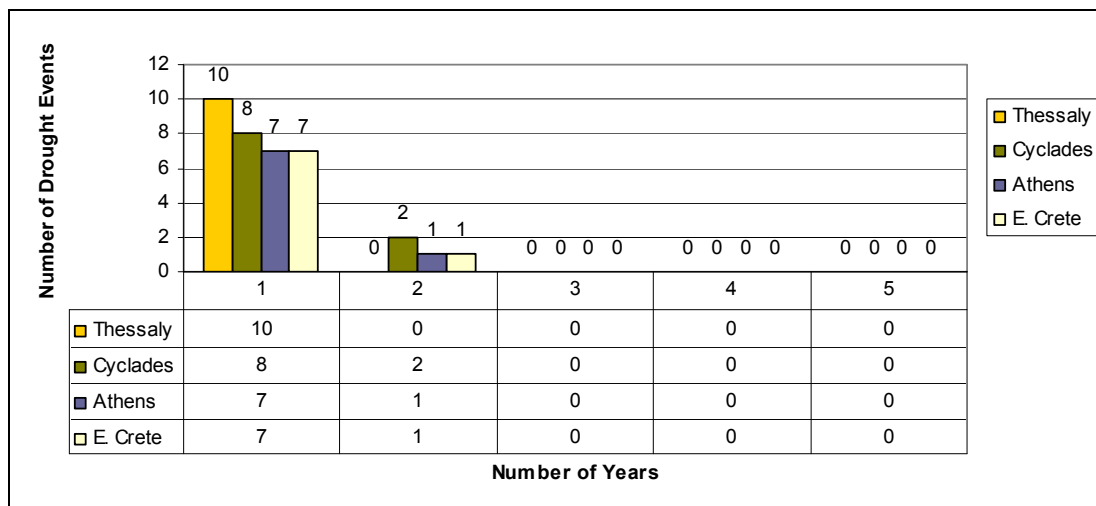
Είναι προφανές ότι οι συνέπειες μιας ετήσιας ξηρασίας είναι διαφορετικές από αυτές μιας παρατεταμένης ξηρασίας. Σε γενικές γραμμές οι επιπτώσεις μιας πολυετούς ξηρασίας είναι πολύ πιο σημαντικές συγκρινόμενες με το άθροισμα των επιπτώσεων (ίσου αριθμού ετών) μη συνεχόμενων ετήσιων γεγονότων της ίδιας σφοδρότητας. Οι επιπτώσεις μιας πολυετούς ξηρασίας εξαρτώνται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του συστήματος και την τρωτότητά του (vulnerability). Ένα σύστημα με πιο ισχυρή ικανότητα ανάκαμψης, καλά προετοιμασμένο και με ανθρώπους εκπαιδευμένους που ανταποκρίνεται στις ανάγκες που προκύπτουν, αναμένεται να αντέξει στην πίεση που δημιουργείται από μια πολυετή ξηρασία με μεγαλύτερη επιτυχία από ένα λιγότερο προετοιμασμένο και πιο ευάλωτο σύστημα (Tsakiris et al., 2010).

Από την ανάλυση των συνθηκών ξηρασίας τεσσάρων περιοχών της Ελλάδας (Θεσσαλία, Κυκλάδες, Αθήνα και Ανατολική Κρήτη) για την περίοδο 1955-2002, καταγράφονται τα γεγονότα ξηρασίας μεμονωμένων ετών και πολυετούς ξηρασίας, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.2 και 6.3. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τα γεγονότα ξηρασίας ανεξάρτητα από το επίπεδο έντασης της ξηρασίας, ενώ στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται τα γεγονότα σημαντικής και ακραίας ξηρασίας.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.3, τα σημαντικά και ακραία γεγονότα ξηρασίας που συμβαίνουν για δύο συνεχόμενα χρόνια είναι πολύ σπάνια φαινόμενα. Επίσης, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι δεν παρουσιάζονται πολυετή φαινόμενα σημαντικής και ακραίας ξηρασίας με διάρκεια μεγαλύτερη των δύο συνεχόμενων ετών. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των Σχημάτων 6.2 και 6.3 αναφέρονται σε επίπεδα ξηρασίας όπως αυτά προτάθηκαν για το δείκτη RDI.



Σχήμα 6.2. Ετήσια και πολυετή γεγονότα ξηρασίας κατά την περίοδο 1995-2001 (1: ετήσια ξηρασία, 2: διετής ξηρασία, 3: τριετής ξηρασία, 4: τετραετής ξηρασία και 5: πενταετής ξηρασία).



Σχήμα 6.3. Ετήσια και πολυετή γεγονότα σημαντικής και ακραίας ξηρασίας κατά την περίοδο 1955-2002.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων μιας πολυετούς ξηρασίας σε ένα συγκεκριμένο υδατικό σύστημα, απαιτείται σε βάθος ανάλυση όλων των στοιχείων του συστήματος για διάφορες εντάσεις της ξηρασίας για ένα ή περισσότερα συνεχόμενα έτη. Για τα περισσότερα υδατικά συστήματα αυτού του είδους η πληροφορία είναι σπάνια διαθέσιμη. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να καταλήξουμε σε πρακτικά αποτελέσματα, εμπειρικές συναρτήσεις απωλειών (loss functions) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε χρόνο. Το άθροισμά τους για μια σειρά ετών (πολυετής ξηρασία) μπορεί να θεωρηθεί αθροιστικής (additive) ή πολλαπλασιαστικής (multiplicative) μορφής.

Για μια σειρά από περιπτώσεις που εξετάστηκαν με ανεπαρκή και διάσπαρτα δεδομένα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση της πολυετούς

ξηρασίας η συγκεντρωτική συνάρτηση απωλειών είναι πολλαπλασιαστικού και όχι αθροιστικού τύπου.

Χρησιμοποιώντας την αρχική έκφραση του RDI για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, η συνάρτηση απόκρισης (response function) μπορεί να προσεγγιστεί από μια λογιστική συνάρτηση ή μια εκθετική συνάρτηση (power function). Για λόγους απλοποίησης, η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στην απλούστερη μορφή συνάρτησης, που είναι η εκθετική.

Έστω η συνάρτηση:

$$Y = (a_{12})^\lambda \quad (6.4)$$

- όπου:  $Y$  είναι η συνάρτηση απόκρισης του έτους ( $Y \leq 1$ )  
 $a_{12}$  είναι η αρχική έκφραση του RDI για περίοδο 12 μηνών του υδρολογικού έτους (συνήθως Οκτώβριος – Σεπτέμβριος)  
 $\lambda$  είναι ο δείκτης ευαισθησίας του συστήματος που επηρεάζεται από την ξηρασία.

Για  $\lambda = 1$  η συνάρτηση απόκρισης  $Y$  είναι γραμμική. Για τιμές του  $\lambda > 1$  η συνάρτηση είναι κοίλη (concave) ενώ για τιμές του  $\lambda < 1$  η συνάρτηση είναι κυρτή (convex) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.4. Κατά συνέπεια, εάν το σύστημα είναι ισχυρό και καλά προετοιμασμένο, το  $\lambda$  πρέπει να είναι μικρότερο του 1, ενώ για ένα πιο ευάλωτο σύστημα το  $\lambda$  θα πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο του 1. Για λόγους απλοποίησης, ο δείκτης ευαισθησίας  $\lambda$  μπορεί να θεωρηθεί σταθερός για ένα συγκεκριμένο σύστημα καθ' όλη την εξεταζόμενη περίοδο.

Σύμφωνα με την πολλαπλασιαστική αρχή (multiplicative principle) για  $n$  συνεχή έτη η απόκριση στο έτος  $n$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Y_n^* = \prod_{i=1}^n Y_i \quad i = 1(1)n \quad (6.5)$$

όπου η απόκριση  $Y_n^*$  εφαρμόζεται στο τελευταίο έτος της περιόδου ξηρασίας και το  $Y_i$  αναφέρεται στην απόκριση μιας μονοετούς ξηρασίας στο έτος  $i$ .

Αν η αξία ενός τμήματος του συστήματος που πλήττεται από ξηρασία είναι  $A$  και είναι σταθερή σε όλα τα χρόνια διάρκειας του φαινομένου της ξηρασίας, οι επιπτώσεις είναι:

$$L_k = A \cdot \left( 1 - \prod_{i=1}^k Y_i \right) \quad (\text{για το έτος } k) \quad (6.6)$$

και

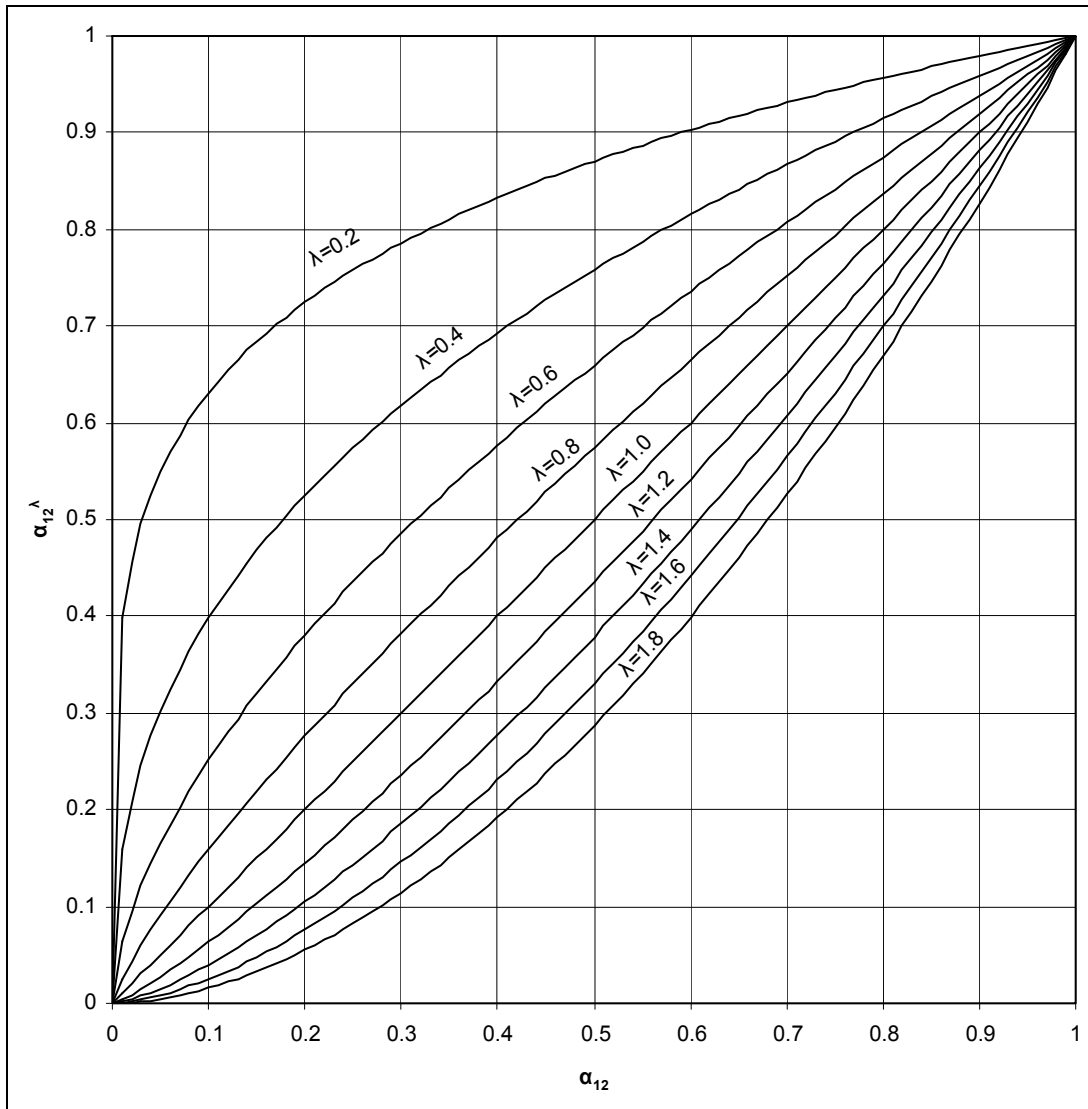
$$L_n = A \cdot \left( 1 - \prod_{i=1}^n Y_i \right) \quad (\text{για το τελευταίο έτος}) \quad (6.7)$$

Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία  $Y_1 = Y_2 = Y_3 = \dots = Y_n = Y$ , που πρακτικά σημαίνει ότι η σφοδρότητα της ξηρασίας παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της πολυετούς ξηρασίας, η εξίσωση 6.5 μπορεί να γραφεί:

$$Y_n^* = Y^n \quad (6.8)$$

και οι επιπτώσεις κάθε έτους της πολυετούς ξηρασίας εκτιμώνται:

$$L_k = A \cdot (1 - Y^k) \quad \text{για } k = 1(1)n \text{ και } k \geq 1 \quad (6.9)$$



Σχήμα 6.4. Διάφορες μορφές της συνάρτησης απόκρισης εκθετικής μορφής.

Για να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε, ας θεωρήσουμε ένα υδατικό σύστημα με δείκτη ευαισθησίας  $\lambda = 0.25$ , που πλήττεται από ένα τριετές γεγονός ξηρασίας μέσης ετήσιας σφοδρότητας που αντιπροσωπεύεται από την τιμή  $a_{12} = 0.70$  της αρχικής μορφής του RDI. Τότε, για κάθε ένα από τα τρία χρόνια, οι αναμενόμενες επιπτώσεις μετρημένες σε οικονομικές απώλειες υπολογίζονται ως ακολούθως, λαμβανομένου υπόψη ότι η αξία του διακυβεύματος είναι ένα εκατομμύριο ευρώ (1 Μ€).

Απώλειες πρώτου χρόνου:

$$L_1 = A \cdot (1 - Y_1) = 1 \text{ Μ€} \cdot (1 - 0.70^{0.25}) = 1 \cdot (1 - 0.91) = 0.085 \text{ Μ€}$$

Απώλειες δεύτερου χρόνου:

$$L_2 = A \cdot (1 - Y_1 Y_2) = 1 \cdot (1 - 0.837) = 0.163 \text{ Μ€}$$

Απώλειες τρίτου χρόνου:

$$L_3 = A \cdot (1 - Y_1 Y_2 Y_3) = 1 \cdot (1 - 0.765) = 0.235 \text{ Μ€}$$

Όπως είναι φανερό από το αριθμητικό παράδειγμα, αν και η σφοδρότητα της ξηρασίας είναι η ίδια και για τα τρία χρόνια της ξηρασίας, οι επιπτώσεις είναι αισθητά αυξανόμενες από το πρώτο προς το τελευταίο έτος του πολυετούς γεγονότος ξηρασίας (στο παράδειγμα αυτό προφανώς  $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y$ ).

Θα είχε ενδιαφέρον να εξαχθούν οι αθροιστικές απώλειες για ολόκληρη τη διάρκεια της περιόδου της πολυετούς ξηρασίας. Ας θεωρήσουμε την τριετή ξηρασία του προηγούμενου παραδείγματος. Τότε:

$$L_{total} = L_1 + L_2 + L_3 = A \cdot (1 - Y_1) + A \cdot (1 - Y_1 Y_2) + A \cdot (1 - Y_1 Y_2 Y_3) = A \cdot [3 - a_{12,1}^\lambda - a_{12,1}^\lambda \times a_{12,2}^\lambda - a_{12,1}^\lambda \times a_{12,2}^\lambda \times a_{12,3}^\lambda] \quad (6.10)$$

Αν η σφοδρότητα της ξηρασίας θεωρηθεί ομοιόμορφη καθ' όλη τη διάρκεια των τριών ετών της ξηρασίας, η εξίσωση 6.10 γίνεται:

$$L_{total} = A \cdot [3 - a^\lambda - a^{2\lambda} - a^{3\lambda}] \quad (6.11)$$

Προφανώς στη γενική περίπτωση των  $n$  ετών ξηρασίας, η εξίσωση γίνεται:

$$L_{total} = A \cdot [n - a^\lambda - a^{2\lambda} - \dots - a^{n\lambda}] \quad (6.12)$$

Θεωρώντας τα δεδομένα του προηγούμενου παραδείγματος ( $a_{12} = 0.70$ ,  $\lambda = 0.25$ ,  $A = 1 \text{ Μ€}$ ), οι αθροιστικές απώλειες για τη συνολική περίοδο της τριετούς ξηρασίας υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση 6.11 σε 0.483 Μ€. Όπως αναμενόταν η τιμή αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αθροιστική τιμή των απωλειών για τα τρία ανεξάρτητα ετήσια γεγονότα ξηρασίας,

που υπολογίσθηκε σε 0.255 M€.

Με βάση τους προηγούμενους υπολογισμούς και τις συνηθέστερες τιμές των  $\lambda$  και  $a_{12}$ , γίνεται σαφές ότι για μια πολυετή ξηρασία η τρωτότητα αυξάνεται με την αύξηση των χρόνων της πολυετούς ξηρασίας. Σχετικά με την κατανομή της σφοδρότητας της ξηρασίας, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι επιπτώσεις είναι μεγαλύτερες αν η σφοδρότητα της ξηρασίας είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια των πρώτων χρόνων της πολυετούς ξηρασίας και ηπιότερη κατά τα χρόνια που ακολουθούν, συγκρινόμενες με την αντίθετη περίπτωση, στην οποία η ξηρασία είναι ήπια κατά τα πρώτα χρόνια και ακολουθείται από σφοδρή ξηρασία κατά τα τελευταία χρόνια της συνολικής περιόδου.

Το τελευταίο βήμα στην πολυετή ξηρασία αφορά στον υπολογισμό του δείκτη ευαισθησίας  $\lambda$ , ο οποίος είναι συμβατός με τα αποτελέσματα που παράγονται για την πολυετή ξηρασία. Η ενέργεια αυτή είναι δύσκολη και εξαρτάται κυρίως από την πολυπλοκότητα του συστήματος που αναλύεται. Για απλά συστήματα, ένας εμπειρικός κανόνας είναι να μελετηθούν οι συνέπειες δύο ή τριών πολυετών γεγονότων ξηρασίας από την πρόσφατη ιστορική χρονοσειρά και να εκτιμηθεί ένας μέσος δείκτης  $\lambda$  μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης δοκιμής και απόρριψης (trial and error). Μια πιο πολύπλοκη προσέγγιση ακολουθείται αν ο δείκτης  $\lambda$  δεν είναι σταθερός και μεταβάλλεται από χρόνο σε χρόνο καθώς η παρατεταμένη ξηρασία εξελίσσεται. Ακόμη και σ' αυτή την περίπτωση η διαδικασία μπορεί να απλοποιηθεί υιοθετώντας μια γραμμική αύξηση του  $\lambda$  σε σχέση με τα χρόνια από την έναρξη της ξηρασίας. Παρόλα αυτά, πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι αυτού του είδους οι απλοποιήσεις εισάγονται με σκοπό τη διατύπωση διαδικασιών που μπορούν να καταλήγουν σε πρακτικά αποτελέσματα. Στην περίπτωση πολύπλοκων (μεικτών) συστημάτων προτείνεται η ανάλυση του συστήματος σε σχετικά ανεξάρτητα υπο-συστήματα.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να γίνει πιο κατανοητή με τη χρήση του παρακάτω αριθμητικού παραδείγματος για ένα απλό σύστημα που πλήττεται από μια τριετή ξηρασία. Η αρχική έκφραση του RDI για κάθε ένα από τα τρία χρόνια είναι  $a_{12} = 0.80, 0.90$  και  $0.70$ , αντίστοιχα. Η ετήσια απορροή του ποταμού μειώνεται στο 75%, 65% και 40% της μέσης ετήσιας απορροής για τα τρία χρόνια ξηρασίας, αντίστοιχα. Η εκτίμηση του δείκτη  $\lambda$  του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, αν ο δείκτης  $\lambda$  θεωρηθεί σταθερός, έχουμε:

$$0.80^\lambda = 0.75 \Rightarrow \lambda = 1.29$$

$$0.80^\lambda \cdot 0.90^\lambda = 0.65 \Rightarrow \lambda = 1.31$$

$$0.80^\lambda \cdot 0.90^\lambda \cdot 0.70^\lambda = 0.40 \Rightarrow \lambda = 1.34$$

Επομένως ένα μέσο  $\lambda$  που μπορεί να επιλεγεί είναι:  $\bar{\lambda} = (1.29 + 1.31 + 1.34) / 3 = 1.31$ .

Μια δεύτερη προσέγγιση θα μπορούσε να κάνει αποδεκτή μια βαθμιαία αύξηση του  $\lambda$  της τάξης του 2% το χρόνο. Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε το  $\lambda = 1.29$  κατά τον πρώτο χρόνο,  $\lambda = 1.31$  κατά το δεύτερο χρόνο και  $\lambda = 1.33$  κατά τον τρίτο χρόνο. Επομένως, αντί της χρήσης μιας μοναδικής τιμής του  $\lambda = 1.31$ , αναμένεται μια μικρή αύξηση από χρόνο σε χρόνο (Tsakiris et al., 2009).

Αν η παραπάνω διαδικασία εφαρμοστεί για δύο ή τρία γεγονότα παρατεταμένης ξηρασίας, μπορούν να εκτιμηθούν κάποιες στρογγυλεμένες τιμές για χρήση σε μελλοντικά γεγονότα πολυετούς ξηρασίας.

### 6.3.2 Δυνητικές επιλογές

Αν και στις περισσότερες καταστάσεις που σχετίζονται με τις συνθήκες πίεσης στους υδατικούς πόρους, φαίνεται ότι έχει δημιουργηθεί αδιέξοδο, η σε βάθος μελέτη όλων των σχετικών μεταβλητών και προϋποθέσεων αποκαλύπτει ένα μεγάλο αριθμό επιλογών και ενεργειών που είναι διαθέσιμες για τον σχεδιασμό αντιμετώπισης και για τον μειριασμό των επιπτώσεων της ξηρασίας. Η ποικιλία των επιλογών, που στην πραγματικότητα όμως είναι εφαρμόσιμες κατά περίπτωση, είναι εξαρτώμενες σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του συστήματος που επηρεάζεται από την ξηρασία ή της λεκάνης απορροής, τις γεωγραφικές συντεταγμένες και τις οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Οι επιλογές μπορεί επίσης να διαφέρουν ανάλογα με το αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τον Στρατηγικό Σχεδιασμό, τη διαχείριση διακινδύνευσης λειψυδρίας ή για τη διαχείριση σε πραγματικό χρόνο (Επιχειρησιακός Σχεδιασμός).

Ένας ενδεικτικός κατάλογος με επιλογές και ενέργειες που είναι γενικά διαθέσιμες για την αντιμετώπιση της ξηρασίας (ή ευρύτερα της πίεσης των υδατικών πόρων) παρουσιάζεται παρακάτω (προσαρμογή από Tsakiris, 2008; Rossi et al., 2007). Οι επιλογές κατατάσσονται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες:

- α. Εκτίμηση σφοδρότητας της ξηρασίας - Ενημέρωση
- β. Μέτρα μείωσης της ζήτησης
- γ. Βελτιώσεις του συστήματος
- δ. Παροχή νερού έκτακτης ανάγκης

#### A. Εκτίμηση σφοδρότητας της ξηρασίας - Ενημέρωση

1. Συχνή ενημέρωση σχετικά με τη σφοδρότητα του γεγονότος ξηρασίας.



2. Συναντήσεις και δημόσιες συζητήσεις.
3. Δημιουργία Ειδικής Επιτροπής Αντιμετώπισης (Task Force).
4. Ανάλυση της ζήτησης και της αποδοτικότητας.
5. Προετοιμασία των επιλογών και των ευθυνών.
6. Στόχοι σε διάφορες χρήσεις.
7. Επίσημο αίτημα στην κεντρική κυβέρνηση και / ή την Ευρωπαϊκή Ένωση.
8. Προγραμματισμός των διακοπών των εργαζομένων.

B. Μέτρα μείωσης της ζήτησης

1. Δημόσιες εκστρατείες (καμπάνιες) ενημέρωσης για εθελοντική μείωση της ζήτησης από:
  - i. Αγρότες, βιομήχανους / βιοτέχνες, τουριστικούς πράκτορες, δημόσια
  - ii. Ανταπόδοση και κίνητρα
2. Δωρεάν διανομή ή/και εγκατάσταση ειδικών συσκευών εξοικονόμησης νερού:
  - i. Εκτεταμένη εγκατάσταση μετρητών νερού (σε όλους τους τύπους των συστημάτων)
  - ii. Ρυθμιστές ροής στα ντους
  - iii. Περιορισμός ροής στα ντους
  - iv. Περιοριστές ροής τουαλέτας (toilet dams)
  - v. Συσκευές εκτοπισμού (displacement)
  - vi. Βαλβίδες μείωσης πίεσης
3. Περιορισμοί σε μη βασικές χρήσεις:
  - i. Πλύσιμο οδοστρωμάτων
  - ii. Ξέπλυμα πεζοδρομίων
  - iii. Πλύσιμο αυτοκινήτων
  - iv. Πότισμα οικιακού γρασιδιού (γκαζόν)
  - v. Γέμισμα κολυμβητικών δεξαμενών
  - vi. Χρήση υδρόψυκτων κλιματιστικών, χωρίς επανακυκλοφορία του νερού
  - vii. Λειτουργία δημόσιων σιντριβανιών / βρυσών
  - viii. Άρδευση πάρκων
  - ix. Άρδευση γηπέδων γκολφ
  - x. Άρδευση των πολυετών και ανθεκτικών στην ξηρασία καλλιεργειών
4. Απαγόρευση επιλεγμένων εμπορικών και καθιερωμένων χρήσεων:
  - i. Πλυντηρίων αυτοκινήτων
  - ii. Χρήσης ντους σε δημόσια κτήρια
  - iii. Πότισμα μη σημαντικών φυτών

5. Τιμολόγηση έκτακτης ανάγκης (κατά το γεγονός ξηρασίας):
  - i. Χρέωση αρδευτικού νερού με βάση τον όγκο
  - ii. Τιμολόγιο Ξηρασίας (ειδική χρέωση για άρδευση)
  - iii. Προσαύξηση ξηρασίας επί του συνόλου των λογαριασμών ύδρευσης
  - iv. Χρέωση καλοκαιρινής χρήσης
  
6. Ορθολογικός προγραμματισμός
  - i. Κατανομή του αρδευτικού νερού ανά περιοχή και είδος καλλιέργειας
  - ii. Κατανομή νερού οικιακής χρήσης κατά κεφαλήν
  - iii. Κατανομή νερού οικιακής χρήσης ανά νοικοκυριό
  - iv. Κατανομή νερού οικιακής χρήσης πριν από την πραγματική χρήση
  - v. Ποσοστιαία μείωση των εμπορικών και καθιερωμένων χρήσεων
  - vi. Ποσοστιαία μείωση της βιομηχανικής χρήσης
  - vii. Πλήρες κλείσιμο των βιομηχανιών και εμπορικών επιχειρήσεων, με υψηλή χρήση νερού

#### Γ. Βελτιώσεις του συστήματος

1. Πρωτογενείς πηγές νερού
2. Μονάδα επεξεργασίας νερού
3. Δίκτυο διανομής:
  - i. Μείωση της πίεσης του συστήματος στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο
  - ii. Υλοποίηση ενός προγράμματος εντοπισμού διαρροών και επισκευών
  - iii. Διακοπτόμενη υδροληψία
4. Επιλογή επιθεώρησης μεμονωμένων νοικοκυριών για επισκευές

#### Δ. Παροχή νερού έκτακτης ανάγκης

1. Μεταφορές μεταξύ διαφορετικών χρήσεων
  - i. Αγορά των δικαιωμάτων του νερού για άρδευση
  - ii. Σχεδιαζόμενη ανακατανομή της άρδευσης για τις δημοτικές χρήσεις
  - iii. Εμπόριο νερού (water trading), τράπεζες νερού (water banks)
  
2. Μεταφορές μεταξύ διαφορετικών περιοχών
  - i. Διασυνδέσεις επείγουσας ανάγκης μεταξύ περιοχών
  - ii. Εισαγωγή νερού με φορτηγά
  - iii. Εισαγωγή νερού με βαγόνια τρένων
  
3. Εκτροπές πολλαπλού σκοπού
  - i. Μείωση της απελευθέρωσης νερού ταμιευτήρων για την παραγωγή

- υδροηλεκτρικής ενέργειας
  - ii. Μείωση της απελευθέρωσης νερού ταμιευτήρων για τον έλεγχο των πλημμύρων
  - iii. Εκτροπή νερού που διατίθεται για λόγους αναψυχής
  - iv. Μείωση των ελάχιστων απαιτήσεων οικολογικής παροχής ποταμών
- δ. Βοηθητικές πηγές έκτακτης ανάγκης
- i. Αξιοποίηση ανεκμετάλλευστων λιμνών, κολπίσκων και λατομείων
  - ii. Αξιοποίηση του νεκρού όγκου ταμιευτήρων
  - iii. Υφάλμυρες πηγές

### 6.3.3 Ορθολογική ιεράρχηση της ικανοποίησης της ζήτησης

Πέρα από τη γενική επιλογή των έργων και των μέτρων για την αντιμετώπιση της ξηρασίας και των επιπτώσεών της στους διάφορους τομείς δραστηριοτήτων, υπάρχει πάντα το πρόβλημα της διανομής των μειωμένων ποσοτήτων νερού που είναι διαθέσιμες κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος ξηρασίας.

Για την ορθολογική διανομή αυτών των ποσοτήτων νερού η Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της ξηρασίας (Task Force) έχει την υποχρέωση να καταρτίσει ένα πίνακα με ιεραρχημένες ανάγκες, ώστε να ικανοποιούνται αυτές που πραγματικά έχουν προτεραιότητα.

Για την κατάρτιση αυτού του πίνακα πρέπει πρώτα να υπολογίζονται οι διαθέσιμες ποσότητες νερού, όπως προβλέπονται από ένα σύστημα πρόβλεψης που είναι διαθέσιμο στην Ειδική Επιτροπή. Αμέσως μετά, η Ειδική Επιτροπή πρέπει να καταρτίσει πίνακα με όλες τις μονάδες ζήτησης για κάθε περίοδο και να ελέγξει κατά πόσο το σύστημα μεταφοράς και διανομής είναι επαρκές για τη μεταφορά και διανομή των ποσοτήτων της ζήτησης. Οι μονάδες ζήτησης χαρακτηρίζονται από ένα μοναδιαίο όγκο απαιτούμενο για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Επιπλέον, κάθε μονάδα ζήτησης χαρακτηρίζεται από αντίστοιχη προτεραιότητα.

Το σύστημα προτεραιοτήτων ικανοποίησης της ζήτησης, αν και διαμορφώνεται από την Ειδική Επιτροπή, εντούτοις, συμφωνείται με τους ενδιαφερόμενους φορείς και το κοινό, σε χρόνο που δεν πλησιάζει την περίοδο ξηρασίας. Το σύστημα προτεραιοτήτων απηχεί τις απόψεις κάθε κοινωνίας και προσιδιάζεται στο πλαίσιο των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε τόπου.

Οι μονάδες ζήτησης για όλες τις χρήσεις μπαίνουν στο ίδιο διάγραμμα και για ευκολία στην κατανόηση χαρακτηρίζονται με το αντίστοιχο χρώμα κάθε προτεραιότητας. Από τις επιμέρους χρήσεις προκύπτει ενιαίο διάγραμμα (ή πίνακας) στο οποίο εύκολα αποκλείεται η ικανοποίηση της ζήτησης με μικρή

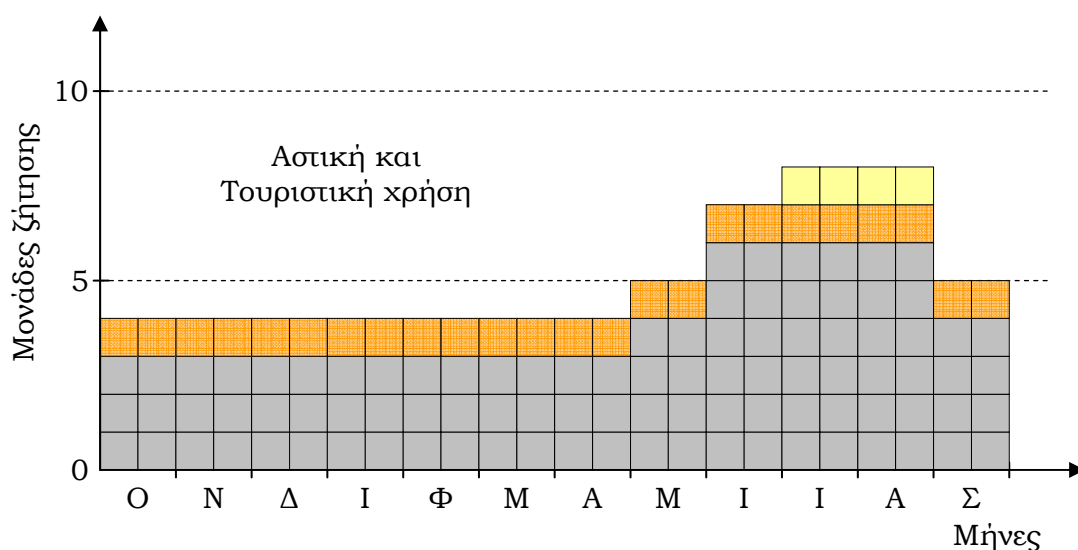
προτεραιότητα.

Η παρουσίαση της μεθοδολογίας που προτείνεται γίνεται πιο παραστατική με τη χρήση ενός συνθετικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.5(α), β), γ) και 6.6 που ακολουθούν.

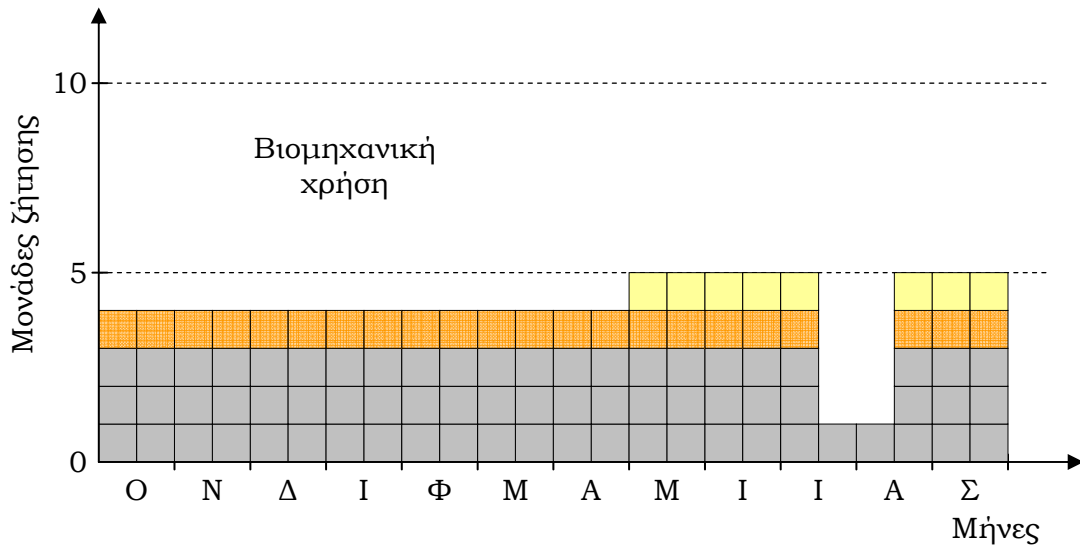
Στο παράδειγμα γίνεται η υπόθεση ότι οι μονάδες ζήτησης κατανέμονται χρονικά σε περιόδους 15ημέρου (δηλαδή δύο περίοδοι τον μήνα), χαρακτηρίζονται δε με τρεις βαθμίδες προτεραιότητας I, II και III, που φαίνονται με τα αντίστοιχα χρώματα γκρι, πορτοκαλί και κίτρινο στο Σχήμα 6.5. Οι μονάδες προτεραιότητας I θεωρούνται υψίστης σημασίας και πρέπει να ικανοποιούνται κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες. Οι μονάδες προτεραιότητας II θεωρούνται σημαντικές και αποτελούν ανάγκες που η μη ικανοποίησή τους έχει επιπτώσεις στους τομείς δραστηριότητας στους οποίους ανήκουν. Όμως σε συνθήκες ακραίων συνθηκών λειψυδρίας θα μπορούσαν να μην ικανοποιηθούν γιατί τα αποτελέσματά τους δεν συντελούν σε καταστροφικά γεγονότα. Τέλος οι μονάδες προτεραιότητας III είναι οι ποσότητες που μπορούν να μην ικανοποιηθούν με σχετικά μικρά αρνητικά αποτελέσματα (π.χ. αλλαγή συνηθειών, περιορισμοί στη σπατάλη κλπ).

Στα Σχήματα 6.5(α), (β) και (γ) παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις μονάδες ζήτησης για

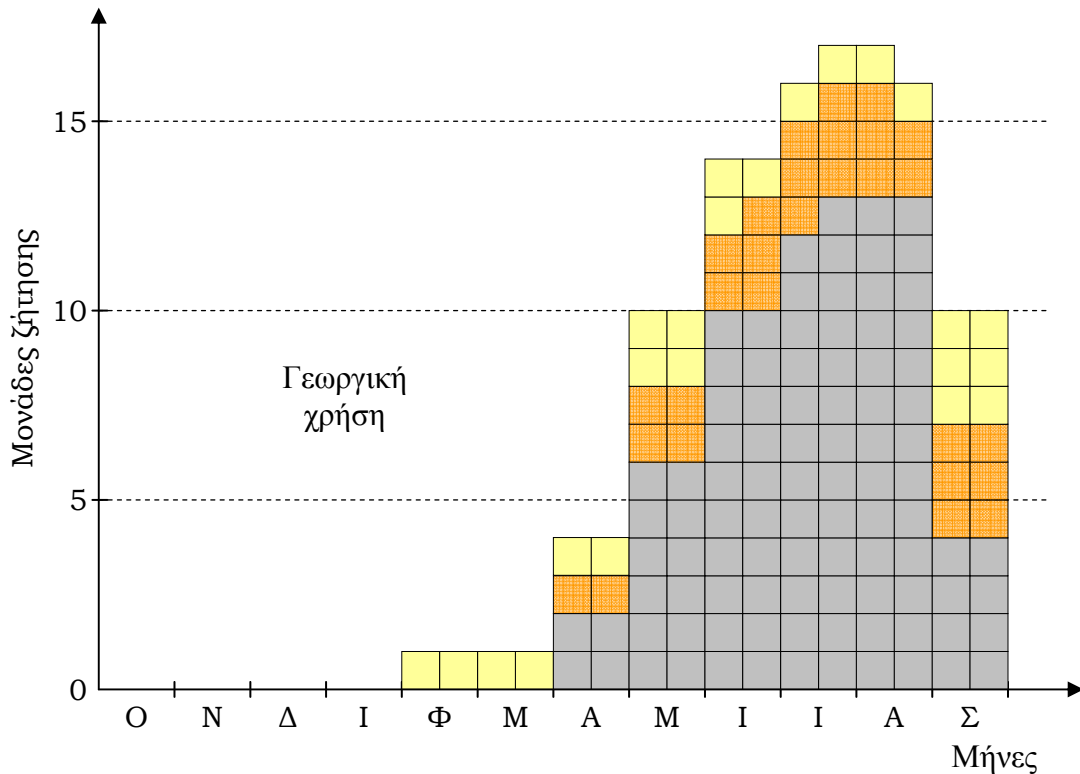
- α) Αστική και Τουριστική χρήση
- β) Βιομηχανική χρήση, και
- γ) Γεωργική χρήση



Σχήμα 6.5(α). Ιεράρχηση μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας σε σχέση με την αστική και τουριστική χρήση.



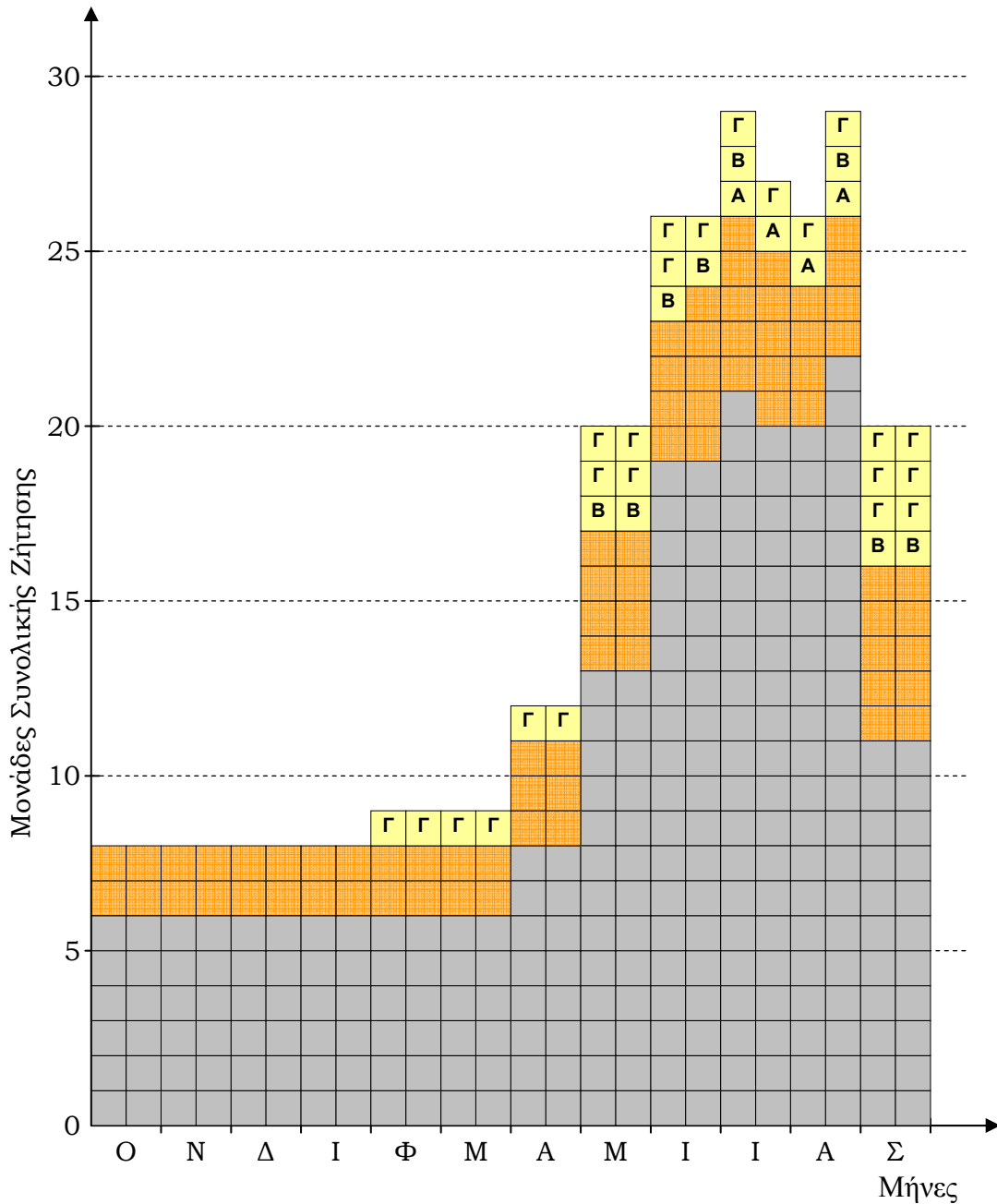
Σχήμα 6.5(β). Ιεράρχηση μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας σε σχέση με την βιομηχανική χρήση.



Σχήμα 6.5(γ). Ιεράρχηση μονάδων ζήτησης για την κατά προτεραιότητα ικανοποίησή τους κατά τη διάρκεια ξηρασίας σε σχέση με την γεωργική χρήση.

Τέλος, ολοκληρωμένα οι μονάδες ζήτησης όλων των χρήσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.6. Από την παραστατική εικόνα ενός τέτοιου διαγράμματος δίνεται η δυνατότητα ακόμη και σε μη ειδικούς να κατανοήσουν τα περιθώρια περιορισμού της κατανάλωσης με τις αντίστοιχες αναμενόμενες επιπτώσεις.

Αν πέρα από τις προτεραιότητες υπάρχει ιεράρχηση στην ικανοποίηση των αναγκών για διάφορες χρήσεις, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη θέση κάθε χρήσης στο διάγραμμα. Στο παράδειγμα, η ιεράρχηση που έχει υιοθετηθεί είναι η ικανοποίηση πρώτα της Αστικής και Τουριστικής χρήσης, κατόπιν της βιομηχανικής χρήσης και τελευταία της Γεωργικής χρήσης. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.6 με τα γράμματα «Α», «Β», «Γ» αντίστοιχα, μόνο για την προτεραιότητα ΙΙΙ.



Με βάση το παράδειγμα των διαγραμμάτων των Σχημάτων 6.5(α), (β) και (γ) και 6.6, αν η διαθέσιμη ποσότητα νερού ήταν αποθηκευμένη και εξασφαλισμένη για ικανοποίηση των προτεραιοτήτων I και II, τότε θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν 35 μονάδες νερού. Στην περίπτωση που η διαθέσιμη ποσότητα ήταν αρκετά μειωμένη ώστε να μπορεί να ικανοποιήσει μόνο τις μονάδες ζήτησης προτεραιότητας I, η συνολική εξοικονόμηση θα έφτανε τις  $35 + 75 = 100$  μονάδες νερού.

Αν η διαθεσιμότητα του νερού είναι χρονικά εξαρτημένη (π.χ. υδροδότηση από ποταμό μέσω φράγματος εκτροπής) τότε επίσης το παραστατικό διάγραμμα δείχνει ποιες ποσότητες δεν μπορούν να ικανοποιηθούν, με ένα επιπλέον καθοριστικό χαρακτηριστικό που είναι το 15θήμερο στο οποίο ανήκουν.

Συμπερασματικά, εκτός των προγραμμάτων μαθηματικής βελτιστοποίησης ή πολυκριτηριακής ανάλυσης υπάρχουν και τρόποι περισσότερο παραδοσιακοί αλλά αποδοτικοί για την ορθολογική επιλογή μη ικανοποίησης κάποιων μονάδων ζήτησης στους αντίστοιχους χρόνους. Η μέθοδος αυτή που είναι απλή αλλά καινοτόμος ονομάστηκε από το συγγραφέα της διατριβής ως «τοιχος με τούβλα» (brick wall) αν και απλή στην κατανόησή της (συνεπώς κατάλληλη για χρήση από ανθρώπους μη απαραίτητα ειδικούς) προϋποθέτει σημαντική προετοιμασία για τον καθορισμό των προτεραιοτήτων από την Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της Ξηρασίας σε συνεργασία (αποδοχή) από όλους τους ενδιαφερόμενους.

## 6.4 Οργανωτική διάσταση

### 6.4.1 Θεσμικό και νομικό πλαίσιο

Σε θεσμικό επίπεδο, τη σημαντικότερη πρωτοβουλία για την αντιμετώπιση της ξηρασίας αποτελεί η δημιουργία της Ειδικής Επιτροπής Αντιμετώπισης της ξηρασίας (Drought Task Force). Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός πλαισίου, που θα διέπει τις σχέσεις μεταξύ οργανισμών και φορέων, όχι μόνο για τη βέλτιστη αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων, αλλά και για τη βελτίωση των μελλοντικών δράσεων που θα περιορίσουν την επίδραση της ξηρασίας στα διάφορα συστήματα. Η αντιμετώπιση δηλαδή της ξηρασίας, απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που δεν βασίζεται μόνο στις φυσικές διεργασίες, αλλά και στις κοινωνικο-οικονομικές συνθήκες μιας περιοχής. Καμία διαχειριστική δράση, νομοθεσία ή στρατηγική δεν μπορεί να ανταποκριθεί από μόνη της σε όλες τις πλευρές και να επιτύχει όλους τους σκοπούς για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της ξηρασίας.

Το θεσμικό πλαίσιο που διέπει την ξηρασία θα πρέπει να μπορεί να

ανταποκριθεί στις εξής κύριες ερωτήσεις:

- Πως αλληλεπιδρούν οι διάφοροι οργανισμοί και φορείς των επίσημων ή ανεπίσημων δικτύων αντιμετώπισης της ξηρασίας;
- Ποιες είναι οι ιεραρχίες και ποιοι οι τρόποι επικοινωνίας;
- Ποίοι είναι οι άμεσα ενδιαφερόμενοι;
- Ποιος είναι ο βαθμός επιρροής και εξάρτησης των αποφάσεων στους ενδιαφερόμενους;

Η μεθοδολογία ανάπτυξης του θεσμικού πλαισίου θα πρέπει να ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Δημιουργία ενός νοητού μοντέλου οργανισμών και φορέων και περιγραφή του νομικού πλαισίου στα διάφορα επίπεδα ενδιαφέροντος (τοπικό, περιφερειακό, επίπεδο χώρας)
- Συλλογή πρόσθετων πληροφοριών και προσδιορισμό των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων και των ενδιαφερόμενων που επηρεάζονται από τις αποφάσεις κάθε φορέα.
- Επαλήθευση της δομής του μοντέλου.
- Ανάλυση των δυνατών και αδύνατων σημείων των οργανωτικών διεργασιών και της ιεραρχικής δομής των φορέων.
- Συζήτηση των προκλήσεων και των ευκαιριών για τη βελτίωση του σχεδιασμού για την ξηρασία.

Το σημαντικότερο ωστόσο στοιχείο της οργανωτικής διαδικασίας για την ξηρασία παραμένει η εξασφάλιση και η οργάνωση της συμμετοχής όλων των ενδιαφερόμενων ομάδων και του κοινού στη λήψη αποφάσεων. Οι συμμετοχικές διαδικασίες, που κερδίζουν συνεχώς έδαφος, αποτελούν την καλύτερη πορεία προς την εξασφάλιση λειτουργικού σχεδιασμού για την ξηρασία.

Ολοκληρωμένες διαχειριστικές προτάσεις για τη διασύνδεση και τις αρμοδιότητες των εμπλεκόμενων στην αντιμετώπιση της ξηρασίας φορέων, έχουν διατυπωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η πρόταση των Rossi et al (2007) αποτελεί ένα εξαιρετικό παράδειγμα διασύνδεσης φορέων και ελέγχου αρμοδιοτήτων που έρχεται σε συμφωνία και με τις Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το κύριο νομικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό και την αντιμετώπιση της ξηρασίας προσδιορίζεται από την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Νερό. Σύμφωνα με την οδηγία ο σχεδιασμός και η αντιμετώπιση πρέπει να γίνεται σε επίπεδο υδατικού συστήματος, όπως θα προσδιοριστεί λεπτομερώς από κάθε χώρα. Η οδηγία δεν ορίζει συγκεκριμένες δράσεις αντιμετώπισης του κινδύνου ξηρασίας, όμως οι γενικότερες υποχρεώσεις που απορρέουν από αυτή, όπως η παρακολούθηση της κατάστασης των νερών και η



σύνταξη και εφαρμογή σχεδίων διαχείρισης σε επίπεδο υδατικού συστήματος, καλύπτουν ως ένα βαθμό και τον Σχεδιασμό για την ξηρασία.

Σε επίπεδο Εθνικής νομοθεσίας, η διαχείριση υδατικών πόρων στην Ελλάδα διέπεται από τον Ν. 1739/1987, όπως επίσης και από τον Ν. 1650/1986 για την προστασία του περιβάλλοντος. Η κυριότερη προσπάθεια νομοθετικής ρύθμισης ωστόσο, έρχεται με την υιοθέτηση της Οδηγίας Πλαίσιο από τον Ν. 3199/2003, ο οποίος επικυρώθηκε στην Ελληνική Βουλή στις 12 Νοεμβρίου του 2003.

Η χώρα μας υπέγραψε επίσης τη Συνθήκη των Ηνωμένων Εθνών για την καταπολέμηση της ερημοποίησης (UNCCD) το 1994, την οποία επικύρωσε η Ελληνική Βουλή το 1997. Σε εφαρμογή της συγκεκριμένης Συνθήκης ιδρύθηκε και η Εθνική Επιτροπή για την Καταπολέμηση της Ερημοποίησης το 2002, χωρίς να είναι ιδιαίτερα γνωστή η δράση της.

Μια εξειδικευμένη νομοθεσία σχετικά με την ξηρασία κρίνεται πλέον σημαντική και αναμένεται τόσο σε κάθε κράτος ξεχωριστά όσο και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Η δημιουργία ολοκληρωμένων Σχεδίων Αντιμετώπισης Ξηρασίας σε κάθε κράτος θα λύσει τόσο θεσμικά όσο και οργανωτικά προβλήματα και θα θωρακίσει την κάθε χώρα απέναντι στον κίνδυνο της ξηρασίας.

#### 6.4.2 Συμμετοχικές διαδικασίες

Η τάση που κυριαρχεί παγκόσμια τα τελευταία χρόνια στο δυτικό κόσμο είναι η συμμετοχή του κοινού στη λήψη αποφάσεων, τουλάχιστον στα θέματα που σχετίζονται με το περιβάλλον. Η διαχείριση των υδατικών πόρων αλλά και της έλλειψής τους, αποτελούν από τα κυρίαρχα θέματα στα οποία τόσο η πλήρης και διαφανής ενημέρωση του κοινού, όσο και η συμμετοχή του στη διαμόρφωση των αποφάσεων ή τουλάχιστον η αποδοχή τους, θεωρείται μεγάλης σημασίας. Όπως θα αναπτυχθεί και στη συνέχεια, η σύγχρονη Ευρωπαϊκή προσέγγιση του θέματος, απαιτεί τουλάχιστον την αποδοχή των όποιων αποφάσεων από όλους τους κοινωνικούς φορείς (stakeholders) πριν την εφαρμογή τους, ώστε οι διενέξεις μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερόμενων ομάδων να μειώνονται στο ελάχιστο.

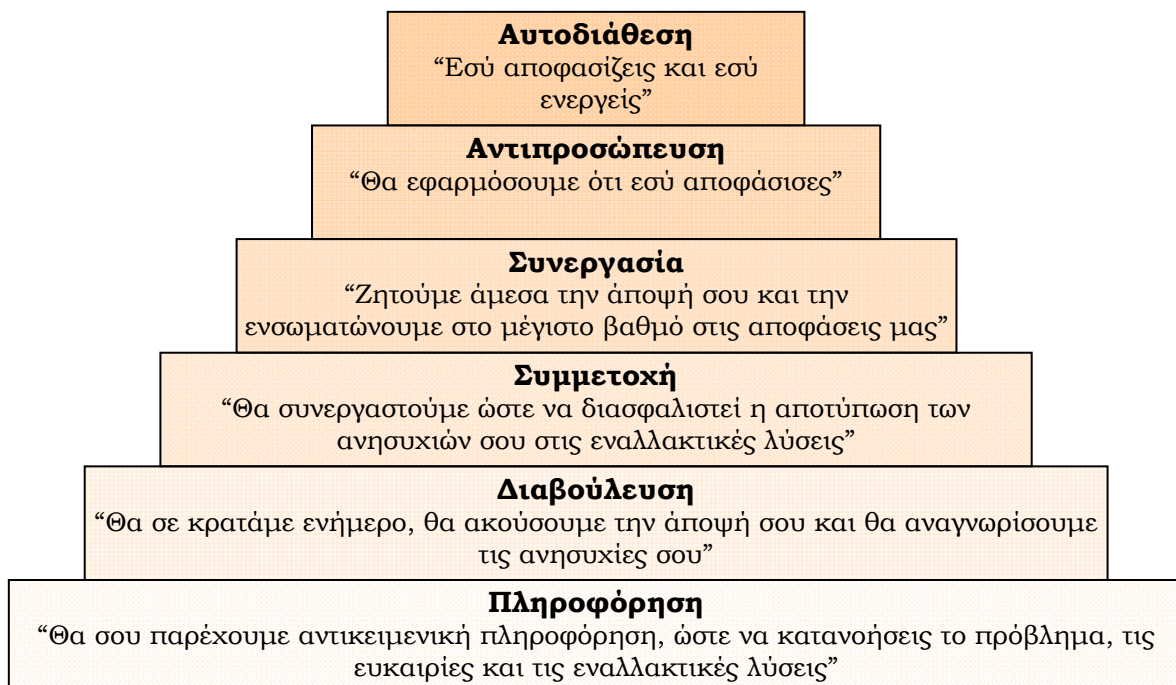
Μεταξύ των κύριων λόγων για το αυξανόμενο ενδιαφέρον στις συμμετοχικές διαδικασίες είναι η αδυναμία της αντιπροσωπευτικής δημοκρατίας, η επιστημονική αβεβαιότητα και πολυπλοκότητα, η αναποτελεσματικότητα στην εφαρμογή της πολιτικής και οι συγκρούσεις συμφερόντων μεταξύ των διαφορετικών ομάδων που κυρίως δέχονται τόσο τις συνέπειες των φαινομένων όσο και των μέτρων αντιμετώπισής τους (Pimbert and Wakeford, 2001). Η αδυναμία της αντιπροσωπευτικής δημοκρατίας αναφέρεται κυρίως στην πεποίθηση ομάδων του κοινού ή και μεμονωμένων ανθρώπων, ειδικά όσον

θεωρούνται ή αισθάνονται μη προνομιούχοι, ότι εξαιρούνται από τις αποφάσεις που επηρεάζουν τη ζωή τους. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται από την κεντρική (και συνήθως απομακρυσμένη από τους χώρους που υφίστανται τις συνέπειες) κυβέρνηση, συχνά δεν κατορθώνουν να αφουγκραστούν και να ενσωματώσουν την θέληση των πολιτών. Από την άλλη πλευρά, τα περιβαλλοντικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένων και των φυσικών καταστροφών όπως η ξηρασία, είναι πολύ σύνθετα, με πολλές αβεβαιότητες και κινδύνους. Όπως έχει ειπωθεί επανειλημμένα, η πολύπλοκη φύση της ξηρασίας δεν επιτρέπει στους επιστήμονες να παρέχουν μοναδική και αδιαμφισβήτητη πληροφορία κατά τη διάρκεια εξέλιξης ενός φαινομένου. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της εμπιστοσύνης του κοινού απέναντι στους επιστήμονες και ειδικούς του χώρου. Η εφαρμογή της πολιτικής έχει επίσης αποδειχθεί αναποτελεσματική σε πολλές περιπτώσεις. Οι κεντρικές πολιτικές συχνά αποτυγχάνουν να φέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι συμμετοχικές διαδικασίες από την άλλη πλευρά, έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την ποιότητα της λήψης αποφάσεων αντλώντας γνώσεις από τις τοπικές κοινωνικές ομάδες και περιορίζοντας τις συγκρούσεις μεταξύ των ομάδων αυτών, κυρίως στο στάδιο του σχεδιασμού και της λήψης αποφάσεων. Η διαδικασία αυτή, βοηθά ώστε η εφαρμογή της πολιτικής να είναι περισσότερο νόμιμη, αποτελεσματική, αποδοτική και βιώσιμη. Τέλος, ο αποκλεισμός κοινωνικών ομάδων από τις αποφάσεις οδηγεί με πολύ μεγάλη πιθανότητα σε συγκρούσεις κυρίως κατά τη διαδικασία εφαρμογής των αποφάσεων αυτών. Οι συναινετικές αποφάσεις, κυρίως με τη συμμετοχή των ομάδων που αντιμετωπίζουν τις συνέπειες τόσο του φαινομένου όσο και των μέτρων αντιμετώπισής του, μπορεί να ελαχιστοποιήσουν τις δημιουργούμενες εντάσεις.

Οι κύριοι στόχοι της συμμετοχικής διαδικασίας περιλαμβάνουν:

- Ενημέρωση των συμμετεχόντων και αύξηση της ευαισθητοποίησης του κοινού
- Βελτίωση της ποιότητας των αποφάσεων, με την ενσωμάτωση σ' αυτές της γνώσης των τοπικών κοινωνικών ομάδων της περιοχής που πλήττεται από την καταστροφή
- Αναγνώριση περιθωριοποιημένων φωνών και ανάπτυξη αμοιβαίας κατανόησης μεταξύ των συμμετεχόντων
- Επίτευξη συμφωνιών και όπου είναι εφικτό ομόφωνων αποφάσεων
- Μείωση συγκρούσεων μεταξύ κοινωνικών ομάδων με αντικρουόμενα συμφέροντα και επίσπευση της εφαρμογής της πολιτικής μετά τη συναινετική λήψη αποφάσεων.
- Ενδυνάμωση των τοπικών κοινοτήτων για ανάληψη δράσης

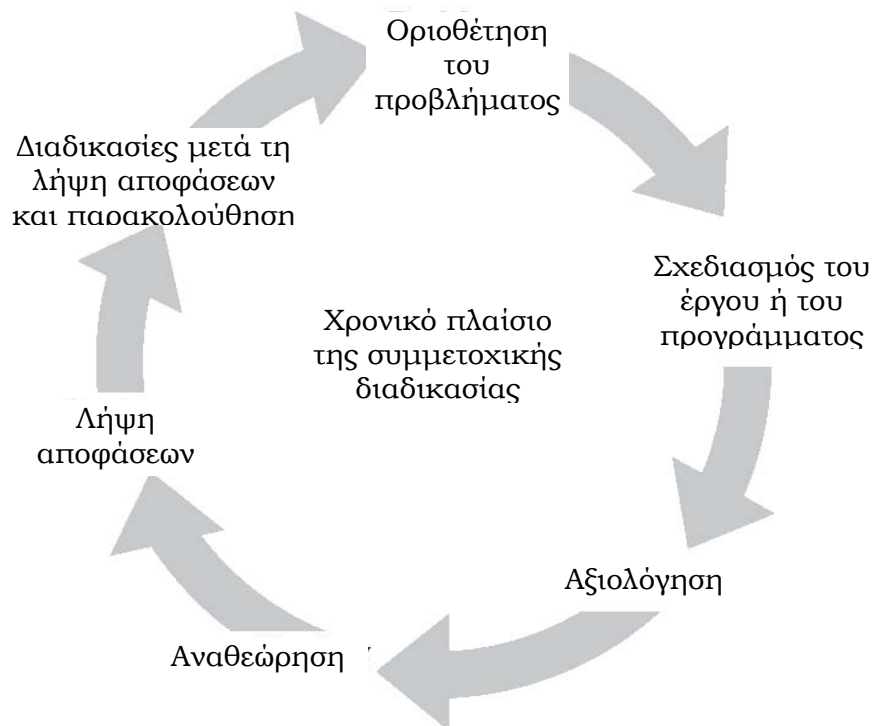
Η βασικότερη πτυχή του πλαισίου συμμετοχής του κοινού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι η διάρθρωση των επιπέδων συμμετοχής. Στο χαμηλότερο επίπεδο συναντά κανείς την απλή πληροφόρηση, όσον αφορά στο περιεχόμενο και τη διαδικασία της απόφασης. Οι σχετικές πληροφορίες γίνονται διαθέσιμες στα ενδιαφερόμενα μέρη και στο κοινό μέσω τυποποιημένων τεχνικών διάδοσης. Το επόμενο επίπεδο αφορά στη διαβούλευση. Το κοινό καλείται (υπό την ευθύνη των αρχών) να υποβάλει σχόλια σε γραπτή μορφή ή να τα παρουσιάσει προφορικά σε συναντήσεις, ακροάσεις κλπ. Στην πιο «δεσμευτική» μορφή της διαβούλευσης, οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων δεν μπορούν να απορρίψουν τα σχόλια των συμμετεχόντων χωρίς αιτιολόγηση. Ένα επίπεδο πιο πάνω είναι η συμμετοχή, στην οποία οι αρχές είναι υποχρεωμένες να ενσωματώσουν μερικά από τα σχόλια του κοινού στην τελική απόφαση και να εξηγήσουν επαρκώς γιατί απέρριψαν τα υπόλοιπα. Αν αναλογιστούμε τα επίπεδα συμμετοχής ως μια «σκάλα» με τη μορφή που παρουσιάστηκε από τον Arnstein (1969), τα επόμενα στάδια εκτείνονται από συνεργασία μεταξύ των αρχών και του κοινού, μέχρι την αντιπροσώπευση κατά την οποία οι αποφάσεις των επιλεγμένων επιτροπών των πολιτών εφαρμόζονται από τους υπεύθυνους. Στην κορυφή της σκάλας βρίσκεται η αυτοδιάθεση. Στην αυτοδιάθεση εφαρμόζονται πιο ριζοσπαστικές δημοκρατικές οργανωτικές μορφές, στις οποίες οι κοινότητες έχουν την δύναμη να λαμβάνουν και να εφαρμόζουν αποφάσεις.



Σχήμα 6.7. Τα επίπεδα συμμετοχής του κοινού (προσαρμογή από τους Videira et al., 2006 και IAP2, 2007).

Μια άλλη σημαντική πτυχή του πλαισίου για συμμετοχή του κοινού είναι το

πού και το πότε θα πραγματοποιηθεί αυτή η συμμετοχή. Η συμμετοχή των κοινωνικών φορέων και μεμονωμένων ενδιαφερόμενων μπορεί να λάβει χώρα σε διάφορα στάδια της διαδικασίας (Σχήμα 6.8). Μια τυπική τέτοια διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες φάσεις: την φάση πριν την απόφαση (περιλαμβάνει την αναγνώριση του προβλήματος και την κατάστρωση του Σχεδίου), την φάση της απόφασης και την φάση μετά την απόφαση. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι η συμμετοχή του κοινού θα πρέπει να πραγματοποιείται σε ολόκληρη τη διαδικασία λήψης αποφάσεων ενός σχεδίου ή μιας δέσμης μέτρων. Είναι σημαντικό, να συμπεριληφθεί από νωρίς το κοινό στη διαδικασία και να μην περιοριστεί στη φάση εφαρμογής ή σε υποπτυχές της υλοποίησης του Σχεδίου, όπου σημαντικές αποφάσεις έχουν ήδη παρθεί (UNEP/PAP/RAC, 2007). Ιδανικά, η συμμετοχή του κοινού θα πρέπει να αρχίζει πριν ακόμα το πρόβλημα εντοπιστεί με ακρίβεια. Είναι προφανές, ότι ένα σχέδιο δε μπορεί να είναι επιτυχημένο χωρίς την άποψη αυτών που θα το εφαρμόσουν και θα ζήσουν με αυτό. Από την άλλη πλευρά, η γνώση των ανθρώπων μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες και ιδέες για τη δημιουργία εναλλακτικών στρατηγικών. Επιπλέον, διαφορετικές ομάδες ενδιαφερόμενων και κοινωνικών εταίρων μπορούν να αντιστοιχίσουν διαφορετικό βάρος και διαφορετικά κριτήρια σε εναλλακτικές λύσεις, αφού οι συνέπειες μιας διαδικασίας μπορεί να είναι διαφορετικές ανάμεσα στις διαφορετικές ομάδες και μια αρνητική συνέπεια για μια ομάδα μπορεί να ωφελήσει μια άλλη.



Σχήμα 6.8. Επιλογή του χρόνου συμμετοχής στη διαδικασία (προσαρμογή από Videira et al., 2006).

Η απάντηση στην ερώτηση «ποιοί πρέπει να συμμετέχουν;» είναι ένα ακόμη κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να καλυφθεί. Πρέπει φυσικά να σημειωθεί, ότι η επιλογή των συμμετεχόντων εξαρτάται κυρίως από το περιεχόμενο και τους στόχους της συμμετοχικής διαδικασίας. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όλοι πρέπει να έχουν τη δυνατότητα συμμετοχής. Ωστόσο οι πιο πιθανοί συμμετέχοντες, όπως αναφέρονται στις οδηγίες για τη συμμετοχή του κοινού σε σχέση με την Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τους υδατικούς πόρους (Guidance on Public Participation in relation to the WFD) που αναπτύχθηκε ως τμήμα της Κοινής Στρατηγικής Υλοποίησης της οδηγίας (WFD Common Implementation Strategy), είναι οι ειδικοί που σχετίζονται με τη διαχείριση και επομένως και την έλλειψη νερού, αρχές και εκλεγμένοι αντιπρόσωποι, τοπικές ομάδες και μη επαγγελματικά οργανωμένες ομάδες, καθώς και μεμονωμένοι πολίτες (ComEC, 2002). Εν συντομία θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι στην κατηγορία των επαγγελματιών περιλαμβάνονται επιστημονικά στελέχη δημόσιων και ιδιωτικών οργανισμών, επαγγελματικών και εθελοντικών ομάδων και κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών Μη Κυβερνητικών Οργανώσεων (ΜΚΟ). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται επίσης οι επιχειρήσεις, η βιομηχανία, οι ασφαλιστικοί όμιλοι και η ακαδημαϊκή κοινότητα. Στην κατηγορία των Αρχών και των εκλεγμένων αντιπροσώπων περιλαμβάνονται οι κυβερνητικές υπηρεσίες, οι δημόσιες υπηρεσίες και η τοπική αυτοδιοίκηση. Οι τοπικές και μη επαγγελματικά οργανωμένες ομάδες που δραστηριοποιούνται σε τοπικό επίπεδο, μπορούν να διαχωριστούν σε: κοινότητες με βάση τη θέση (π.χ. κάτοικοι, ενώσεις και τοπικά συμβούλια) και κοινότητες με βάση το ενδιαφέρον (π.χ. ομάδες αγροτών, αλιέων, κλπ). Τέλος, στην κατηγορία των μεμονωμένων πολιτών περιλαμβάνονται μεμονωμένοι πολίτες, αγρότες, ιδιοκτήτες γης και εταιρείες που εκπροσωπούν τον εαυτό τους.

Η ανάμειξη των πολιτών είναι επίσης σημαντική κατά τη διάρκεια της «παρακολούθησης και αξιολόγησης», η οποία αποτελεί τη μετά την απόφαση φάση. Επιτροπές πολιτών μπορούν να παρακολουθούν τη συμμόρφωση των αρχών με ένα συμφωνημένο σχέδιο και όρους και να παρέχουν ανατροφοδότηση για αξιολόγηση των συνεπειών και των αποτελεσμάτων.

Η συμμετοχή του κοινού μπορεί, επίσης, να μειώσει τις συγκρούσεις σε αμφισβητήσιμες αποφάσεις, όπως έγκριση μέτρων αντιμετώπισης της ξηρασίας, αποφάσεις για πρότυπα ποιότητας και επίπεδα επεξεργασίας ή παρακολούθησης, κατανομή των αποζημιώσεων για τις ζημιές μεταξύ των διαφόρων ομάδων κλπ. Τέλος, είναι σκόπιμο να δημιουργηθεί μια μόνιμη οργανωτική δομή για συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων στη λήψη ή την επεξεργασία των αποφάσεων για την αντιμετώπιση της έλλειψης νερού. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα λιγότερη προσπάθεια στο μέλλον, αφού οι διαδικασίες και

τα εργαλεία δε θα χρειάζεται να αναθεωρούνται κάθε φορά που είναι απαραίτητη η συμμετοχή για μια απόφαση.

Στη Λευκή Βίβλο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διακυβέρνηση (EU White Paper on Governance) τονίζεται ότι η ποιότητα και η αποτελεσματικότητα των πολιτικών αποφάσεων εξαρτάται από την εξασφάλιση ευρείας συμμετοχής σε όλη την αλυσίδα της πολιτικής, αρχίζοντας ακόμη από το στάδιο της σύλληψης της αρχικής ιδέας (ComEC, 2001). Όσο το δυνατόν περισσότερες επιλογές θα πρέπει να είναι ανοιχτές, έτσι ώστε η συμμετοχική διαδικασία να βοηθήσει στην επιλογή της καταλληλότερης τελικής απόφασης. Επιπλέον, η δημόσια δέσμευση στις αποφάσεις είναι πιθανόν να αυξηθεί, εάν υπάρχει συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων ήδη από τις παλαιότερες φάσεις ανάπτυξης της στρατηγικής (DETR, 2000). Το κοινό που συμμετέχει και οι συμμετοχικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πρέπει να εστιάζουν στις ειδικές απαιτήσεις του κάθε σταδίου της συμμετοχικής διαδικασίας.

#### 6.4.3 Προσπάθεια ανάμειξης του κοινού στον Ελληνικό χώρο

Στο πλαίσιο της έρευνας για την ξηρασία, έγινε μια αρχική προσπάθεια για την ανάμειξη του κοινού στο Σχεδιασμό για την αντιμετώπιση της ξηρασίας στην περιοχή της Ανατολικής Κρήτης. Η διαδικασία αυτή στηρίχθηκε κυρίως στην προσπάθεια επικοινωνίας με τους πολίτες για τη διερεύνηση τόσο του επιπέδου πληροφόρησης τους για θέματα ξηρασίας, όσο και της ανατροφοδότησης (feedback) μέσω της γνώμης των πολιτών για διάφορες πτυχές της καθημερινότητας που μπορεί να επηρεασθούν από την ξηρασία.

Η προσπάθεια επικοινωνίας με το κοινό έγινε μέσω ενός ερωτηματολογίου, το οποίο διανεμήθηκε στους πολίτες της πόλης του Ηρακλείου στην Κρήτη, με κύριο στόχο τη διερεύνηση του επιπέδου ευαισθητοποίησής τους όσον αφορά στα φαινόμενα ξηρασίας, καθώς και τις απόψεις τους σχετικά με την αντίδραση της κρατικής μηχανής στην αντιμετώπιση των συνεπειών της ξηρασίας. Το ερωτηματολόγιο διανεμήθηκε σε πολίτες διαφορετικών ηλικιακών ομάδων, επιπέδων εκπαίδευσης και επαγγελμάτων, σε μια προσπάθεια να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα απόψεων, που δημιουργούνται μέσω των διαφόρων χρήσεων του νερού και της επίδρασης της ξηρασίας στους διάφορους χρήστες του.

Το ερωτηματολόγιο θεωρείται ότι βοηθά με δύο τρόπους. Από τη μία πλευρά, πολλοί άνθρωποι αναγκάστηκαν να σκεφτούν και να κατανοήσουν τη σημασία της ξηρασίας και της έλλειψης νερού στην καθημερινή τους ζωή, όταν προσπάθησαν να απαντήσουν στα διάφορα ερωτήματα. Από την άλλη, επιβεβαιώθηκε η υπάρχουσα άποψη σχετικά με το επίπεδο της ευαισθητοποίησης του κοινού απέναντι στην ξηρασία, ενώ προέκυψαν και πολλές

ενδιαφέρουσες μη αναμενόμενες πτυχές της κατάστασης μέσω όχι μόνο των ίδιων των απαντήσεων, αλλά και της στατιστικής τους επεξεργασίας (Vangelis, 2008).

Ο σχεδιασμός του ερωτηματολογίου έγινε με γνώμονα τόσο την υπάρχουσα γνώση σχετικά με τις συμμετοχικές διαδικασίες, όσο και τα ιδιαίτερα προβλήματα που οι πολίτες μπορούν να συναντήσουν στην καθημερινή τους ζωή και ειδικά στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι τελικές ερωτήσεις διαμορφώθηκαν με τη βοήθεια κοινωνιολόγου ώστε να ληφθεί υπόψη ο τρόπος προσέγγισης των ανθρώπων σύμφωνα με τις γενικές οδηγίες των κοινωνικών επιστημών. Το πρώτο μέρος του ερωτηματολογίου είναι αποκλειστικά αφιερωμένο σε ερωτήσεις που θα βοηθήσουν στην ταξινόμηση των ερωτούμενων σε κατηγορίες. Οι ερωτούμενοι δηλώνουν το φύλο τους (άνδρας ή γυναίκα) και την ηλικιακή τους ομάδα, συγκεκριμένα νέοι (15-39 ετών), μέσης ηλικίας (40-64 ετών) και ηλικιωμένοι (65 ετών και άνω). Δηλώνουν επίσης το εκπαιδευτικό τους επίπεδο και το επάγγελμα τους, ώστε κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων να μπορούν να γίνουν διαφόρων ειδών ομαδοποιήσεις. Στο δεύτερο μέρος του ερωτηματολογίου συγκεντρώνονται όλες οι σχετικές με την ξηρασία ερωτήσεις.

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται οι δύο πρώτες σελίδες του ερωτηματολογίου, όπου διακρίνονται το πρώτο μέρος και η αρχή του δευτέρου μέρους του ερωτηματολογίου.

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ**  
**ΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ**

**ΦΥΛΟ**                    Α                     Γ   
**ΟΜΑΔΑ ΗΛΙΚΙΑΣ**    15-39                     40-64                     65 και άνω   
**ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ**  
 Δεν αποφοίτησε του Δημοτικού   
 Αποφοίτος Δημοτικού ή Γ' τάξης Γυμνασίου   
 Πτυχιούχος Ανώτερης Σχολής ή Αποφοίτος Μέσης Εκπαίδευσης   
 Πτυχιούχος ΑΕΙ / ΑΤΕΙ ή Κάτοχος Μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών

**ΜΕΤΡΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΠΟΛΕΙΣ**

Οι απαντήσεις πρέπει να είναι ιεραρχημένες κατά τον ακόλουθο βαθμό προτεραιότητας:  
 Α' προτ = υψηλή,  
 Β' προτ = μεσαία,  
 Γ' προτ = χαμηλή,  
 Δ' προτ = χωρίς σημασία

**Α. Ποια από τα ακόλουθα Μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης νερού μπορούν να ληφθούν?**

**1. Η ενημέρωση του κοινού και η πρόσκληση για εθελούσια μείωση της κατανάλωσης?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**2. Η δωρεάν διανομή και / ή εγκατάσταση διατάξεων εξοικονόμησης νερού?**

**2.1 Ακροφύσιων ντους με μικρή παροχή?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**2.2 Μειωτών παροχής νερού στα ντους?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**2.3 Μηχανισμό διπλής λειτουργίας (πλήρους/μειωμένης) παροχής στα καζάνια τουαλέτας?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**2.4 Η μείωση του όγκου του νερού στο καζάνι της τουαλέτας**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**2.5 Βαλβίδων μείωσης πίεσης**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3. Με ποια προτεραιότητα στις παρακάτω δευτερεύουσες χρήσεις μπορούμε να πετύχουμε τον περιορισμό στην κατανάλωση νερού?**

**3.1 Στις πισίνες?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.2 Στο πλύσιμο των αυτοκινήτων?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.3 Στο πλύσιμο του γκαζόν?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.4 Στο πλύσιμο των πεζοδρομίων με λάσπη?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.5 Στα υδρόψυκτα κλιματιστικά χωρίς ανακύκλωση νερού?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.6 Στο πλύσιμο των δρόμων?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.7 Στα δημόσια αντιριβάνια?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.8 Στην άρδευση των πάρκων?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

**3.9 Στην άρδευση των γαπέδων γκολφ?**  
 Α' προτ                     Β' προτ                     Γ' προτ                     Δ' προτ

Σχήμα 6.9. Οι δύο πρώτες σελίδες του ερωτηματολογίου.

Το δεύτερο μέρος του ερωτηματολογίου είναι χωρισμένο σε τμήματα, ουσιαστικά σε ομάδες ερωτήσεων που αφορούν στο ίδιο κεντρικό θέμα. Σε όλες τις ερωτήσεις όλων των τμημάτων ζητείται από τους πολίτες να ιεραρχήσουν τις προτεινόμενες ενέργειες ή μέτρα σε μια κλίμακα τεσσάρων επιλογών από “Α” που αντιστοιχεί σε υψηλή προτεραιότητα έως το “Δ” αν η πρόταση θεωρείται χωρίς καμία σημασία.

Το πρώτο τμήμα του δευτέρου μέρους αφορά σε ενέργειες και μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης. Η ομάδα των ερωτήσεων αυτού του τμήματος ασχολείται με την ενημέρωση του κοινού και την εθελοντική προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης. Επίσης, με τη σπουδαιότητα της χρήσης διατάξεων εξοικονόμησης νερού, αλλά και του συγκεκριμένου είδους τέτοιων διατάξεων. Είναι σημαντικότερη η χρήση τέτοιων διατάξεων στο ντους, στο καζανάκι της τουαλέτας ή σε κάποια άλλη οικιακή παροχή νερού; Ποια προτεραιότητα δίνεται σε χρήσεις που θα περιορίσουν την κατανάλωση κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας, όπως το πλύσιμο των αυτοκινήτων, το γέμισμα των πισινών, το πότισμα του γκαζόν, το πλύσιμο των δρόμων η άρδευση των πάρκων και των γηπέδων γκολφ και τα δημόσια σιντριβάνια; Θα πρέπει να περιοριστούν οι εμπορικές χρήσεις νερού, όπως τα πλυντήρια αυτοκινήτων; Θα πρέπει να εφαρμοστεί τιμολογιακή πολιτική και μια τέτοια πολιτική θα πρέπει να αφορά μόνο στην περίοδο της κρίσης ή γενικά στις υψηλές καταναλώσεις; Με ποιον τρόπο θα πρέπει να γίνεται η διανομή νερού, κατά κεφαλή ή ανά νοικοκυριό; Θα πρέπει η αστική χρήση να έχει προτεραιότητα έναντι των υπολοίπων ή θα πρέπει το νερό να μοιράζεται εξίσου σε όλες τις χρήσεις;

Η δεύτερη ομάδα ερωτήσεων αφορά στην υποδομή και κυρίως στο δίκτυο διανομής νερού. Προσπαθεί να διερευνήσει ποιες τροποποιήσεις ή αναβαθμίσεις του δικτύου διανομής θεωρούνται ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα οι ερωτήσεις αφορούν στην υδραυλική πίεση του δικτύου, στην ανίχνευση διαρροών και στην επισκευή των σπασμένων σωληνώσεων, στο κατά πόσο η πλήρης αντικατάσταση ολόκληρου του δικτύου θεωρείται σημαντική ή η χρήση αυτοματισμών στα δίκτυα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Επίσης, αν η διακοπτόμενη διανομή νερού μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση της κατάστασης κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου ξηρασίας.

Τέλος, το τρίτο τμήμα του δευτέρου μέρους του ερωτηματολογίου ασχολείται με ενέργειες και μέτρα που πρέπει να υλοποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης. Οι πολίτες ρωτούνται αν και κατά πόσον θα πρέπει να μεταφερθούν ποσότητες νερού από άλλες περιοχές κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας και με ποιο τρόπο θα μπορούσε να γίνει κάτι τέτοιο στην περίπτωση που κριθεί αναγκαίο (π.χ. με φορητά, με πλοία ή με δίκτυο σωλήνων). Επίσης, αν θεωρείται αναγκαία η περικοπή κάποιων χρήσεων νερού



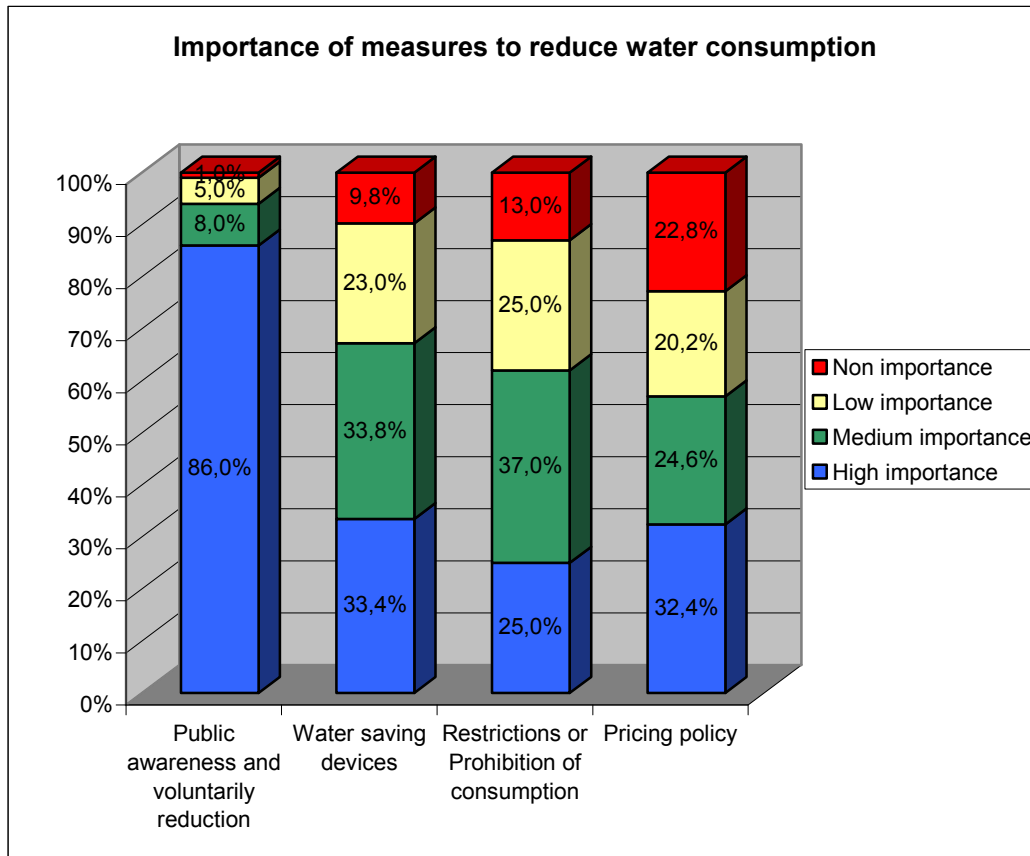
προς όφελος των υπολοίπων καθώς και το ποιες πρέπει να είναι οι χρήσεις που μπορούν να περικοπούν (π.χ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρήσεις αναψυχής ή ακόμη και οικολογική παροχή των ποταμών). Θα πρέπει να διατηρούνται αποθέματα ασφαλείας και είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται υφάλμυρο νερό, απομακρυσμένες πηγές νερού, νέες γεωτρήσεις ή ακόμη και σπορά νεφών;

Όλες οι ερωτήσεις είναι διατυπωμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι πλήρως κατανοητές από όλους τους ερωτώμενους όλων των ηλικιών και μορφωτικών επιπέδων. Αυτό που στην πραγματικότητα αναζητείται μέσω του ερωτηματολογίου είναι οι αυθόρμητες απαντήσεις, που αντικατοπτρίζουν τι πραγματικά πιστεύουν οι πολίτες και όχι ποια θα ήταν η τελική απάντησή τους αν μπορούσαν να σκεφτούν το πρόβλημα διεξοδικά. Οι απαντήσεις αναλύθηκαν στατιστικά και χρησιμοποιήθηκαν διάφορες ομαδοποιήσεις ώστε το θέμα να προσεγγιστεί από πολλές διαφορετικές πλευρές. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι πολλά, ωστόσο στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα πιο σημαντικά τα οποία αφορούν στις τρεις βασικές ομάδες ερωτήσεων.

Στην πρώτη ομάδα των ερωτήσεων σχετικά με τις *ενέργειες και τα μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης* οι συμμετέχοντες θεωρούν πολύ σημαντική την ενημέρωση του κοινού. Συγκεκριμένα, πάνω από το 85% των συμμετεχόντων θεωρούν την ενημέρωση του κοινού ως την πιο σημαντική δράση για την εθελούσια μείωση της κατανάλωσης νερού, κυρίως σε αστικές περιοχές. Η χρήση διατάξεων εξοικονόμησης νερού δεν συγκεντρώνει γενικά σημαντικό αριθμό προτιμήσεων. Η περίπτωση ωστόσο του μηχανισμού πλήρους και μειωμένης παροχής στα καζανάκια της τουαλέτας θεωρείται πολύ ενδιαφέρουσα από τους συμμετέχοντες. Οι μισοί από αυτούς (περίπου 50%) δηλώνουν ότι θα χρησιμοποιούσαν μια τέτοια συσκευή, ενώ σχεδόν κανένας δεν θεωρεί τις βαλβίδες χαμηλής πίεσης σημαντικές. Πρέπει φυσικά να αναφερθεί ότι οι περισσότεροι από τους ανθρώπους μπορεί να μην είναι εξοικειωμένοι με τη λειτουργία μιας βαλβίδας χαμηλής πίεσης ή ακόμη και να μην γνωρίζουν καν περί τίνος πρόκειται, ενώ ένας μηχανισμός διπλής λειτουργίας στο καζανάκι της τουαλέτας δείχνει μια πολύ ενδιαφέρουσα ιδέα για τους περισσότερους και πολλοί από αυτούς μπορεί να έχουν ήδη χρησιμοποιήσει μια τέτοια διάταξη. Οι απαντήσεις λοιπόν του κοινού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μέσα από το φίλτρο κάποιων ειδικών σε κάθε περίπτωση.

Η απαγόρευση συγκεκριμένων χρήσεων, κυρίως των εμπορικών, θεωρείται μεσαίας σημασίας. Η απάντηση μπορεί να θεωρηθεί απλώς ενδεικτική καθώς απαιτείται πιο προσεκτική διερεύνηση ανάμεσα στα διαφορετικά κοινωνικά και εκπαιδευτικά υπόβαθρα καθώς και τα επαγγέλματα των συμμετεχόντων. Είναι προφανές ότι οι άνθρωποι κατανοούν ότι το πόσιμο νερό και γενικά η αστική

χρήση νερού είναι πιο σημαντική κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ξηρασίας, ωστόσο η μείωση της εμπορικής χρήσης μπορεί να έχει σημαντικό κοινωνικό αντίκτυπο.



Σχήμα 6.10. Προτεραιότητα των μέτρων μείωσης της κατανάλωσης.

Η τιμολογιακή πολιτική θεωρείται επίσης σημαντική. Αν και τα συνολικά ποσοστά μπορεί να οδηγήσουν σε μια διαφορετική συνολική εικόνα (όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10), συγκεκριμένες ερωτήσεις που περιλαμβάνονται στο ερωτηματολόγιο πάνω στο συγκεκριμένο θέμα αποσαφηνίζουν την κατάσταση. Αξίζει να σημειωθεί ότι πάνω από το 70% των απαντήσεων ήταν αρνητική για τη δήλωση «Η τιμή του νερού δεν πρέπει να αυξηθεί σε καμία περίπτωση». Οι περισσότεροι από τους συμμετέχοντες (πάνω από 50%) πιστεύουν ότι υψηλότερες τιμές θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στην υπερβολική κατανάλωση και πάντα σύμφωνα με επιστημονικά και πολιτικά αποδεκτά όρια κατανάλωσης που θα τίθενται από την εταιρεία ύδρευσης. Από την άλλη πλευρά, οι συμμετέχοντες πιστεύουν ότι δεν πρέπει να υπάρχει διαφορά στο τιμολόγιο μεταξύ χειμερινής και θερινής περιόδου, ενώ η χρήση «τέλους ξηρασίας» κατά τις περιόδους ξηρασίας δεν θα βοηθούσε καθόλου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην υπόθεση ότι οι συμμετέχοντες θεωρούν την εξοικονόμηση νερού, ακόμη και μέσω της τιμολογιακής πολιτικής, μια δράση για ολόκληρη τη διάρκεια του έτους και όχι

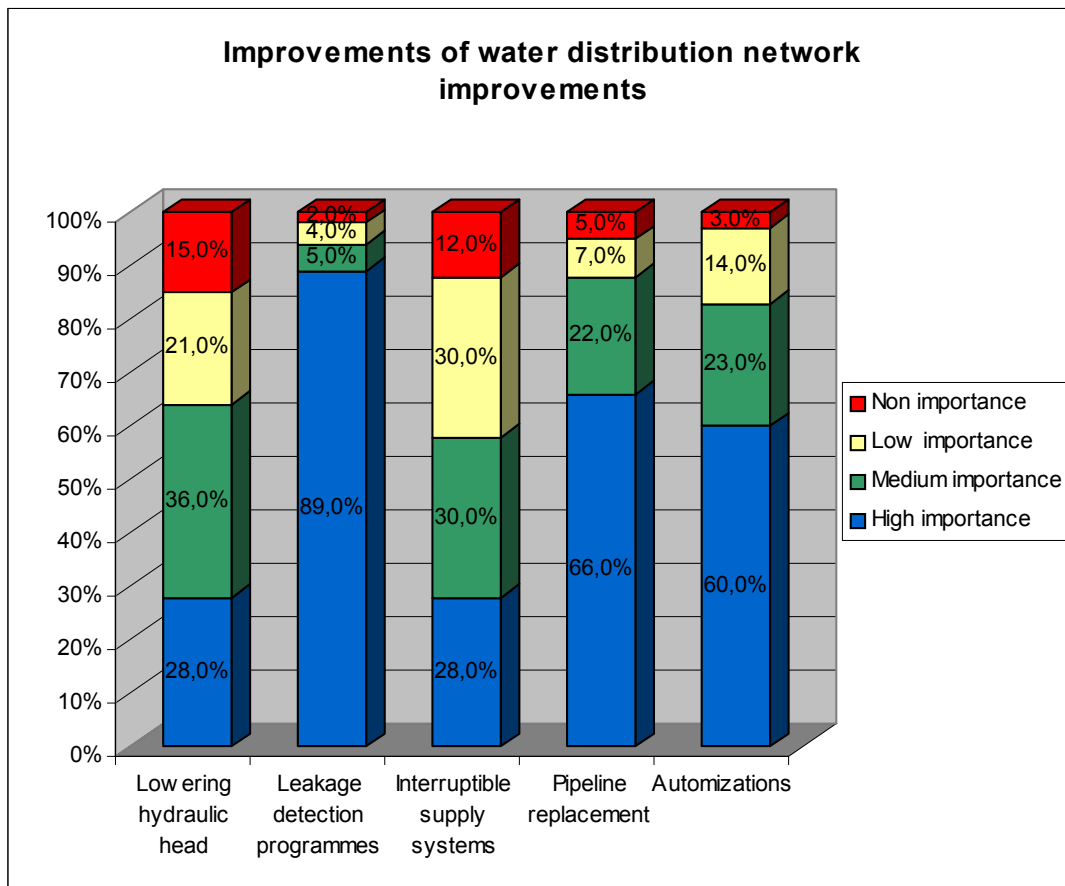
ένα μέτρο έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια της ξηρασίας. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι καθώς η τιμολογιακή πολιτική δεν θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική από τις εταιρίες διανομής νερού στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες, η θετική στάση των συμμετεχόντων μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστικό που παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη περιοχή (ή χώρα), λόγω και του μεσογειακού ταμπεραμέντου.

Ο Περιορισμός ή η απαγόρευση των δευτερευουσών χρήσεων, ή τουλάχιστον των μη ζωτικής σημασίας χρήσεων, όπως η κατανάλωση νερού για αναψυχή, θεωρείται υψίστης σημασίας για την πλειονότητα των συμμετεχόντων (περίπου 60%). Οι συμμετέχοντες πιστεύουν ότι πολλές από τις χρήσεις αυτές θα μπορούσαν να περιοριστούν, από το πλύσιμο των δρόμων (72%) και το γέμισμα των πισινών (63%), έως το πλύσιμο των αυτοκινήτων (56%) και το πότισμα των γηπέδων γκολφ (50%). Από την άλλη πλευρά, ορισμένες δευτερεύουσες χρήσεις θεωρούνται αρκετά σημαντικές ώστε να μην περιοριστούν, όπως η χρήση νερού στα δημόσια σιντριβάνια (μόνο το 40% δηλώνει ότι θα πρέπει να περιορίζεται) και η άρδευση των πάρκων (μόνο το 20% πιστεύει ότι θα πρέπει να απαγορεύεται). Πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι τα πάρκα και τα δημόσια σιντριβάνια αποτελούν καταφύγιο δροσιάς κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας (οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις θερμές περιόδους για τους περισσότερους πολίτες), οπότε πολλοί από τους συμμετέχοντες μπορεί να θεωρούν τη διατήρησή τους μεγάλης σημασίας. Αυτό ισχύει και για τις συσκευές κλιματισμού που δεν αναφέρονται ως εχθρικές προς το περιβάλλον, δεδομένου ότι θεωρούνται ζωτικής σημασίας κατά τις πολύ θερμές περιόδους.

Όριο στην κατανάλωση είναι καλύτερα να εφαρμοστεί σύμφωνα με τους συμμετέχοντες ανά υδρόμετρο και όχι ανά άτομο. Αυτό σημαίνει ότι θεωρείται προτιμότερο να εξετάσει το σύνολο των αναγκών ενός νοικοκυριού, παρά να γίνει προσπάθεια μέτρησης του αριθμού των ατόμων σε κάθε νοικοκυριό και να τεθεί όριο ανά άτομο, αν και τα νοικοκυριά με λιγότερους ενοίκους μπορεί να χρειάζονται λιγότερο νερό. Ο περιορισμός εμπορικών χρήσεων σε τέτοιο βαθμό που θα οδηγούσε σε προσωρινό κλείσιμο βιομηχανιών θεωρείται χαμηλής σημασίας, αφού είναι προφανές ότι οι άνθρωποι προσπαθούν να προστατεύσουν τις θέσεις εργασίας τους, ακόμη και κατά τη διάρκεια ενός ακραίου φαινομένου ξηρασίας.

Όσον αφορά στην υποδομή και στο δίκτυο διανομής νερού (δεύτερη ομάδα ερωτήσεων) οι συμμετέχοντες πιστεύουν ότι η αναβάθμιση και οι επισκευές του δικτύου διανομής ή ακόμη και η αντικατάστασή του με ένα νέο, χρησιμοποιώντας την πιο σύγχρονη τεχνολογία, πρέπει να αποτελέσει κύρια προτεραιότητα. Συγκεκριμένα, περίπου το 88% των ερωτηθέντων πιστεύουν ότι ένα πρόγραμμα ανίχνευσης διαρροών, μαζί φυσικά με την επισκευή των

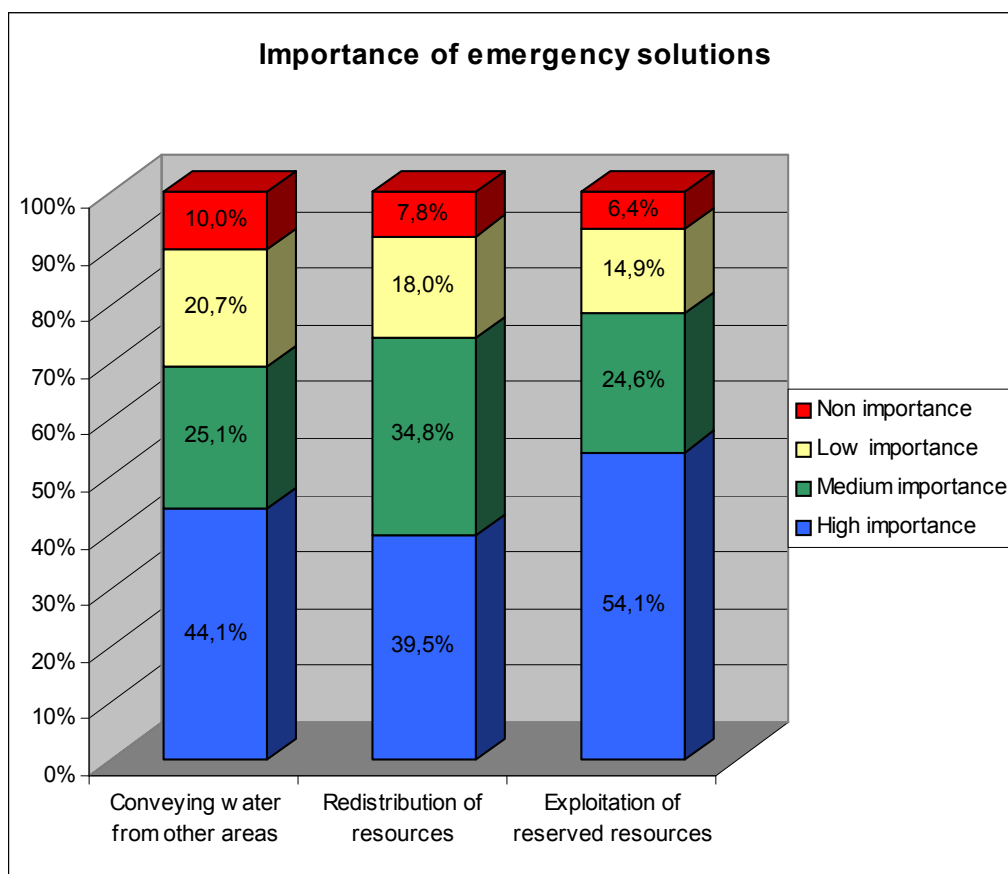
διαρροών που ανιχνεύθηκαν, θα πρέπει να αποτελεί υψηλή προτεραιότητα για την εταιρία διανομής νερού. Πρέπει να επισημανθεί, ότι αυτό το ζήτημα θεωρείται από το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετεχόντων ως υψηλής προτεραιότητας σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο ζήτημα περιλαμβάνεται στο ερωτηματολόγιο. Η αντικατάσταση παλιών ή σπασμένων αγωγών και η εγκατάσταση αυτοματισμών θεωρούνται επίσης υψηλής προτεραιότητας με ποσοστά 66% και 60% αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11. Σημαντικότητα των βελτιώσεων στα δίκτυα διανομής νερού.

Από την άλλη πλευρά, η μείωση της υδραυλικής πίεσης στα δίκτυα ή η χρήση διακοπόμενης παροχής δεν φαίνεται να κερδίσει την εμπιστοσύνη των ερωτούμενων, δεδομένου ότι αντιμετωπίζεται μετριωπαθώς, με απαντήσεις που δεν οδηγούν σε κανένα σαφές συμπέρασμα. Είναι προφανές ότι οι συμμετέχοντες πιστεύουν ότι οι υποδομές και το δίκτυο διανομής είναι πολύ παλιά και πρέπει να αντικατασταθούν με νέα χρησιμοποιώντας τεχνολογικά εξελιγμένους σωλήνες και συσκευές. Αυτή η αίσθηση των συμμετεχόντων έχει επιβεβαιωθεί από μετρήσεις στο δίκτυο που δείχνουν μεγάλες απώλειες νερού. Είναι αλήθεια ότι σημαντικές ποσότητες νερού θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν αν το δίκτυο διανομής ανακατασκευαστεί.

Όσον αφορά τις λύσεις έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας (τρίτη ομάδα ερωτήσεων) οι συμμετέχοντες φαίνεται να είναι εξοικειωμένοι και με τις τρεις υπο-ομάδες ερωτήσεων και φαίνεται ότι ορισμένες από τις προτεινόμενες λύσεις έχουν ήδη εφαρμοστεί στην περιοχή. Αυτό δίνει στους πολίτες την ευκαιρία να έχουν διαμορφώσει μια καλή άποψη για πολλές από τις λύσεις έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 6.12. Σημαντικότητα των επειγουσών ενεργειών.

Η μεταφορά νερού από άλλες περιοχές θεωρείται μια αρκετά καλή λύση κερδίζοντας την προτίμηση του 45% των συμμετεχόντων. Θεωρείται δε καλή λύση μόνο στην περίπτωση που το νερό θα μεταφέρεται με αγωγούς. Η μεταφορά νερού με βυτιοφόρα φορητά ή τρένα δεν θεωρείται πολύ καλή ιδέα. Αν και περισσότεροι από 70% των ερωτηθέντων πιστεύουν ότι η μεταφορά νερού μέσω αγωγών κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ξηρασίας είναι καλή λύση, λιγότεροι από 30% συμφωνούν με τη μεταφορά νερού με άλλα μέσα μεταφοράς. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι και οι δύο λύσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα στο παρελθόν και η αποτελεσματικότητά τους είναι λίγο πολύ γνωστή στο ευρύ κοινό. Από τη μία πλευρά, η μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στα μικρά νησιά του Αιγαίου με όχι και πολύ

καλά αποτελέσματα. Έχουν παρατηρηθεί μάλιστα περιπτώσεις υποβάθμισης της ποιότητας του γλυκού νερού κατά τη διάρκεια της μεταφοράς καθώς και περιπτώσεις που η τιμή ήταν πολύ υψηλή. Φυσικά, τεχνικά προβλήματα όπως η δυσκολία προσέγγισης κάποιων νησιών κυρίως λόγω κακοκαιρίας ή κακής υποδομής, μπορεί να αφήσουν μια περιοχή χωρίς γλυκό νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά, η μεταφορά νερού μέσω αγωγών έχει χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση της πόλης της Αθήνας με πολύ καλά αποτελέσματα. Αν και αυτή η λύση μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα στο μέλλον, υπάρχει η πεποίθηση ότι η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού είναι σχεδόν βέβαιη με τη χρήση άλλων μέσων μεταφοράς εκτός των αγωγών.

Μια άλλη λύση μπορεί να είναι η αναδιανομή ποσοτήτων νερού προς όφελος των πιο επειγουσών καταναλώσεων. Γενικά, οι άνθρωποι πιστεύουν ότι η λύση αυτή αποτελεί ένα καλό μέτρο έκτακτης ανάγκης και την κατατάσσουν στην υψηλή ή τουλάχιστον στη μέση προτεραιότητα, αν και διαφορετικές χρήσεις απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους συμμετέχοντες δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται μείωση των ποσοτήτων νερού για παραγωγή ενέργειας, ενώ οι πολίτες φαίνονται έτοιμοι να ελαχιστοποιήσουν τις ψυχαγωγικές δραστηριότητές τους που απαιτούν τη χρήση νερού κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ξηρασίας. Πάνω από το 60% των συμμετεχόντων πιστεύουν ότι η χρήση για λόγους αναψυχής θα πρέπει να μειωθεί προς όφελος των πιο ζωτικής σημασίας χρήσεων, όπως η οικιακή χρήση. Αυτό που φαίνεται πιο σημαντικό είναι ότι οι πολίτες έχουν αναπτύξει μια ισχυρή οικολογική συνείδηση. Μόνο το 20% των συμμετεχόντων αποδέχονται τη μείωση της οικολογικής παροχής κατάντη των φραγμάτων. Φαίνεται μάλιστα ότι οι περισσότεροι συμμετέχοντες είναι πρόθυμοι να θυσιάσουν τη διαθεσιμότητα του νερού για οικιακή χρήση υπέρ της βιωσιμότητας του περιβάλλοντος. Είναι δε βέβαιο ότι οι πολίτες θεωρούν τη σταθερότητα του περιβάλλοντος πιο σημαντική από την αναψυχή τους. Πρέπει να τονιστεί ότι μια τέτοια σωστή στάση δίνει αξιοπιστία και στις υπόλοιπες απαντήσεις και δείχνει προσωπικότητες που αξίζει τόσο να είναι δέκτες συνεχούς ενημέρωσης για θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων, όσο και να συμμετέχουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Η υψηλότερη προτεραιότητα μεταξύ των λύσεων έκτακτης ανάγκης δίνεται στη διατήρηση πηγών για χρήση έκτακτης ανάγκης. Πάνω από το 55% των συμμετεχόντων θεωρεί ότι υπάρχουν αναξιοποίητες πηγές στην περιοχή τους, που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Ερωτήσεις σχετικά με συγκεκριμένους υδατικούς πόρους έδωσαν ακόμα πιο εντυπωσιακά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, πάνω από το 85% των συμμετεχόντων πιστεύουν ότι τα ποτάμια και οι λίμνες στην περιοχή τους πρέπει να αξιοποιηθούν περισσότερο σε περιόδους έκτακτης ανάγκης. Νέες γεωτρήσεις θα πρέπει να

χρησιμοποιηθούν σύμφωνα με το 73% του συμμετεχόντων, ενώ οι παλιές γεωτρήσεις που δεν χρησιμοποιούνται πια θα πρέπει να επανασυνδέονται με το σύστημα ως λύση έκτακτης ανάγκης, σύμφωνα με το 61% των ερωτηθέντων. Φαίνεται ότι τα ποτάμια και γεωτρήσεις αποτελούν τις πιο δημοφιλείς λύσεις σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης έλλειψης νερού. Τα υφάλμυρα νερά της περιοχής θεωρούνται σημαντικά από έναν στους δύο συμμετέχοντες, ενώ ελαφρώς λιγότερο σημαντική θεωρείται η προσωρινή σύνδεση με απομακρυσμένους υδατικούς πόρους ή άλλα δίκτυα απομακρυσμένων περιοχών. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν λύσεις που δεν θεωρούνται πολύ αξιόλογες, όπως η χρήση του νεκρού όγκου των φραγμάτων και δεξαμενών, λύση που θεωρείται χρήσιμη μόνο από ένα 30% των συμμετεχόντων, ή η σπορά των νεφών, η οποία συγκεντρώνει ακόμα μικρότερη προτίμηση (περίπου 25%). Θα πρέπει να αναφερθεί για άλλη μια φορά, ότι οι λύσεις που συγκεντρώνουν τη μικρότερη προτίμηση μπορεί να είναι άγνωστες στους περισσότερους πολίτες, γεγονός που τους οδηγεί στο να μην τις επιλέγουν χωρίς απαραίτητα να μην τις θεωρούν σημαντικές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η γενική προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε ασαφή αποτελέσματα. Η σε βάθος ανάλυση σε σχέση με ηλικιακές ομάδες και επαγγελματικούς και κοινωνικούς παράγοντες μπορεί να αποσαφηνίσει καταστάσεις και να παρουσιάσει νέες οπτικές γωνίες για πολλά θέματα. Μια τέτοια ανάλυση του ερωτηματολογίου, αν και δεν θα παρουσιαστεί λεπτομερώς στη συγκεκριμένη παράγραφο, παρουσίασε τις διαφορετικές απόψεις μεταξύ των νεότερων και των ηλικιωμένων καθώς και μεταξύ ατόμων διαφορετικού μορφωτικού επιπέδου. Οι νεότεροι και πιο μορφωμένοι πολίτες φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητοι σε οικολογικά προβλήματα, ενώ οι ηλικιωμένοι και οι εργαζόμενοι θεωρούν τη διατήρηση των εμπορικών χρήσεων πιο σημαντική, δεδομένου ότι είναι πιο ευαίσθητοι στις κοινωνικές ταραχές και την απώλεια εισοδήματος.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα ερωτηματολόγια αυτής της μορφής μπορούν να αποδειχθούν πολύ σημαντικά εργαλεία επικοινωνίας μεταξύ του κοινού και των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων. Σε μια εποχή που έχει γίνει κατανοητό ότι ακόμα και η καλύτερη λύση δεν θα είναι αποτελεσματική αν το κοινό δεν είναι έτοιμο για να την εγκρίνει, ή είναι απρόθυμο να αποδεχθεί την ορθότητα και την αναγκαιότητά της, οι συμμετοχικές διαδικασίες κρίνονται απαραίτητες όχι μόνο όσον αφορά στην αποδοχή των σχεδίων αντιμετώπισης της ξηρασίας, αλλά ακόμη και στην ανατροφοδότηση των υπευθύνων με τροποποιήσεις και βελτιώσεις των προτεινόμενων σχεδίων και λύσεων. Η εξαγωγή ξεκάθαρων συμπερασμάτων από τέτοια ερωτηματολόγια δεν είναι εύκολη διαδικασία και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να οδηγεί σε παραπλανητικές εκτιμήσεις. Ακόμη και σ' αυτή την περίπτωση, εξάγονται σημαντικά ευρήματα σε

σχέση με την άποψη του κοινού που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Από το συγκεκριμένο ερωτηματολόγιο συνοπτικά εξάγονται τα εξής συμπεράσματα: Η ενημέρωση του κοινού είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία που μπορεί να ευαισθητοποιήσει τους ανθρώπους σχετικά με τη σημασία του νερού και να οδηγήσει σε εθελοντική εξοικονόμηση νερού σε περίοδο ξηρασίας, εξοικονόμηση που θα είναι πολύ πιο σημαντική αν γίνει τρόπος ζωής. Οι περιορισμοί και οι απαγορεύσεις για συγκεκριμένες χρήσεις θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά και μόνο ως λύση ανάγκης, αφού μπορεί να οδηγήσουν σε κοινωνικές αντιδράσεις και αναταραχές. Το ίδιο ισχύει και για την τιμολογιακή πολιτική η οποία θεωρείται ως ένα χρήσιμο εργαλείο, αλλά μόνο για την υπερβολική κατανάλωση. Οι πολίτες είναι πρόθυμοι να ελαττώσουν ορισμένες χρήσεις σε μία περίοδο έκτακτης ανάγκης, αλλά με την προϋπόθεση ότι η ελάττωση αυτή δεν προκαλεί βλάβη στο περιβάλλον. Οι ψυχαγωγικές χρήσεις μπορούν εύκολα να διακοπούν, σε αντίθεση με την οικολογική παροχή κατάντη των φραγμάτων, η διατήρηση της οποίας θεωρείται υψίστης σημασίας. Το δίκτυο διανομής νερού στην υπό εξέταση περιοχή θεωρείται προβληματικό. Οι πολίτες πιστεύουν ότι είναι παλιό και ελαττωματικό. Ένα πρόγραμμα ανίχνευσης διαρροών θεωρείται όχι μόνο αναγκαίο αλλά και επιτακτικό. Τροποποιήσεις στο δίκτυο θα πρέπει να εφαρμοστούν το συντομότερο δυνατό και αντικατάσταση του συνόλου ή μεγάλων τμημάτων του δικτύου με νέα, που ενσωματώνουν σύγχρονης τεχνολογίας υλικά, θα πρέπει άμεσα να προγραμματιστεί. Μέτρα έκτακτης ανάγκης για τις ακραίες περιόδους ξηρασίας θα πρέπει να προβλεφθούν και να προγραμματιστούν από το κράτος. Η μεταφορά νερού μέσω αγωγών θεωρείται ο πιο αποτελεσματικός τρόπος, ενώ άλλα μέσα μεταφοράς του νερού θα πρέπει να αποφεύγονται. Ανακατανομή των πηγών προς όφελος των πιο αναγκαίων καταναλώσεων θα πρέπει επίσης να εφαρμόζεται, εκτός αν η ανακατανομή αυτή πλήττει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Τέλος, η διατήρηση πηγών για έκτακτη ανάγκη, αλλά και η περαιτέρω εκμετάλλευση των ποταμών και λιμνών κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας θεωρούνται απαραίτητα, προκειμένου να μετριαστούν οι συνέπειες της ξηρασίας.

## **6.5 Στρατηγικός και Επιχειρησιακός Σχεδιασμός**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κάθε υδατικό σύστημα αντιδρά διαφορετικά στην ξηρασία σύμφωνα με την ικανότητα και την προετοιμασία του να αντισταθεί στη μείωση της διαθεσιμότητας του νερού. Ακόμη και σε ένα μεικτό σύστημα, το κάθε υποσύστημά του παρουσιάζει διαφορετική τρωτότητα, ενώ για κάθε σύστημα ή υποσύστημα μπορεί να απαιτείται διαφορετικό επίπεδο διασφάλισης



των πόρων (water security). Για παράδειγμα, ένα αστικό υδατικό σύστημα θα πρέπει να είναι περισσότερο προστατευμένο απέναντι στη λειψυδρία σε σχέση με ένα αγροτικό σύστημα. Αυτό αντικατοπτρίζεται στο επίπεδο της αποδεκτής πιθανότητας αστοχίας, η οποία πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερη στο αστικό υδατικό σύστημα.

Για ένα απλό υδατικό σύστημα το οποίο εξαρτάται κυρίως από την ετήσια διαθεσιμότητα νερού (ετήσιας ρύθμισης) ο Στρατηγικός Σχεδιασμός έχει ως προτεραιότητα τον προσδιορισμό των επιπέδων της πιθανότητας αστοχίας εξαιτίας της έλλειψης νερού και τη διαμόρφωση των προτάσεων για τα κατάλληλα διαχειριστικά και κατασκευαστικά μέτρα με στόχο την κάλυψη των αναγκών. Στην περίπτωση ενός υπάρχοντος συστήματος με συγκεκριμένη υποδομή, η ανάλυση των γεγονότων ξηρασίας απαιτείται για τον ορθολογικό καθορισμό της έντασης της ξηρασίας (που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη περίοδο αναφοράς) και επομένως τη διαμόρφωση των κατάλληλων διαχειριστικών και κατασκευαστικών μέτρων που απαιτούνται.

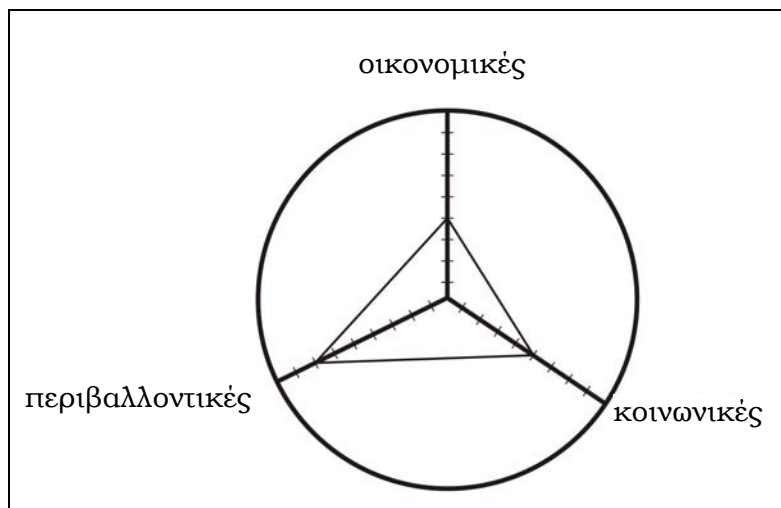
Θα πρέπει να τονιστεί ότι η διακινδύνευση για λειψυδρία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τους φυσικούς κινδύνους όπως η ξηρασία. Επομένως, η πιθανολογική διαδικασία θα πρέπει να ενσωματώνει και μια ντετερμινιστική συνιστώσα, που περιλαμβάνει τα μόνιμα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις διαχειριστικές πρακτικές που έχουν εγκριθεί για αυτό το υδατικό σύστημα. Επομένως, εάν η διακινδύνευση (risk) υπολογίζεται ως η πιθανότητα αστοχίας (λόγω της έλλειψης νερού) θα πρέπει πάντοτε να αναφέρεται σε συγκεκριμένες συνθήκες και δυνατότητες του συστήματος (Tsakiris, 2009).

Στην περίπτωση του Επιχειρησιακού Σχεδιασμού ετοιμότητας, ένας ακόμη περιορισμός θα πρέπει να πληρείται: η γνώση των αρχικών συνθηκών. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να υπολογιστεί η λεγόμενη «διακινδύνευση υπό συνθήκη» (conditional risk), βασισμένη στην κατάσταση στην αφετηρία του γεγονότος ξηρασίας.

Τόσο για τον Στρατηγικό, όσο και για τον Επιχειρησιακό Σχεδιασμό, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ετήσιες όσο και οι πολυετείς (παρατεταμένες) ξηρασίες.

Δεδομένου ότι οι πιθανότητες δεν είναι εύκολα κατανοητές από τα κέντρα λήψης αποφάσεων και τα ενδιαφερόμενα μέρη (stakeholders) και δεν δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες εγρήγορης απέναντι στη σοβαρότητα της έλλειψης νερού, η διακινδύνευση μπορεί να εκτιμηθεί με όρους οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών απωλειών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση της έννοιας της ετησιοποιημένης διακινδύνευσης (μέση ετήσια διακινδύνευση), που ενσωματώνει το σενάριο της ξηρασίας με ορισμένη

πιθανότητα υπέρβασης, τον αντίκτυπό της στη διαθεσιμότητα του νερού και ως εκ τούτου τις επιπτώσεις της στον οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό τομέα. Σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθείται, τα επιμέρους κριτήρια μετατρέπονται σε αριθμούς σε μια κοινή θεωρητική κλίμακα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13 (π.χ. από 0 μέχρι 10, όπου στο 0 δεν υπάρχουν επιπτώσεις και στο 10 υπάρχουν οι μέγιστες αρνητικές επιπτώσεις). Επιπλέον, σταθμίζοντάς τα ως προς τη σχετική τους σημασία, αποδίδεται η συνολική βαθμολογία για κάθε σενάριο. Χρησιμοποιώντας κλάσεις πιθανότητας και τον μέσο όρο των επιπτώσεων μεταξύ των σεναρίων ξηρασίας στα όρια κάθε κλάσης, μπορούν να εκτιμηθούν οι αναμενόμενες επιπτώσεις (οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές) από ολόκληρη τη διαδικασία των γεγονότων ξηρασίας και των χαρακτηριστικών του συστήματος (Tsakiris et. al., 2009).



Σχήμα 6.13. Εκτίμηση ενός γεγονότος ξηρασίας με βάση τις επιπτώσεις στον οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό τομέα.

Η εκτίμηση της μέσης ετήσιας διακινδύνευσης είναι δύσκολη και απαιτεί βαθιά γνώση των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών διαδικασιών. Η μέση ετήσια αυτή διακινδύνευση μπορεί να εξαχθεί με βάση τη γνώση των ειδικών (experts) στο εξεταζόμενο σύστημα και προφανώς είναι εφαρμόσιμη μόνο στο συγκεκριμένο σύστημα.

Στα σύνθετα υδατικά συστήματα, εμφανίζεται μια ακόμη επιπλοκή που σχετίζεται με τους κανόνες κατανομής των περιορισμένων υδατικών πόρων κατά τη διάρκεια της ξηρασίας. Ακολουθώντας την ορθολογική ιεράρχηση της ικανοποίησης της ζήτησης που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η έλλειψη της κάθε μονάδας νερού κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (π.χ. 15νθημέρου) δημιουργεί συγκεκριμένες επιπτώσεις. Οι επιπτώσεις αυτές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το προσδιορισμό της προτεραιότητας κάθε μονάδας νερού. Ο προσδιορισμός των προτεραιοτήτων

αυτών για κάθε μήνα σε ένα σύνθετο υδατικό σύστημα απαιτεί προηγμένες πολυκριτηριακές εκτιμήσεις και ενισχυμένη συμμετοχή των ενδιαφερομένων μερών.

## 6.6 Περιεχόμενα ενός Σχεδίου Διαχείρισης Ξηρασίας

### A. Εισαγωγή

Εξηγεί το σκοπό του σχεδίου και θέτει τους όρους για:

- Τον συντονισμό των δραστηριοτήτων
- Τον προσδιορισμό των ευθυνών για τη συλλογή δεδομένων
- Τη δημιουργία σταθερής βάσης για την αξιολόγηση της σφοδρότητας της ξηρασίας
- Τη διασφάλιση του νομικού και διοικητικού πλαισίου
- Την καθιέρωση επικοινωνίας με τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και το κοινό
- Την κινητοποίηση όλων των διαθέσιμων δυνάμεων

### B. Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της Ξηρασίας

Αυτή η ενότητα εξηγεί πώς η Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της Ξηρασίας, ένα συντονιστικό όργανο διαχείρισης των αντιδράσεων σε καταστάσεις ξηρασίας, θα δημιουργηθεί. Εντοπίζονται οι εκπρόσωποι, οργανώνονται συναντήσεις, δηλώνονται οι ευθύνες και διευκολύνονται η επικοινωνία και συστάσεις προς τους οργανισμούς και το κοινό.

### Γ. Συλλογή δεδομένων

Οι αρμοδιότητες σχετικά με τη συλλογή δεδομένων, την επικοινωνία και την υποβολή εκθέσεων δίνεται σε οργανισμούς που εκπροσωπούνται στην Ειδική Επιτροπή Αντιμετώπισης της Ξηρασίας.

### Δ. Εκτίμηση σφοδρότητας Ξηρασίας

Επιλέγονται οι δείκτες Ξηρασίας και συμφωνούνται τα επίπεδα Ξηρασίας για τη λήψη μέτρων. Προτείνονται οι κατάλληλοι περίοδοι αναφοράς για την εκτίμηση της Ξηρασίας (π.χ. 3, 6, 9 και 12 μήνες).

Αναπτύσσονται μέθοδοι για τον ακριβή προσδιορισμό των επεισοδίων Ξηρασίας (π.χ. διάρκεια).

### Ε. Επικοινωνίες

Δημιουργούνται τρόποι επικοινωνίας με τις αρμόδιες υπηρεσίες, τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και το κοινό. Καθορίζεται το είδος και η χρονική στιγμή της επικοινωνίας.

#### ΣΤ. Αντίδραση στην ξηρασία και επίπεδα δράσης

Τα επίπεδα της αντίδρασης στην ξηρασία μπορεί να είναι:

- Τοπικό (επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού ή άλλης κατάλληλης περιοχής ή υδατικού συστήματος).
- Περιφερειακό (σε περίπτωση που επηρεάζονται περισσότερες από μία περιοχές).
- Εθνικό (σε περίπτωση που η κατάσταση της ξηρασίας είναι πολύ σοβαρή και επηρεάζει πολύ μεγάλες περιοχές).

Ο ρόλος των οργανισμών που εμπλέκονται σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο θα πρέπει να διευκρινιστεί (υπουργεία περιβάλλοντος, εσωτερικών, γεωργικής ανάπτυξης, τουρισμού, βιομηχανίας κτλ).

Προσδιορίζονται επίσης τα επίπεδα δράσης που σχετίζονται με τις συνθήκες ξηρασίας και κατά τα οποία θα ενεργοποιηθούν διαφορετικές ομάδες δράσεων. Υπό φυσιολογικές καταστάσεις προβλέπονται έξι επίπεδα δράσεων:

- άνω του φυσιολογικού
- φυσιολογικό
- συμβουλευτικό
- παρακολούθησης
- προειδοποίησης
- έκτακτης ανάγκης

Οι ενέργειες στο πλαίσιο αυτών των επιπέδων θα πρέπει να δηλώνονται με σαφήνεια.

### Ε. Εφαρμογή μέτρων έκτακτης ανάγκης

Οι αρχές και οι εξουσίες που σχετίζονται με καταστάσεις ξηρασίας σε διάφορα επίπεδα της διακυβέρνησης, εντοπίζονται και ορίζονται ως πρωταγωνιστές. Νόμοι εφαρμόσιμοι σε καταστάσεις ξηρασίας τίθενται σε εφαρμογή. Πριν την εφαρμογή οποιουδήποτε μέτρου, θα πρέπει να ζητούνται οι συμβουλές του κατάλληλου νομικού προσωπικού.

## 6.7 Παραδείγματα εφαρμογής Σχεδιασμού Αντιμετώπισης της Ξηρασίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο Σχεδιασμός για την αντιμετώπιση της ξηρασίας δεν έχει προχωρήσει στα περισσότερα κράτη του κόσμου. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθούν κάποια σημαντικά παραδείγματα χωρών που είτε έχουν κάνει προσπάθειες προς την κατεύθυνση του Σχεδιασμού, είτε ακόμη έχουν να παρουσιάσουν ολοκληρωμένα Σχέδια για την αντιμετώπιση της ξηρασίας.

Ένα από τα καλύτερα παραδείγματα σχεδιασμού για την ξηρασία αποτελεί το Επιχειρησιακό Σχέδιο της Seville στην Ισπανία. Η εταιρία ύδρευσης της Seville δημιούργησε και διένειμε σε όλους τους ενδιαφερόμενους ένα σχέδιο αντιμετώπισης της ξηρασίας που ονόμασε «Εγχειρίδιο για την Ξηρασία». Στο σχέδιο περιγράφονται οι δράσεις που θα πρέπει να αναληφθούν σε κάθε στάδιο ξηρασίας αλλά και τα κριτήρια έναρξης εφαρμογής των διαφόρων δράσεων. Το σχέδιο περιγράφει επίσης τη δημιουργία Ειδικής Επιτροπής Αντιμετώπισης, αλλά και το πλαίσιο συμφωνιών που πρέπει να επιτευχθεί με άλλους φορείς για την αντιμετώπιση ενός γεγονότος ξηρασίας (UNEP/PAP/RAC, 2007).

Τα περισσότερα ωστόσο σχέδια αντιμετώπισης προέρχονται από τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου αρκετές από τις πολιτείες έχουν υιοθετήσει το σχεδιασμό για την ξηρασία και έχουν δημιουργήσει ολοκληρωμένα σχέδια για την αντιμετώπιση της. Παράδειγμα τέτοιου σχεδιασμού αποτελεί το Επιχειρησιακό Σχέδιο για την ξηρασία της Arizona (ADPP, 2004) στο οποίο περιγράφονται αναλυτικά οι ενέργειες της Πολιτείας, των διαφόρων φορέων, αλλά και των πολιτών για την αντιμετώπιση ενός γεγονότος ξηρασίας. Αντίστοιχη προσπάθεια έχει γίνει στη Massachusetts (MDMP, 2001), όπου έμφαση δίνεται τόσο στην αναγνώριση της ξηρασίας, όσο και στο θεσμικό πλαίσιο, με αναλυτική περιγραφή της Ειδικής Επιτροπής Αντιμετώπισης, αλλά και του ρόλου των διαφόρων φορέων στην αντιμετώπιση της ξηρασίας. Η δομή του σχεδιασμού, οι προτεραιότητες και οι φορείς, αλλά και ο ρόλος των ομάδων εργασίας και το πλαίσιο των δράσεων περιγράφονται στο Σχέδιο Ξηρασίας του New Mexico (NMDP, 2003).

Μια πραγματικά ενδιαφέρουσα περίπτωση αποτελεί το Σχέδιο Διαχείρισης της Ξηρασίας που έχει συνταχθεί από το Τμήμα Γεωργίας, Δασών και Αλιείας της Δημοκρατίας της Νοτίου Αφρικής. Το Σχέδιο βασίζεται στο ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο, στην αξιολόγηση των κινδύνων και τον σχεδιασμό περιορισμού τους και στις ενέργειες αντίδρασης και αποκατάστασης. Σύμφωνα με το Σχέδιο η διαχείριση της ξηρασίας διέπεται από δράσεις πληροφόρησης και επικοινωνίας, εκπαίδευσης και κατάρτισης, ευαισθητοποίησης του κοινού, έρευνας και φυσικά της κατάλληλης χρηματοδότησης (DMP, 2005). Χαρακτηριστικό του Σχεδίου

αυτού είναι ότι όπως αναφέρεται ακόμη και στο εξώφυλλο, αποτελεί ένα κείμενο διαβούλευσης για σχολιασμό από το κοινό.

## 6.8 Αναφορές κεφαλαίου

- Arizona Drought Preparedness Plan (ADPP), 2004. Arizona Drought Preparedness Plan – Operational Drought Plan, Governor’s Drought Task Force, Governor Janet Napolitano, October 8, 2004.
- Arnstein S.R., 1969. A Ladder of Citizens’ Participation. *Journal of the American Institute of Planners*, 35(4): 216-224.
- Cancelliere A., Di Mauro G., Bonaccorso B. and Rossi G., 2007. Stochastic Forecasting of Drought Indices. In: G. Rossi, T. Vega and B. Bonaccorso (Eds.), *Methods and tools for drought analysis and management*, Springer (Water Science and Technology Library, Volume 62), Dordrecht 2007, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-5923-0, pp. 83-100.
- Commission of the European Communities (ComEC), 2001. European Governance: A White Paper, COM(2001) 428. European Commission: Brussels, p. 35.
- Commission of the European Communities (ComEC), 2002. Guidance on Public Participation in Relation to the Water Framework Directive – Active Involvement, Consultation and Public Access to Information. Common Implementation Strategy Working Group 2.9. European Commission: Brussels.
- Department of the Environment, Transport and the Regions (DETR), 2000. Public Participation in Making Local Environmental Decisions - The Aarhus Convention Newcastle Workshop - Good Practice Handbook. DETR: London (product code OEP 0330).
- Drought Management Plan (DMP), 2005. Drought Management Plan: A discussion Document for Public Comment, Republic of South Africa, Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, August 2005.
- Glinni A.F., Sivakumar M.V.K. and Wilhite D.A., 2001. Drought management and preparedness - WMO perspective. Proceedings of the Mitigation of Climate Induced Natural Hazards Workshop, 12-13 December 2001, WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- IAP2, 2007. IAP2 Spectrum of Public Participation. International Association for Public Participation, available at: <http://www.iap2.org>.
- Massachusetts Drought Management Plan (MDMP), 2001. Working Draft: Massachusetts Drought Management Plan, Executive Office of Environmental Affairs and Massachusetts Emergency management Agency, December 20, 2001.

- New Mexico Drought Plan (NMDP), 2003. New Mexico Drought Task Force, New Mexico Drought Plan, November 2003.
- Pimbert M. and Wakeford T., 2001. Overview, Deliberative Democracy and Citizen Empowerment. *PLA Notes*, 40: 23-28.
- Rossi G., Castiglione L. and Bonaccorso B., 2007. Guidelines for Planning and Implementing Drought Mitigation Measures. In: G. Rossi, T. Vega and B. Bonaccorso (Eds.), *Methods and tools for drought analysis and management*, Springer (Water Science and Technology Library, Volume 62), Dordrecht 2007, The Netherlands, ISBN: 978-1-4020-5923-0, pp. 325-347.
- Tsakiris G., 2008. Drought Induced Water Shortage Management: An Overview. In: G. Tsakiris (Ed.), *Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM) – Final Report*. CANaH Publication 6/08, Athens 2008, pp. 9-22.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H. and Pangalou D., 2007. Application of the Drought Management Guidelines in Greece (Chapter 16). In: *Drought Management Guidelines Technical Annex*, A. Iglesias, M. Moneo, A. Lopez-Francos (Eds.), CIHEAM/EC MEDAWater (Series B: Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes), Zaragoza, ISBN: 2-85352-359-4, pp. 245-295.
- Tsakiris G., Vangelis H. and Tigkas D., 2009. Assessment of Water Systems Vulnerability to Drought. *Proceedings of the Seventh International Conference of EWRA “Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Uncertainty”*, Limassol, 25-27 June 2009, Cyprus, pp. 333-340.
- Tsakiris G., Vangelis H. and Tigkas D., 2010. Assessing Water System Vulnerability to Multi-year Droughts. *European Water*, 29: 21-29.
- Tsakiris, G. 2009. A Paradigm for Applying Risk and Hazard Concepts in Proactive Planning. In: A. Iglesias, L. Garrote, A. Cancelliere, F. Cubillo and D. Wilhite (Eds.), *Coping with drought risk in Agriculture and Water Supply Systems, Drought Management and Policy Development in the Mediterranean*, Springer (Advances in Natural and Technological Hazards Research, Volume 26), Springer Science+Business Media B.V. 2009, ISBN: 978-1-4020-9044-8, pp. 81-99.
- UNEP/PAP/RAC, 2007. “Integrated Coastal Urban Water System Planning in Coastal Areas of the Mediterranean – Volume II: Tools and Instruments”, Priority Actions Programme, Regional Activity Centre, Split, Chapter 8, pp. 93-106.
- Vangelis H., 2008. Measures to combat Drought and Water Shortage: Public Participation through Questionnaires. In: G. Tsakiris (Ed.), *Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in*

Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM) – Final Report. CANaH Publication 6/08, Athens 2008, pp. 407-414

Videira N., Antunes P., Santos R. and Lobo G., 2006. Public and Stakeholder Participation in European Water Policy: a Critical Review of Project Evaluation Processes. *European Environment*, 16:19-31.

Wilhite D.A., 1993. The Enigma of Drought (Chapter 1, Part One). In: Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies, D.A. Wilhite (ed.), Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, ISBN: 0-7923-9337-6, pp. 3-15.



## κεφάλαιο 7

# Ξηρασία, RDI και Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής

### 7.1 Το τέλος της μονιμότητας στις μετεωρολογικές χρονοσειρές

Όταν νέες επιστημονικές μέθοδοι προτάθηκαν να αντικαταστήσουν τις εμπειρικές μεθόδους στις «αναπτυξιακές» μελέτες μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο υπήρξε μια μεγάλη ανάγκη για στοιχεία και μετρήσεις που απαιτούνταν για τη βαθμονόμηση και τη χρήση αυτών των μεθόδων. Έτσι, στο σχεδιασμό και στη διαχείριση των πάσης φύσεως υδραυλικών έργων ετέθη ως προϋπόθεση η συλλογή ικανού αριθμού δεδομένων από τα αντίστοιχα δίκτυα (μετεωρολογικά, υδρολογικά κλπ.). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού μετρητικών σταθμών για την καταγραφή σε κατάλληλες χρονικές κλίμακες των βασικών μεταβλητών που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους και τη δημιουργία δικτύων για τη χωρική κάλυψη κάθε χώρας.

Μετά την παρέλευση μερικών δεκαετιών τα μετρητικά δίκτυα προσέφεραν χρονοσειρές των μετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών σε κατάλληλες κλίμακες. Οι χρονοσειρές αυτές (μετά και από κατάλληλες διαδικασίες συμπλήρωσης και διόρθωσής τους) χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλη έκταση μαζί με Στατιστικές Μεθόδους και Μεθόδους Πιθανοτήτων για τον προσδιορισμό των μεγεθών σχεδιασμού των υδραυλικών έργων. Κατανομές πιθανότητας διαφορετικής πολυπλοκότητας χρησιμοποιήθηκαν για τις ακραίες υψηλές και χαμηλές τιμές των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών.

Με απλά λόγια, ο σχεδιασμός των υδραυλικών έργων και η διαχείριση των

υδατικών πόρων στηρίχθηκε σε μεθόδους και διαδικασίες που υποθέτουν την εξασφάλιση της μονιμότητας (stationarity) στις χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται (Milly et al., 2008). Η έννοια της μονιμότητας μπορεί να ελεγχθεί σε μια χρονοσειρά με διάφορες μεθόδους, γραφικές, υπολογιστικές, στατιστικές. Η Θεωρία της Ανάλυσης Χρονοσειρών διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για τον έλεγχο της μονιμότητας της κάθε χρονοσειράς.

Όπως είναι φυσικό ο πρώτος έλεγχος είναι γραφικός/εμπειρικός. Αν μια χρονοσειρά παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά για δύο χρονικά διαστήματα (σημαντικού μήκους) αυτό σημαίνει ότι η υπόθεση της μονιμότητας δεν ισχύει και επομένως οι μέθοδοι που στηρίζονται σ' αυτή την υπόθεση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Όσον αφορά στις βασικές μεταβλητές που χαρακτηρίζουν το κλίμα μιας περιοχής, πρέπει να τονισθεί η διαφορά μεταξύ κλιματικής μεταβλητότητας (climatic variability) και κλιματικής μονιμότητας (climatic stationarity). Η πρώτη αναφέρεται σε μια αναμενόμενη διαφοροποίηση των τιμών της μεταβλητής μέσα σε ευρέα όρια χωρίς ουσιαστικά να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη της κεντρικής τιμής (μέσος όρος, διάμεσος, πιθανότερη τιμή κλπ.) και της διασποράς (τυπική απόκλιση, εύρος, ασυμμετρία, κύρτωση κλπ.). Αντίθετα, αν μια χρονοσειρά χαρακτηρίζεται ως μη μόνιμη κλιματική χρονοσειρά αυτό σημαίνει ότι για μεγάλα χρονικά διαστήματα παρατηρούνται συστηματικές μεταβολές, που είτε διαφοροποιούν τα βασικά στατιστικά μεγέθη κεντρικής τιμής και διασποράς ή εμπεριέχουν επαναλαμβανόμενες τιμές ακραίων γεγονότων που βρίσκονται έξω από τα όρια της κλιματικής μεταβλητότητας.

Οι συστηματικές αλλαγές στις κλιματικές χρονοσειρές προέρχονται κυρίως από άμεσες ή έμμεσες ανθρώπινες παρεμβάσεις στα συστήματα που έχουν σχέση με τον υδρολογικό κύκλο. Αυτή η κατηγορία αλλαγών εντάσσεται στις αλλαγές χρήσης γης, αλλαγές δραστηριοτήτων και συνηθειών, ιδιοκτησιακές αλλαγές, αλλαγές του αναπτυξιακού μοντέλου και γενικότερα ανθρωπογενείς αλλαγές και παρεμβάσεις. Επίσης, μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές στην τεχνολογία, στη θέση μέτρησης, στον τρόπο μέτρησης και σε οτιδήποτε αλλάζει τις συνθήκες μέτρησης κάθε κλιματικής μεταβλητής. Η διαπίστωση του χρόνου αλλαγής αλλά και η διόρθωση (συνήθως) των παλαιότερων στοιχείων της χρονοσειράς, αποτελεί σήμερα τυπική διαδικασία διόρθωσης των στοιχείων των χρονοσειρών για να γίνουν ομογενή, ώστε οι μεταβλητές των στοιχείων αυτών να μπορούν να χαρακτηρισθούν ως τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν τις Θεωρητικές Κατανομές Πιθανότητας.

Στην περίπτωση της διόρθωσης της γενικότερης ανθρώπινης παρέμβασης στον υδρολογικό κύκλο, η διόρθωση είναι πιο δύσκολη γιατί η «φυσικοποίηση»

των μεγεθών (δηλαδή η διόρθωση των πρόσφατων τιμών ώστε να απομακρυνθεί η επίδραση της ανθρώπινης παρέμβασης) απαιτεί μεγάλη προσπάθεια, που γίνεται κάτω από ένα μεγάλο αριθμό υποθέσεων που πρέπει να ισχύουν για να επιτευχθεί ικανοποιητικά. Όμως, και σε αυτή την περίπτωση και παρά τις δυσκολίες, οι σχετικές διορθώσεις μπορούν να μετατρέψουν μια σειρά σε ομογενή, ώστε όλα τα δεδομένα να είναι ίσης βαρύτητας και να ισχύουν οι κανόνες της Στατιστικής και των Πιθανοτήτων για εξαγωγή συμπερασμάτων και υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις συνήθως μιλάμε για ομογενοποίηση των στοιχείων μιας χρονοσειράς μιας κλιματικής μεταβλητής. Τις τελευταίες δεκαετίες η ύπαρξη χρονοσειρών μεγάλου χρονικού μήκους και οι προηγμένες μέθοδοι ανίχνευσης αλλαγών στα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών, αλλά και η έρευνα και δημιουργία μοντέλων γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας άλλαξαν το τοπίο της ανάλυσης των χρονοσειρών, εισάγοντας την έννοια της «κλιματικής αλλαγής» και των επιπτώσεών της. Εκτός της ανίχνευσης τέτοιων αλλαγών στις χρονοσειρές των μετεωρολογικών μεταβλητών, δημιουργήθηκε και η τάση διαμόρφωσης προτάσεων σεναρίων για την έκταση της κλιματικής αλλαγής στο μέλλον.

## 7.2 Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή, σύμφωνα με τον ορισμό του Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), αναφέρεται σε μια αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί (π.χ. με χρήση στατιστικών ελέγχων) από τις αλλαγές στο μέσο όρο και/ή την μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του και διατηρείται για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως δεκαετίες ή και περισσότερο. Αναφέρεται σε οποιαδήποτε αλλαγή του κλίματος με την πάροδο του χρόνου, είτε λόγω της φυσικής μεταβλητότητας, είτε ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ο ορισμός αυτός διαφέρει από εκείνον που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών, σύμφωνα με τον οποίο η κλιματική αλλαγή αφορά στην αλλαγή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία μεταβάλλει τη σύνθεση της ατμόσφαιρας του πλανήτη και λειτουργεί προσθετικά προς τις παρατηρούμενες φυσικές κλιματικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια συγκρίσιμων χρονικών περιόδων (IPCC, 2007).

Σενάριο Κλιματικής Αλλαγής, όπως ορίζεται από το Data Distribution

Centre του IPCC (DDC: Κέντρο Διανομής Δεδομένων), είναι μια συνεκτική, εσωτερικά συνεπής και αληθοφανής περιγραφή μιας πιθανής μελλοντικής κλιματικής κατάστασης του πλανήτη. Το σενάριο δεν αποτελεί πρόβλεψη. Κάθε σενάριο είναι μια εναλλακτική εικόνα του πώς το μέλλον μπορεί να εξελιχθεί. Μια κλιματική προβολή μπορεί να χρησιμεύσει ως πρώτη ύλη για ένα σενάριο, αλλά τα σενάρια συχνά απαιτούν συμπληρωματικές πληροφορίες (π.χ., για τις συνθήκες αναφοράς). Ένα σύνολο σεναρίων συχνά χρησιμοποιείται για να αντικατοπτρίσει, στο μέτρο του δυνατού, το φάσμα της αβεβαιότητας στις κλιματικές προβολές, που στηρίζονται κυρίως στα αποτελέσματα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (DDC, 2011).

Μοντέλα γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (General Circulation Models - GCMs) ονομάζονται τα αριθμητικά μοντέλα που προσπαθούν να προσομοιώσουν το κλίμα σε παγκόσμιο επίπεδο, υπολογίζοντας σε ωριαία χρονική κλίμακα την εξέλιξη της ατμοσφαιρικής κατάστασης στις τρεις χωρικές διαστάσεις, βασισμένα στην αρχή διατήρησης της μάζας στην ατμόσφαιρα, στην ταχύτητα κίνησης, στη συνολική ενέργεια και την εξάτμιση του νερού (Grotch and MacCracken, 1991). Τα μοντέλα αυτά αντιπροσωπεύουν φυσικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς και την επιφάνεια της γης και περιλαμβάνουν σχετικές διαδικασίες από την επιφανειακή υδρολογία, τη διάδοση της θερμότητας, την ατμοσφαιρική ακτινοβολία, τη νέφωση και τους θαλάσσιους πάγους (Washington and Meehl, 1983). Τα τελευταία χρόνια, η σύνδεση μοντέλων γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας με πιο ρεαλιστικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας των ωκεανών, τα οποία εξετάζουν σε βάθος την κίνηση των ωκεάνιων μαζών, την αλμυρότητα και τη θερμική ενέργεια, επιτρέπουν την ακριβέστερη μελέτη του χρονικού ρυθμού των κλιματικών αλλαγών.

Για να θεωρηθεί ένα σενάριο κλιματικής αλλαγής χρήσιμο για τη διερεύνηση των επιπτώσεων και τη χάραξη πολιτικής, το IPCC θεωρεί ότι πρέπει να πληρούνται τουλάχιστον τα εξής πέντε κριτήρια:

1. Συνέπεια με τις παγκόσμιες προβλέψεις. Το σενάριο θα πρέπει να είναι συνεπές με ένα ευρύ φάσμα προβλέψεων για την υπερθέρμανση του πλανήτη (global warming) που βασίζονται στις αυξημένες συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου. Οι πιο συνηθισμένες τιμές που αναφέρονται για την αύξηση αυτή της θερμοκρασίας είναι 1.4 °C έως 5.8 °C ως το 2100, ή 1.5 °C έως 4.5 °C για διπλασιασμό της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.
2. Φυσική αληθοφάνεια. Το σενάριο θα πρέπει να είναι αληθοφανές, δεν πρέπει δηλαδή να παραβιάζει τους βασικούς νόμους της φυσικής. Ως εκ τούτου, οι αλλαγές σε μια περιοχή πρέπει να είναι φυσικά συνεπείς με αυτές σε μια άλλη περιοχή, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπλέον, ο

συνδυασμός των αλλαγών σε διάφορες μεταβλητές (που συχνά συσχετίζονται μεταξύ τους) θα πρέπει να παρουσιάζει φυσική συνέπεια.

3. Δυνατότητα εφαρμογής στην αξιολόγηση των επιπτώσεων. Το σενάριο θα πρέπει να περιγράφει τις αλλαγές σε επαρκή αριθμό μεταβλητών σε χωρική και χρονική κλίμακα, ώστε να επιτρέπει την αξιολόγηση των επιπτώσεων. Για παράδειγμα, τα μοντέλα επιπτώσεων μπορούν να απαιτούν την εισαγωγή δεδομένων για μεταβλητές όπως η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου, σε χωρικές κλίμακες που κυμαίνονται από παγκόσμια ως τοπική και χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από ετήσιους μέσους όρους ως ημερήσιες ή ωριαίες τιμές.
4. Αντιπροσωπευτικότητα. Το σενάριο θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του φάσματος της μελλοντικής αλλαγής του κλίματος στη συγκεκριμένη περιοχή. Μόνο με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί ένα ρεαλιστικό φάσμα πιθανών επιπτώσεων.
5. Προσβασιμότητα. Το σενάριο θα πρέπει να είναι εύκολο να αποκτηθεί, να ερμηνευθεί και να εφαρμοστεί για την αξιολόγηση των επιπτώσεων.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη, σύμφωνα με την τελευταία έκθεση του IPCC, είναι αναμφίβολη. Αποδεικνύεται πλέον και από παρατηρήσεις η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας του αέρα αλλά και των ωκεανών, η εκτεταμένη τήξη του χιονιού και των πάγων και η αύξηση της παγκόσμιας μέσης στάθμης της θάλασσας. Η τάση αύξησης της θερμοκρασίας τα τελευταία 50 χρόνια είναι της τάξης των 0.13 °C ανά δεκαετία, σχεδόν διπλάσια από την τάση που ανιχνεύεται στη χρονοσειρά των τελευταίων 100 ετών. Η στάθμη της θάλασσας ανέβηκε με μέσο ρυθμό 1.8 mm το χρόνο μεταξύ του 1961 και του 2003. Η έκταση των πάγων στον Αρκτικό κύκλο μειώνεται με μέσο ρυθμό 2.7% ανά δεκαετία, που κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού φτάνει και σε ρυθμό της τάξης του 7.4% ανά δεκαετία. Οι βροχοπτώσεις τα τελευταία 100 χρόνια μειώθηκαν αισθητά στην Αφρικανική ζώνη Sahel, τις περιοχές της Μεσογείου, τη νότια Αφρική και σε τμήματα της νότιας Ασίας. Αυξήθηκαν ωστόσο σημαντικά στις ανατολικές περιοχές της βόρειας και νότιας Αμερικής, της βόρειας Ευρώπης και της βόρειας και κεντρικής Ασίας. Οι περιοχές που πλήττονται από φαινόμενα ξηρασίας εκτιμάται ότι επίσης έχουν αυξηθεί από το 1970 και μετά.

Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τα διάφορα φυσικά συστήματα, κυρίως μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας. Φυσικά, η επιρροή αυτή είναι εντονότερη στα συστήματα που σχετίζονται με το χιόνι, τον πάγο και το παγωμένο έδαφος. Στα υδρολογικά συστήματα, υπάρχουν πλέον σοβαρές ενδείξεις ότι αυξάνεται η απορροή, με ιδιαίτερη έμφαση στις

ανοιξιάτικες αιχμές της, κυρίως στα ποτάμια που τροφοδοτούνται από χιονισμένες περιοχές. Τα νερά των ποταμών και των λιμνών εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού και την δημιουργία προβλημάτων λόγω της διαφορετικής θερμικής κατανομής. Ισχυρές είναι επίσης οι ενδείξεις ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει έντονα και τα βιολογικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων αλλαγών όπως η πρόωμη ανάπτυξη των φύλλων στα δέντρα, η μεταβολή στους χρόνους μετανάστευσης και ωοτοκίας των πουλιών και η μετατόπιση των πληθυσμών πολλών φυτικών και ζωικών ειδών προς την κατεύθυνση των πόλων της γης. Αλλαγές παρατηρούνται επίσης και στους βιολογικούς οργανισμούς των θαλασσών και του γλυκού νερού.

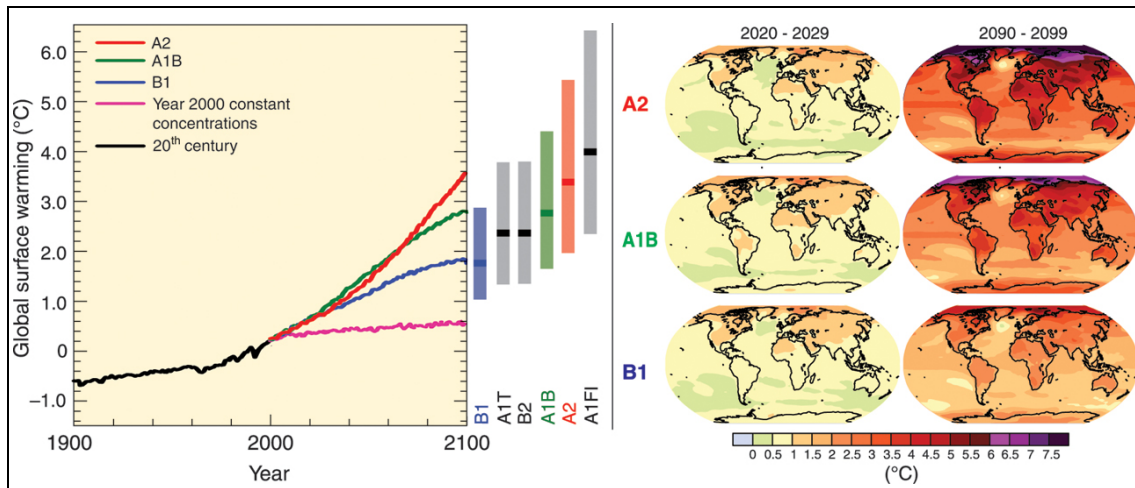
Επιπτώσεις τις κλιματικής αλλαγής επηρεάζουν άμεσα και τον άνθρωπο, χωρίς όμως οι αλλαγές αυτές να μπορούν να βασιστούν σε ισχυρές ενδείξεις. Ωστόσο, η αύξηση των επιδημιών και των αλλεργιών, αλλά και της θνησιμότητας από υπερβολικές θερμοκρασίες συνδέονται από πολλούς με τις κλιματικές αλλαγές. Επίσης, έχει παρατηρηθεί η ανάγκη αλλαγών σε καλλιεργητικές πρακτικές και σε παραθαλάσσιες δραστηριότητες των ανθρώπων.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί, ότι τα στοιχεία που έχουν ως τώρα συγκεντρωθεί και μελετηθεί δεν αποτελούν απόδειξη αυτών των μεταβολών, αλλά κυρίως ενδείξεις των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα διάφορα συστήματα. Οι ενδείξεις αυτές είναι ακόμη πιο ανεπαρκείς για την ανίχνευση τάσεων σε ορισμένες άλλες μεταβλητές ή μικρής κλίμακας φαινόμενα, όπως για παράδειγμα οι τυφώνες, το χαλάζι, οι κεραυνοί και οι τροπικοί κυκλώνες.

Οι προβλέψεις για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα είναι κάθε άλλο παρά καθησυχαστικές, ενώ η κατάσταση θα γίνει πολύ χειρότερη αν συνεχιστεί με τους ίδιους ρυθμούς η εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις, η κατανομή των ανέμων και η στάθμη της θάλασσας θα συνεχίσουν να επηρεάζονται. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζονται οι προβολές της θερμοκρασίας του εδάφους ως το 2100, με βάση τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας για τα διάφορα σενάρια που έχουν αναπτυχθεί από το IPCC.

Τα διάφορα φυσικά συστήματα αναμένεται να επηρεαστούν έντονα. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις που πηγάζουν από τα σενάρια για το κλίμα στο μέλλον, τα οικοσυστήματα θα υποστούν σημαντικές αλλαγές στη δομή και τη λειτουργία τους, με αλλαγές στη γεωγραφική εξάπλωση των διαφόρων ειδών και αρνητικές συνέπειες για τη βιοποικιλότητα και τη διαθεσιμότητα αγαθών, όπως τροφής και νερού. Αναμένεται μείωση της γεωργικής παραγωγής σε πολλές περιοχές, αν και θα υπάρξει κάποια αύξηση στις περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους. Οι παραθαλάσσιες περιοχές θα εκτεθούν σε ισχυρούς κινδύνους,

περιλαμβανομένων των παράκτιων πλημμυρών και της διάβρωσης των ακτών. Η κατάσταση αυτή θα δημιουργήσει όπως είναι προφανές ισχυρή πίεση στην εγκατάσταση και τις δραστηριότητες των ανθρώπων σε αυτές τις περιοχές, ενώ η βιομηχανική παραγωγή αναμένεται να επηρεαστεί από την υποβάθμιση των φυσικών πόρων. Η υγεία των ανθρώπων αναμένεται επίσης να επηρεαστεί, καθώς θα υπάρχουν τραυματισμοί από ακραία καιρικά φαινόμενα, αλλά και επιδημίες από την υποβάθμιση της ποιότητας των πόρων.



Σχήμα 7.1. Εκτίμηση της θερμοκρασίας του πλανήτη έως το 2100 σύμφωνα με τα σενάρια κλιματικής αλλαγής του IPCC.

Τέλος, οι επιπτώσεις στα υδατικά συστήματα αναμένεται να είναι φυσικά σημαντικές. Μεταβολές στη διαίτα των υδατορευμάτων θα προκληθούν από τις μεταβολές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας, με τις απορροές σε άλλες περιοχές να μειώνονται και σε άλλες να αυξάνονται σημαντικά. Οι πληττόμενες από ξηρασία περιοχές αναμένεται να αυξηθούν σε έκταση, με δυσμενείς επιπτώσεις σε πολλούς τομείς, όπως η γεωργία, η ύδρευση, η παραγωγή ενέργειας, αλλά και η υγεία των ανθρώπων. Σε τοπικό επίπεδο, αναμένεται μεγάλη αύξηση της ζήτησης του νερού άρδευσης, με παράλληλη μείωση των δραστηριοτήτων αναψυχής που σχετίζονται με το νερό.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, αν η κατάσταση εξελιχθεί σύμφωνα με τα σενάρια κλιματικής αλλαγής, οι περισσότερες χώρες θα υποστούν σημαντικές πιέσεις στο μέλλον και η ζωή των κατοίκων τους θα υποβαθμιστεί.

### 7.3 Βασικές αρχές ανίχνευσης της κλιματικής αλλαγής

Το θέμα της κλιματικής αλλαγής άρχισε να ενδιαφέρει διεθνείς οργανισμούς και κυβερνήσεις ουσιαστικά μετά το 1980. Διεθνείς διασκέψεις

άρχισαν να το περιλαμβάνουν στην «ατζέντα» τους χωρίς όμως να του δίνουν την προτεραιότητα που έπρεπε. Κυρίως η συσχέτιση της κλιματικής αλλαγής και των υδατικών πόρων δεν αποτέλεσε πρωταρχικό θέμα συζήτησης ούτε στη διάσκεψη του Δουβλίνου ούτε του Ρίο που οργανώθηκαν με την ευθύνη του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών. Σε πολλές περιπτώσεις η έμφαση δίνονταν σε άλλους παράγοντες οικολογικού κυρίως ενδιαφέροντος, όπως ο επηρεασμός της βιοποικιλότητας από τις αλλαγές στις κλιματικές μεταβλητές κ.α.

Όπως κάθε νέο θέμα έτσι και η Κλιματική Αλλαγή και οι επιπτώσεις της αποτέλεσαν πεδίο σύγκρουσης επιστημονικών και όχι μόνο απόψεων. Το «στρατόπεδο» που υποστηρίζει ότι βιώνουμε την κλιματική αλλαγή και ότι αυτό θα φαίνεται όλο και περισσότερο στις επόμενες δεκαετίες φαίνεται να κερδίζει έδαφος, ακόμη και αν η επιστημονική μεθοδολογία προσέγγισης παρουσιάζει ελλείψεις και κενά που πολλές φορές είναι εμφανή. Ιδιαίτερη αμφιβολία υπάρχει ως προς τις αιτίες αυτών των αλλαγών (π.χ. αύξηση στις εκπομπές αερίων καύσης κλπ.). Αντίθετα το άλλο «στρατόπεδο» που δεν πιστεύει ότι υπάρχει συστηματική αλλαγή στις χρονοσειρές των κλιματικών μεταβλητών που αναλύονται, καταφεύγει σε παραδείγματα (πολλές φορές μεμονωμένα) κάποιων επιλεγμένων μεταβλητών, σε ορισμένους σταθμούς (σημειακά δεδομένα) που τα στοιχεία τους χαρακτηρίζονται από «μονιμότητα».

Πολλά επιστημονικά μέσα (συνέδρια, επιστημονικές ενώσεις, επιστημονικά περιοδικά) αλλά και μέσα ενημέρωσης (π.χ. *Le Monde*, *The Guardian* κλπ.) έχουν οργανώσει συζητήσεις (debates) με θέμα την ύπαρξη ή όχι της κλιματικής αλλαγής και το κατά πόσο οι εκπομπές καυσαερίων και άλλων αερίων είναι η αιτία για αλλαγή στο κλίμα. Αν και το θέμα της διατριβής δεν εστιάζει γενικότερα στο θέμα της κλιματικής αλλαγής, στην παράγραφο αυτή θα επιχειρηθεί η διατύπωση μιας γνώμης σε σχέση με τις βασικές αρχές ανίχνευσης της κλιματικής αλλαγής. Έμφαση βεβαίως δίνεται στις μετεωρολογικές και υδρολογικές χρονοσειρές που σχετίζονται με τα θέματα ξηρασίας και λειψυδρίας.

Οι βασικές αυτές αρχές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω με σκοπό την υποβοήθηση της έρευνας για μια περισσότερο ορθολογική προσέγγιση και ένταξη του θέματος της διατριβής που αφορά στις ξηρασίες σε ένα γενικότερο πλαίσιο αναφοράς:

1. Η ύπαρξη μεμονωμένων σταθμών των οποίων τα στοιχεία αποδεικνύεται με αυστηρή επιστημονική μέθοδο (π.χ. στατιστικές μεθόδους ελέγχου τάσεων) ότι χαρακτηρίζονται από «μονιμότητα», δεν αποτελεί ικανή και αναγκαία συνθήκη για απόρριψη της ύπαρξης κλιματικής αλλαγής.
2. Οι μικρές σχετικά σειρές που καλύπτουν χρονικό διάστημα λίγων δεκαετιών δεν προσφέρονται για διερεύνηση και ανάλυση αλλαγής των



χαρακτηριστικών μεγεθών της χρονοσειράς. Αντίθετα απαιτούνται χρονοσειρές μεγάλου χρονικού μήκους με απολύτως αξιόπιστα και ομογενή (ως προς τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και τεχνολογικές αλλαγές) δεδομένα, που σε λίγες περιπτώσεις μπορούν να βρεθούν.

3. Το διαθέσιμο ιστορικό δείγμα και οι παρατηρήσεις πάνω σε αυτό δεν μπορεί να θεωρείται ότι αποτυπώνει ή μπορεί να αποτελέσει σταθερή αφετηρία για πρόβλεψη μελλοντικών δεδομένων (με ή χωρίς αλλαγές).
4. Ανάλυση μεμονωμένων κλιματικών μεταβλητών μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.
5. Η διαμόρφωση σεναρίων και η εφαρμογή τους προερχόμενη από τα κλιματικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας στην κάθε μικρή σε έκταση περιοχή εμπεριέχει τον κίνδυνο σφαλμάτων πολλαπλάσιου μεγέθους από τις μεταβολές που εισάγει στις κλιματικές μεταβλητές. Συνεπώς η διαδικασία αυτή δεν αποτελεί ασφαλή μεθοδολογία μεταφοράς των κλιματικών σεναρίων σε μικρές εδαφικές περιοχές.
6. Σε κάθε διερεύνηση πιθανών αλλαγών στο κλίμα και τις επιπτώσεις αυτών των αλλαγών, δεν πρέπει να αγνοούνται οι αλλαγές στο φυσικό (αλλαγές στη χρήση γης) και στο κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον (socio-economic environment).

Η θέση που εκφράζεται εδώ είναι ότι υπάρχουν πολλά και επαναλαμβανόμενα φαινόμενα εκδήλωσης του κλίματος που δεν ερμηνεύονται με τη θεωρία της μεταβλητότητας του κλίματος, ανεξάρτητα από τους λόγους (ανθρωπογενείς ή φυσικούς). Επομένως δεν μπορούμε να επαναπαυόμαστε στη Στρατηγική Διαχείριση των Υδατικών Πόρων και το Σχεδιασμό των Έργων που σχετίζονται με τους Υδατικούς Πόρους χωρίς να αναλογιζόμαστε την ύπαρξη τέτοιων ή και μεγαλύτερων συμβάντων, για τα οποία απαιτείται ένας Προληπτικός Ευέλικτος Σχεδιασμός που να τα λαμβάνει υπόψη του. Οι αρχές αυτού του «νέου» σχεδιασμού έχουν αναφερθεί από επιστήμονες του χώρου των υδατικών πόρων ως αρχές των τριών F (Forecasts, Flexibility and Fields), ως διεπιστημονική και ολοκληρωμένη προσέγγιση (Brown, 2010).

Η διατύπωση αυτών των αρχών του «νέου» στρατηγικού σχεδιασμού αποτελεί ένα «αυτοκριτικό προβληματισμό» για την ανάλυση των ζηρασιών αυτής της Διατριβής που βασίσθηκε στην υπόθεση της «μονιμότητας», όπως παραδοσιακά μέχρι τώρα εξετάζεται επιστημονικά το θέμα αυτό. Ταυτόχρονα όμως αυτές οι αρχές έρχονται (έστω και εκ των υστέρων) να επιβεβαιώσουν βασικές κατευθύνσεις που ακολουθήθηκαν σ' αυτή τη Διατριβή, που συνοπτικά είναι:

1. Η ταυτόχρονη ανάλυση περισσότερων της μιας μεταβλητής για την εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας.

2. Η σύνδεση των μεγεθών της ξηρασίας με τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων για διάφορες χρήσεις. Με άλλα λόγια, η ανάλυση της ξηρασίας δεν παραμένει ως ανάλυση ενός μετεωρολογικού φαινομένου, αλλά μεταφέρεται στη λειψυδρία και περαιτέρω στις επιπτώσεις.
3. Η πρόταση για τη χρήση της λεκάνης ή της υπολεκάνης απορροής ενός ποταμού ως της γεωγραφικής μονάδας στην οποία πρέπει να γίνεται αναφορά ως προς τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας και όχι με την ανάλυση δεδομένων μεμονωμένων σταθμών. Σημειώνεται ότι τόσο ο υδρολογικός κύκλος, όσο και η διαχείριση υδατικών πόρων μπορούν να παρακολουθούνται σε επίπεδο λεκάνης απορροής.
4. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης μιας χωρικής μονάδας (όπως η λεκάνη ή η υπολεκάνη απορροής ποταμού) από την ξηρασία γίνεται με την αξιοποίηση όλων των οικονομικών και κοινωνικοοικονομικών συνθηκών. Με τη θεώρηση αυτή, η διαμόρφωση Σχεδίων Προετοιμασίας για την αντιμετώπιση της ξηρασίας αναφέρεται τελικά στις συνολικές επιπτώσεις στο φυσικό και ανθρωπογενές σύστημα.

#### 7.4 Παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής με το δείκτη RDI

Οι προβλέψεις Ινστιτούτων, Διεθνών Οργανισμών και Διεθνών Επιτροπών για την κλιματική αλλαγή αναφέρονται στις αναμενόμενες αλλαγές σε τρία βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη που σχετίζονται με το κλίμα κάθε περιοχής: τη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας.

Αν επικεντρώσουμε κυρίως στις αλλαγές στη θερμοκρασία και στη βροχόπτωση που σχετίζονται με τα θέματα αυτής της διατριβής, θα μπορούσε εύκολα να συμπεράνει κανείς ότι η αξιολόγηση της σφοδρότητας της ξηρασίας σε μια περιοχή (π.χ. λεκάνη απορροής) επιτυγχάνεται πιο αυθεντικά και αξιόπιστα αν στη μέθοδο συμπεριλαμβάνονταν και τα δύο μεγέθη μαζί. Σε άλλο σημείο της διατριβής έχει αναπτυχθεί η υπεροχή της μεθόδου εκτίμησης της σφοδρότητας της ξηρασίας με τον Δείκτη RDI έναντι άλλων που χρησιμοποιούν ως μόνη παράμετρο τη βροχόπτωση.

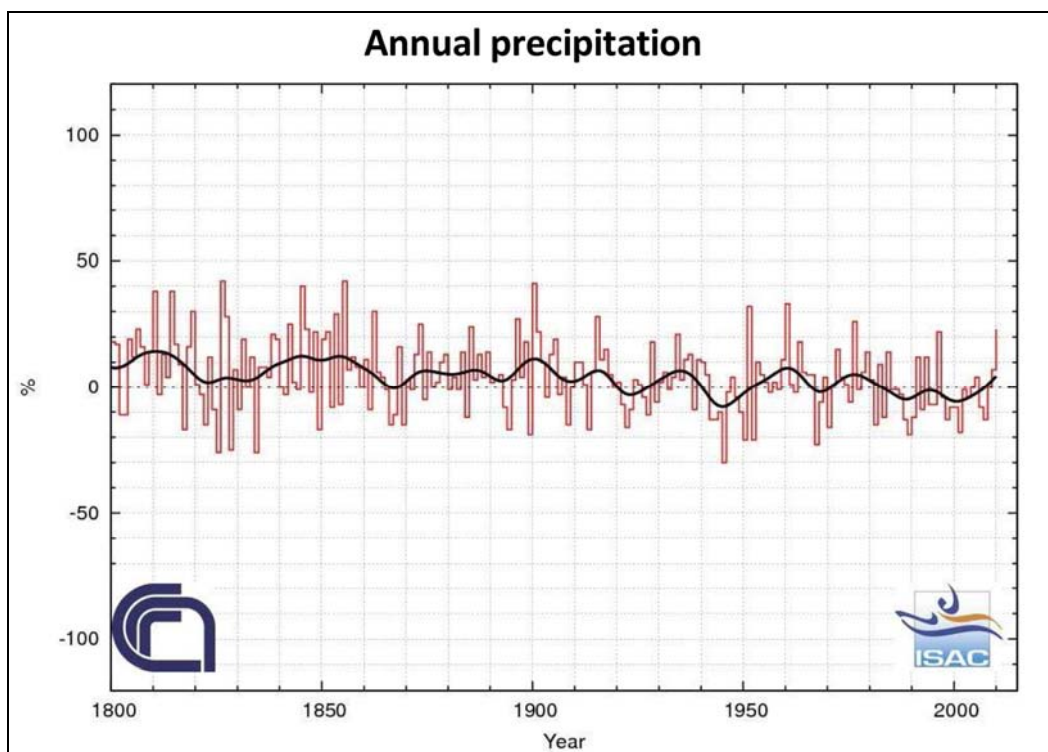
Στο σημείο αυτό, μια άλλη πτυχή της πρότασης του RDI παρουσιάζεται για την παρακολούθηση της εξέλιξης της μεταβολής του κλίματος στην εδαφική έκταση μιας λεκάνης απορροής. Όπως έχει αναλυτικά παρουσιασθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αρχική μεταβλητή του RDI είναι ο λόγος της αθροιστικής βροχόπτωσης προς την αθροιστική δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε μια λεκάνη απορροής για μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.

Η πρόταση εδώ είναι να χρησιμοποιηθεί η σύνθετη αυτή νέα μεταβλητή για

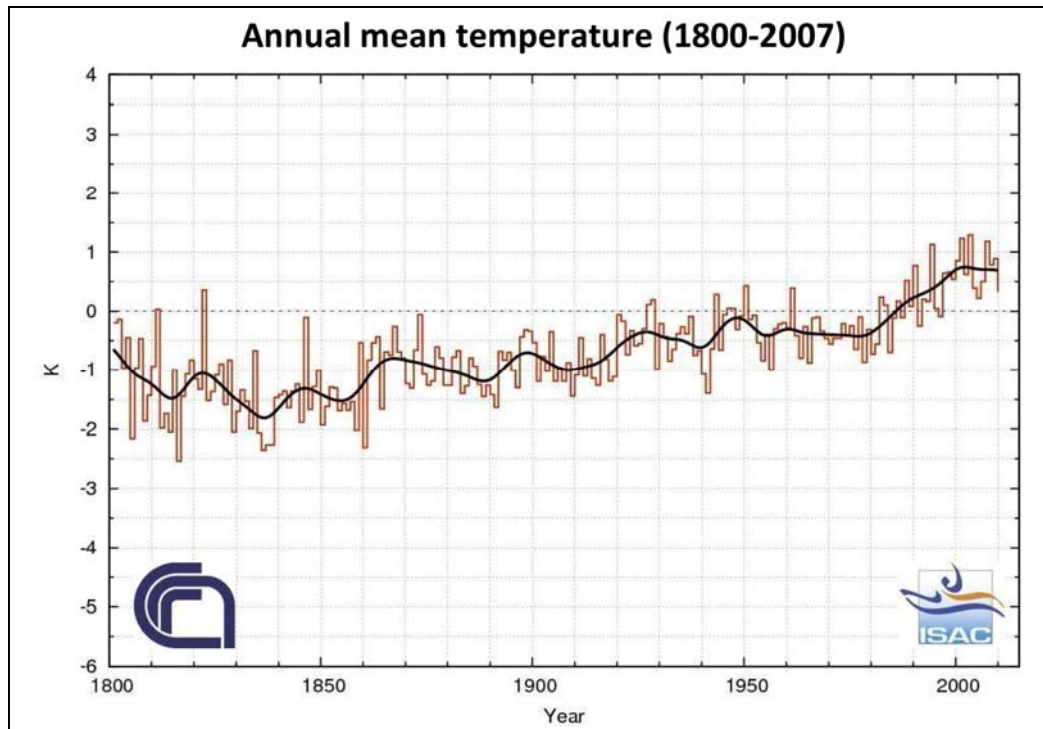
την παρακολούθηση της εξέλιξης του κλίματος. Για την κατανόηση της πρότασης, παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο πραγματικό παράδειγμα που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σπουδαιότητα.

Το παράδειγμα αναφέρεται στη λεκάνη του ποταμού Πάδου στη Λομβαρδία (Po river). Η λεκάνη του Πάδου έχει διερευνηθεί υδρολογικά και μετεωρολογικά όσο ελάχιστες λεκάνες απορροής στον κόσμο, λόγω των μεγάλων δραστηριοτήτων και του μεγάλου οικονομικού ενδιαφέροντος για την Ιταλία και την Ευρώπη (π.χ. [Brunetti et al., 2006](#); [Zanchettin et al., 2008](#); [W2A, 2011](#)). Στα Σχήματα 7.2 και 7.3 παρουσιάζονται οι ετήσιες χρονοσειρές της βροχόπτωσης και της μέσης θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τις αναλυτικές μελέτες, παρατηρείται ανοδική τάση στη μέση ετήσια θερμοκρασία, ενώ δεν μπορεί να διαπιστωθεί ανιχνεύσιμη τάση μείωσης στην ετήσια βροχόπτωση.

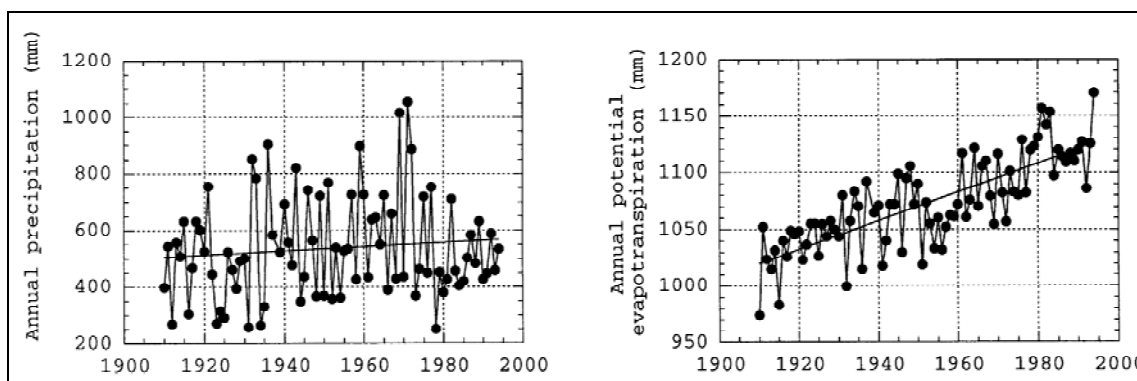
Το παράδειγμα του ποταμού Πάδου είναι πολύ σημαντικό και χαρακτηριστικό, καθώς καλύπτει και μια ευρεία περιοχή του κεντρικού τμήματος της Μεσογειακής Ευρώπης, δεν είναι όμως φυσικά και το μοναδικό. Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζεται αντίστοιχο παράδειγμα από την περιοχή της ανατολικής Ισπανίας, στο οποίο είναι εμφανής η έντονα αυξητική τάση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, που έχει εκτιμηθεί για ολόκληρο σχεδόν τον προηγούμενο αιώνα, σε αντίθεση με τη σχετικά μικρή αν και ανοδική τάση της βροχόπτωσης ([Pinol et al., 1998](#)).



Σχήμα 7.2. Χρονοσειρά ετήσιων τιμών βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πάδου για την περίοδο 1800-2010 (πηγή: [W2A, 2011](#)).



Σχήμα 7.3. Χρονοσειρά μέσων ετήσιων τιμών θερμοκρασίας στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πάδου για την περίοδο 1800-2010 (πηγή: [W2A, 2011](#)).



Σχήμα 7.4. Χρονοσειρές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και μέσης ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του μετεωρολογικού σταθμού Roquetes στην ανατολική Ισπανία για την περίοδο 1910-1944 (πηγή: [Pinol et al., 1998](#)).

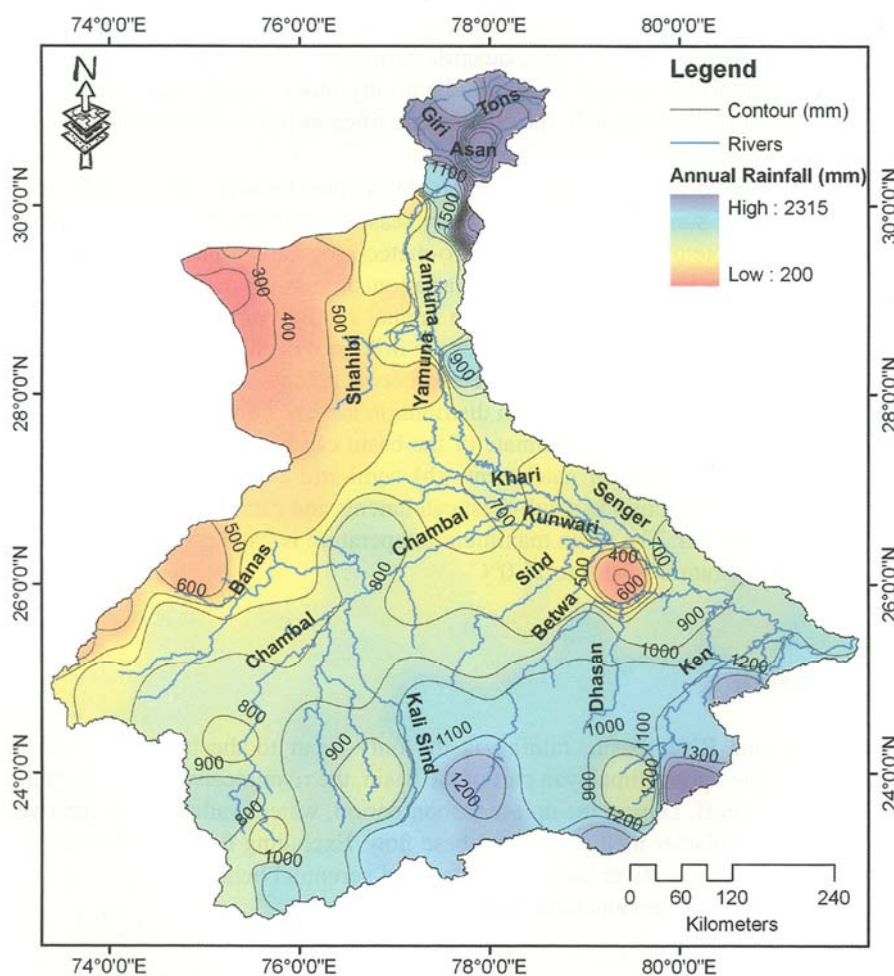
Το ερώτημα λοιπόν εδώ πως μπορεί να απαντηθεί; Υπάρχει τάση αλλαγής των κλιματικών συνθηκών και του υδατικού δυναμικού της λεκάνης ή όχι; Ο τρόπος λοιπόν που προτείνεται εδώ είναι να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης RDI είτε στην αρχική του μορφή ( $a_{12}$ ), είτε στην τυποποιημένη του μορφή  $RDI_{st}$ , ώστε να ανιχνευθεί η μεταβολή και η τάση που ενδεχόμενα υπάρχει.

Βεβαίως μπορεί να ισχυρισθεί κάποιος ότι αυτή η μέθοδος δεν διαφέρει ουσιαστικά από τον Δείκτη Ξηρότητας (Aridity Index) που χρησιμοποιούν οι Διεθνείς Οργανισμοί για την κατάταξη σε κατηγορίες του κλίματος μιας

περιοχής. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι ο δείκτης RDI στην αρχική του μορφή για διάστημα έτους ( $a_{12}$ ) συμπίπτει με το Δείκτη Ξηρότητας (AI).

Όμως αυτό συμβαίνει μόνο με την αρχική μορφή του RDI και μόνο για τη διάρκεια των 12 μηνών. Η πρόταση εδώ με τη χρήση του RDI μπορεί να αναφέρεται σε οποιαδήποτε διάρκεια (π.χ. εποχή του έτους).

Για επεξηγηματικούς λόγους, ώστε η πρόταση να γίνει σαφής, παρουσιάζεται ένα ακόμη παράδειγμα από τη βιβλιογραφία, το παράδειγμα της λεκάνης του ποταμού Yamuna στην Ινδία. Η ανάλυση που αναφέρεται εδώ είναι από ένα βιβλίο που μόλις εκδόθηκε από τη Springer (Rai et al., 2012).



Σχήμα 7.5. Λεκάνη απορροής ποταμού Yamuna (πηγή: Rai et al., 2012).

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Mann-Kendall/Z-statistic ερευνητές μπόρεσαν να ανιχνεύσουν μια καθοδική πορεία του AI (Δείκτη Ξηρότητας, δηλαδή του RDI 12 μηνών –  $a_{12}$ ) και επομένως του υδατικού δυναμικού όλης της λεκάνης. Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικό γιατί πρόκειται για μια μεγάλη λεκάνη με κλιματική ανομοιομορφία (πολλές κλιματικές ζώνες) με διακριτές εποχές του

έτους (περίοδος μουσώνων, περίοδος εκτός μουσώνων) και όχι απολύτως όμοια συμπεριφορά των βροχοπτώσεων και της θερμοκρασίας.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται η σύνοψη του ελέγχου Mann-Kendall (modified) κυρίως για τις βροχοπτώσεις που ακολουθούν αντίθετες τάσεις για τις δύο εποχές, των μουσώνων και εκτός μουσώνων. Συνεπώς πρακτικά δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα έστω και αν η μόνη μεταβλητή είναι η βροχόπτωση. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1, το τελικό συμπέρασμα για την ύπαρξη τάσης μείωσης του υδατικού δυναμικού της λεκάνης προκύπτει από τον Δείκτη Ξηρότητας (AI), δηλαδή τον RDI των 12 μηνών στην αρχική του έκφραση.

Πίνακας 7.1. Απόσπασμα ανάλυσης τάσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Yamuna με βάση τον Έλεγχο Mann-Kendall (modified).

Μεταβλητή	Μέσος όρος λεκάνης	Εύρος	Τυπική απόκλιση	Αριθμός σειρών			Τελική τάση
				Αρνητική τάση	Θετική τάση	Μη τάση	
Ύψος βροχόπτωσης εποχής μουσώνων (mm)	806.8	327 - 1568.9	259.7	8		57	-
Ύψος βροχόπτωσης εκτός εποχής μουσώνων (mm)	86.5	19.5 - 479	100.1		3	62	+
Δείκτης Ξηρότητας (AI) (RDI 12 μηνών)	38.0	14.9 - 74.6	12.9	6		59	-

Στην περίπτωση συνεπώς αυτή που παρουσιάζεται τόσο σύνθετη, μόνο ένας τρόπος όπως αυτός του RDI μπορεί να δώσει αποτελέσματα επί της ουσίας. Για να φανεί μάλιστα η διαφορά, ο RDI θα μπορούσε να προκύψει και για τις δύο εποχές χωριστά, ώστε να αποτυπωθούν πιο λεπτομερειακά τα αποτελέσματα στις δύο εποχές.

## 7.5 Η επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στα χαρακτηριστικά της ξηρασίας – Κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας

Όπως έχει τονισθεί επανειλημμένα σ' αυτή τη διατριβή, το φαινόμενο της ξηρασίας είναι πολυδιάστατο. Κάτω από ορισμένες υποθέσεις μπορεί να χαρακτηριστεί ως δισδιάστατο ή και μονοδιάστατο. Αν δηλαδή η ανάλυση γίνεται για μια λεκάνη απορροής και για συγκεκριμένη περίοδο αναφοράς, τότε η μόνη μεταβλητή είναι η ένταση της ξηρασίας. Συνεπώς, τα επεισόδια ξηρασίας

μπορούν να αναλυθούν στατιστικά και να διαπιστωθεί κατά πόσο τα γεγονότα ξηρασίας συμβαίνουν συχνότερα και με μεγαλύτερη ένταση. Αυτό (με την προϋπόθεση της μονοδιάστατης ανάλυσης) μπορεί να γίνει με τον έλεγχο ύπαρξης τάσης σε δείγμα ικανού μήκους ή εναλλακτικά με τον χωρισμό της χρονοσειράς των RDI σε δύο ή και παραπάνω περιόδους και τη διαπίστωση μεταβολής του μέσου μεγέθους της έντασης της ξηρασίας σε αυτές τις περιόδους.

Ο ασφαλέστερος τρόπος προσέγγισης στην παραπάνω ανάλυση είναι η χρησιμοποίηση του RDI των 12 μηνών στην τυποποιημένη του μορφή. Επίσης αν ενδιαφέρει η διερεύνηση της αλλαγής σε άλλες περιόδους αναφοράς (π.χ. 3, 6 ή 9 μήνες) αυτό γίνεται κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Τέλος αν το ενδιαφέρον εστιάζεται σε μια κρίσιμη περίοδο (π.χ. περίοδο ανάπτυξης κάποιων καλλιεργειών ή περίοδο των αρδεύσεων), μπορεί ο υπολογισμός του RDI να ξεκινά από διαφορετικό μήνα (και όχι από την έναρξη του υδρολογικού έτους όπως αρχικά προτάθηκε για τον RDI; [Tsakiris and Vangelis, 2005](#)) και να τελειώνει σε όποιον μήνα ενδιαφέρει για το συγκεκριμένο θέμα. Θα μπορούσε για παράδειγμα να εξετασθεί για κάθε έτος η περίοδος Μάρτιος - Απρίλιος - Μάιος που ενδιαφέρει ορισμένες ξηρικές καλλιέργειες.

Η παραπάνω μεθοδολογία απαιτεί την ύπαρξη μεγάλων χρονοσειρών που διαθέτουν μεγάλο σχετικά αριθμό ξηρασιών για ανάλυση. Συνήθως όμως οι χρονοσειρές που διαθέτουμε είναι αρκετά μικρές με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρός αριθμός ξηρασιών στο δείγμα. Αυτό σημαίνει ουσιαστικά αδυναμία στατιστικής επεξεργασίας αυτών των ξηρασιών.

Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην ένταση των ξηρασιών είναι μέσω σεναρίων αναμενόμενων μεταβολών στα ύψη βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για την ευρύτερη περιοχή στην οποία ανήκει η λεκάνη απορροής. Με βάση αυτές τις αναμενόμενες μεταβολές υπολογίζονται οι νέοι δείκτες ξηρασίας που αντιπροσωπεύουν τις μελλοντικές συνθήκες. Βεβαίως εδώ υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί και δυσκολίες που αναφέρονται στην εκτίμηση των σεναρίων με την μεταφορά στο επίπεδο της λεκάνης απορροής στοιχείων που προκύπτουν από τα κλιματικά μοντέλα. Σε κάθε περίπτωση η πρόγνωση των μελλοντικών συνθηκών εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα και γι' αυτό δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα και μοναδικό μέγεθος αλλά να συνοδεύεται και από άλλα στοιχεία διασποράς (π.χ. εύρος τιμών, τυπική απόκλιση κλπ.).

Όλα τα παραπάνω ισχύουν με την προϋπόθεση μείωσης των διαστάσεων της ξηρασίας σε μια, την ένταση. Αντίστοιχες είναι οι προσεγγίσεις αν αντί μίας υπάρχουν δύο ή τρεις διαστάσεις. Ιδιαίτερα για τη χωρική έκταση της ξηρασίας προτείνεται η χρήση κανάβου με κυψέλες λίγων τετραγωνικών χιλιομέτρων στο

κέντρο των οποίων μεταφέρονται όλες οι μετεωρολογικές πληροφορίες και υπολογίζεται η ένταση της ξηρασίας. Εφαρμογές αυτής της μορφής παρουσιάσθηκαν αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της διατριβής. Η χρήση ψηφιακών χαρτών ή μεθόδων όπως αυτή της Αθροιστικής Καμπύλης (or more ogive curve) που εμφανίζει τα ποσοστά εκτάσεων που υφίστανται τα διάφορα επίπεδα έντασης της ξηρασίας μπορεί να υποβοηθήσει στην στατιστική ανάλυση αυτής της διάστασης της ξηρασίας.

Μια μελλοντική κατεύθυνση μελέτης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα χαρακτηριστικά της ξηρασίας είναι η ταυτόχρονη στοχαστική παραγωγή τιμών βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοχαστικά μοντέλα παραγωγής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μιας λεκάνης απορροής. Η παραγωγή τέτοιων μεγάλων χρονοσειρών δυνητικά περιέχει σημαντικό αριθμό ξηρασιών με ευρεία διακύμανση έντασης. Έτσι ένα τέτοιο στοχαστικό μοντέλο το οποίο βαθμονομείται από τα δεδομένα μιας υπάρχουσας χρονοσειράς, παρά το γεγονός ότι διατηρεί τις βασικές στατιστικές ποσότητες κεντρικής τιμής και διασποράς, παράγει μεγαλύτερο εύρος τιμών και επομένως περισσότερα γεγονότα ξηρασίας. Συνεπώς μια τέτοια διευρυμένη χρονοσειρά μπορεί να αποτελέσει ορθολογικότερη βάση για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το σχεδιασμό των μέτρων και έργων αντιμετώπισης των ξηρασιών (preparedness and mitigation planning).

Αν επιλεγεί η μελέτη της ξηρασίας μέσα από τον πολυδιάστατο χαρακτήρα της, μπορεί κανείς να καταφύγει σε πιο σύγχρονες προσπάθειες που κερδίζουν όλο και μεγαλύτερη αποδοχή. Μεταξύ των καινοτόμων προσεγγίσεων που ασχολούνται με τις διαστάσεις της ξηρασίας είναι η χρήση των “copulas” (Singh and Strupczewski, 2007). Αν και η εφαρμογή των “copulas” είναι σχετικά νέα στην ανάλυση της ξηρασίας, πολλές προσπάθειες έχουν γίνει και στο παρελθόν για να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας με την ανάπτυξη «από κοινού» (συνδεδεμένων) συναρτήσεων κατανομής που βασίζονται σε δείκτες ξηρασίας και “copulas” (Shiau and Modarres 2009; Serinaldi et al., 2009).

## 7.6 Αναφορές κεφαλαίου

- Brown C., 2010. The end of Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2): 143-145.
- Brunetti M., Maugeri M., Monti F. and Nanni T., 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26(3): 345-



381.

- DDC, 2011. Definition of Terms used within the DDC Pages. Data Distribution Centre of the IPCC, [http://www.ipcc-data.org/ddc\\_definitions.html](http://www.ipcc-data.org/ddc_definitions.html), modified: 28 November 2011.
- Grotch S.L. and MacCracken M.C., 1991. The Use of General Circulation Models to Predict Regional Climatic Change. *Journal of Climate*, 4(3): 286-303.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- Milly P.C., Betancourt D.J., Falkenmark M., Hirsch R., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P. and Stouffer R.J., 2008. Stationarity is dead: With water management? *Science*, 319: 573-574.
- Pinol J., Terradas J. and Lloret F., 1998. Climate Warming, Wildfire Hazard and Wildfire Occurrence in Coastal Eastern Spain. *Climatic Change*, 38(3): 345–357.
- Rai R.K., Upadhyay A., Ojha C.S.P and Singh V.P., 2012. The Yamuna River Basin – Water Resources and Environment, Springer.
- Serinaldi F., Bonaccorso B., Cancelliere A. and Grimaldi S., 2009. Probabilistic characterization of drought properties through copulas. *Physics and Chemistry of the Earth Journal*, 34(10-12):596-605.
- Shiau J. and Modarres R., 2009. Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran. *Meteorological Applications*, 16(4):481-489.
- Singh V. and Strupczewski W., 2007. Editorial. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4): 345.
- Tsakiris G. and Vangelis H., 2005. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water*, 9/10: 3-11.
- W2A, 2011. Temperature and Precipitation Trends in Emilia Romagna. Water 2 Adapt Project, Policy Brief, February 2011, 4 p.
- Washington W.M. and Meehl G.A., 1983. General Circulation Model Experiments on the Climatic Effects Due to a Doubling and Quadrupling of Carbon Dioxide Concentration. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 88(C11): 6600-6610.
- Zanchettin D., Traverso P. and Tomasino M., 2008. Po River discharges: a preliminary analysis of a 200-year time series. *Climatic Change*, 89(3-4): 411-433.



## κεφάλαιο 8

# Συμπεράσματα - Προτάσεις

### 8.1 Αντικείμενο και προσέγγιση της διδακτορικής διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής ήταν η μελέτη και η ανάλυση του φαινομένου της ξηρασίας και η εκτίμηση της σφοδρότητας των γεγονότων ξηρασίας μέσα από μια νέα καινοτόμο προσέγγιση. Αντικείμενο επίσης της διατριβής, ήταν η αξιολόγηση της διακινδύνευσης από τα γεγονότα ξηρασίας, καθώς και η διαμόρφωση πλαισίου αντιμετώπισης της ξηρασίας σε ευάλωτες περιοχές όπως πολλές περιοχές της Ελλάδας (π.χ. Ανατολική Ελλάδα, Νησιά Αιγαίου, Κρήτη, Θεσσαλία κλπ.) αλλά και της Μεσογείου.

Λόγω της κρισιμότητας της ξηρασίας στην ανάπτυξη αυτών των ευάλωτων περιοχών, τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μια αυξημένη συγγραφική δραστηριότητα στο θέμα με αποτέλεσμα πολλές πλευρές του φαινομένου της ξηρασίας να φωτισθούν καλύτερα και το φαινόμενο να κατανοηθεί βαθύτερα. Πολλές προσπάθειες επίσης έχουν γίνει και στον τομέα της οργάνωσης των απαραίτητων δομών και μηχανισμών για την αντιμετώπιση των γεγονότων ξηρασίας. Είναι όμως γεγονός ότι η επιστημονική έρευνα στο θέμα δεν έχει αξιοποιηθεί σημαντικά σε επιχειρησιακό επίπεδο. Στον τομέα αυτό πρόόδους έχουν κυρίως επιδείξει οι Ηνωμένες Πολιτείες (ορισμένες πολιτείες), η Αυστραλία και από την Ευρώπη η Ισπανία.

Οι λόγοι που ακόμη δεν έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα αυτό στις περισσότερες χώρες του κόσμου μπορεί να αποδοθεί στους παρακάτω λόγους:

- i) Τα γεγονότα ξηρασίας μεγάλης έντασης είναι αρκετά σπάνια γεγονότα.
- ii) Το μεγάλο κόστος οργάνωσης αντιμετώπισης της ξηρασίας με τη δημιουργία συστημάτων παρακολούθησης, λειτουργία επιτροπών (task force), ψήφιση νομοθετικών ρυθμίσεων αλλά και ενός πλήρους μηχανισμού παρεμβάσεων και συμμετοχής των ενδιαφερομένων.
- iii) Η μη ύπαρξη απλών επιστημονικών εργαλείων που να είναι αξιόπιστα στην εκτίμηση της σφοδρότητας της ξηρασίας και να είναι πειστικά για το κοινό κατά τη λήψη των απαραίτητων μέτρων.
- iv) Η μη ύπαρξη ολοκληρωμένης πρότασης ενός συνολικού πλαισίου αντιμετώπισης της ξηρασίας, που να καλύπτει το σύνολο των απαιτήσεων μιας τέτοιας διαδικασίας, που ξεκινά από την πρόληψη και καταλήγει στην μείωση των προβλημάτων που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια και μετά το γεγονός ξηρασίας.

Η διδακτορική διατριβή αντιμετώπισε το φαινόμενο της ξηρασίας με τρόπο ώστε να συνεισφέρει στην κατανόηση του φαινομένου, να συμβάλει στην απλοποίηση της προσομοίωσης του και να δημιουργήσει το πλαίσιο αντιμετώπισης του φαινομένου στηριζόμενη στην φιλοσοφία του Προληπτικού Σχεδιασμού.

## 8.2 Συμπεράσματα

Εντελώς συμβατικά η διδακτορική διατριβή μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα:

- α) στην αξιολόγηση των γεγονότων ξηρασίας που αφορά στην ανάλυση του φαινομένου, την προσομοίωσή του, την απλοποίηση του και την ανάλυση συχνότητας εμφάνισής του, και
- β) τον Προληπτικό Σχεδιασμό, που περιλαμβάνει την παρακολούθηση και την πρόγνωση των γεγονότων της ξηρασίας και την οργανωτική δομή και τα εργαλεία για την αντιμετώπισή της.

Στο πρώτο τμήμα τα κύρια συμπεράσματα μπορούν συνοπτικά να παρουσιασθούν ως εξής:

- α) Η επίτευξη ορθολογικής εκτίμησης της έντασης της ξηρασίας με τον προτεινόμενο Δείκτη ξηρασίας RDI που βασίζεται στην αθροιστική βροχοπτώση και στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Η ευρεία αναγνώριση του Δείκτη RDI και η χρήση του σήμερα σε πολλές χώρες του κόσμου από τη Μεσόγειο, τη Μέση Ανατολή, την Ασία, την

Αφρική και την Αυστραλία, πιστοποιεί την σημαντικότητα της συμβολής της διδακτορικής διατριβής.

- β) Η αποτελεσματική μεταφορά και παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν στην ξηρασία σε ψηφιακούς χάρτες (κάναβο κατάλληλης διακριτοποίησης καθώς και μέσω αθροιστικών καμπυλών, γνωστών ως “or more cumulative curves”) που περιγράφουν παραστατικά το φαινόμενο της ξηρασίας ως εκτατικό φαινόμενο μεταβαλλόμενης έντασης στο χώρο.
- γ) Η ανάλυση συχνότητας των περιόδων ξηρασίας με τη χρήση του RDI και της διμεταβλητής κατανομής πιθανοτήτων (της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής) για τις ετήσιες σειρές των μεγεθών αυτών που ακολουθούν την κανονική κατανομή.
- δ) Η απλοποίηση της ανάλυσης της ξηρασίας με τον περιορισμό των διαστάσεων της από τρεις (ένταση, διάρκεια, χωρική έκταση) σε μία, αυτή της έντασης, με τη διάρκεια να αντικαθίσταται από την περίοδο αναφοράς και τη χωρική έκταση να αντικαθίσταται από τη λεκάνη απορροής.  
Η απλοποιημένη αυτή προσέγγιση κατέστησε απλούστερη την ανάλυση συχνότητας των γεγονότων ξηρασίας, απομάκρυνε τη σύγχυση για τη διάρκειά της (στις περιπτώσεις που υγροί μήνες παρεμβάλλονται σε ένα μεγάλο διάστημα ξηρασίας) και κατέστησε την ανάλυση ξηρασίας συμβατή με τη διαχείριση των υδατικών πόρων που χρησιμοποιεί ως μονάδα εφαρμογής τη λεκάνη απορροής ποταμού.

Στο δεύτερο τμήμα της διατριβής, τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται:

- α) Στη διαμόρφωση του συστήματος παρακολούθησης των βασικών μετεωρολογικών μεταβλητών και στην αξιοποίησή τους για τον υπολογισμό του Δείκτη RDI. Το σύστημα αυτό στηρίζεται στο μετεωρολογικό δίκτυο που είναι ικανό για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των μεταβλητών που συμμετέχουν στον Δείκτη RDI, δηλαδή της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.  
Επειδή η δυνητική εξατμισοδιαπνοή δεν μετράται απευθείας, έγινε η διερεύνηση του επηρεασμού του RDI από τη μέθοδο υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, που απέδειξε ότι ο επηρεασμός είναι ελάχιστος ή ασήμαντος για τις περισσότερες μεθόδους υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.
- β) Στη χρήση του RDI για την εκτίμηση των επιπτώσεων από μεμονωμένα έτη ξηρασίας και από εμμένουσες ξηρασίες που διαρκούν δύο ή και περισσότερα συνεχή έτη. Όπως απεδείχθη με τη χρήση απλών συναρτήσεων απωλειών (loss functions), η διακινδύνευση (ύψος αρνητικών συνεπειών και ζημιών) μεγεθύνεται δυσανάλογα με τον αριθμό των

συνεχών ξηρών ετών σε σχέση με μεμονωμένα ξηρά έτη ίσου αριθμού.

- γ) Στην πρόταση για την επιλογή μέτρων για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση της ξηρασίας κυρίως στο Στρατηγικό Σχέδιο αντιμετώπισης της ξηρασίας.

Ιδιαίτερη σπουδαιότητα έχει η προτεινόμενη μέθοδος ιεράρχησης της κατανομής των περιορισμένων υδατικών αποθεμάτων σε περίοδο ξηρασίας, όπου οι επιλογές βασίζονται σε μονάδες (bricks) που χαρακτηρίζονται από τυποποιημένο όγκο νερού που διατίθεται τον συγκεκριμένο χρόνο σε δραστηριότητα που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη προτεραιότητα χρήσης.

- δ) Στην διαμόρφωση συστήματος πρόγνωσης της σφοδρότητας της ξηρασίας για ολόκληρο το έτος, με αφετηρία το πρώτο τρίμηνο του υδρολογικού έτους και βήμα χρόνου τον ένα μήνα.

Η προσέγγιση αθροιστικού χρόνου που επιχειρείται, προσεγγίζει ικανοποιητικά την κατάσταση ξηρασίας του έτους, χωρίς να απαιτούνται οι πιθανότητες μετάβασης από περίοδο σε περίοδο του ίδιου έτους.

Ως επέκταση του συστήματος πρόγνωσης, μπορεί να θεωρηθεί και η διάδοση της σχετικής με την ξηρασία πληροφορίας προς τα κέντρα αποφάσεων και το ενδιαφερόμενο κοινό.

Τέλος, συναφής με το θέμα αυτό είναι η οργάνωση της δομής που απαιτείται για τη λήψη των αποφάσεων στο χρόνο που απαιτείται, καθώς και οι διαδικασίες πληροφόρησης και συμμετοχής των κοινωνικών εταίρων και του κοινού στη λήψη αποφάσεων.

- ε) Στη χρήση του προτεινόμενου Δείκτη ξηρασίας RDI ως σύνθετου κλιματικού δείκτη για την παρακολούθηση του κλίματος μιας χωρικής ενότητας (π.χ. λεκάνη απορροής ή σύνολο γειτονικών λεκανών απορροής).

### 8.3 Προτάσεις για τη συνέχιση της έρευνας

Οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο που πραγματεύεται η διδακτορική διατριβή μπορούν να χωρισθούν σε δύο επίπεδα:

- α) το ερευνητικό-θεωρητικό επίπεδο, και
- β) το πρακτικό-επιχειρησιακό επίπεδο

Ως προς το ερευνητικό-θεωρητικό αντικείμενο, στη διδακτορική διατριβή εντοπίστηκαν επί μέρους θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και ανάλυσης. Μεταξύ αυτών είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η ανάλυση συχνότητας των ξηρών ετών με δεδομένο ότι τα έτη ξηρασίας

απαντώνται είτε ως μεμονωμένα γεγονότα, είτε ως γεγονότα παρατεταμένης ξηρασίας που διαρκούν δύο ή περισσότερα έτη. Συνεπώς, αυτού του είδους η ανάλυση συχνότητας δεν μπορεί να γίνει με τις συμβατικές θεωρητικές κατανομές πιθανότητας.

- 2) Η πλήρης προσομοίωση της ξηρασίας ως τρισδιάστατου φαινομένου με την κάθε διάσταση να ακολουθεί μεμονωμένα τη δική της θεωρητική κατανομή πιθανότητας. Προσπάθειες τέτοιας μορφής έχουν ήδη πραγματοποιηθεί με δύο από τις τρεις διαστάσεις, με τη χρήση των copulas. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύνθετη κατανομή πιθανοτήτων που προκύπτει από διαφορετικού τύπου κατανομές για τις τρεις διαστάσεις της ξηρασίας.
- 3) Η εκτίμηση της επίδρασης της ξηρασίας διαφόρων περιόδων αναφοράς (κυρίως με τον δείκτη RDI) στα στοιχεία της απορροής μιας λεκάνης απορροής και του απολήψιμου όγκου νερού από ταμειυτήρα επιφανειακής ταμίευσης. Επίσης, η εκτίμηση της επίδρασης στα υπόγεια νερά ενός υδροφορέα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υπόγειου υδροφορέα.
- 4) Η διαμόρφωση συναρτήσεων απωλειών (loss functions) για τους διάφορους τομείς που επηρεάζονται από την ξηρασία, ώστε να υπάρχει δυνατότητα πρόβλεψης των αρνητικών συνεπειών για κάθε χρήση.

Στο πρακτικό-επιχειρησιακό επίπεδο, θέματα ιδιαίτερης σημασίας για την αντιμετώπιση της ξηρασίας, αποτελούν τα ακόλουθα:

- 1) Η διερεύνηση της σχέσης έντασης ξηρασίας (π.χ. με τη χρήση του RDI) με την ένταση της λειψυδρίας (διαφορά ζήτησης και διαθεσιμότητας νερού) και τις επιπτώσεις στους διάφορους τομείς χρήσης του νερού (γεωργική, βιομηχανική, αστική, περιβαλλοντική).
- 2) Η διαμόρφωση επιπέδων επιτήρησης και συναγερμού ανάλογα με την ένταση της ξηρασίας και τον χρόνο που γίνεται η εκτίμηση / πρόγνωση. Επιδίωξη σ' αυτό το κρίσιμο θέμα είναι η δημιουργία ενός πολυπαραμετρικού μοντέλου, που ανάλογα με τις συνθήκες και τα δεδομένα κάθε εφαρμογής να μπορεί να καθορίζει τα κρίσιμα όρια (επιτήρησης και συναγερμού) για τη λήψη αποφάσεων.
- 3) Η δημιουργία ενός πλαισίου βέλτιστης επιλογής μέτρων και έργων με βάση μια σειρά κριτηρίων. Το θέμα αυτό μπορεί αρχικά να αντιμετωπισθεί με διάφορες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης στο πλαίσιο του Προληπτικού Σχεδιασμού και ειδικότερα στο Στρατηγικό Σχέδιο αντιμετώπισης της ξηρασίας.
- 4) Η βελτίωση του μηχανισμού πρόγνωσης της ετήσιας ξηρασίας μέσω του

Δείκτη RDI από δεδομένα τριών ή περισσότερων μηνών. Η βελτίωση αυτή μπορεί να προκύψει με χωρισμό του έτους σε περιόδους και τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μετάβασης από ιστορικές ξηρασίες. Επειδή συνήθως δεν υπάρχουν αρκετά έτη με ξηρασία στις ιστορικές χρονοσειρές από τις οποίες θα προκύψουν οι πιθανότητες μετάβασης από περίοδο σε περίοδο, προτείνεται η συνθετική ταυτόχρονη παραγωγή μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Με τον τρόπο αυτό, θα δημιουργηθεί ένα μεγάλο δείγμα, απαραίτητο για τον εντοπισμό ικανού αριθμού ξηρών περιόδων και τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μετάβασης.

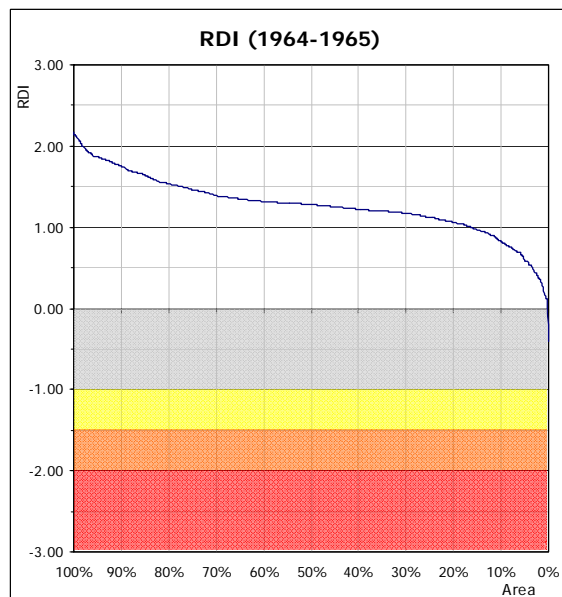
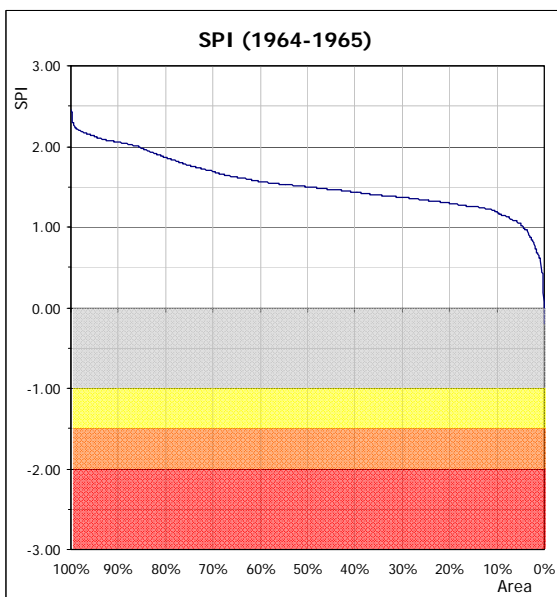
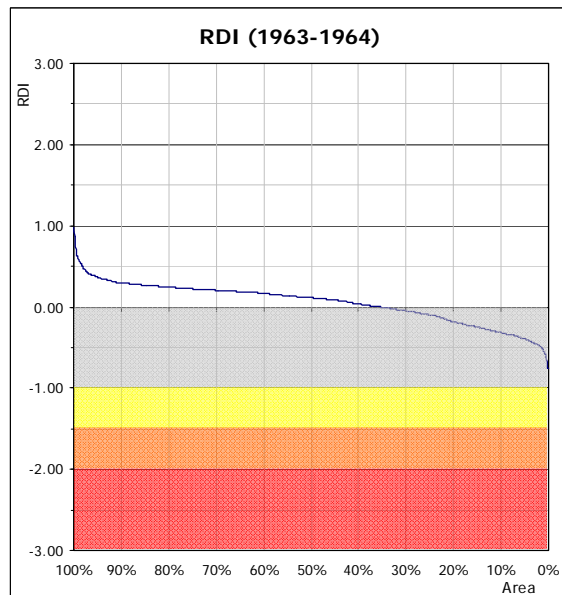
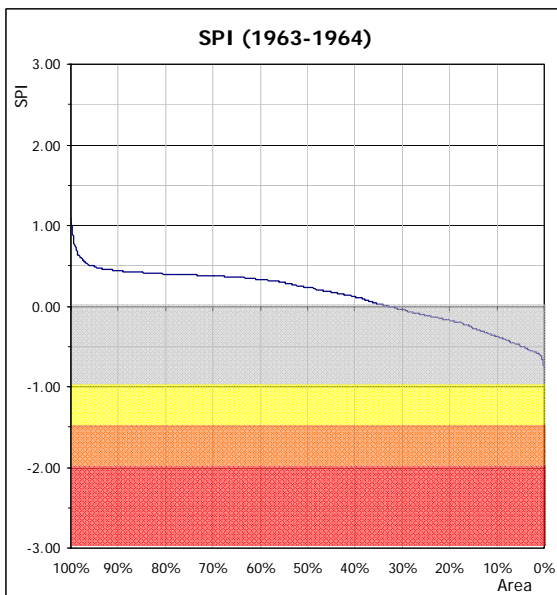
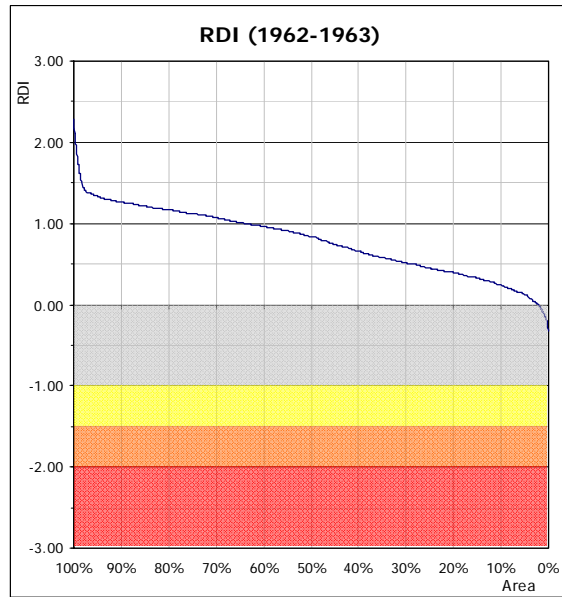
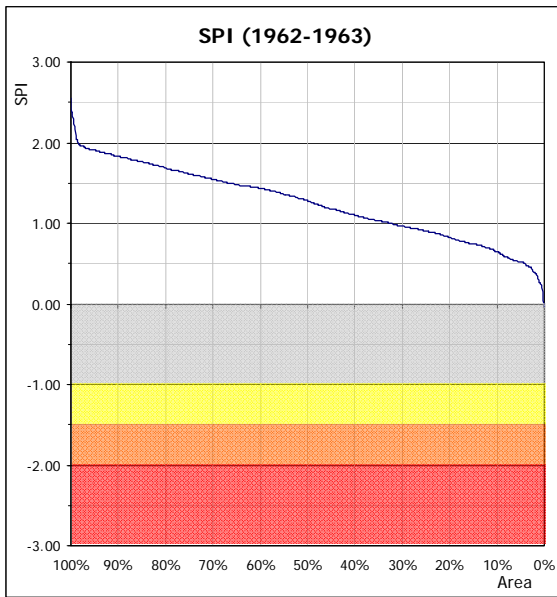
- 5) Μεγάλα περιθώρια υπάρχουν για την διαμόρφωση των απαραίτητων οργανωτικών δομών και τη δημιουργία μηχανισμών για τη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια μιας ξηρής περιόδου αλλά και σε χρόνους που δεν σχετίζονται με τα γεγονότα ξηρασίας.

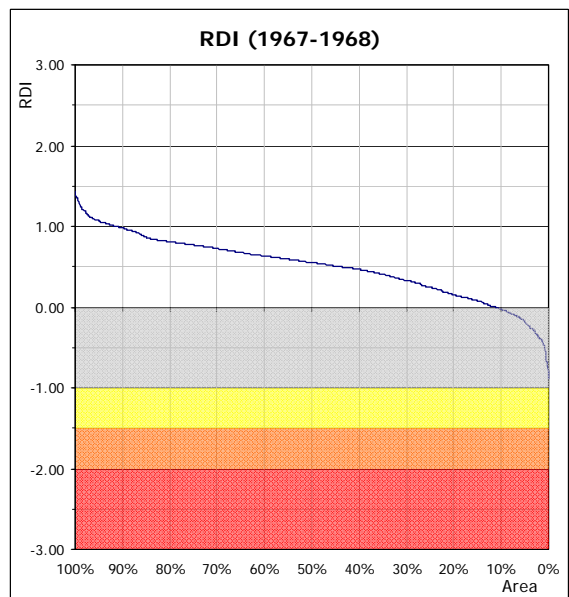
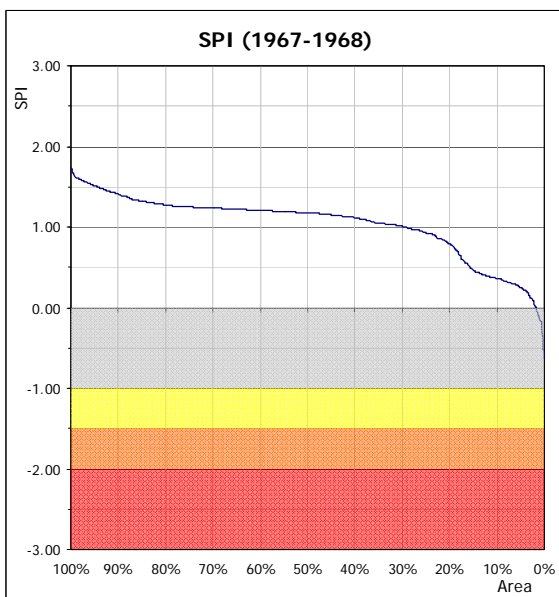
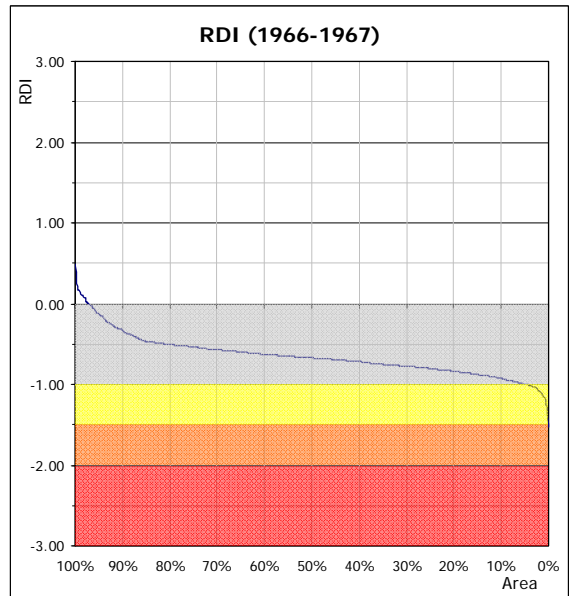
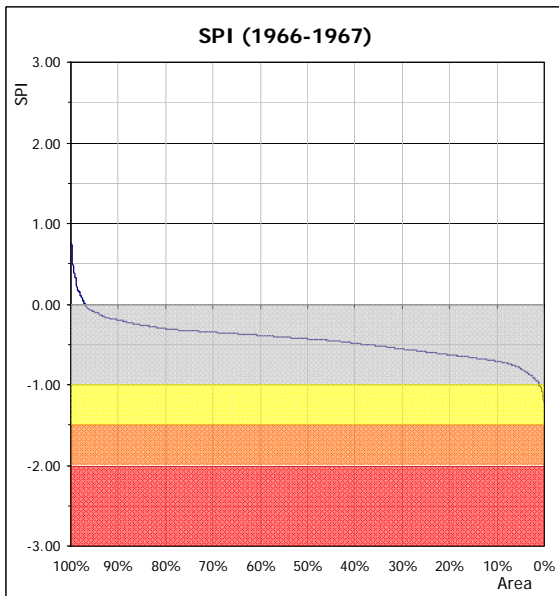
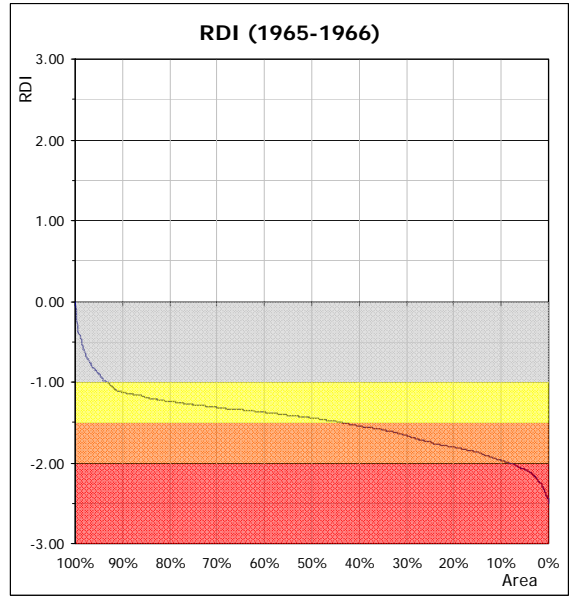
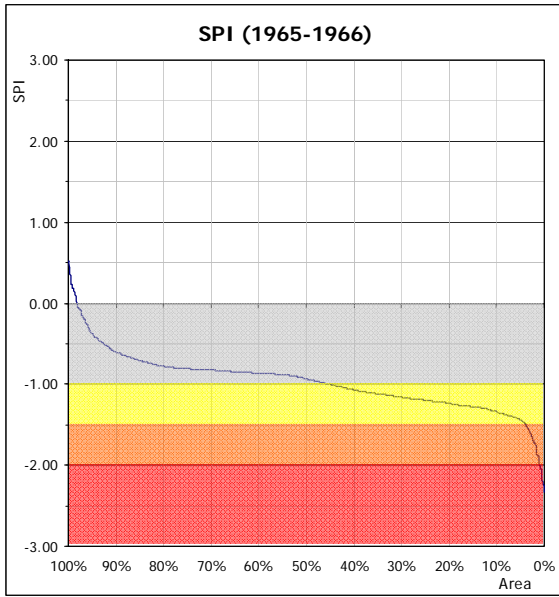


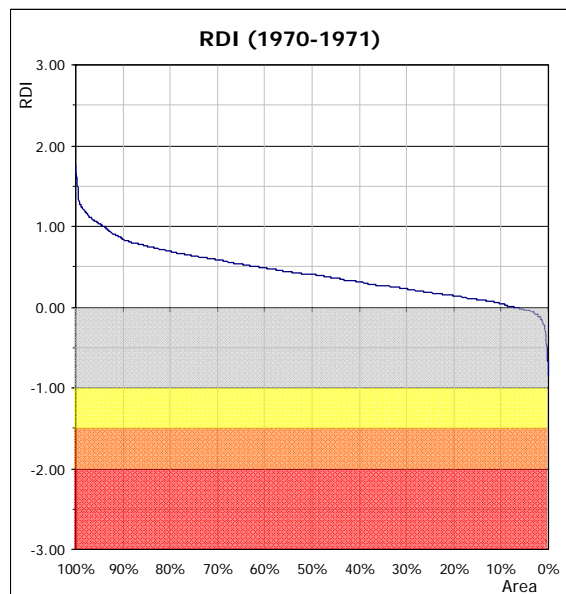
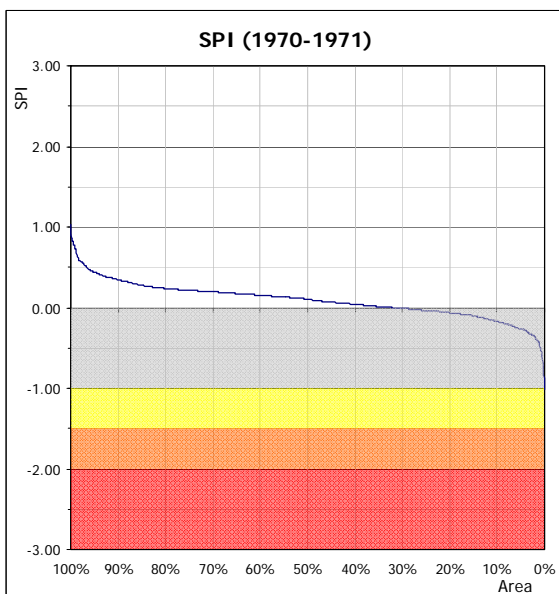
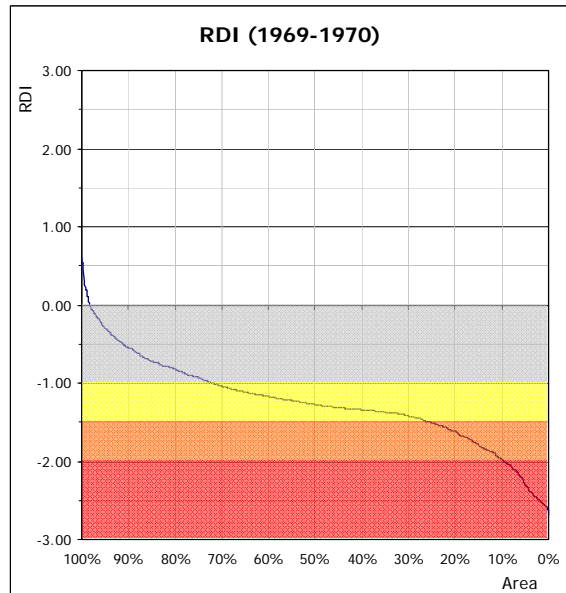
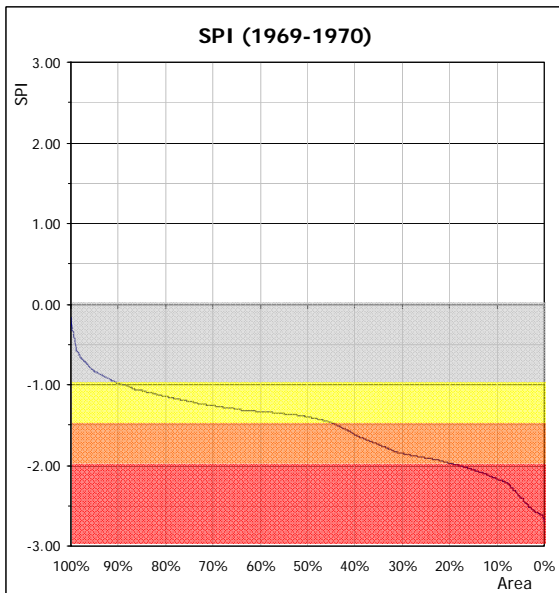
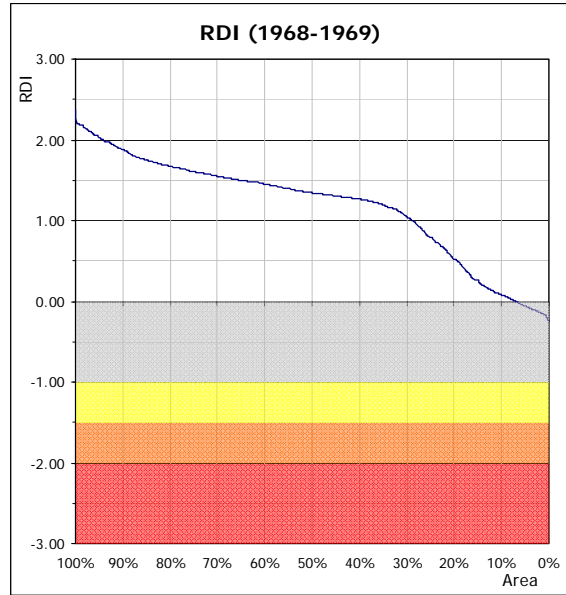
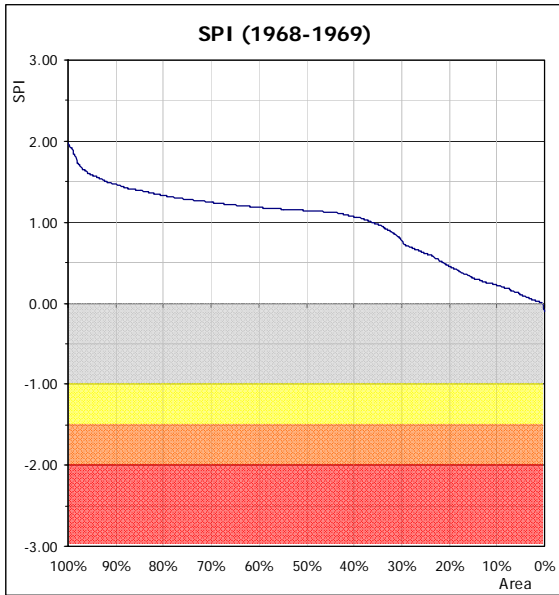
παράρτημα I

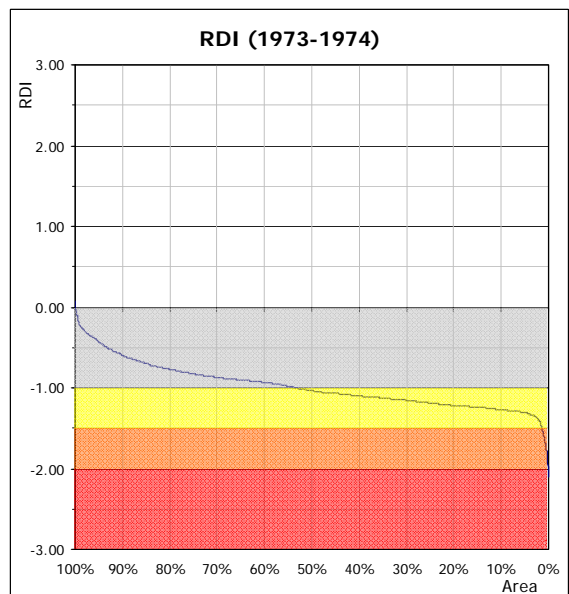
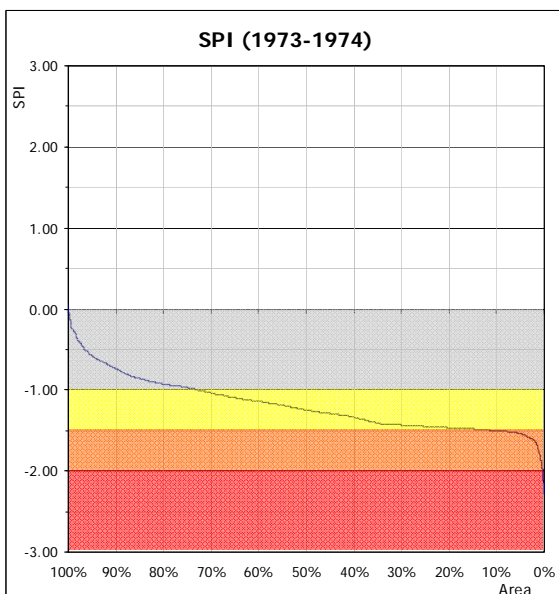
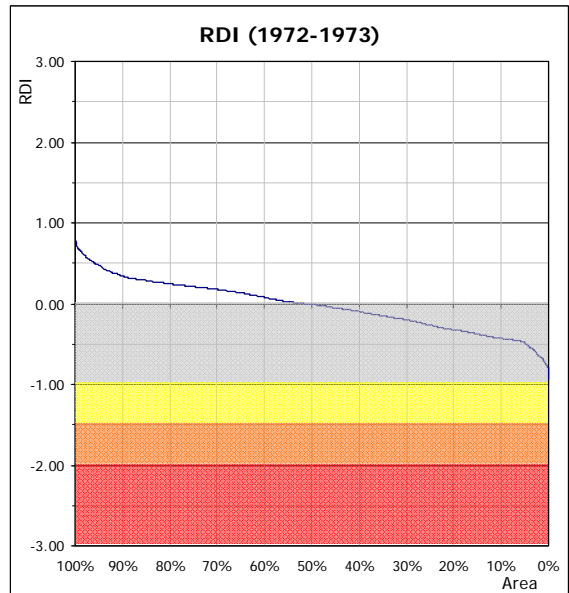
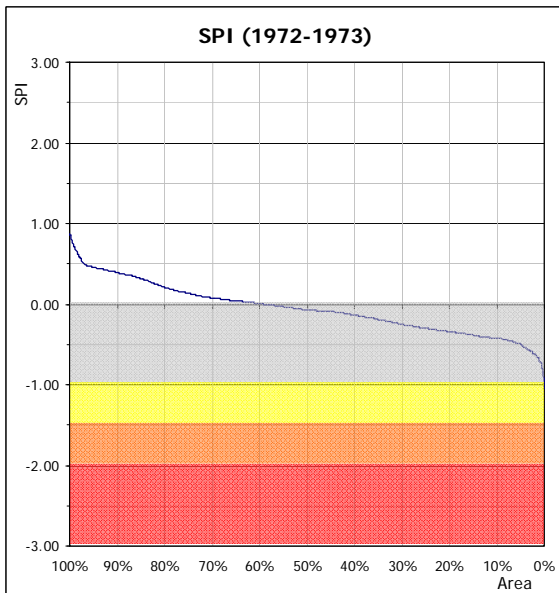
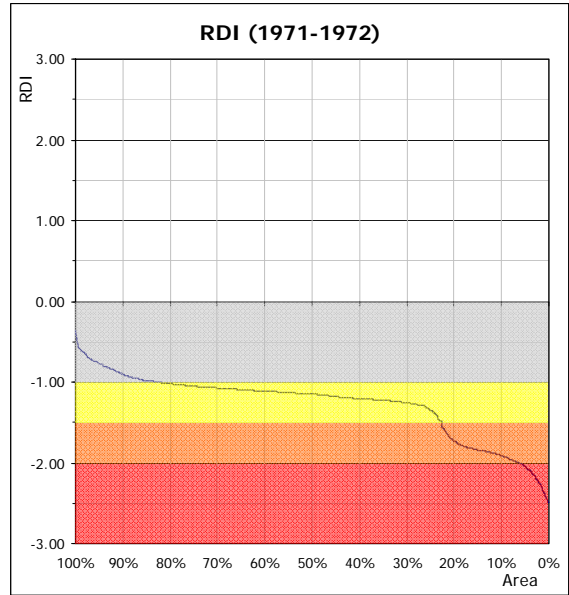
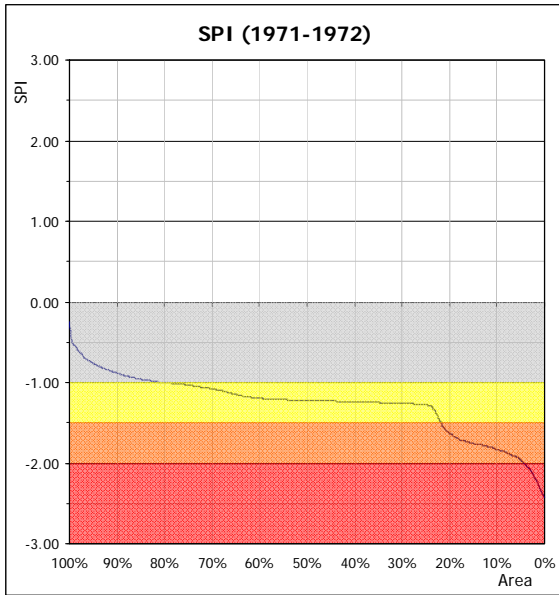
Αθροιστικές Καμπύλες  
("or more" ogive curves)

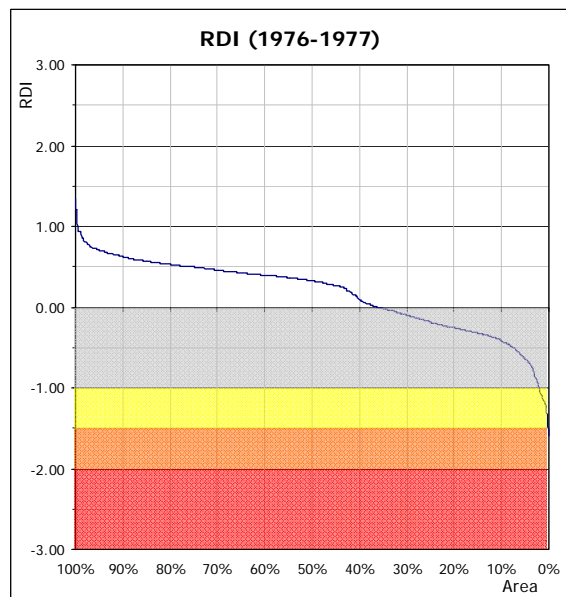
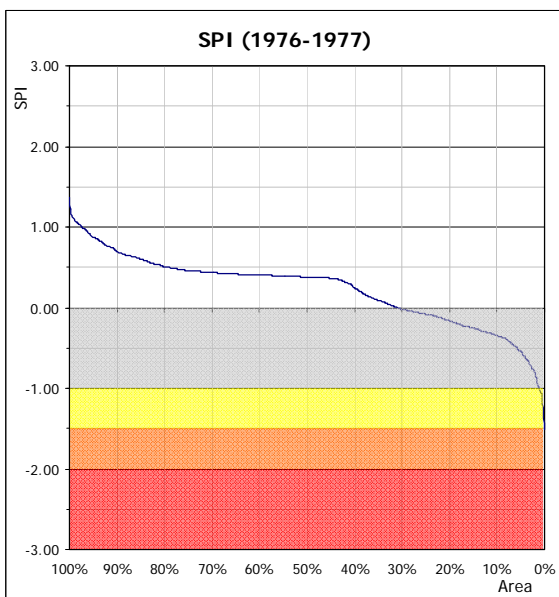
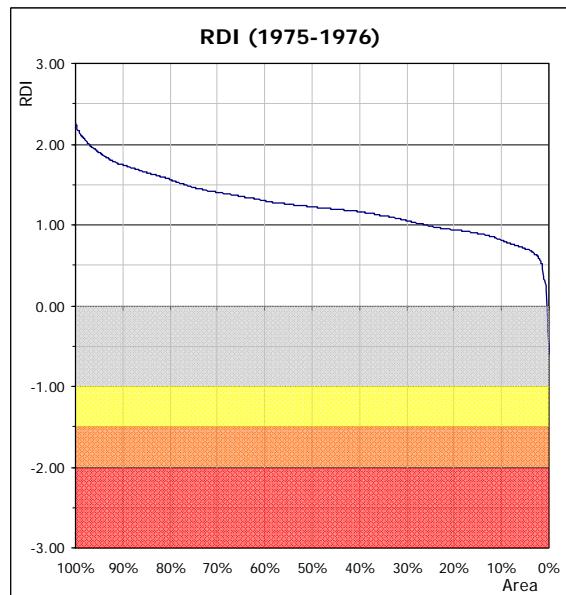
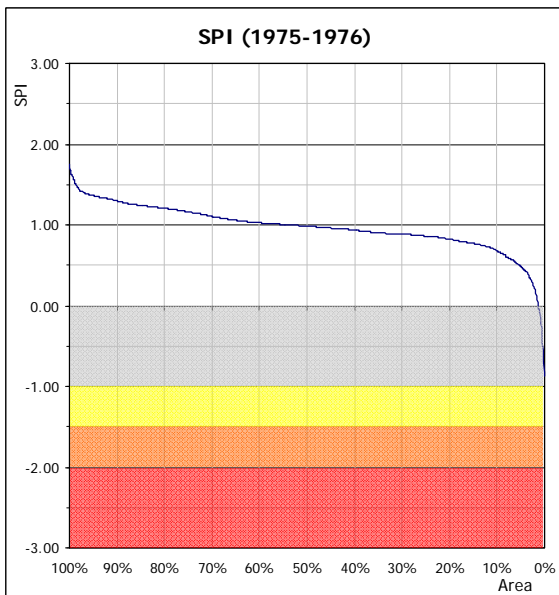
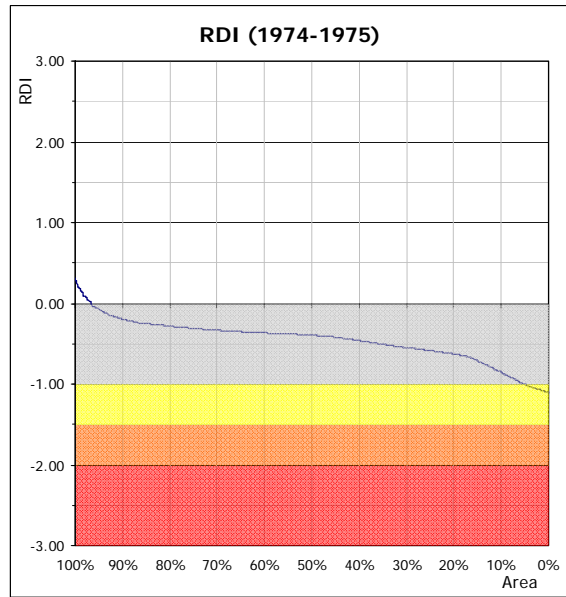
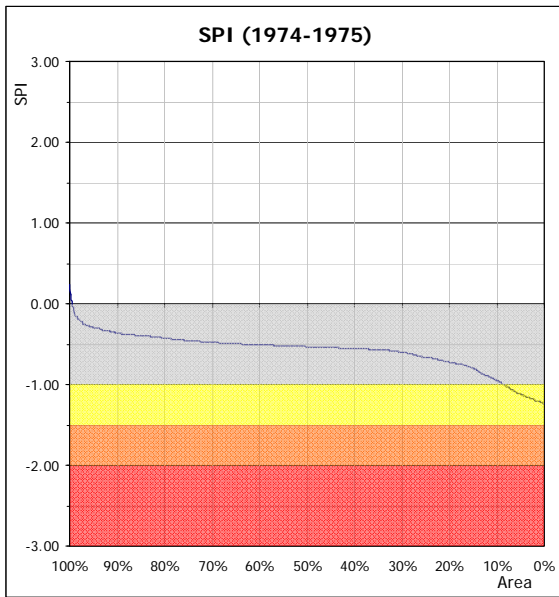


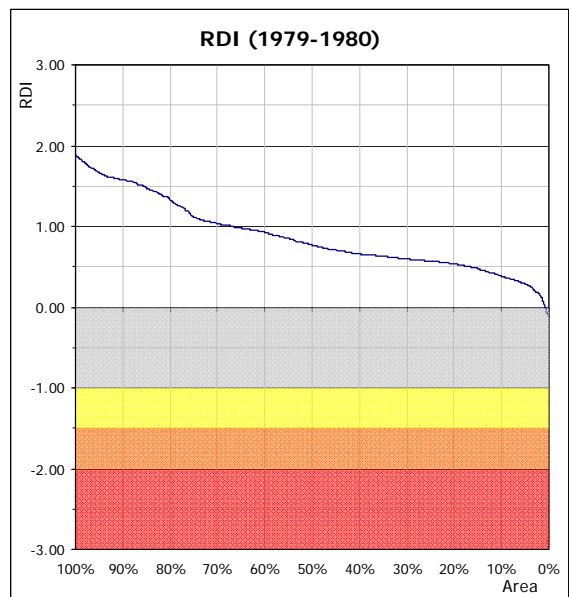
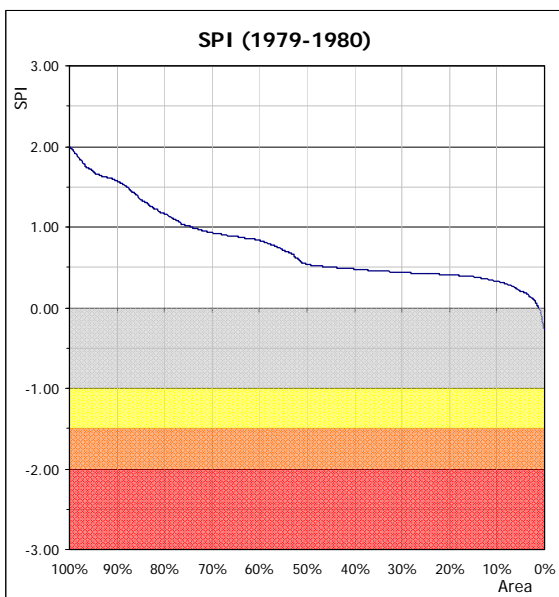
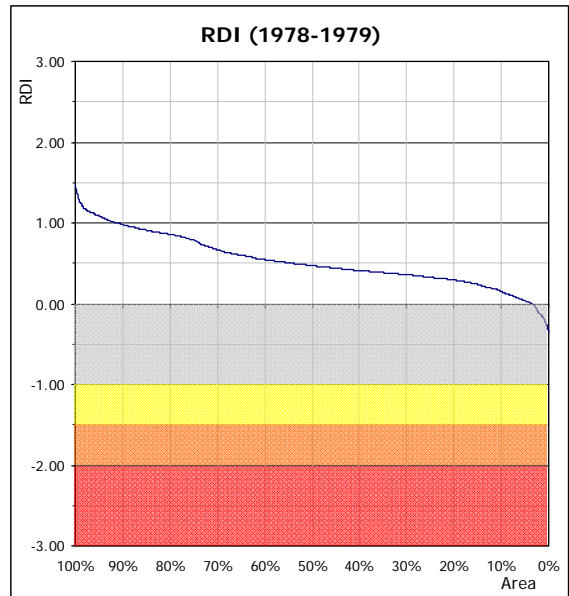
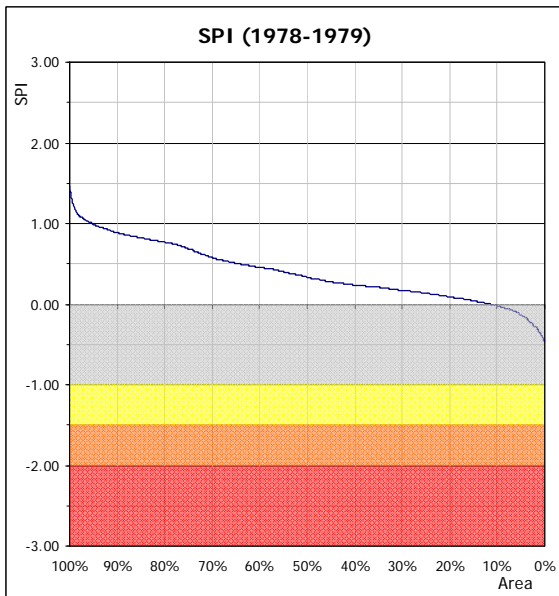
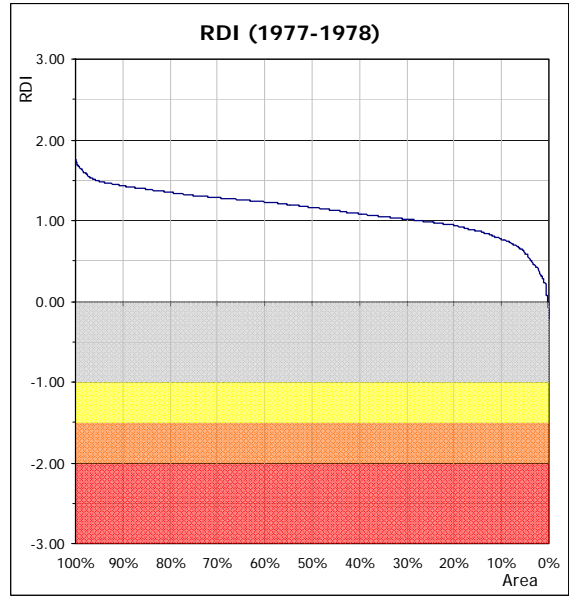
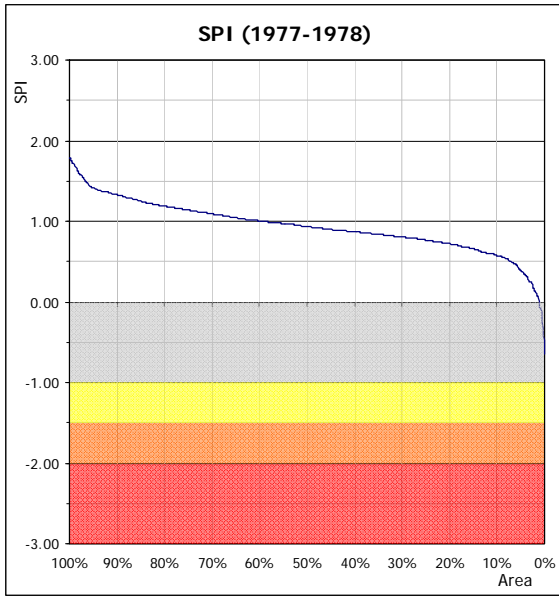




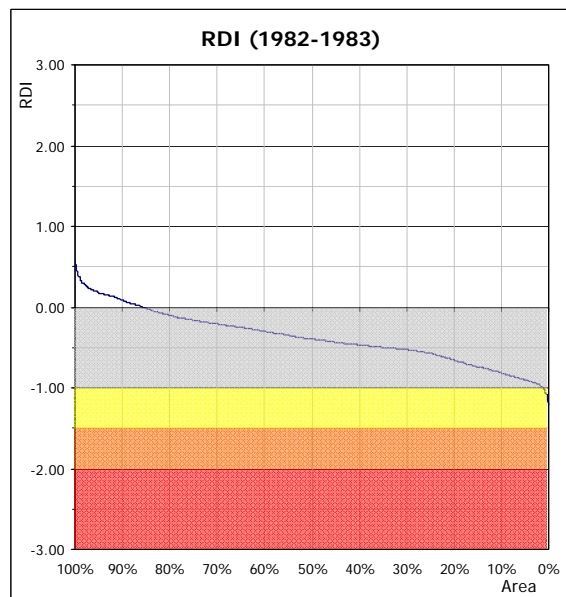
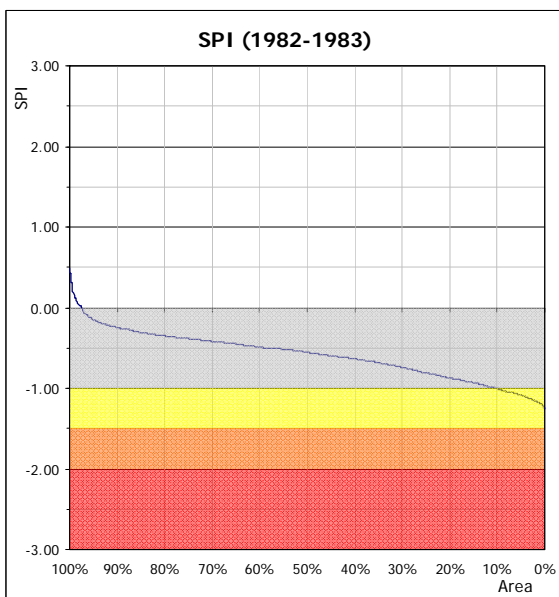
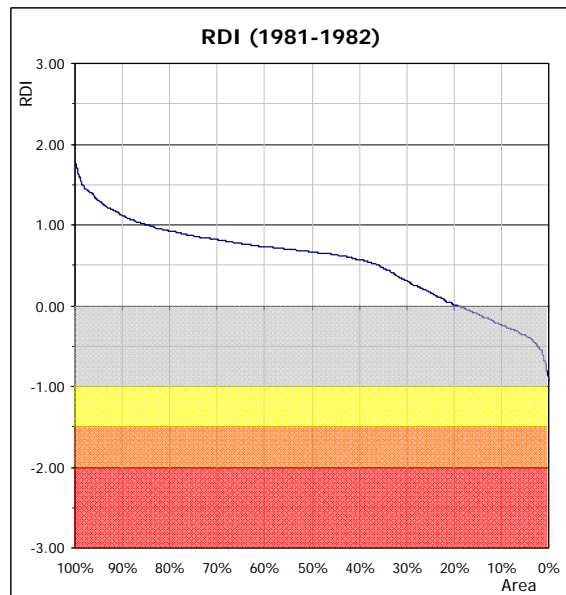
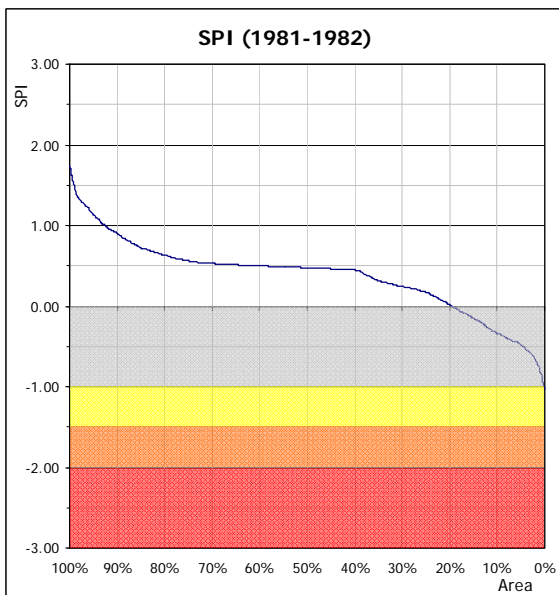
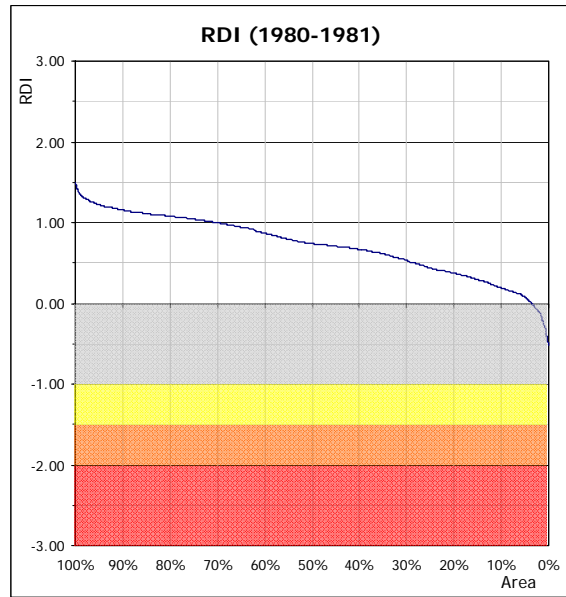
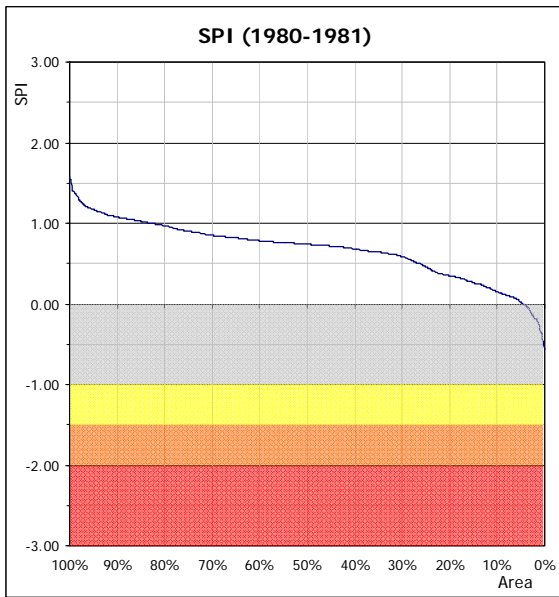


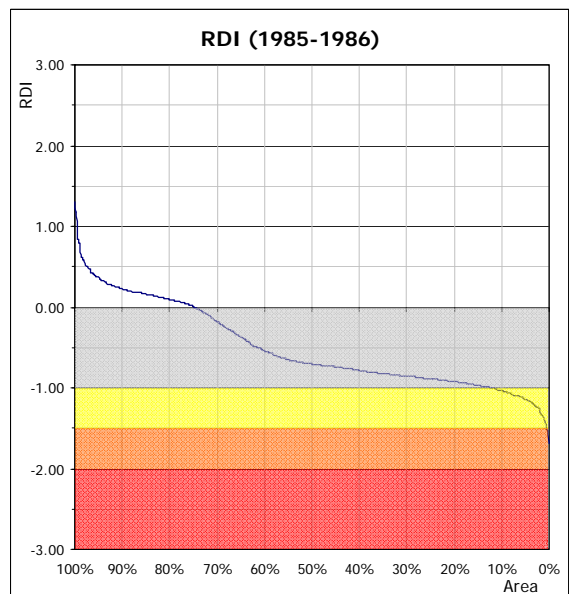
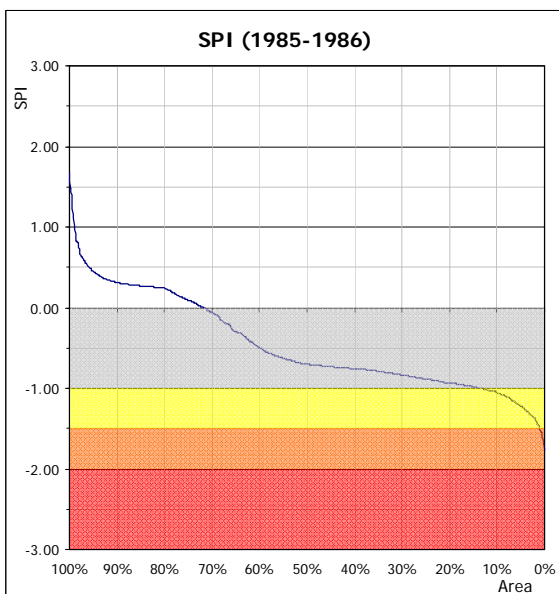
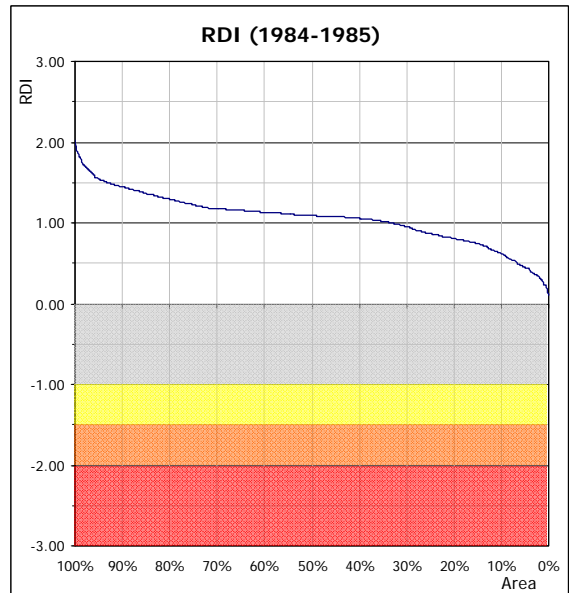
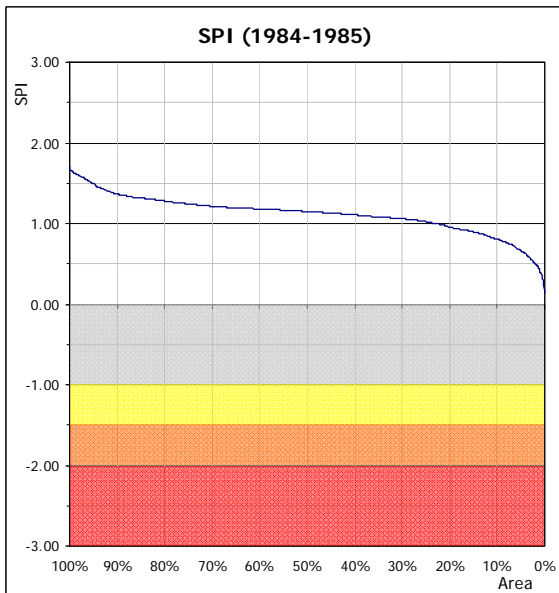
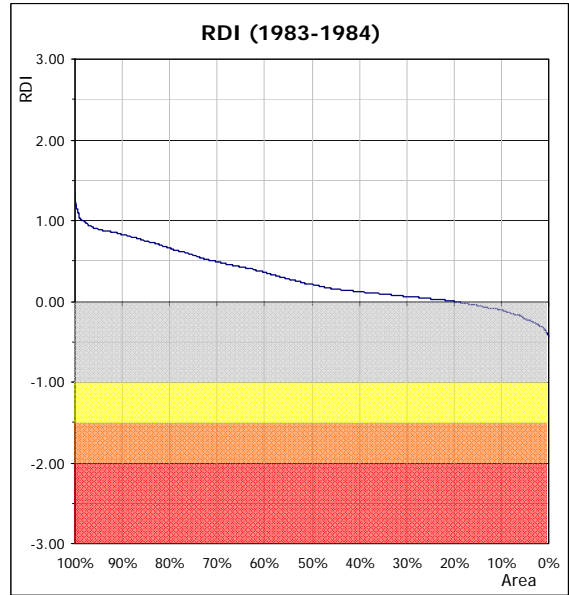
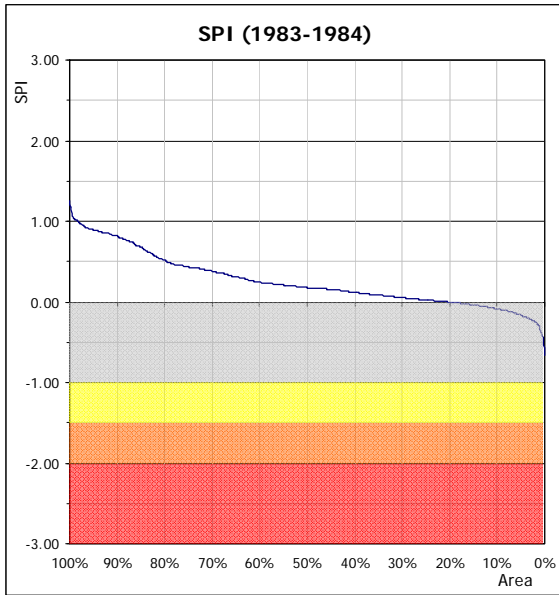


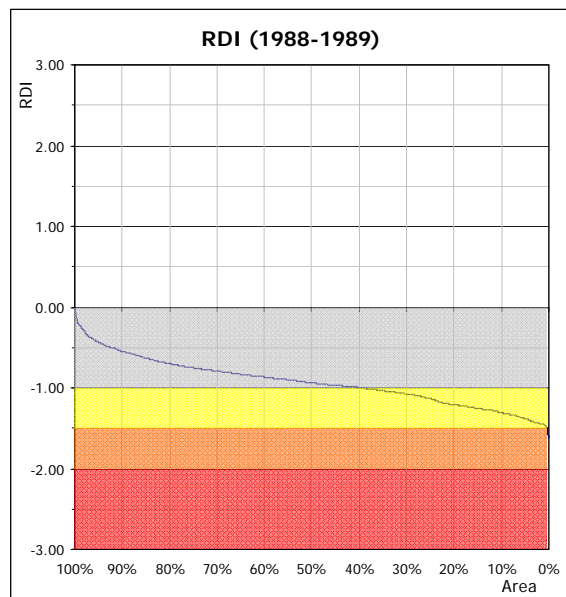
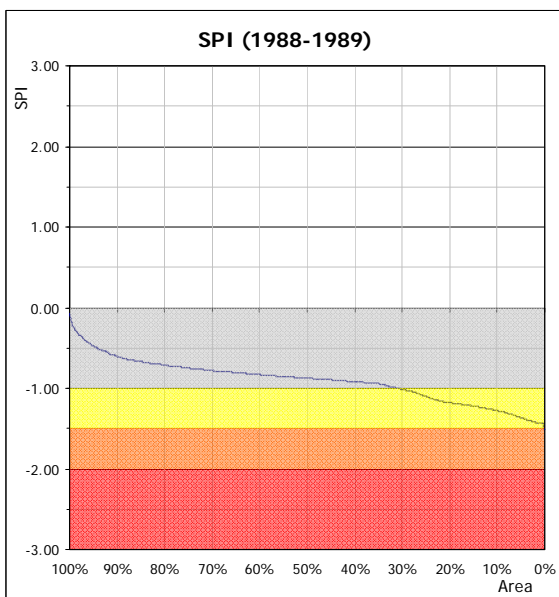
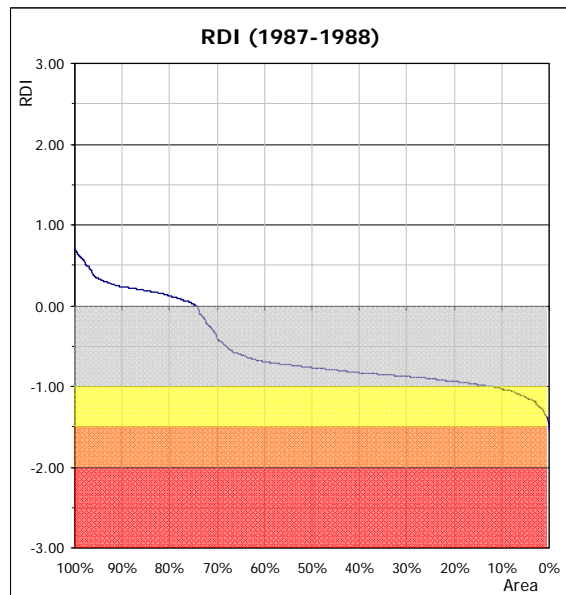
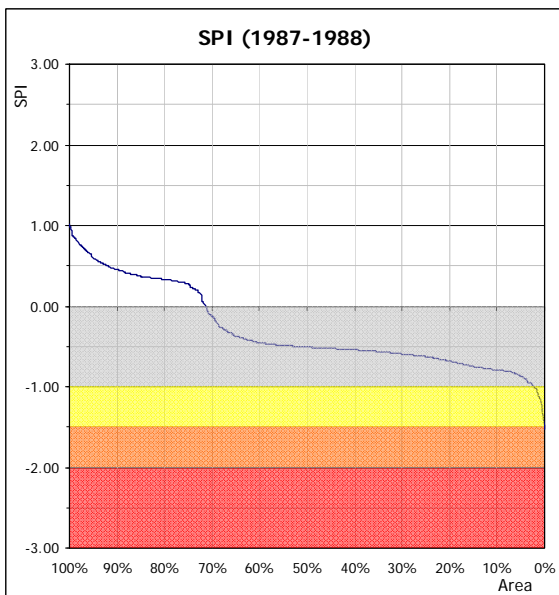
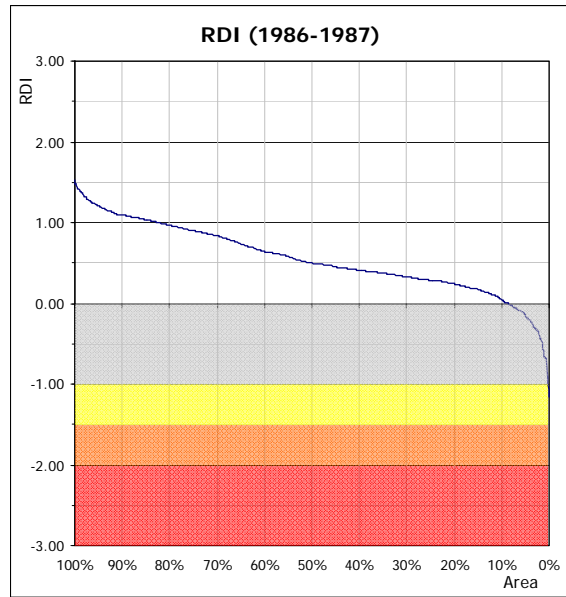
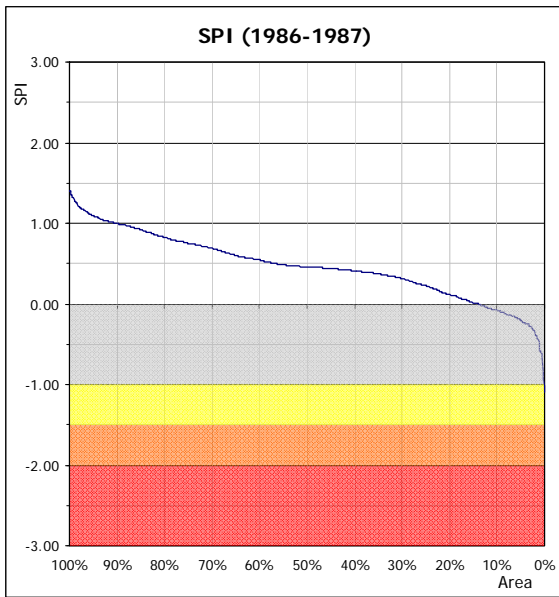


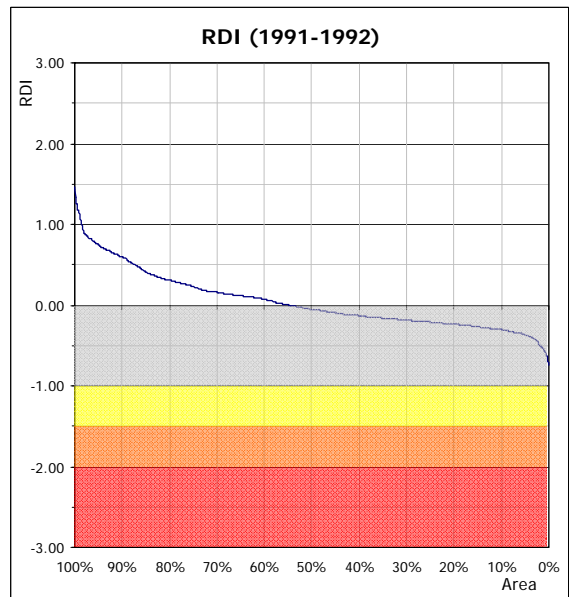
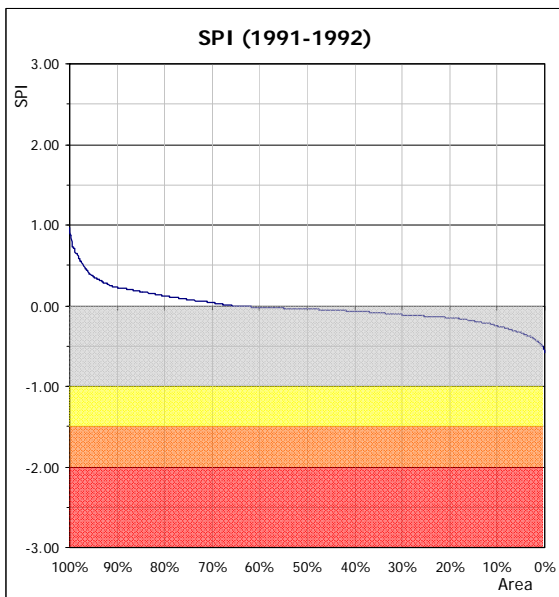
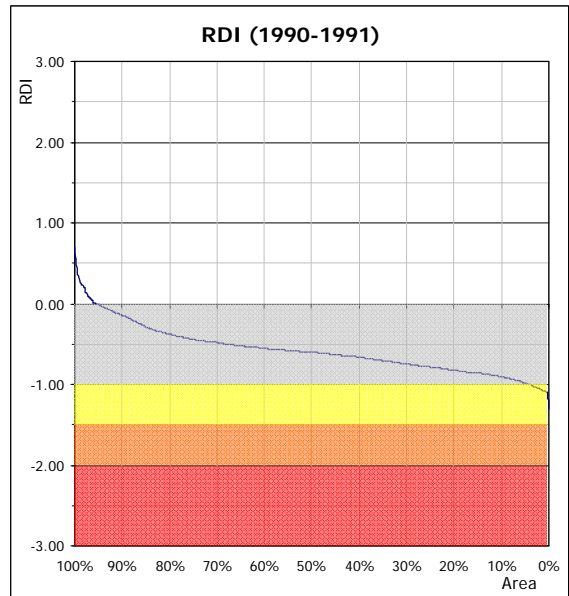
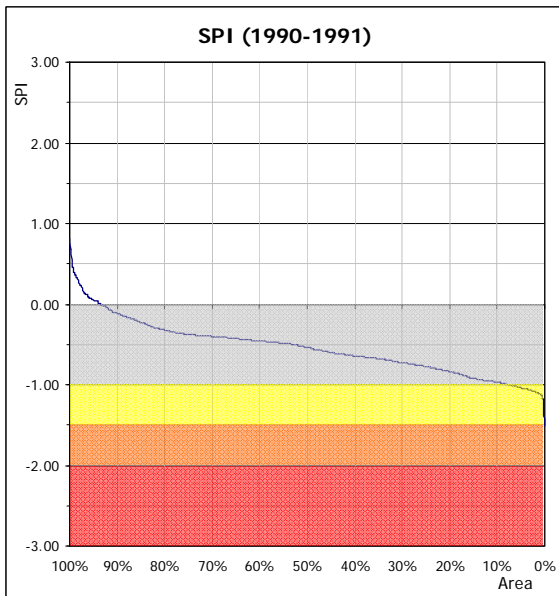
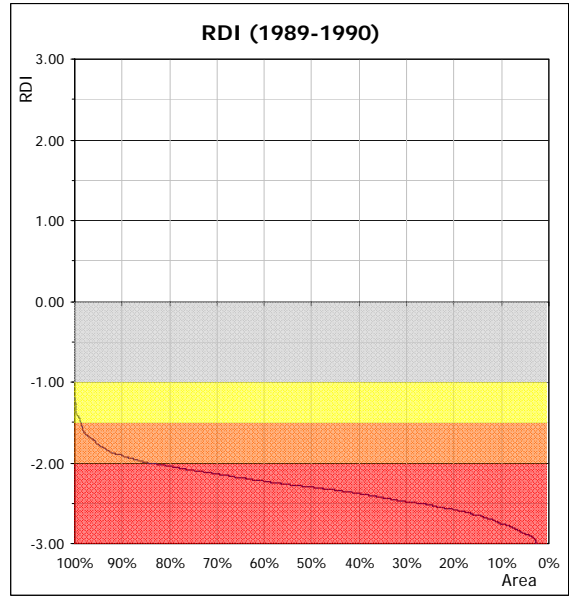
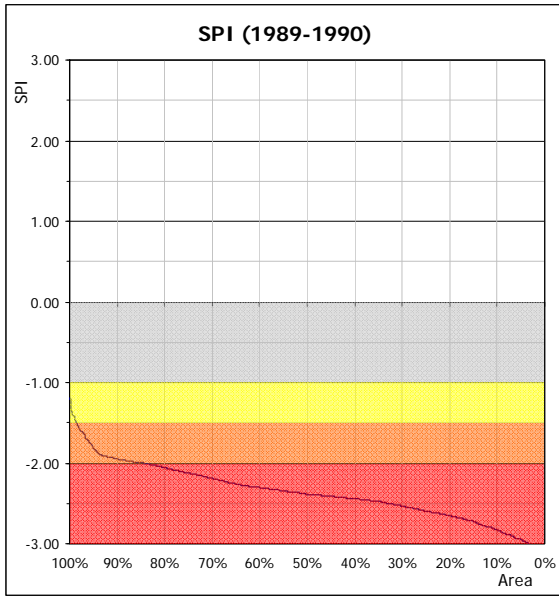










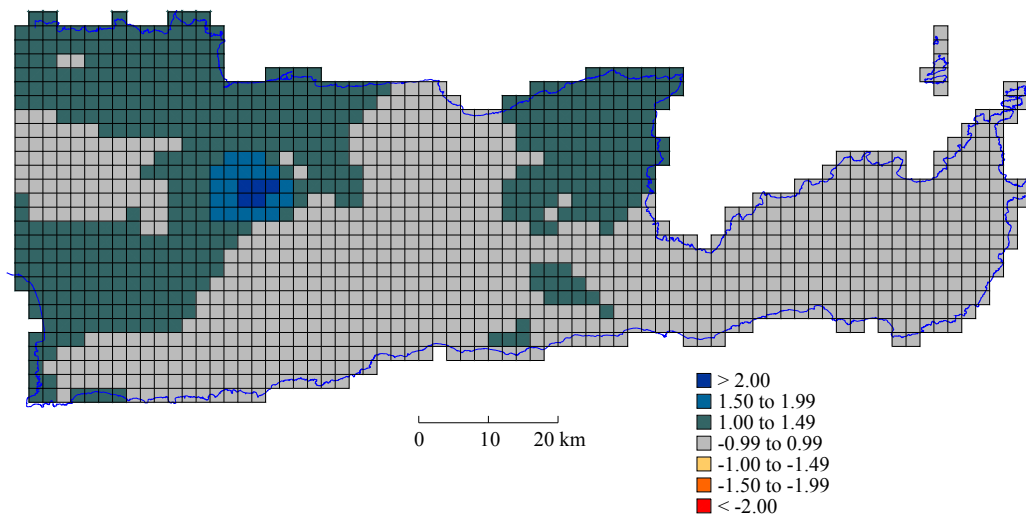


παράρτημα II

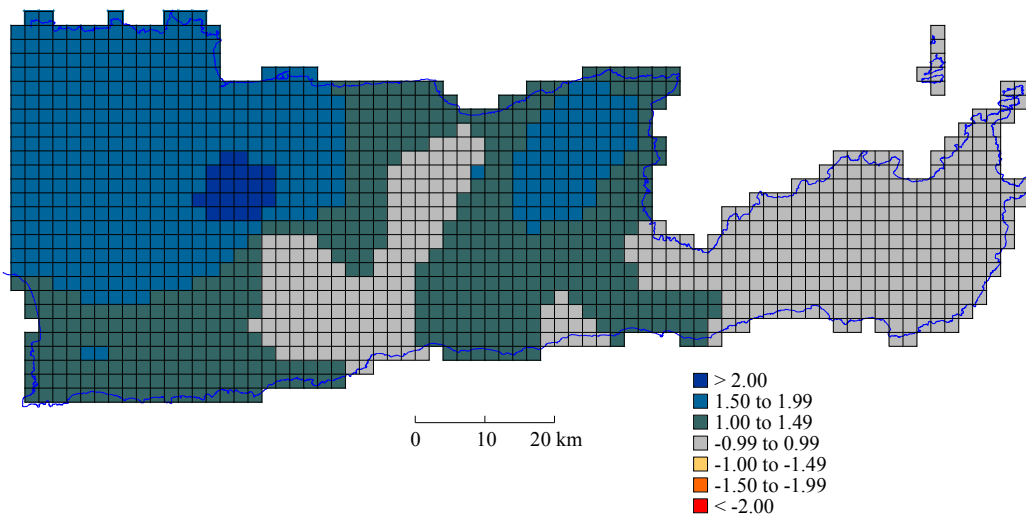
Χάρτες χωρικής κατανομής ξηρασίας  
(Ανατολική Κρήτη)



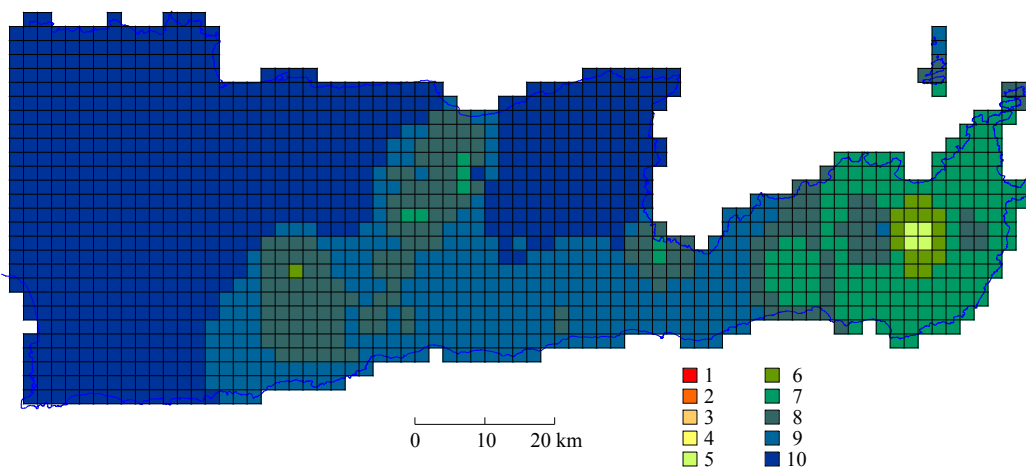
1962-1963



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

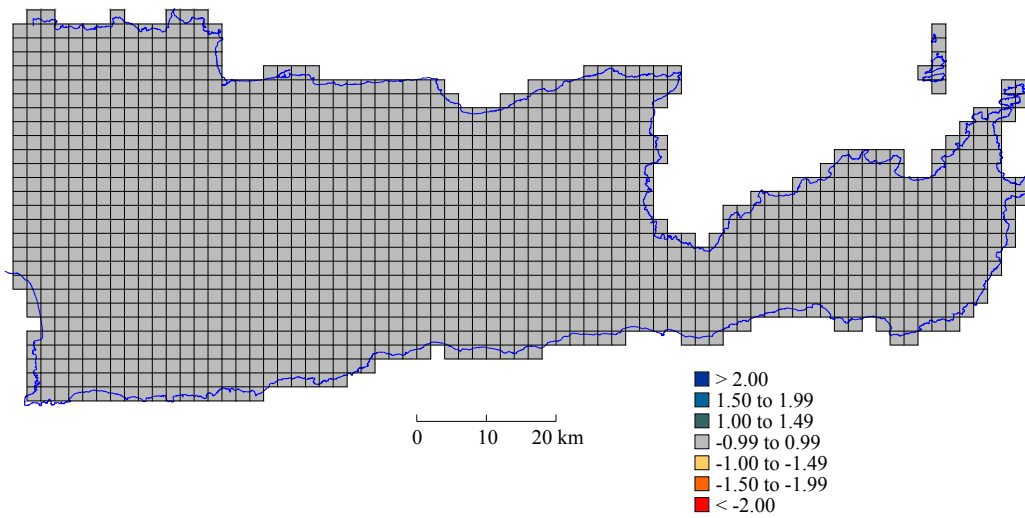


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

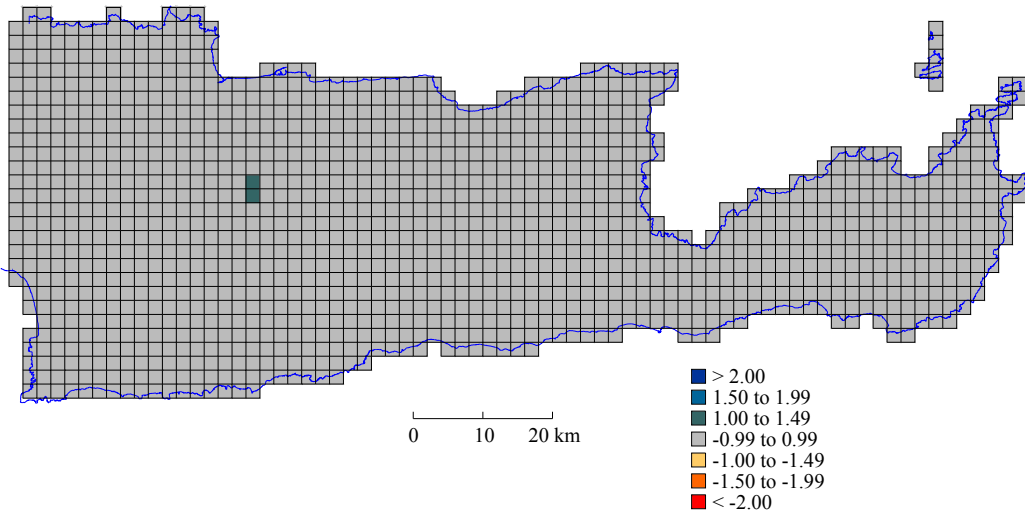


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

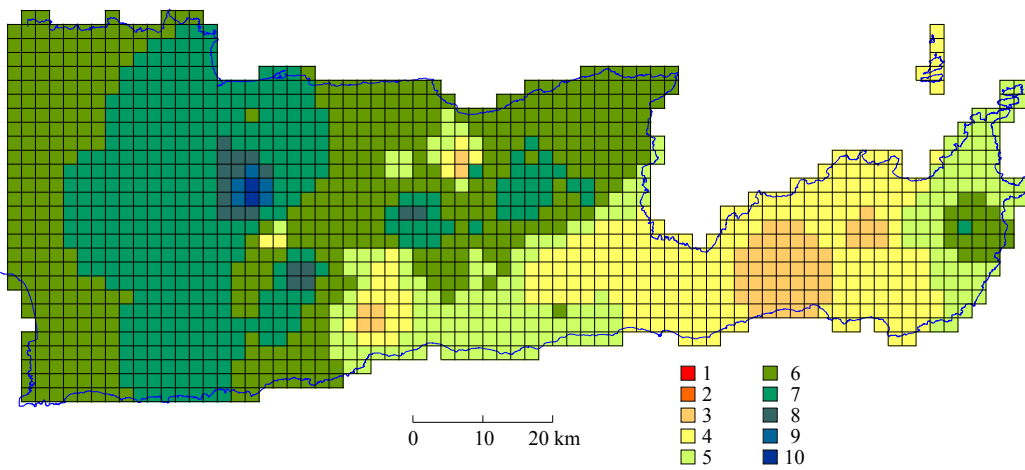
1963-1964



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI



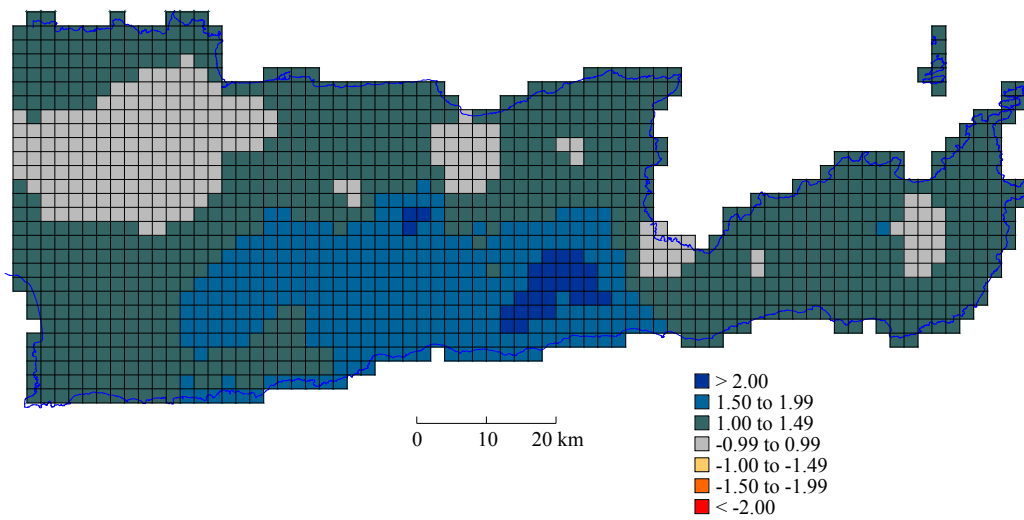
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI



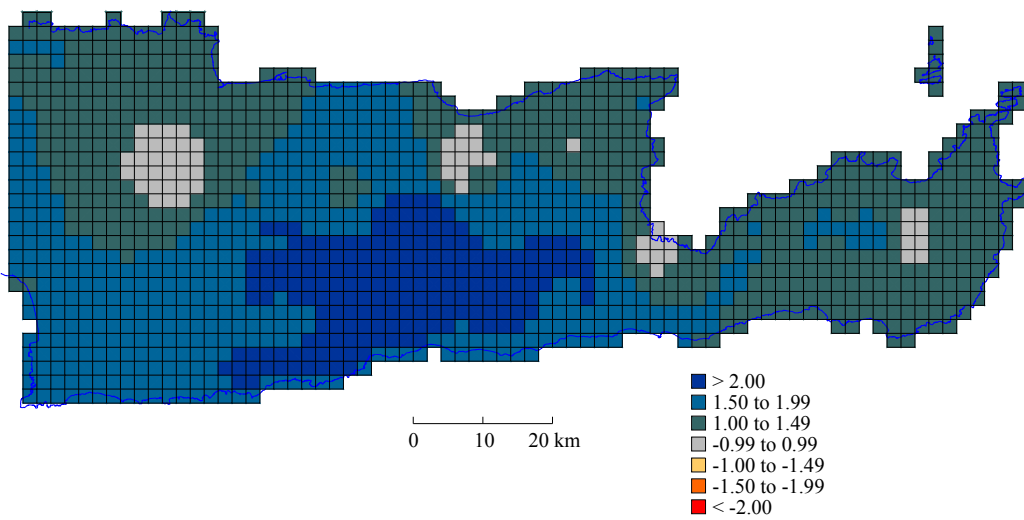
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles



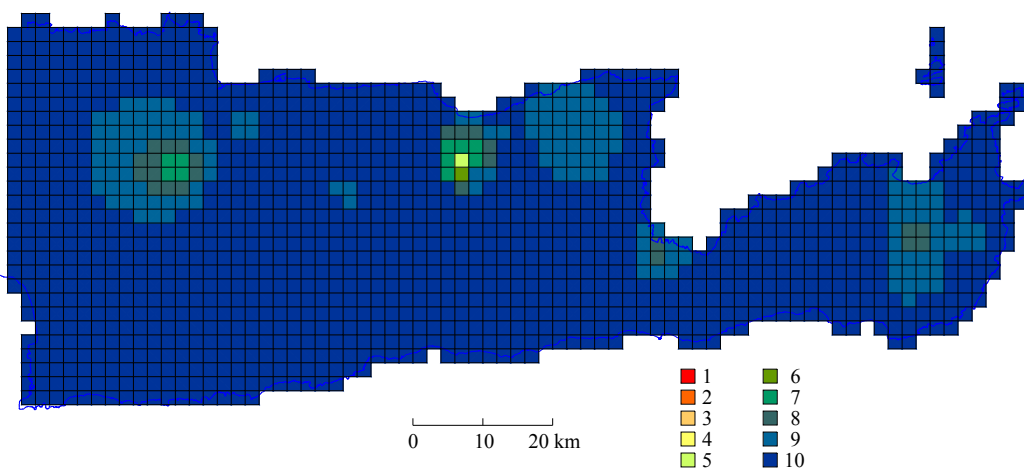
1964-1965



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

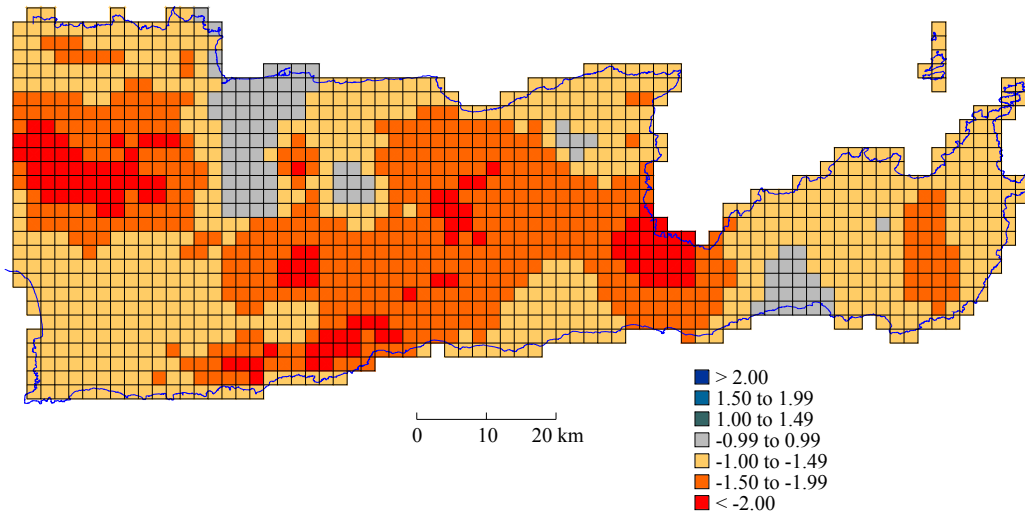


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

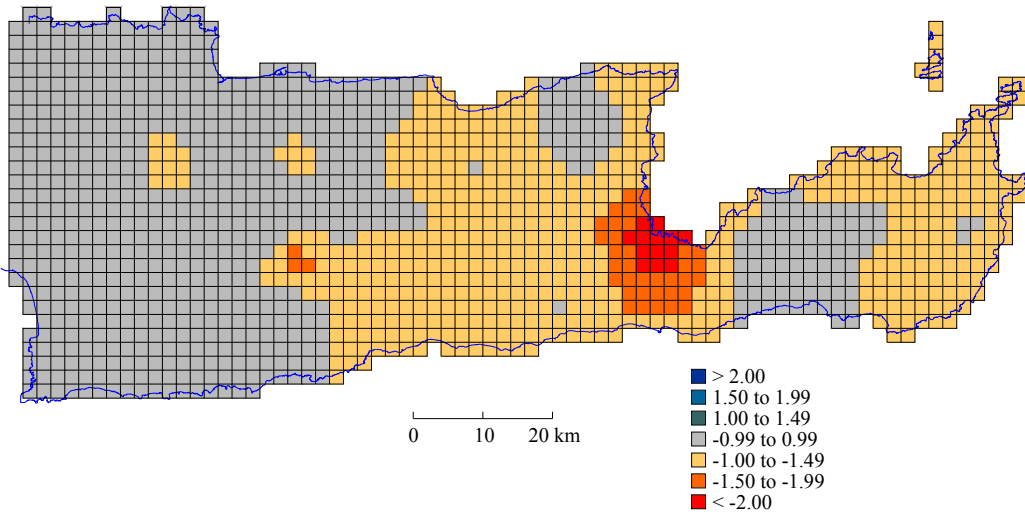


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

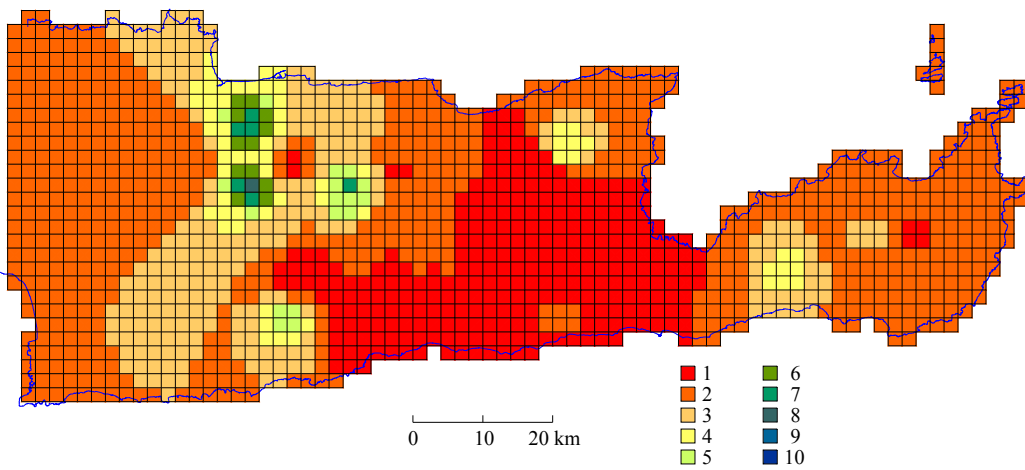
1965-1966



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

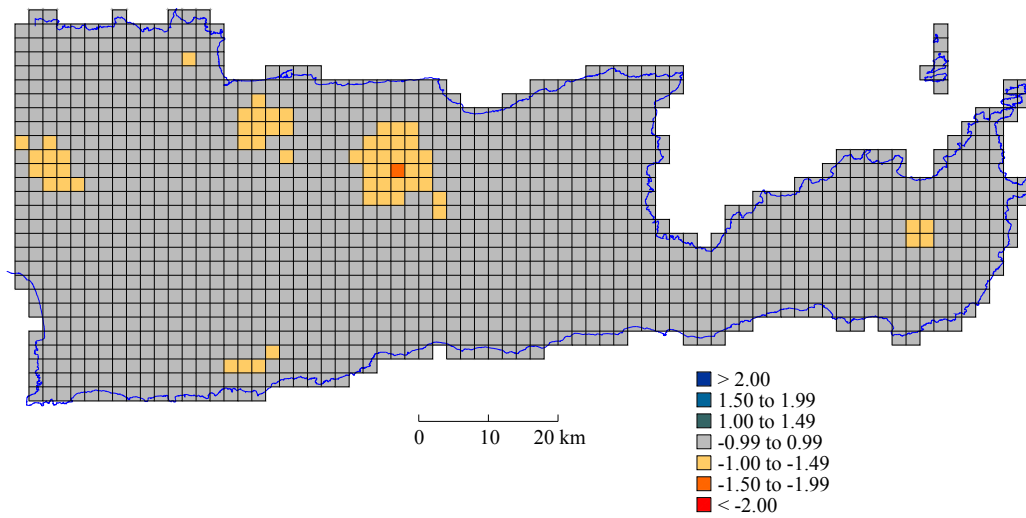


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

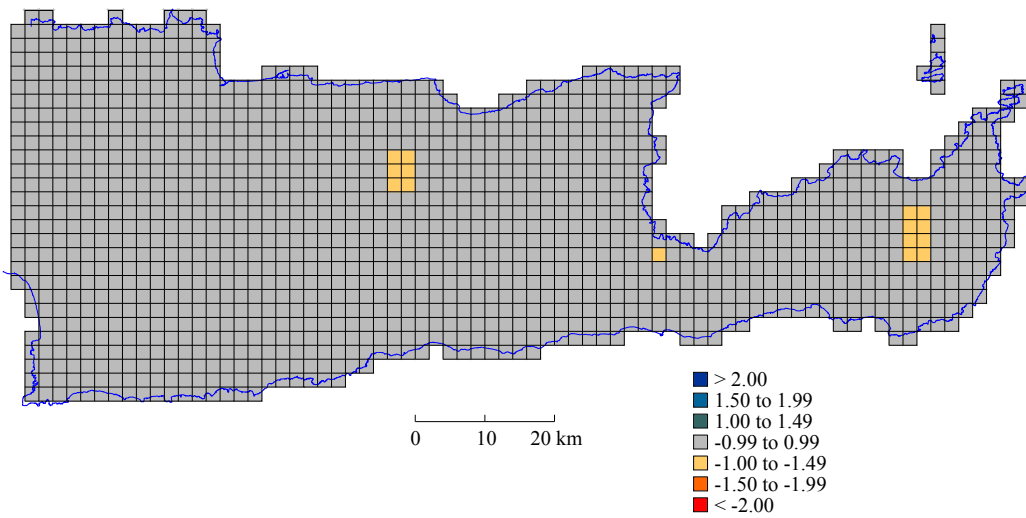


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

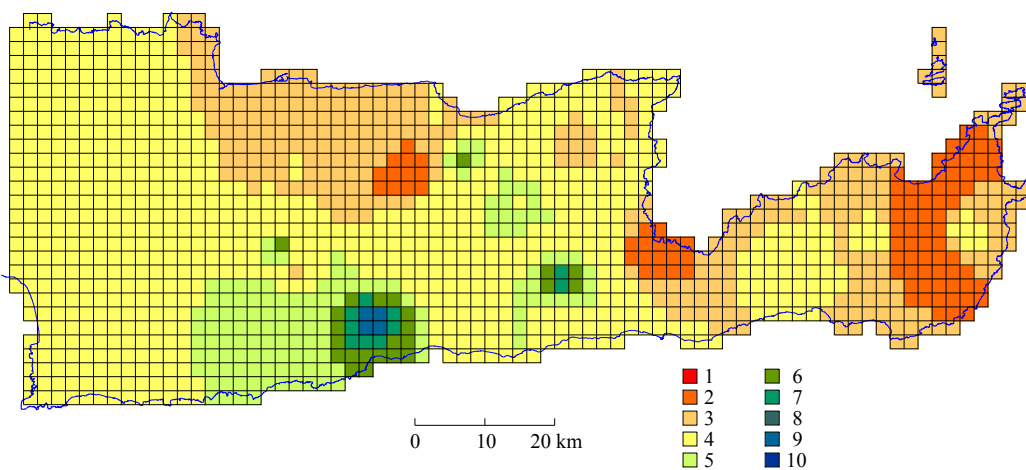
1966-1967



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

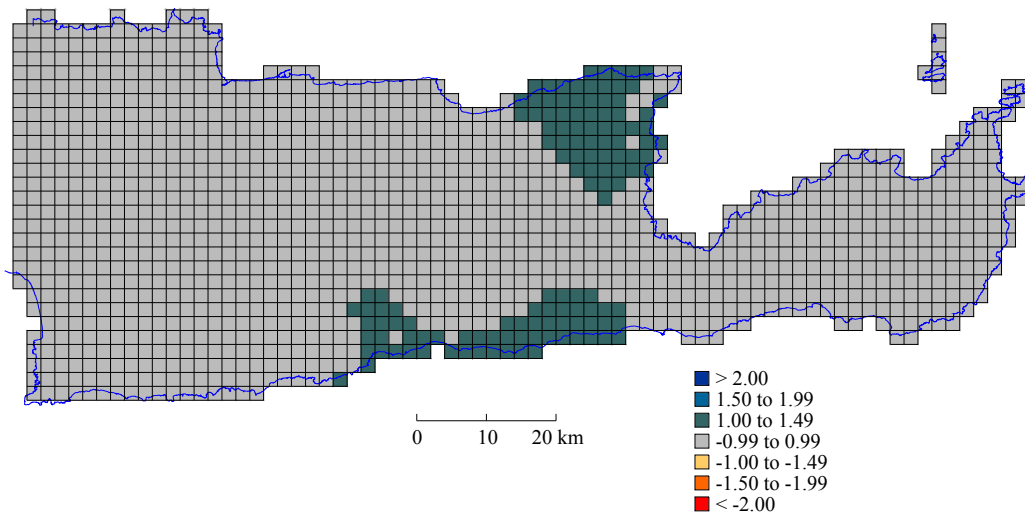


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

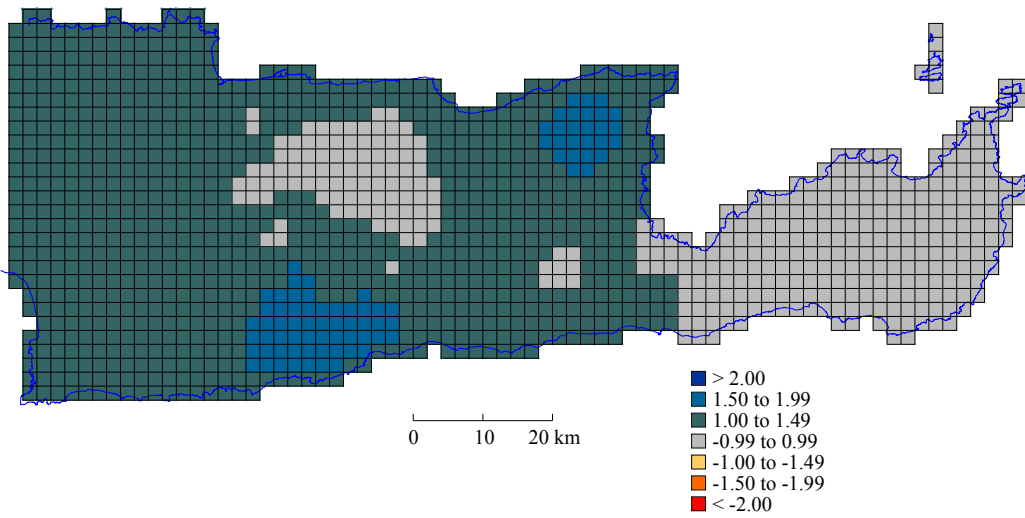


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

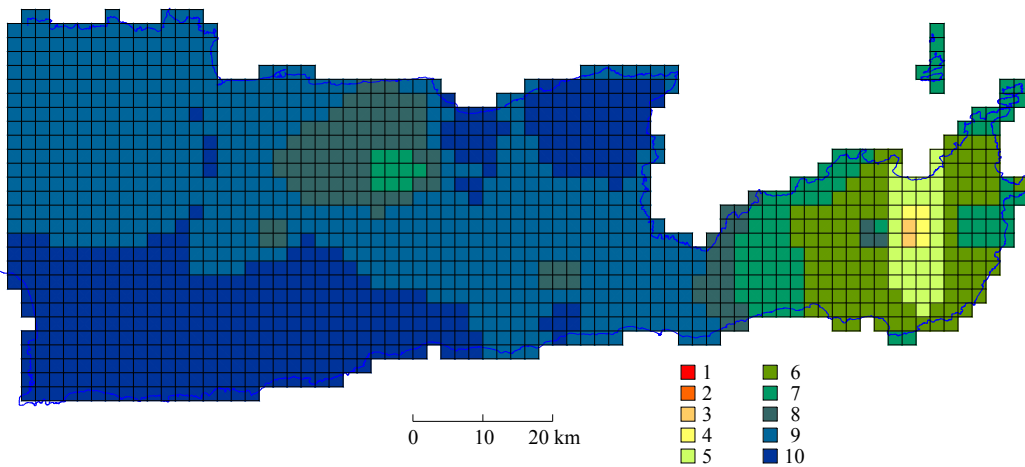
1967-1968



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

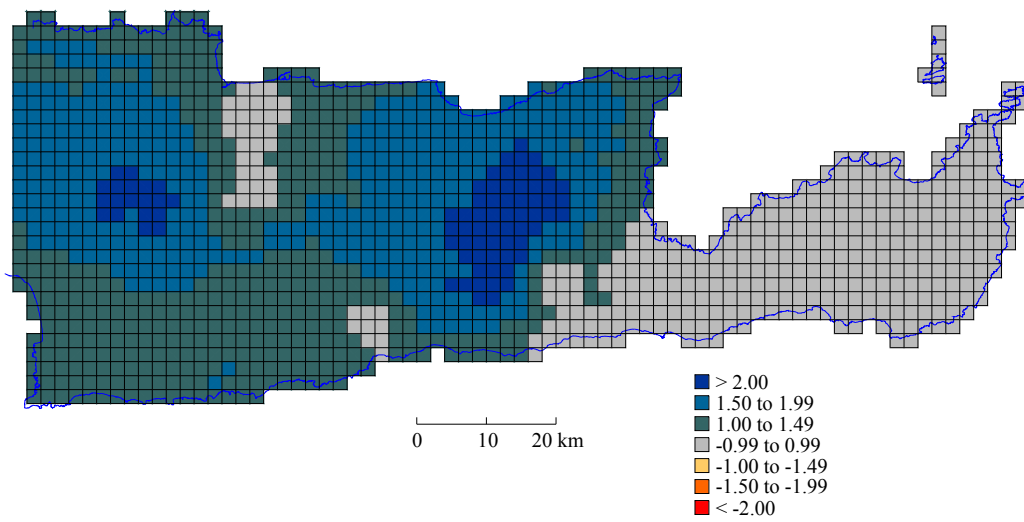


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

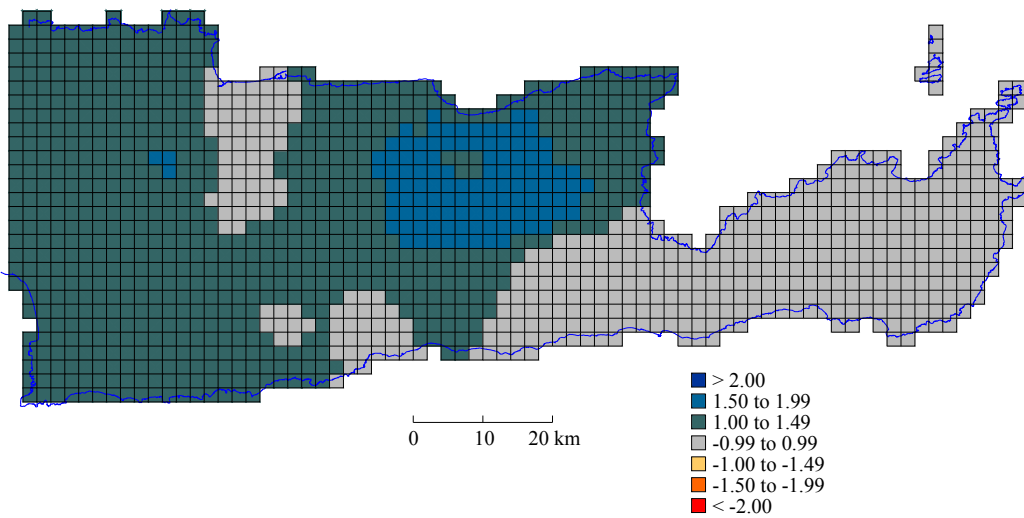


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

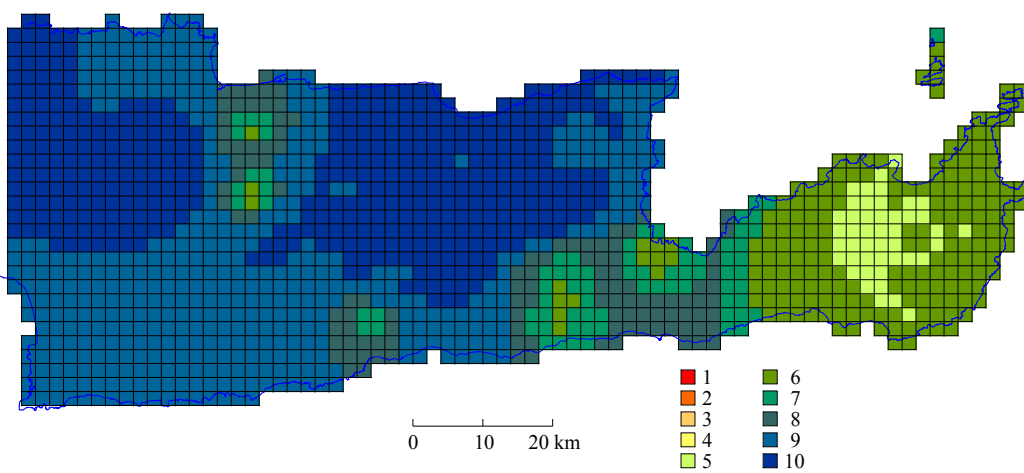
1968-1969



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

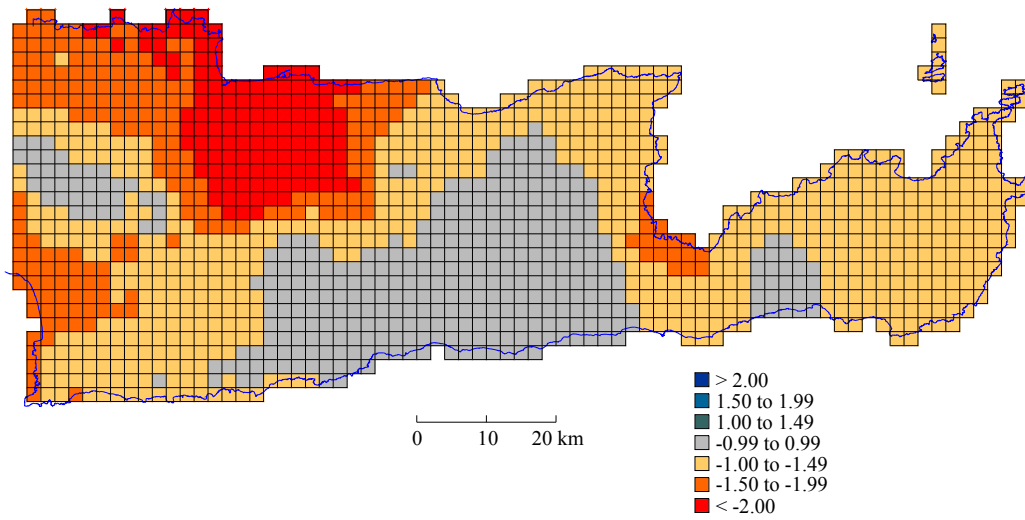


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

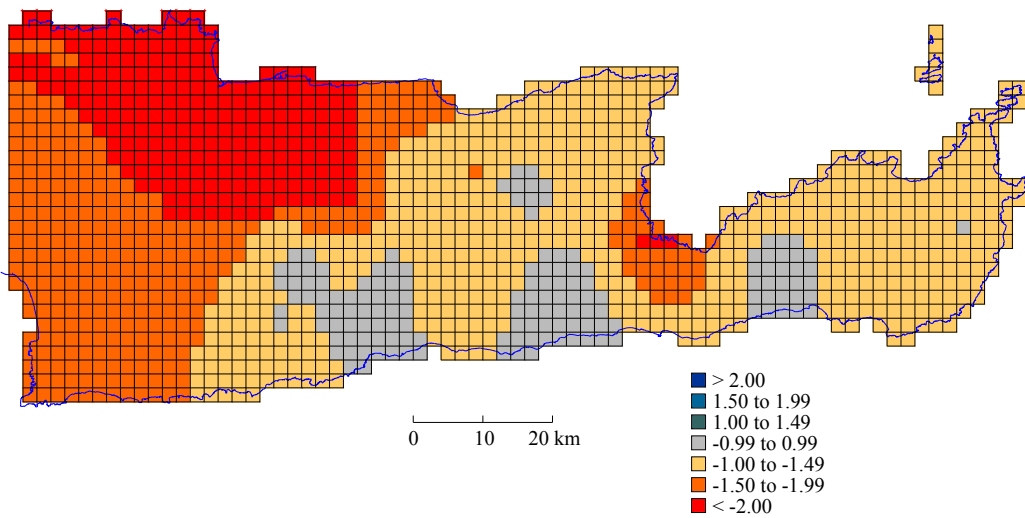


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

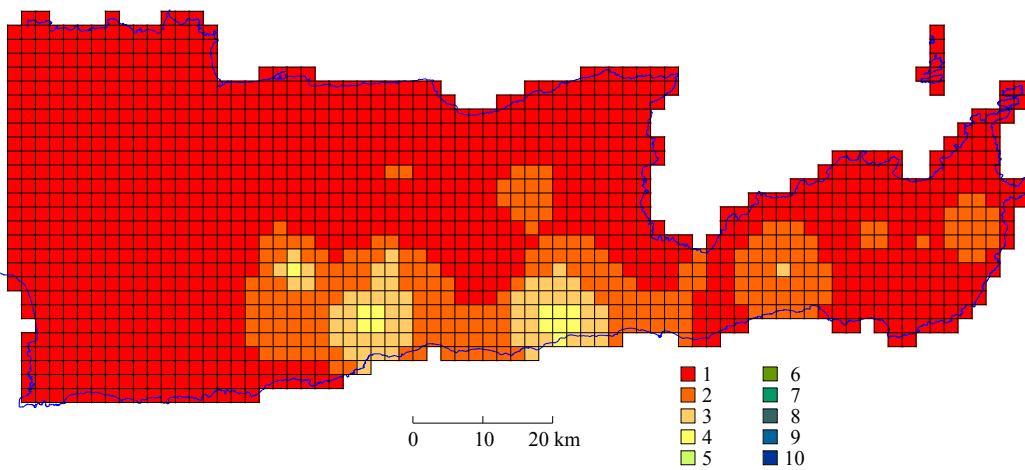
1969-1970



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

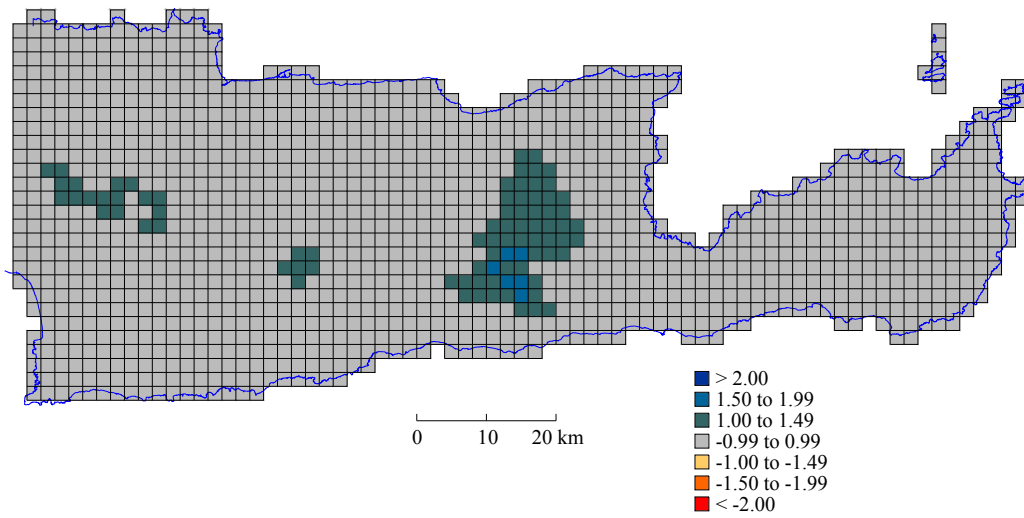


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

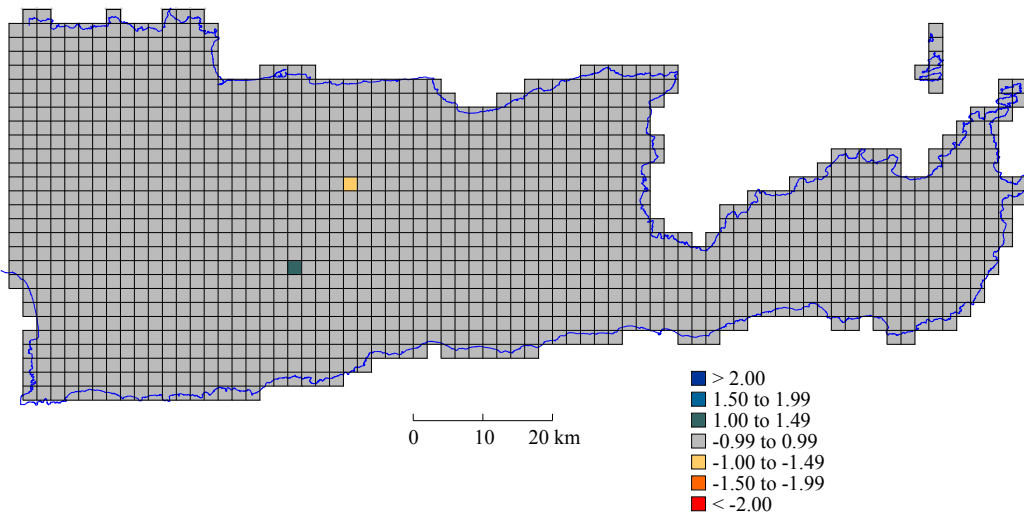


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

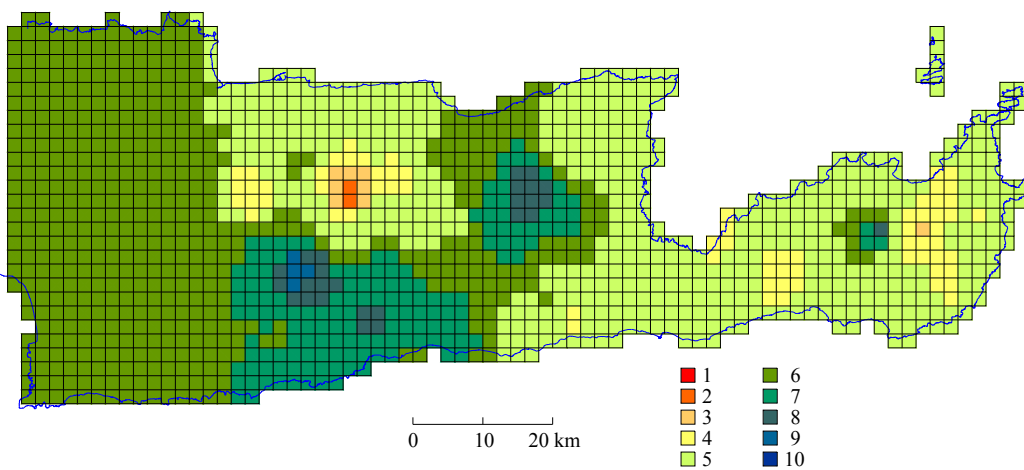
1970-1971



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

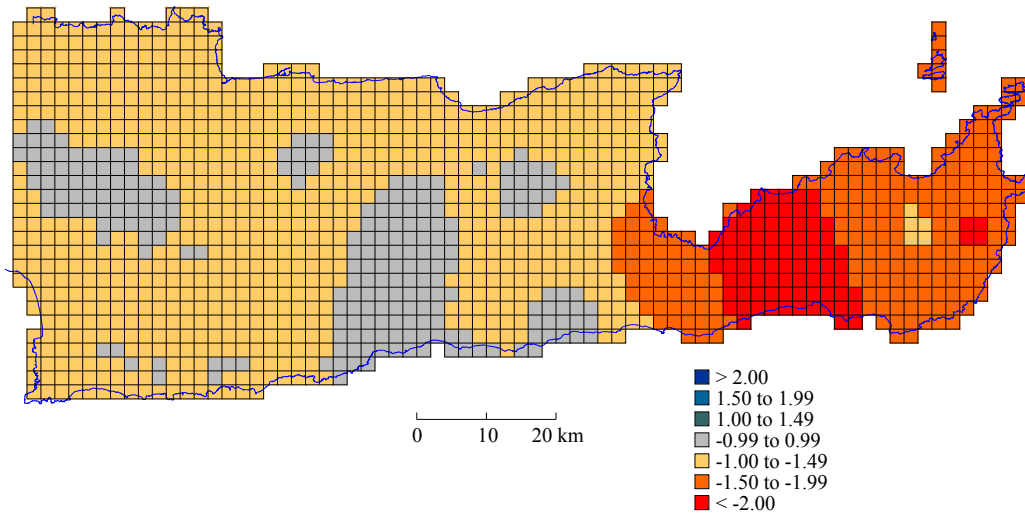


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

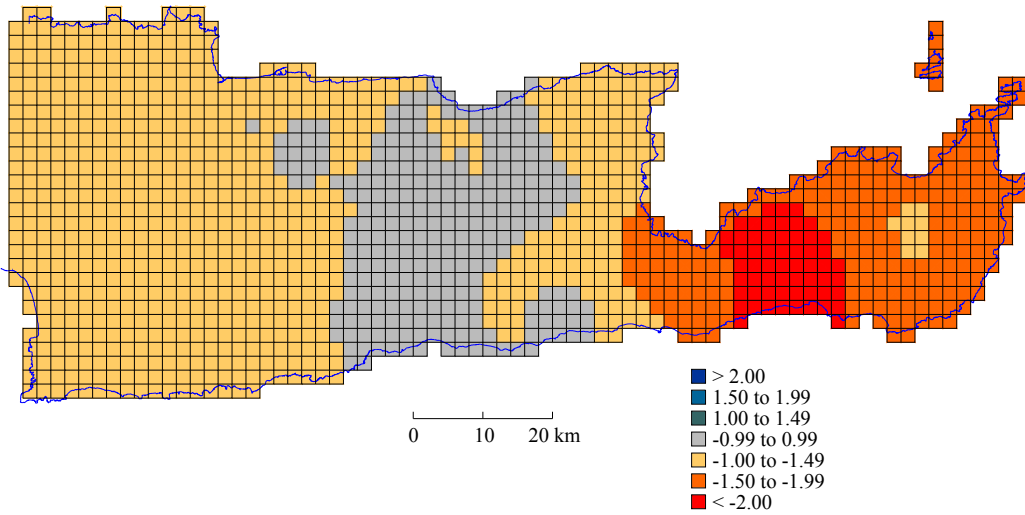


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

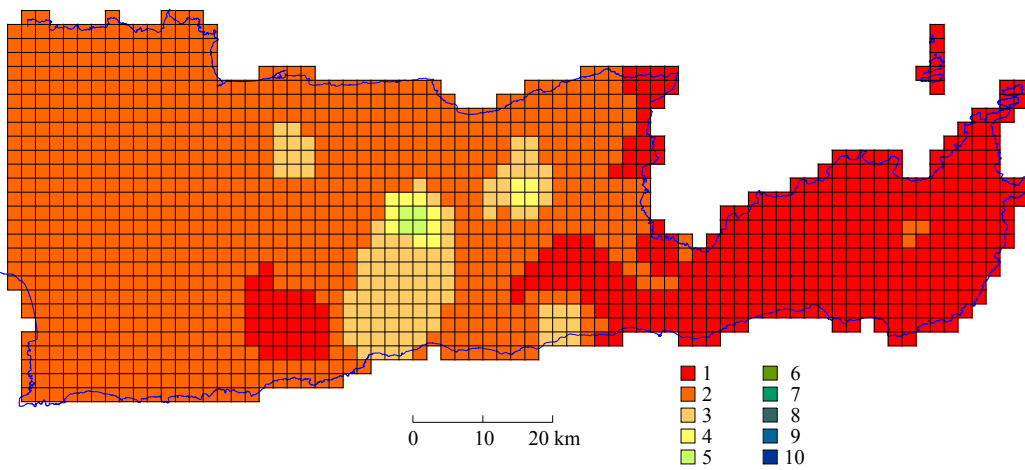
1971-1972



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI



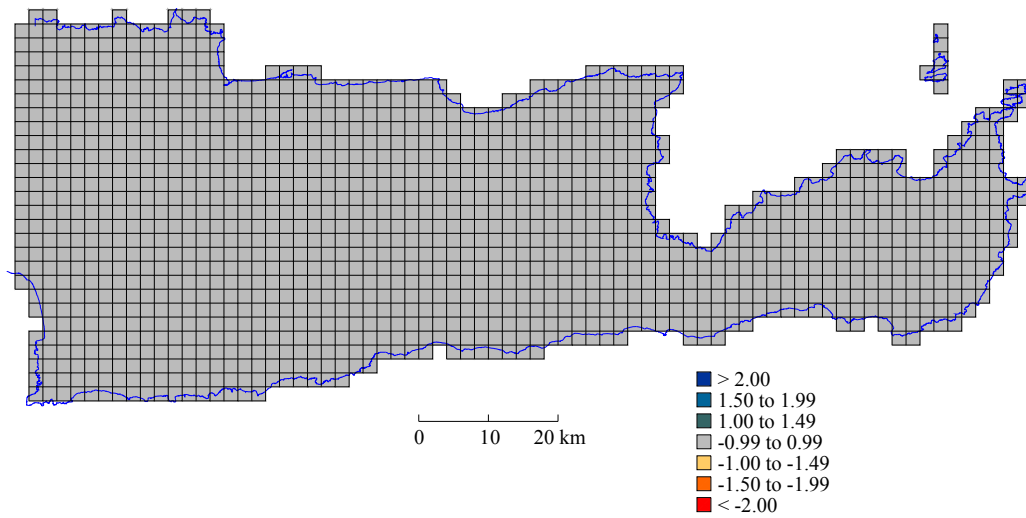
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI



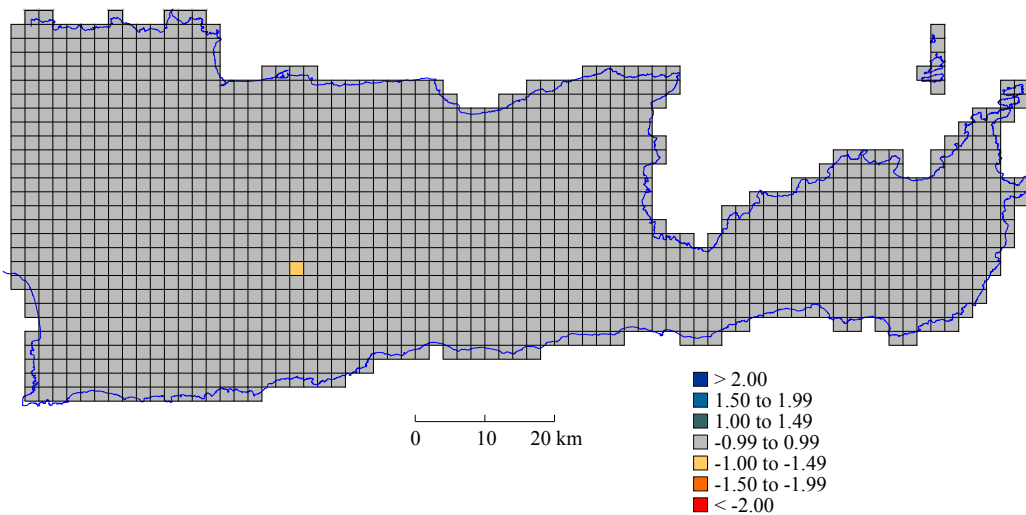
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles



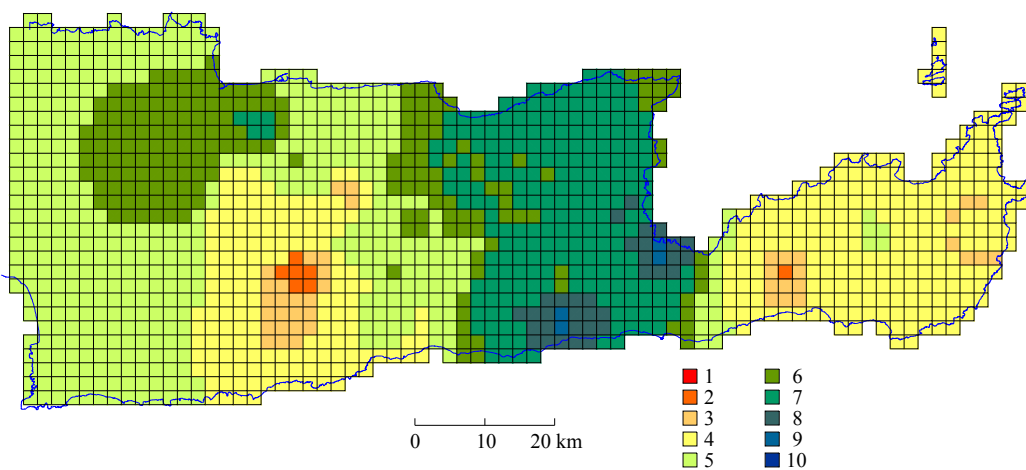
1972-1973



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

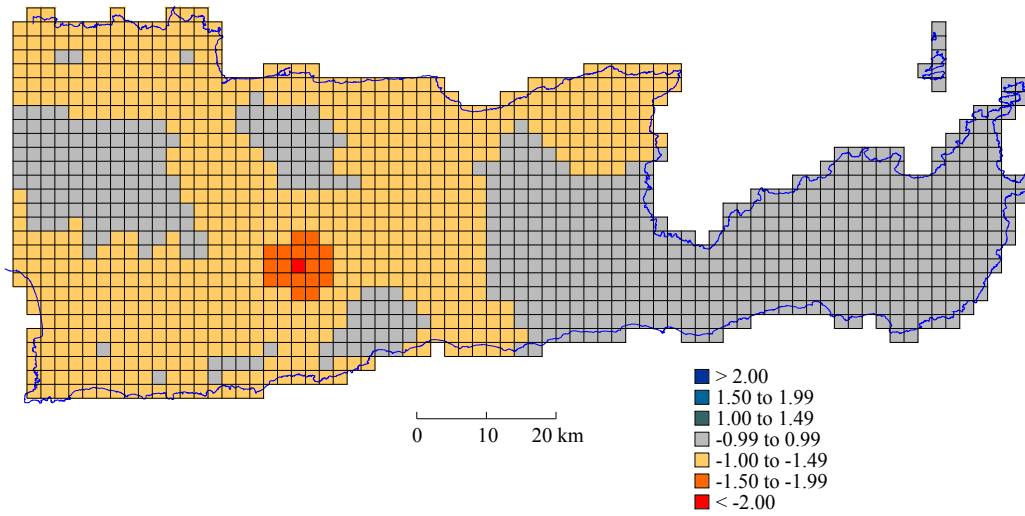


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

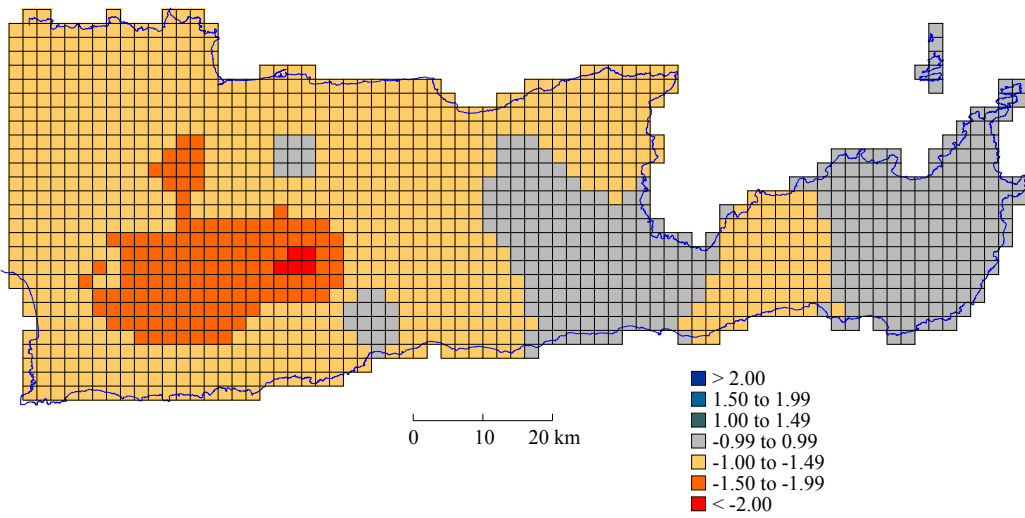


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

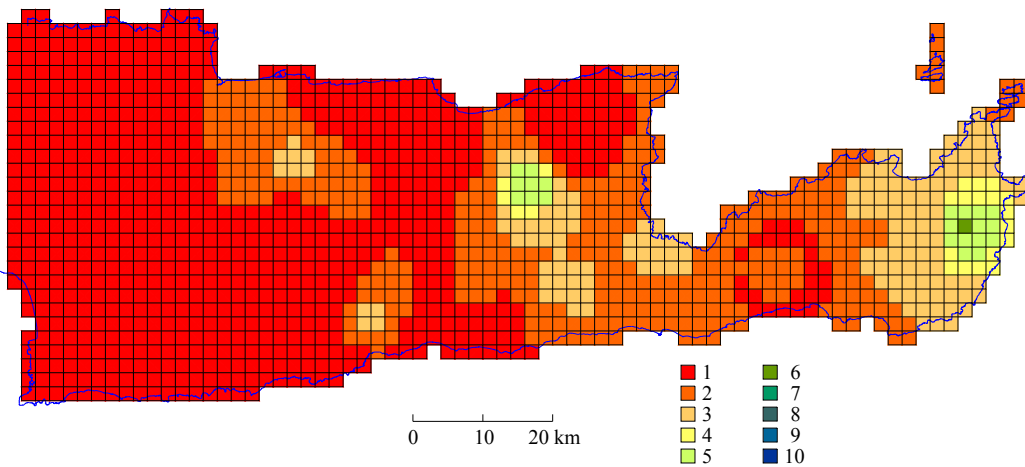
1973-1974



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

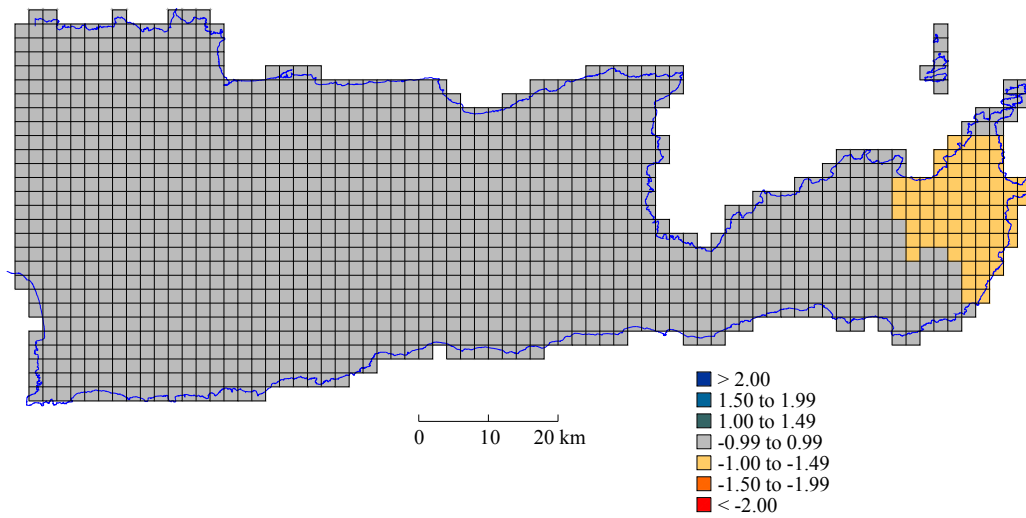


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

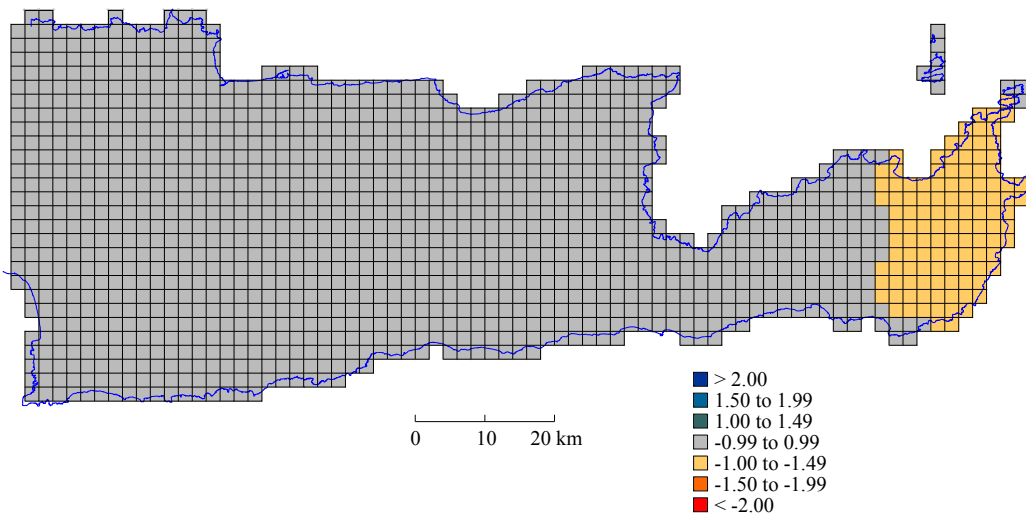


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

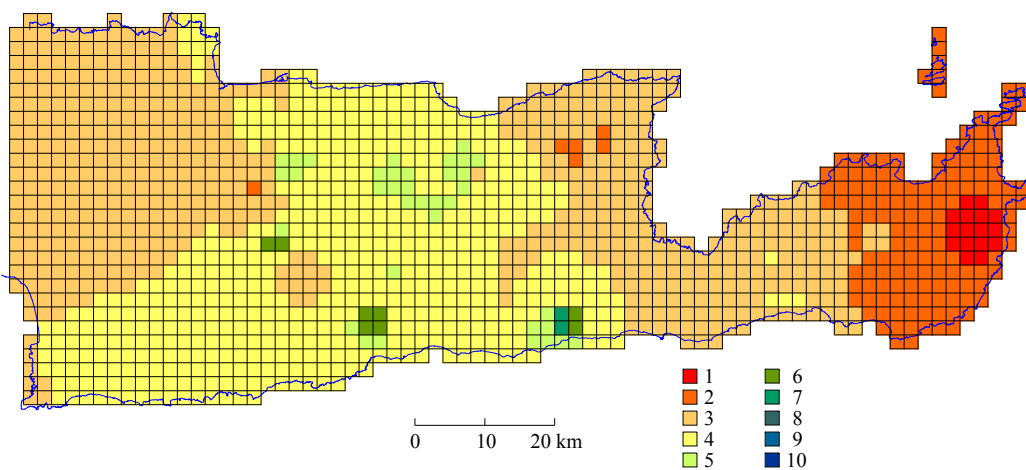
1974-1975



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

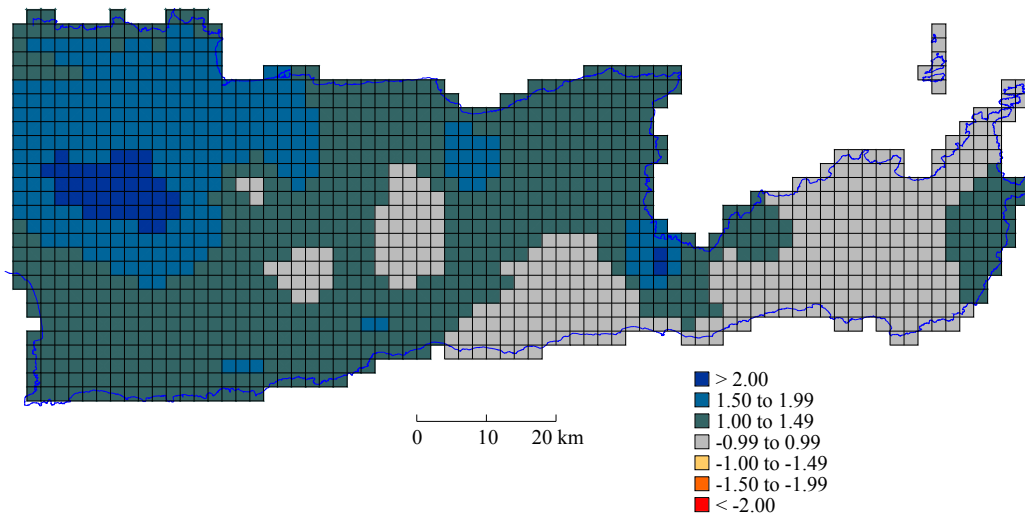


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

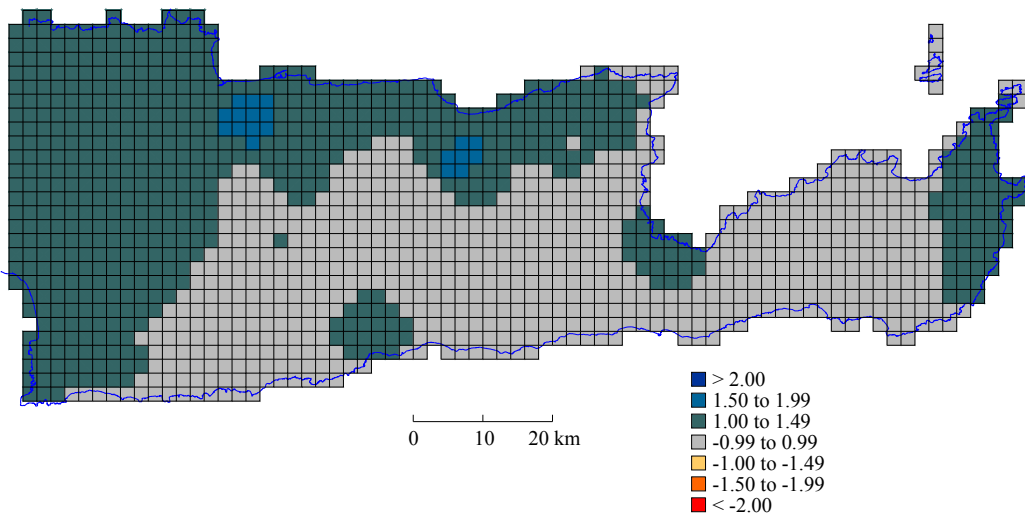


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

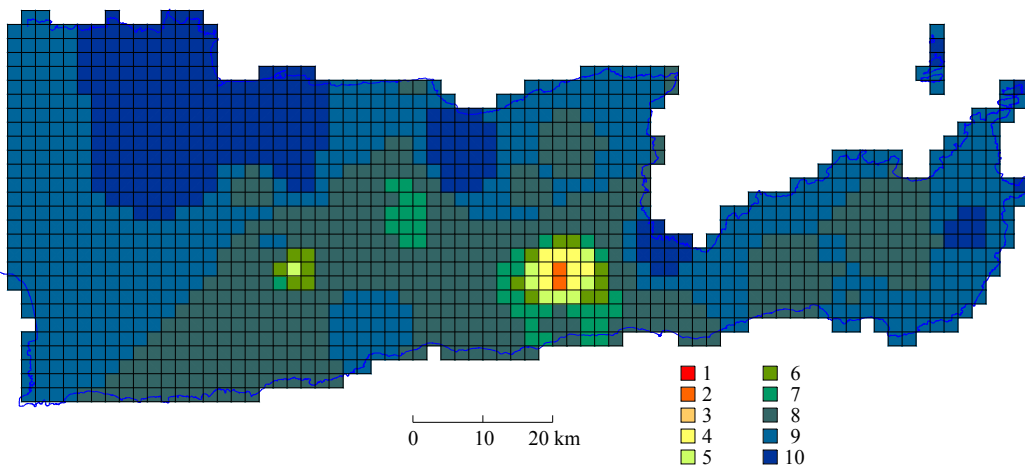
1975-1976



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

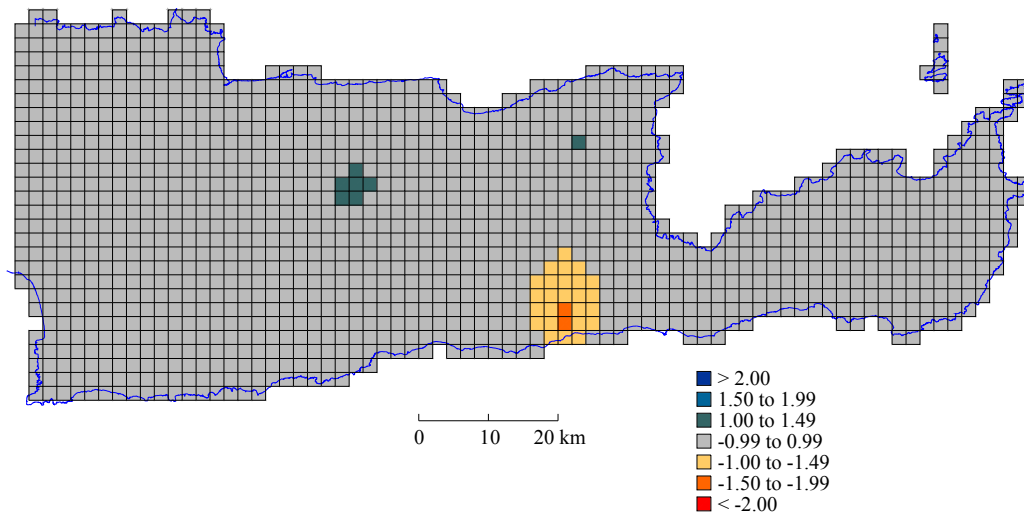


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

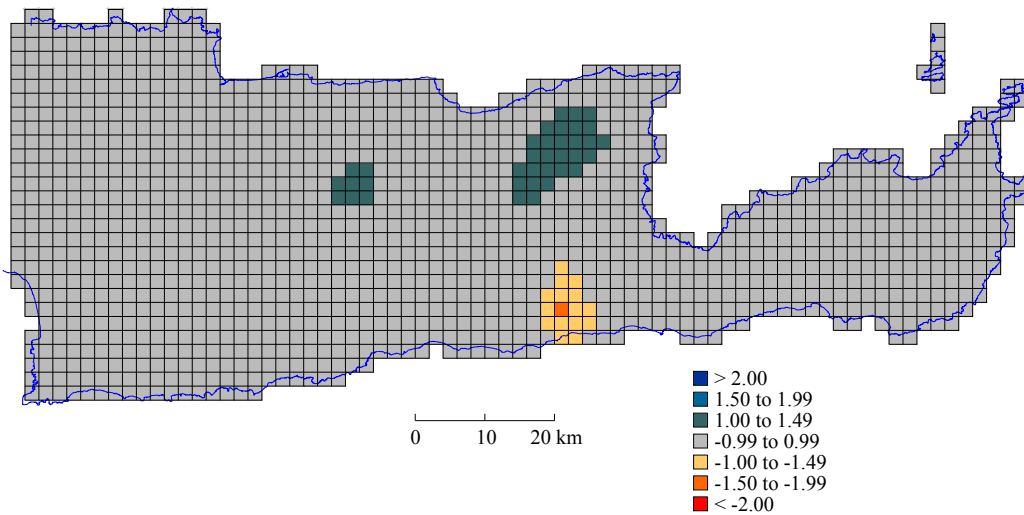


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

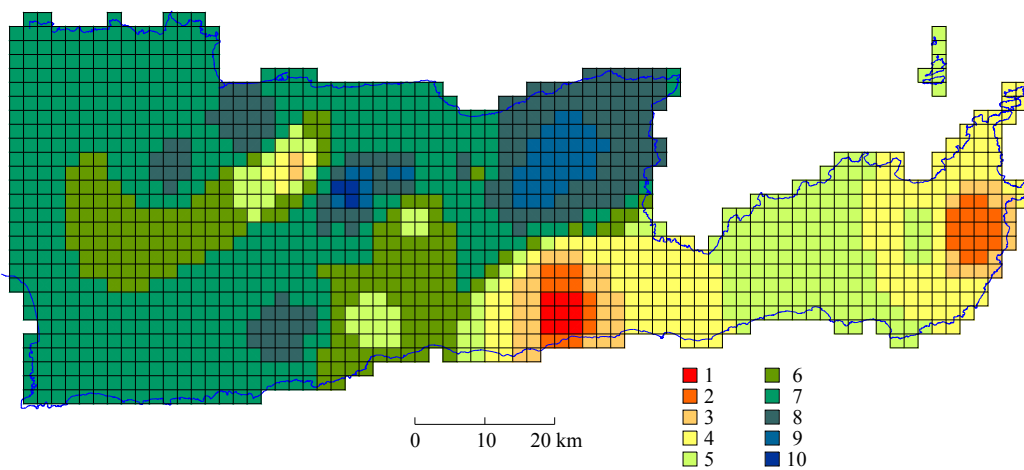
1976-1977



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

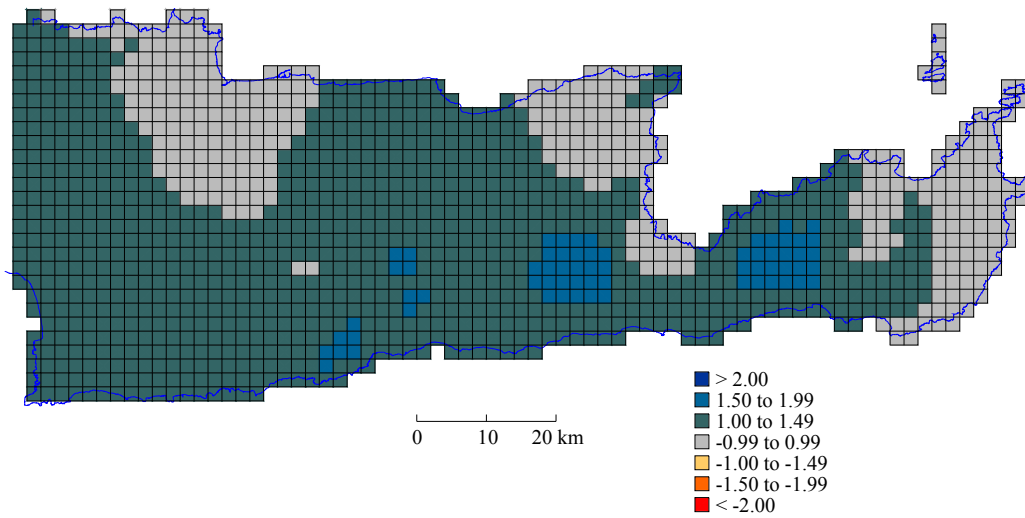


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

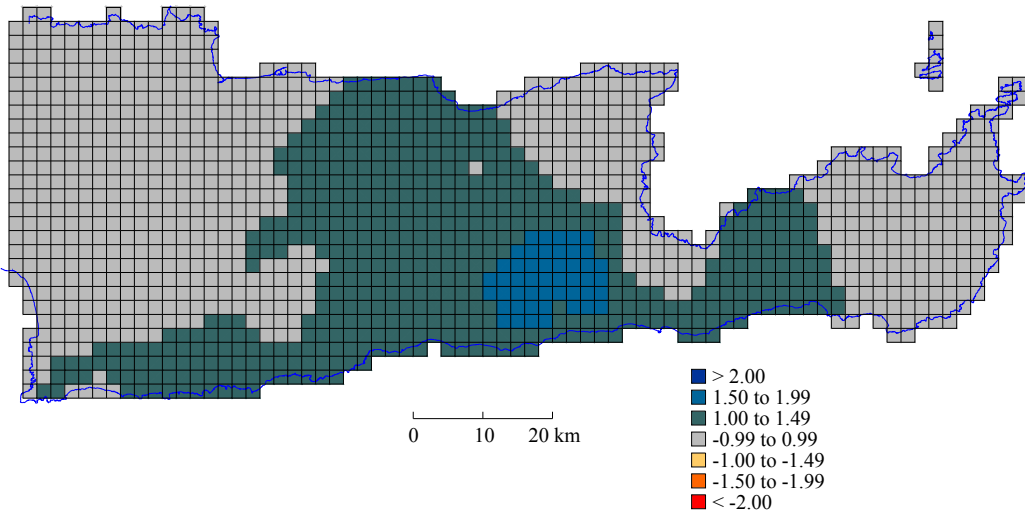


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

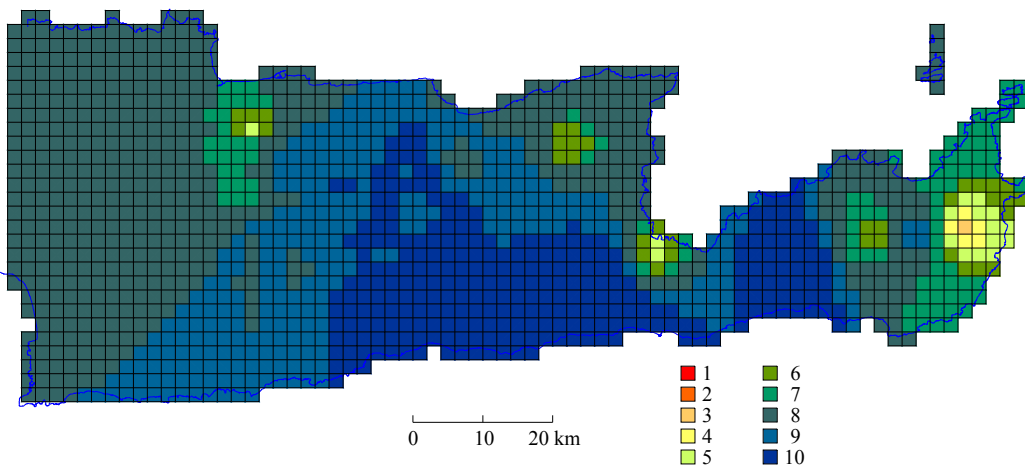
1977-1978



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

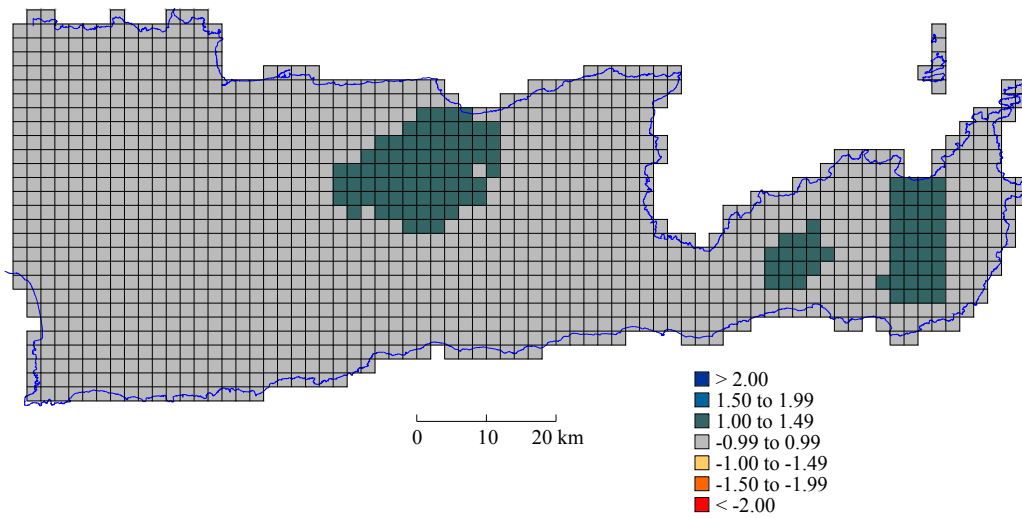


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

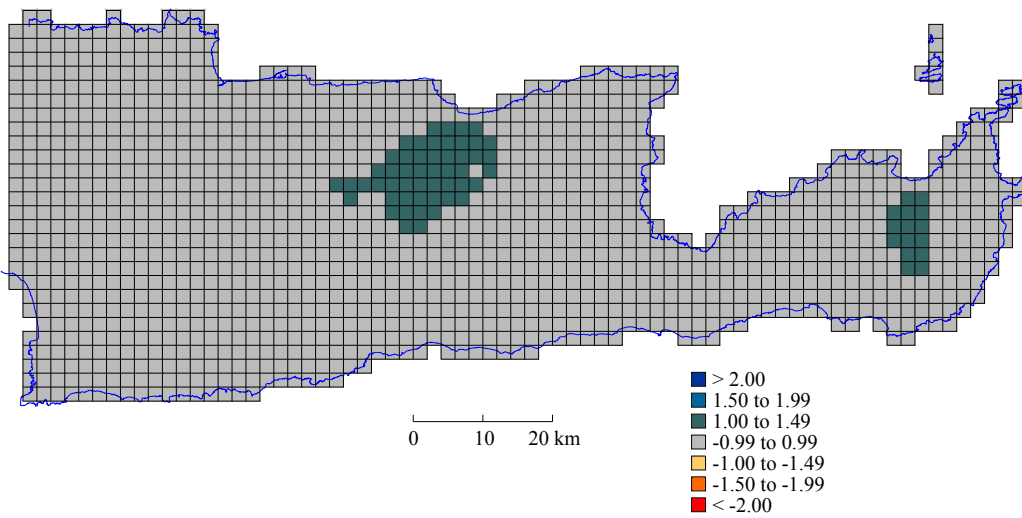


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

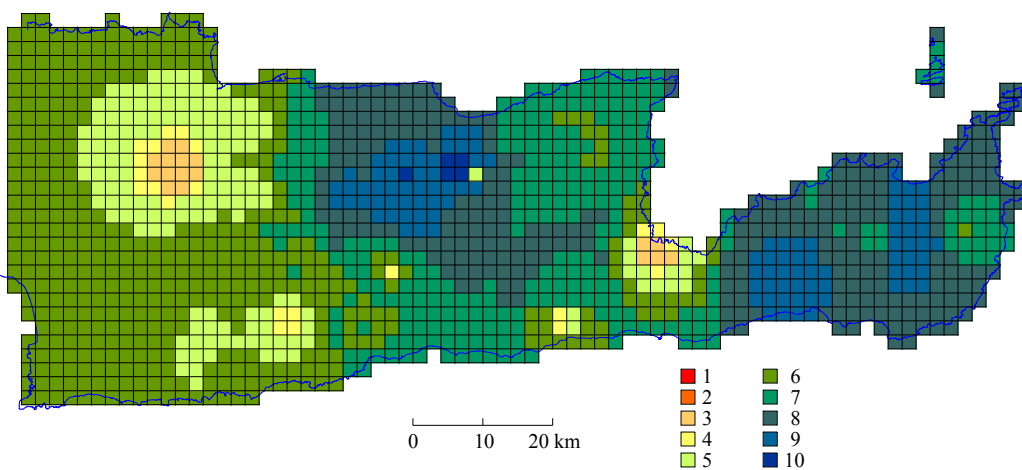
1978-1979



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

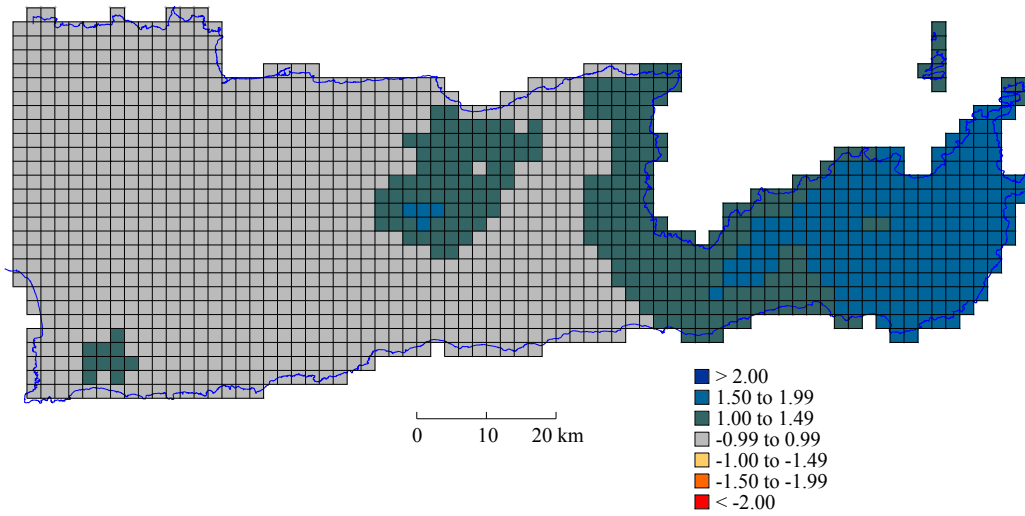


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

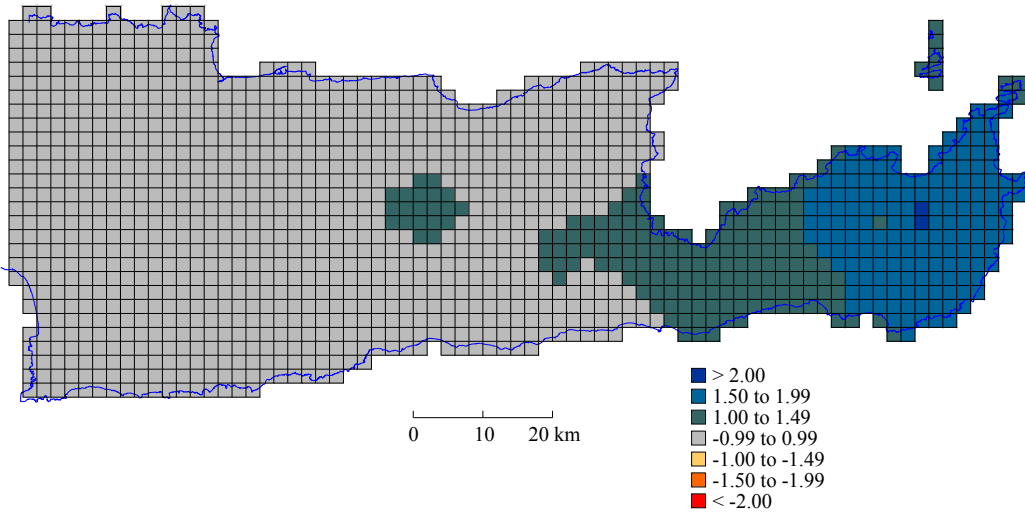


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

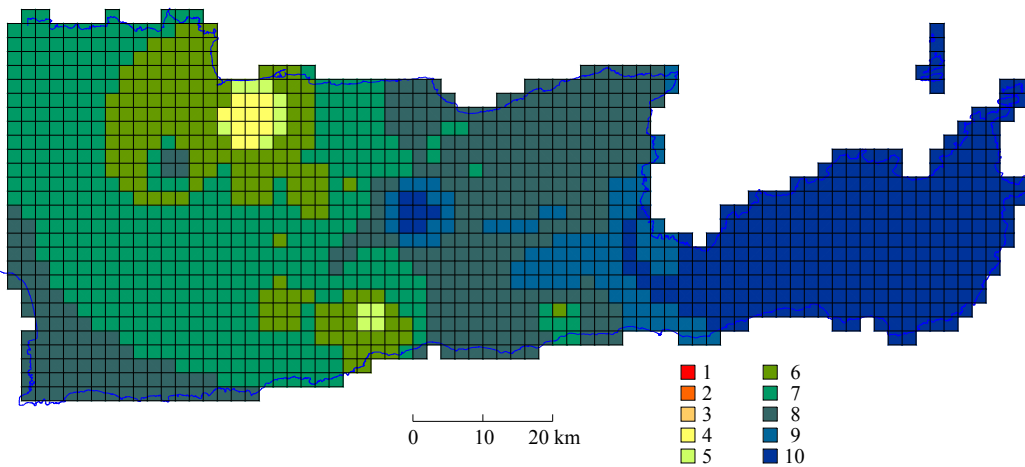
1979-1980



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI



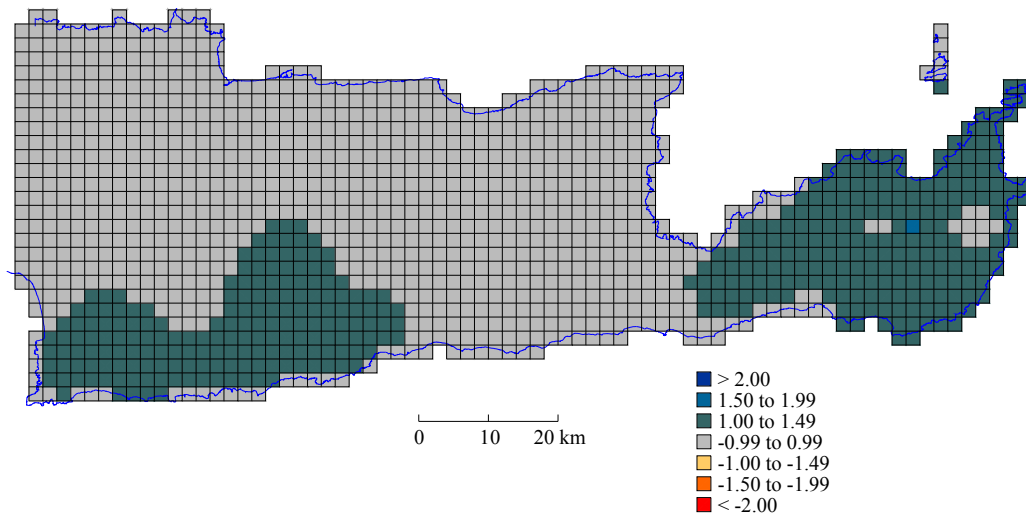
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI



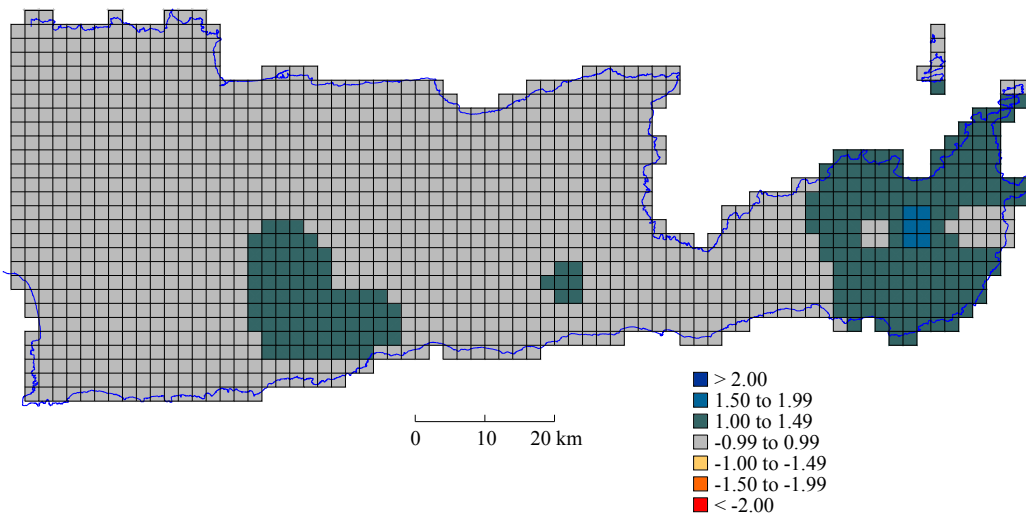
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles



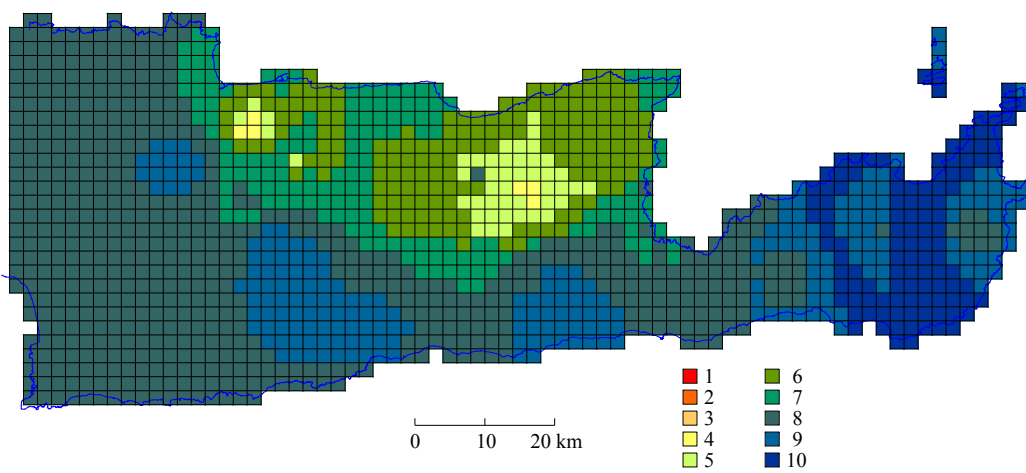
1980-1981



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

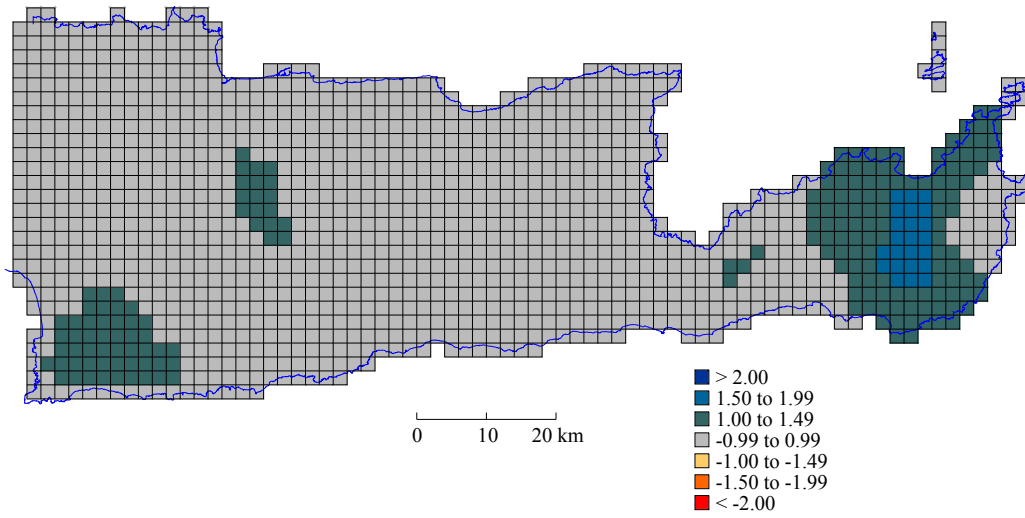


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

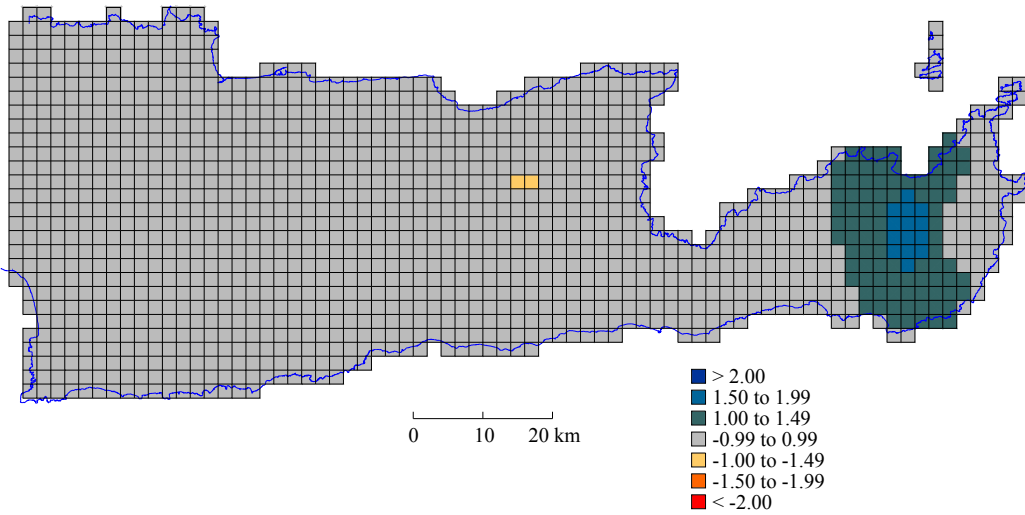


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

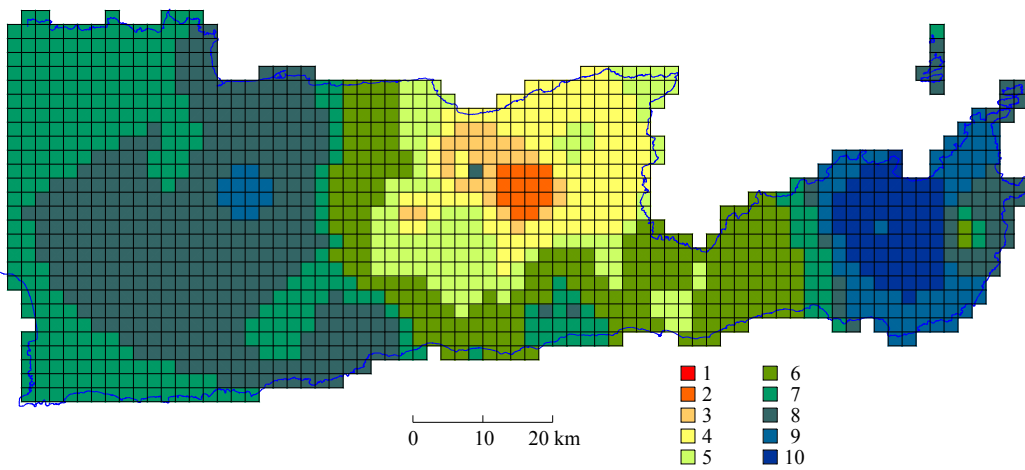
1981-1982



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

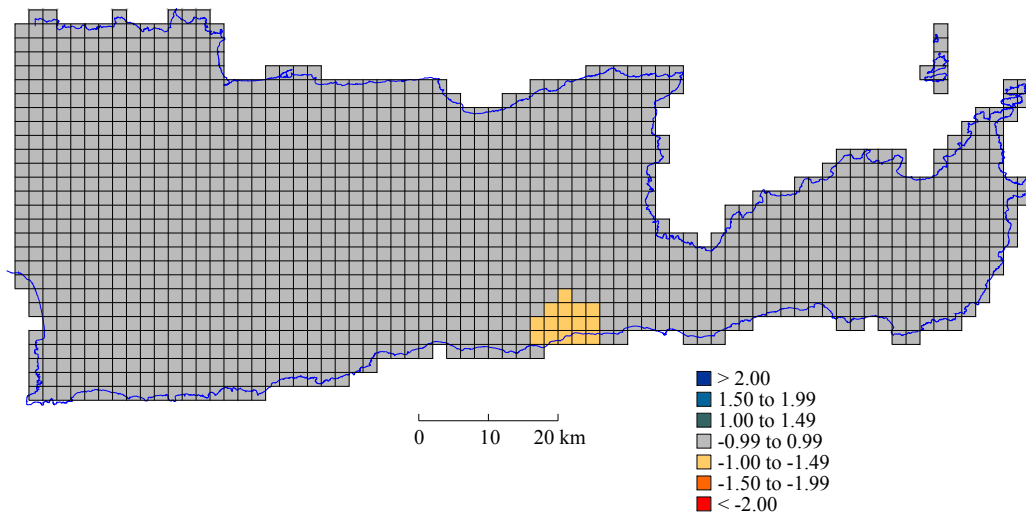


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

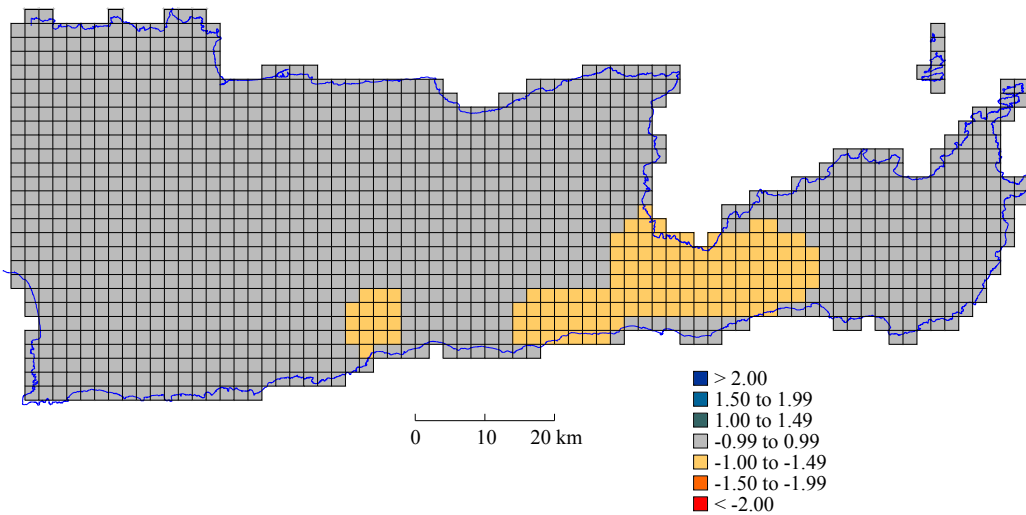


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

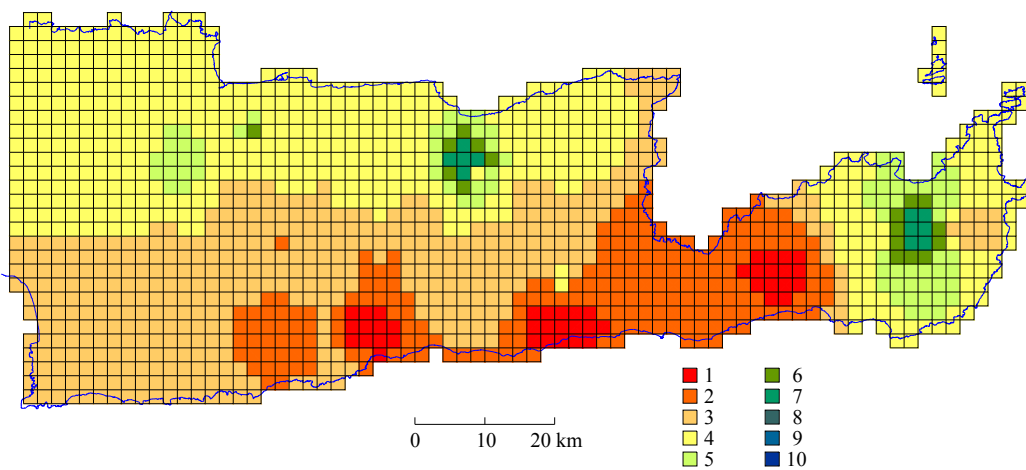
1982-1983



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

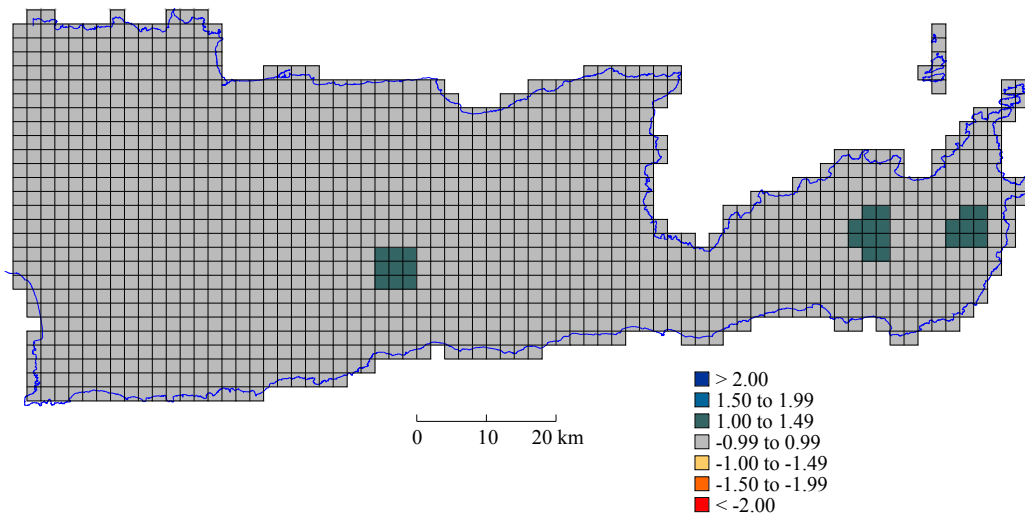


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

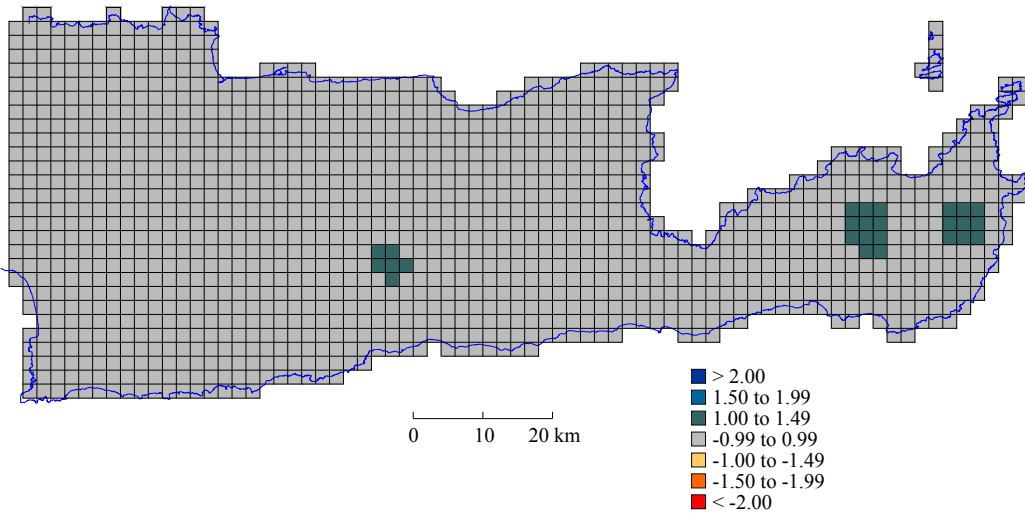


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

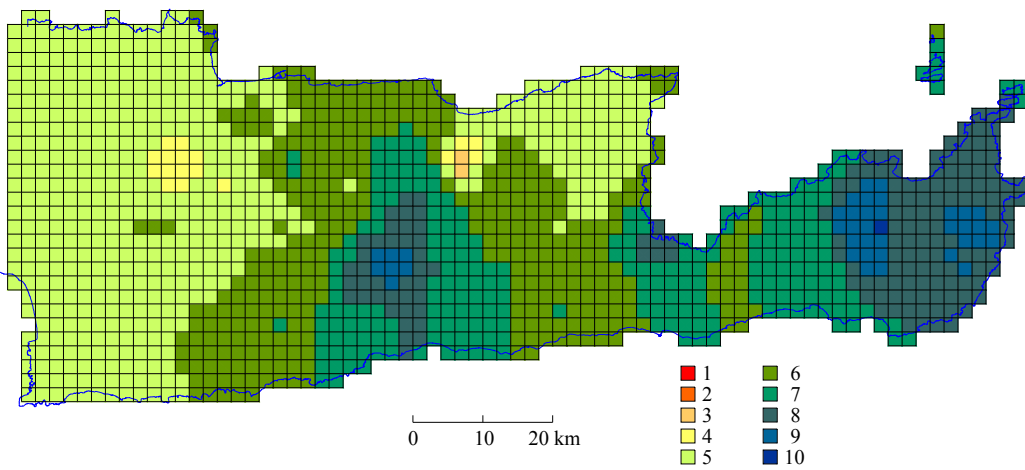
1983-1984



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

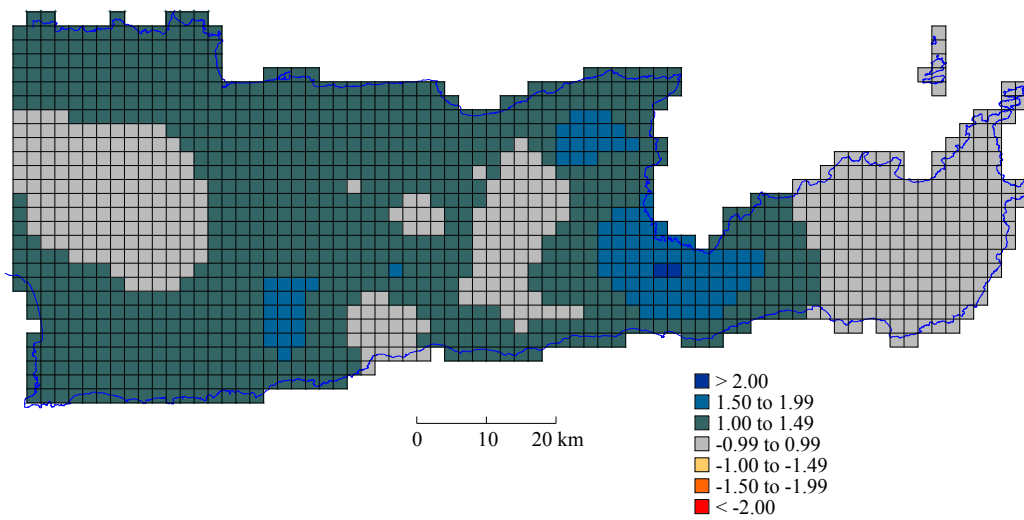


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

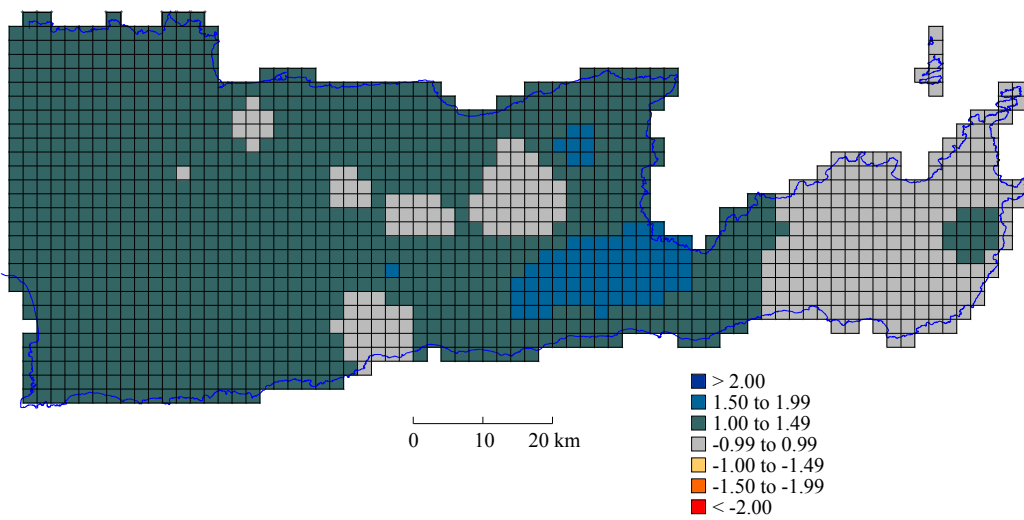


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

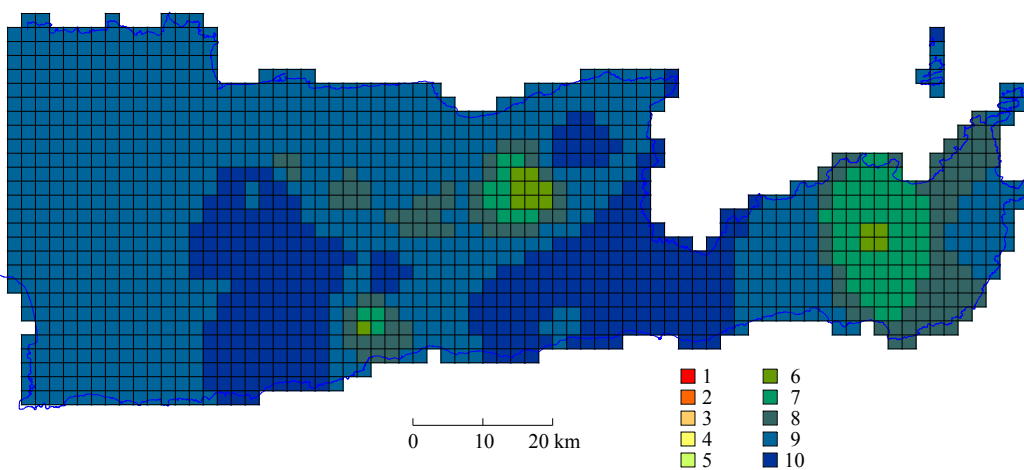
1984-1985



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

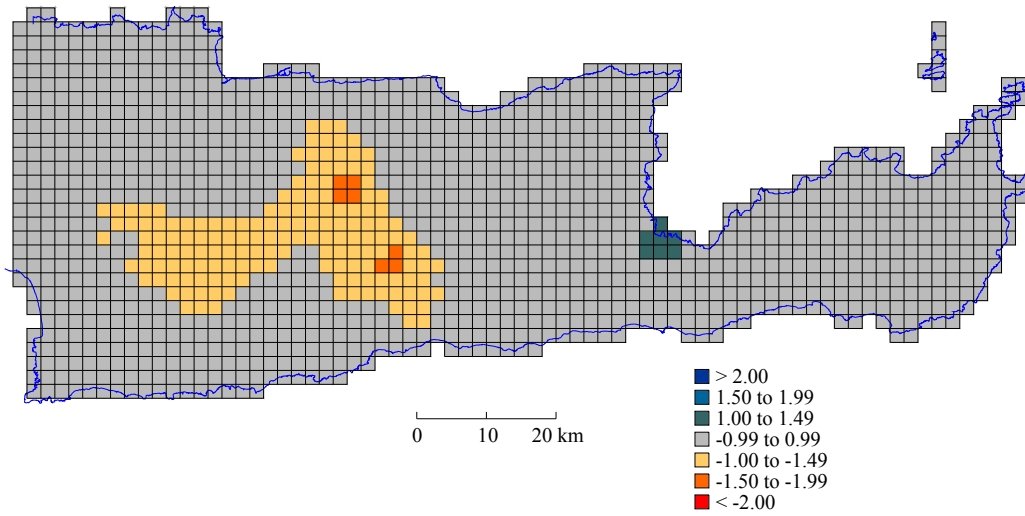


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

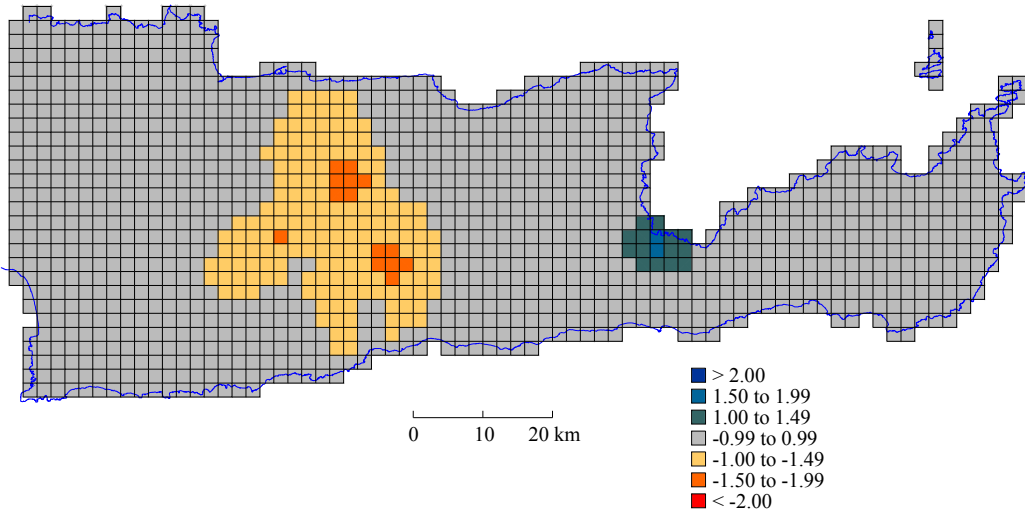


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

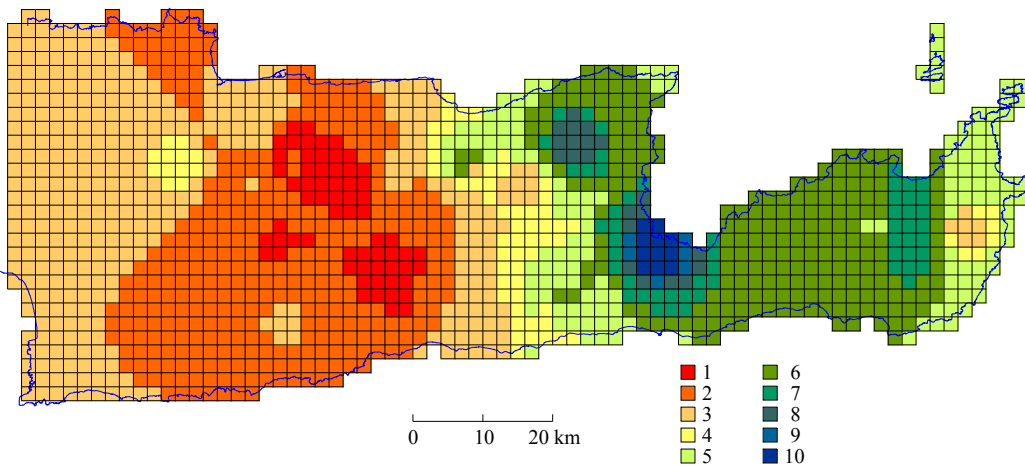
1985-1986



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

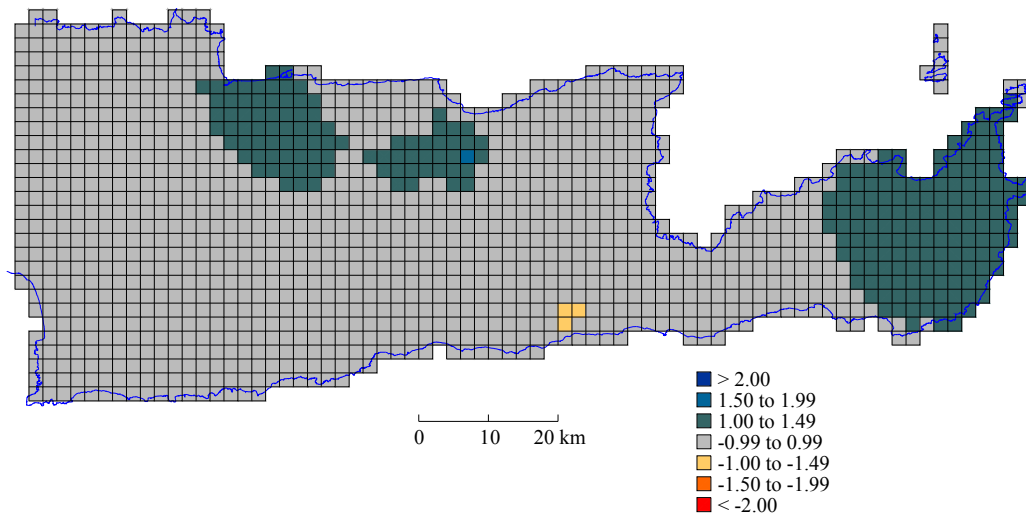


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

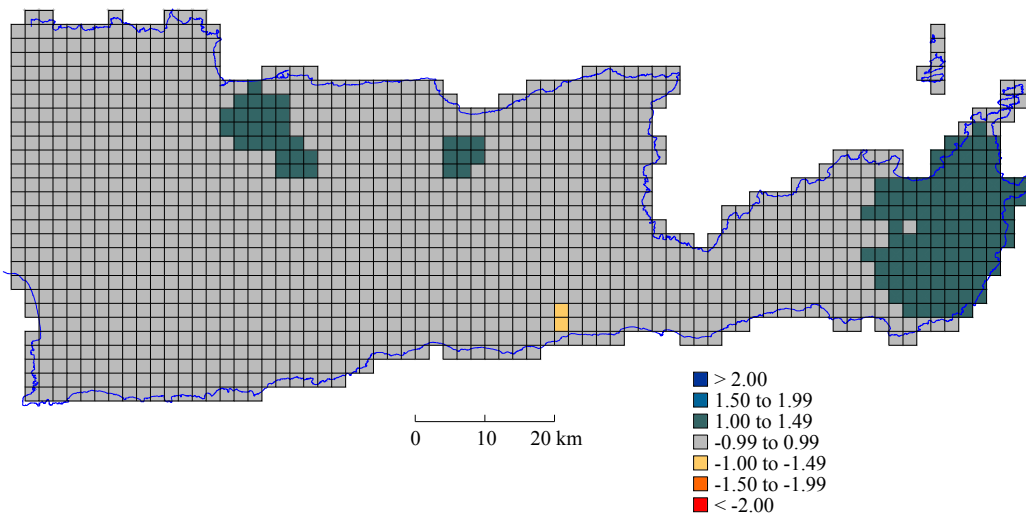


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

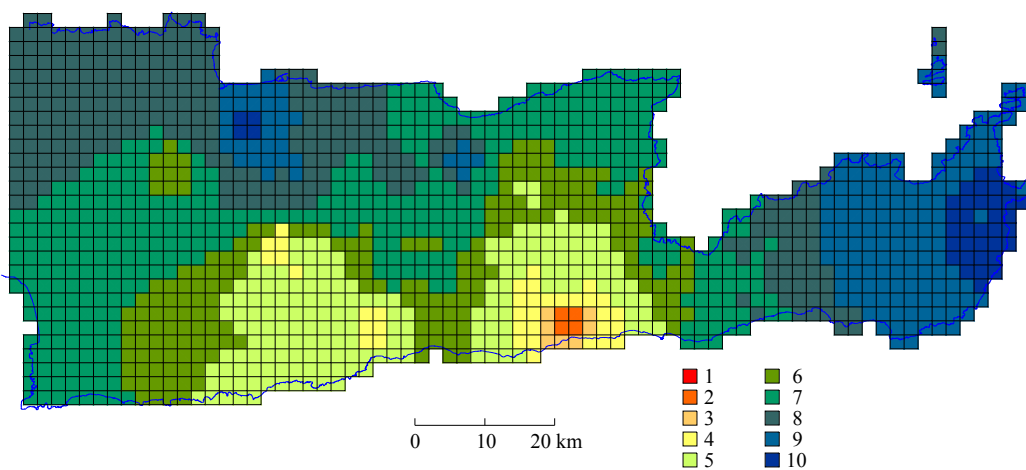
1986-1987



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

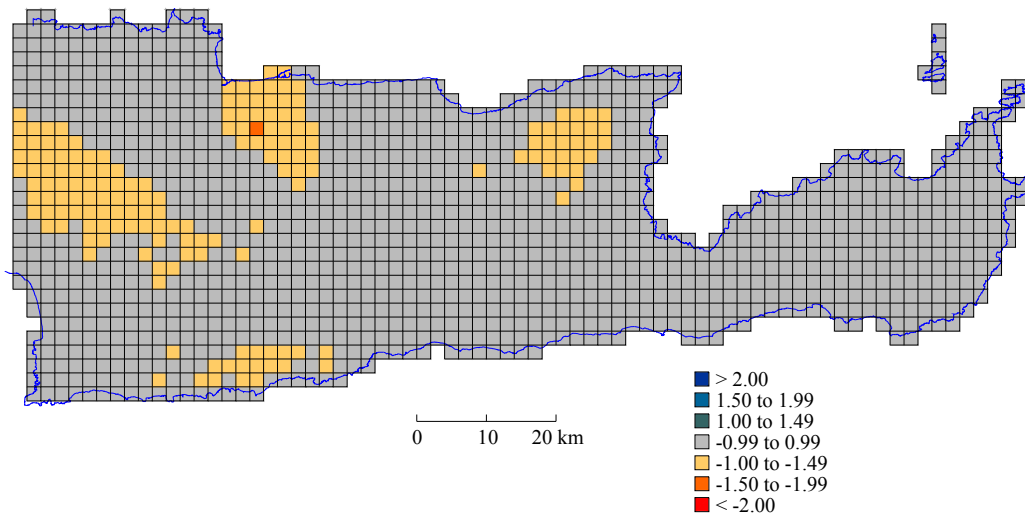


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

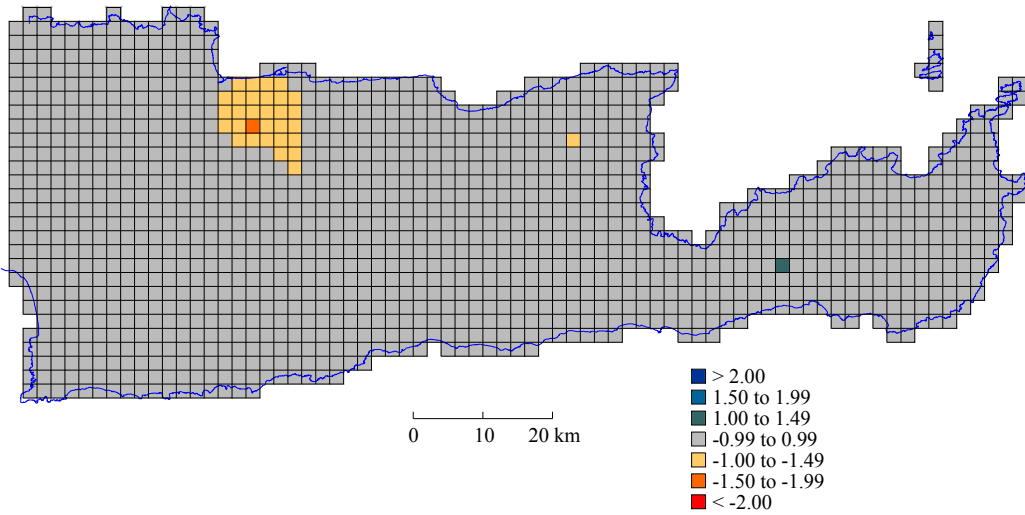


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

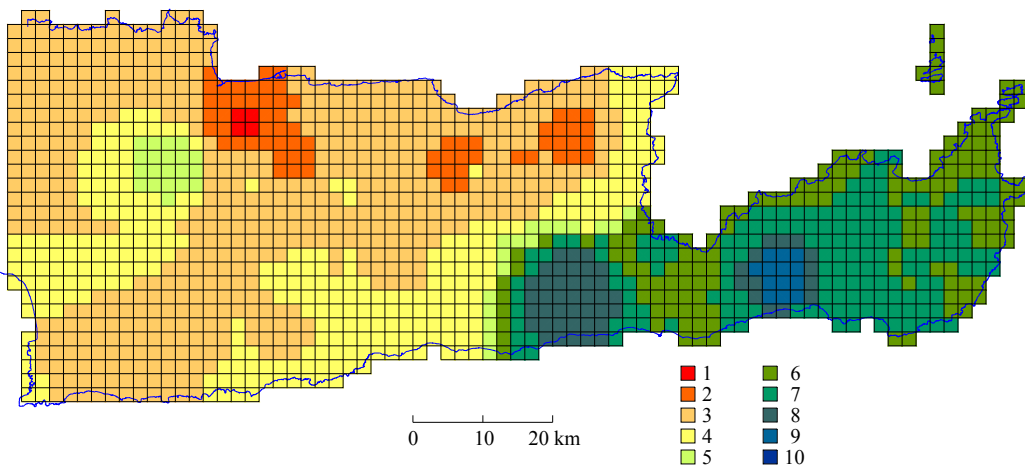
1987-1988



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI



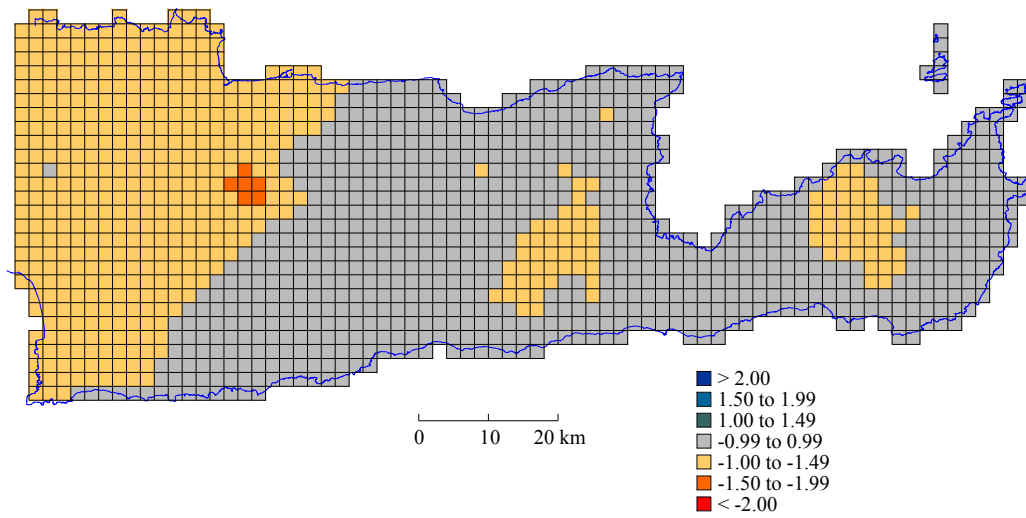
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI



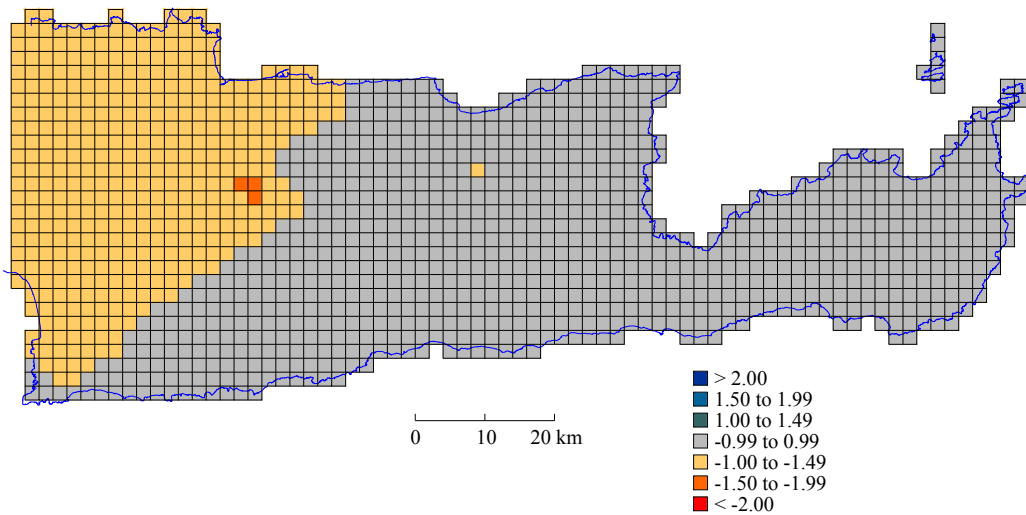
Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles



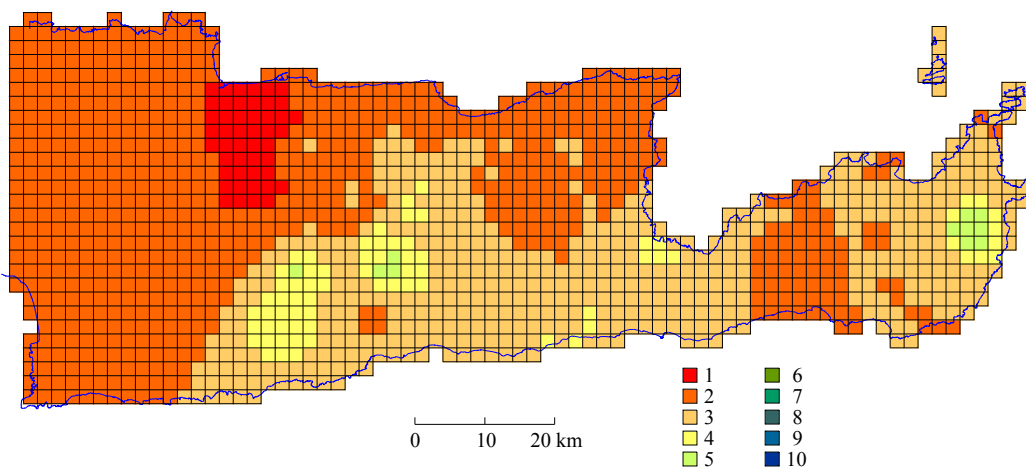
1988-1989



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

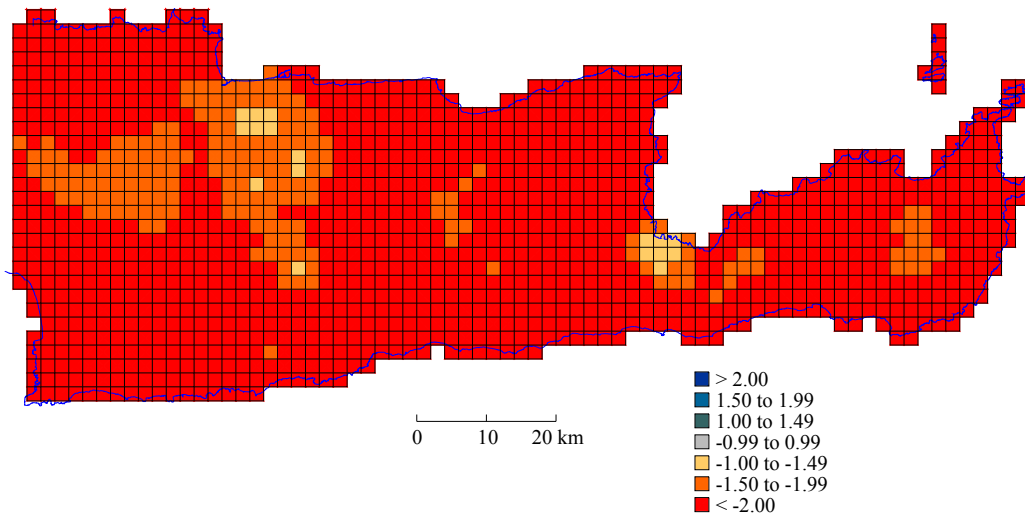


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

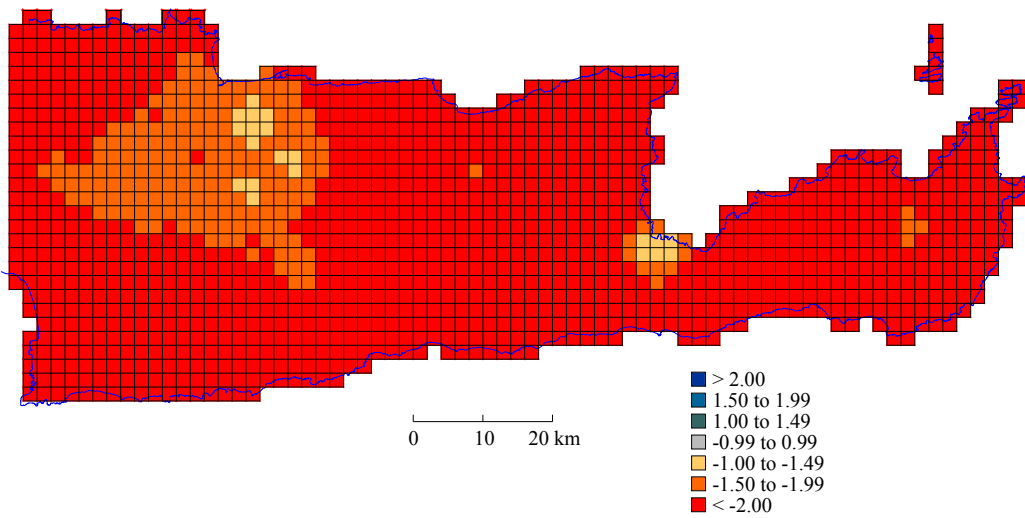


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

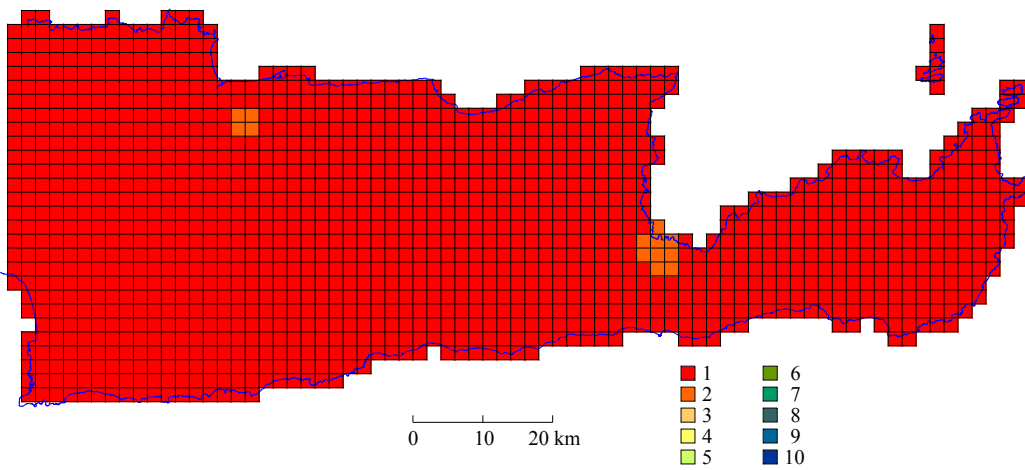
1989-1990



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

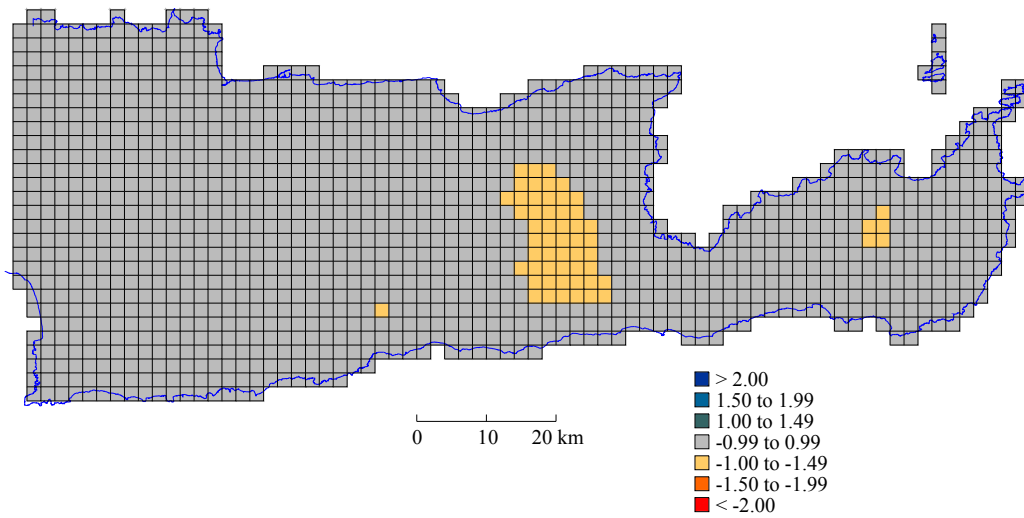


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

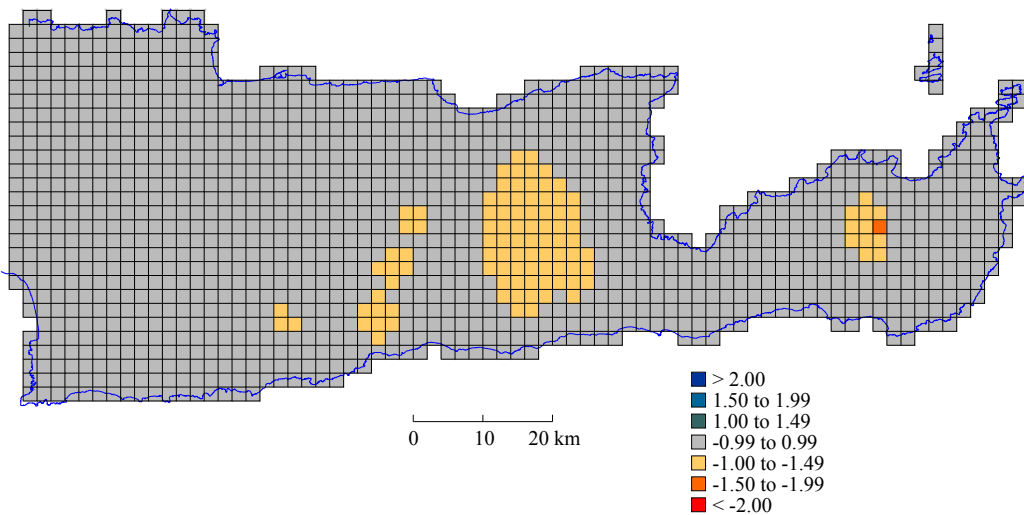


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

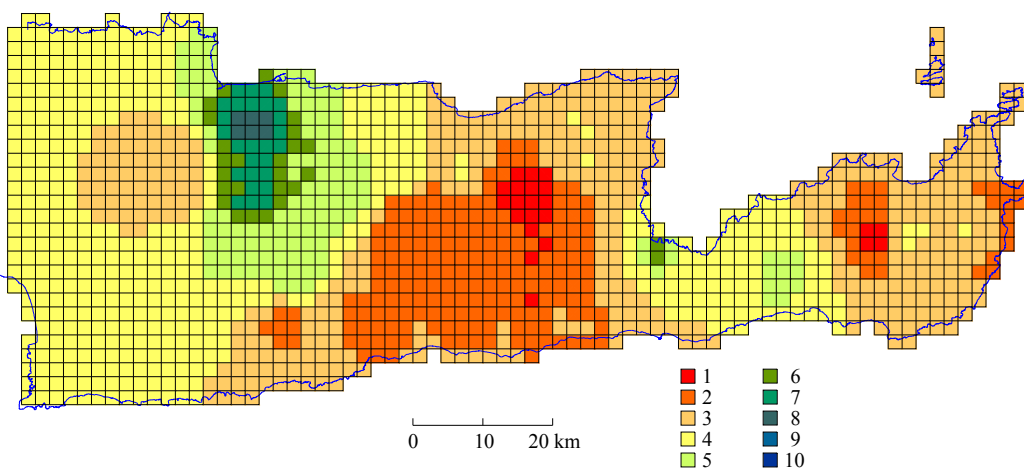
1990-1991



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI

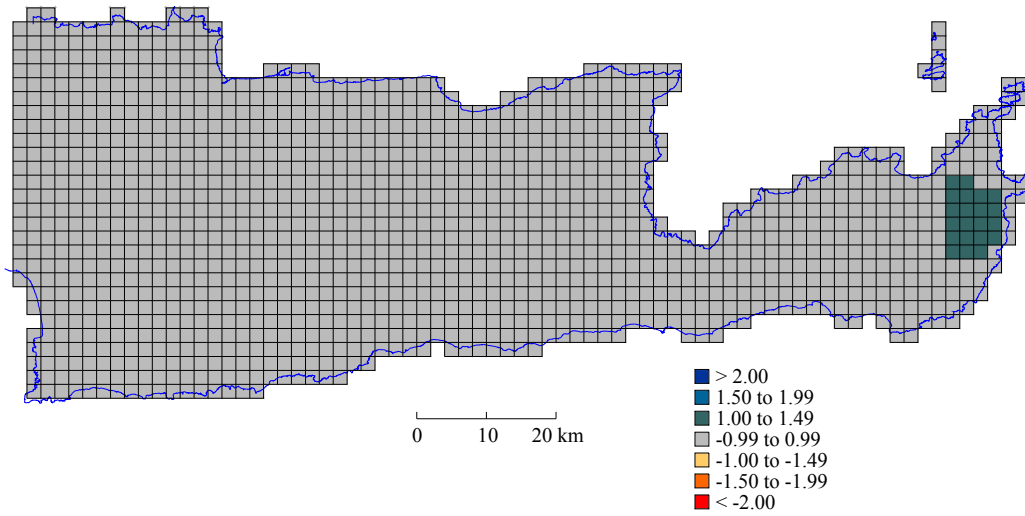


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI

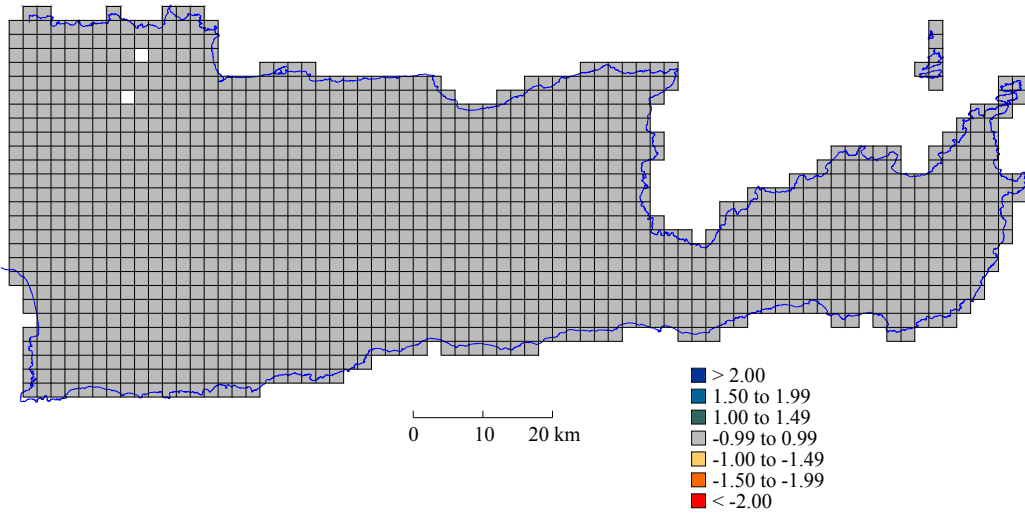


Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

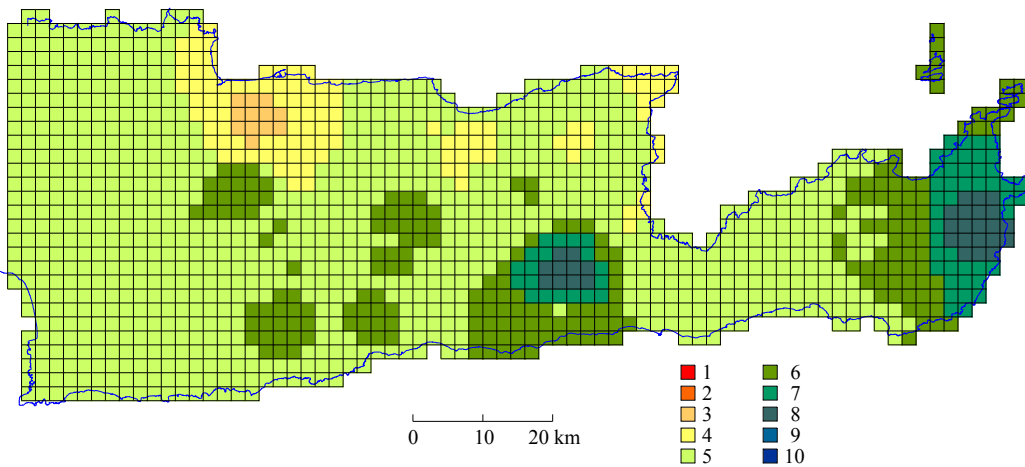
1991-1992



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη RDI



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη SPI



Χάρτης ετήσιας ξηρασίας με βάση τον δείκτη Deciles

## Συνοπτικό Βιογραφικό Σημείωμα\*

---

\* Σύμφωνα με την Απόφαση 12<sup>ης</sup>/2011 Συνεδρίασης της Συγκλήτου Ε.Σ. 15.07.2011.



---

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ

Όνομα: **Χαρίλαος**  
Επώνυμο: **Βαγγέλης**  
Ημερομηνία Γεννήσεως: 13 Φεβρουαρίου 1974  
Διεύθυνση Κατοικίας: Δάφνης 34, 157 72, Ζωγράφος  
Τηλέφωνα: 210 7722698 / 6944 772396  
e-mail: harrivag@central.ntua.gr

### Σπουδές

- Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Επιστημονική Περιοχή: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» (Δεκέμβριος 2001).  
Μεταπτυχιακή Εργασία με θέμα «Σύστημα Παρακολούθησης της Ξηρασίας» με επιβλέποντα τον καθηγητή κ. Γ. Τσακίρη.
- Δίπλωμα Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Οκτώβριος 1998).  
Διπλωματική Εργασία με θέμα «Εκτίμηση του Επιφανειακού Υδατικού Δυναμικού της Νήσου Σύμης» με επιβλέποντα τον καθηγητή κ. Γ. Τσακίρη.
- Απόφοιτος 1<sup>ου</sup> Λυκείου Ιωαννίνων με βαθμό απολυτηρίου 18 και 5/10.
- Αγγλική Γλώσσα (Cambridge F.C.E.)
- Γνώσεις Ηλεκτρονικών Υπολογιστών: Λειτουργία και χρήση επεξεργαστών κειμένου και λογιστικών φύλλων, κατασκευή ιστοσελίδων (Web design), ηλεκτρονική σχεδίαση (CAD), στατιστική επεξεργασία (Statgraphics).

### Διακρίσεις / Υποτροφίες

- Βράβευση από τα «Θωμαΐδεια Βραβεία» για τη δημοσίευση της εργασίας «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών», 2009.
- Υποτροφία της Επιτροπής Διαχείρισης του Ειδικού Λογαριασμού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής κατά την περίοδο 20/12/2004 έως 10/9/2007.
- Βράβευση από τα «Θωμαΐδεια Βραβεία» για τη δημοσίευση της εργασίας “Assessing the Areal Extent of Drought”, 2007.
- Βράβευση από τα «Θωμαΐδεια Βραβεία» για τη δημοσίευση της εργασίας «Προσδιορισμός σεναρίων ξηρασίας στη λεκάνη του Νέστου με εφαρμογή του νέου δείκτη ξηρασίας RDI», 2005.
- Βράβευση από τα «Θωμαΐδεια Βραβεία» για τη δημοσίευση της εργασίας «Εκτίμηση του Διαθέσιμου Υδατικού Δυναμικού σε Έργα Επιφανειακής Ταμίευσης στα Άνυδρα Νησιά του Αιγαίου», 2000.
- Βράβευση από την Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία, μετά τις ετήσιες εξετάσεις που διοργανώνει και την κατάληψη της δεύτερης θέσης στην περιφέρεια της Ηπείρου, 1991.

### **Ερευνητική εμπειρία / Προγράμματα**

Ερευνητής Α' Βαθμίδας (σύμφωνα με την κατάταξη ΕΔΕΙΛ-ΕΜΠ)

Συμμετοχή στα Ερευνητικά Προγράμματα:

- ο Τίτλος: Σύνταξη Προδιαγραφών για Μελέτες και Έργα Προστασίας, Οριοθέτησης, Διευθέτησης και Συντήρησης Υδατορευμάτων  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/01/1998 – 15/10/2001  
Χρηματοδότης: Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε
- ο Τίτλος: Βιώσιμη ανάπτυξη, ανάδειξη και προστασία μικρών νησιών του Αιγαίου (ΑΚΡΙΤΑΣ)  
Διάρκεια συμμετοχής: 27/08/1998 – 31/10/1998  
Χρηματοδότης: Υπουργείο Αιγαίου
- ο Τίτλος: Άνυδρα Νησιά του Αιγαίου  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/01/2000 – 31/03/2000  
Χρηματοδότης: Υπουργείο Αιγαίου
- ο Τίτλος: Χωροταξικό Πρόγραμμα Ρυθμίσεων, Έργων και Δράσεων για την Αειφόρο Διαχείριση Υδατικών Πόρων στα Βόρεια Δωδεκάνησα  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/04/2000 – 31/08/2002  
Χρηματοδότης: ΥΠ.ΕΘ.Ο.
- ο Τίτλος: Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (Υδροσκόπιο 2000)  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/06/2001 – 31/07/2001  
Χρηματοδότης: Ε.Ε. / Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- ο Τίτλος: Διαχείριση Υδατικών Πόρων Δωδεκανήσων – Α' Φάση  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/12/2001 – 31/12/2001  
Χρηματοδότης: ΑΔΕΥΠ ΑΤΕ
- ο Τίτλος: Διαχείριση Υδατικών Πόρων Νήσου Πάρου  
Διάρκεια συμμετοχής: 15/01/2001 – 31/07/2002  
Χρηματοδότης: Δήμος Πάρου / ΔΕΥΑΠ
- ο Τίτλος: Συνολική Αξιολόγηση σεναρίων ανάπτυξης Υδατικών Πόρων λεκάνης Αποσελέμη Κρήτης  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/01/2002 – 31/07/2004  
Χρηματοδότης: Δήμοι Χερσονήσου, Μαλίων και Γουβών Κρήτης
- ο Τίτλος: Seminars «Water Resources Management in the Era of Transition»  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/02/2002 – 15/07/2003  
Χρηματοδότης: Διάφοροι (Several Individuals)
- ο Τίτλος: Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning (MEDROPLAN)  
Διάρκεια συμμετοχής: 16/07/2003 – 30/04/2007  
Χρηματοδότης: ERDF (EC)
- ο Τίτλος: Πολιτική Περιβάλλοντος μέσω δεικτών Αειφορίας σε Πανευρωπαϊκό επίπεδο Νομαρχίας NUTS III  
Διάρκεια συμμετοχής: 02/01/2004 – 29/02/2004  
Χρηματοδότης: EC
- ο Τίτλος: CADSEALAND: Land and Sea Interaction  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/01/2004 – 31/12/2005  
Χρηματοδότης: ERDF (EC)



- Τίτλος: Drought and desertification in Mediterranean basins (SEDEMED II)  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/09/2004 – 31/08/2005  
Χρηματοδότης: ERDF (EC)
- Τίτλος: Διαχείριση φυσικών κινδύνων για την προστασία θέσεων πολιτιστικού ενδιαφέροντος σε περιβάλλον ΓΣΠ (DISMA)  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/01/2007 – 31/07/2007  
Χρηματοδότης: EC (NOE)
- Τίτλος: Proactive management of water systems to face drought and water scarcity in islands and coastal areas of the Mediterranean (PRODIM)  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/09/2006 – 31/10/2008  
Χρηματοδότης: ERDF (EC)
- Τίτλος: Καταγραφή ανθρωπογενών και κλιματικών αλλαγών και της επίδρασής τους στο Εθνικό Πάρκο Λιμνοθάλασσας Μεσολογίου  
Διάρκεια συμμετοχής: 03/07/2009 – 02/01/2010  
Χρηματοδότης: Φορέας διαχείρισης "Λιμνοθάλασσα Μεσολογίου"
- Τίτλος: Preventive Maintenance for Water Utility Networks (PM4WAT)  
Διάρκεια συμμετοχής: 01/10/2009 – 30/11/2011  
Χρηματοδότης: EC

### **Διδακτική εμπειρία**

- Διδασκαλία των Ασκήσεων του μαθήματος «Τεχνική Υδρολογία», που διδάχθηκε στο 7ο εξάμηνο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2001-2002, 2002-2003 και 2004-2005.
- Διδασκαλία των Ασκήσεων του μαθήματος «Υδραυλικά Έργα», που διδάχθηκε στο 8ο εξάμηνο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2001-2002.
- Εισηγήσεις σε «Σεμιναριακά Μαθήματα» στα πλαίσια του 5ου Διεθνούς Συνεδρίου της EWRA “Water Resources Management in the Era of Transition”, Φεβρουάριος 2002 έως Ιούλιος 2003.
- Διδασκαλία των Ασκήσεων του μαθήματος «Τεχνική Υδρολογία», που διδάσκεται στο 6ο εξάμηνο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 και 2009-2010.
- Επικουρική διδασκαλία στο μάθημα «Μάθημα-Θέμα: Διαχείριση Υδατικών Πόρων», που διδάσκεται στο 9ο εξάμηνο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2007-2008.
- Επικουρική διδασκαλία στο μάθημα «Πρόληψη και αντιμετώπιση φυσικών κινδύνων», που διδάσκεται στη 2η κατεύθυνση του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβάλλον και Ανάπτυξη» με τίτλο «Περιβάλλον και Ανάπτυξη Ορεινών Περιοχών» στις εγκαταστάσεις του

Μετσόβιου Κέντρου Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕΚΔΕ) στο Μέτσοβο, κατά το πρώτο εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2008 – 2009.

**Συγγραφικό έργο (Βιβλία, Δημοσιεύσεις, Ανακοινώσεις σε συνέδρια)**

*Βιβλία*

- Γ. Τσακίρης και Χ. Βαγγέλης. ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ: ΙΙ. Εφαρμογές Τεχνικής Υδρολογίας. Εκδόσεις Συμμετρία, ISBN: 978-960-266-266-3, Αθήνα 2009 (σελίδες 268).

*Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά*

- H. Vangelis, M. Spiliotis and G. Tsakiris, 2011. Drought Severity Assessment Based on Bivariate Probability Analysis. *Water Resources Management* 25(1): 357–371.
- G. Tsakiris, H. Vangelis and D. Tigkas, 2010. Assessing Water Systems Vulnerability to Multi-year Droughts. *European Water*, 29: 21-29.
- G. Tsakiris, D. Pangalou and H. Vangelis, 2007. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management* 21(5): 821-833.
- G. Tsakiris and H. Vangelis, 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10: 3-11.
- G. Tsakiris and H. Vangelis, 2004. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. *Water Resources Management* 18(1): 1-12.

*Κεφάλαια σε Βιβλία*

- D. Pangalou, D. Tigkas, H. Vangelis, G. Tsakiris and A. Nanou-Giannarou. Chapter 16 (Part III): Drought Severity Thresholds and Drought Management in Greece. In: A. Iglesias, L. Garrote, A. Cancelliere, F. Cubillo and D. Wilhite (Eds.), *Coping with drought risk in Agriculture and Water Supply Systems, Drought Management and Policy Development in the Mediterranean*, Springer (Advances in Natural and Technological Hazards Research, Volume 26), Springer Science+Business Media B.V. 2009, ISBN: 978-1-4020-9044-8, pp.243-256.
- D. Tigkas, H. Vangelis, D. Pangalou and G. Tsakiris. Drought Identification & Characterisation. Case study in Greek Regions. In: G. Tsakiris (Ed.), *Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM) – Final Report*. CANaH Publication 6/08, Athens 2008, pp. 59-76.
- H. Vangelis. Measures to combat Drought and Water Shortage: Public Participation through Questionnaires. In: G. Tsakiris (Ed.), *Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM) – Final Report*. CANaH Publication 6/08, Athens 2008, pp. 407-414.
- G. Tsakiris, D. Tigkas, H. Vangelis and D. Pangalou. Chapter 9 (Part II): Regional drought identification and assessment. Case Study in Crete. In: G. Rossi, T. Vega and B. Bonaccorso (Eds.), *Methods and tools for drought*

- analysis and management, Springer (Water Science and Technology Library, Volume 62), Dordrecht 2007, ISBN: 978-1-4020-5923-0, pp. 169-191.
- G. Tsakiris, A. Loukas, D. Pangalou, H. Vangelis, D. Tigkas, G. Rossi and A. Cancelliere. Chapter 7 (Part I): Drought Characterization. In: A. Iglesias, M. Moneo, A. Lopez-Francos (Eds.), Drought Management Guidelines Technical Annex, CIHEAM/EC MEDAWater (Series B: Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes), Zaragoza 2007, ISBN: 2-85352-359-4, pp. 85-102.
  - G. Tsakiris, A. Cancelliere, D. Tigkas, H. Vangelis, D. Pangalou, B. Bonaccorso, M. Moneo and V. Nicolosi. Chapter 11 (Part I): Tools and Models. In: A. Iglesias, M. Moneo, A. Lopez-Francos (Eds.), Drought Management Guidelines Technical Annex, CIHEAM/EC MEDAWater (Series B: Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes), Zaragoza 2007, ISBN: 2-85352-359-4, pp. 135-164.
  - G. Tsakiris, D. Tigkas, H. Vangelis and D. Pangalou. Chapter 16 (Part II): Application of the drought management guidelines in Greece. In: A. Iglesias, M. Moneo, A. Lopez-Francos (Eds.), Drought Management Guidelines Technical Annex, CIHEAM/EC MEDAWater (Series B: Etudes et Recherches, No. 58, Options Méditerranéennes), Zaragoza 2007, ISBN: 2-85352-359-4, pp. 245-295.
  - G. Tsakiris, D. Tigkas, H. Vangelis and D. Pangalou. Regional drought identification and assessment – Case Study in Crete. In: G. Rossi, B. Bonaccorso and T. Vega (Eds.), Acquisition and Processing of hydrometeorological data for drought monitoring and management, Volume II: Drought analysis methodologies, Part II, Palermo 2006, ISBN: 978-88-902822-0-8, pp. 215-239.
  - G. Tsakiris, D. Tigkas, H. Vangelis and P. Sioras. Surface water potential and impacts from climate instability and change. In: H. Vangelis and D. Tigkas (Eds.), Assessment of Hazards in Corinthian Gulf, CANAH Publication 2/06, Athens 2005, pp. 1-27.

#### *Διεθνή Συνέδρια*

- H. Vangelis and D. Tigkas, 2011. Evaluation of Different Methods for Calculating Potential Evapotranspiration in Drought Severity Assessment. Proceedings of the VI EWRA International Symposium “Water Engineering and Management in a Changing Environment”, 29 June - 2 July, 2011, Catania, Sicily (Italy), (digital format publication).
- G. Tsakiris, H. Vangelis, D. Tigkas, A. Stathaki, D. Sofotasios, S. Toprak, A. Cem Koç, M. Güngör, M. Kaya, E. De Angelis, G. Iacovou and B. Charalambous, 2011. Preventive Maintenance for Water Utilities. Proceedings of the VI EWRA International Symposium “Water Engineering and Management in a Changing Environment”, 29 June - 2 July, 2011, Catania, Sicily (Italy), (digital format publication).
- G. Tsakiris, H. Vangelis and D. Tigkas, 2010. Drought impacts on rainfed agriculture under climatic instability. Proceedings of the 2nd International Conference on Drought Management “Economics of Drought and Drought

- Preparedness in a Climate Change Context”, 4-6 March 2010, Istanbul (Turkey), (digital format publication).
- G. Tsakiris, D. Tigkas, H. Vangelis, 2010. Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM). Proceedings of the 2nd International Conference on Drought Management “Economics of Drought and Drought Preparedness in a Climate Change Context”, 4-6 March 2010, Istanbul (Turkey), (digital format publication).
  - G. Tsakiris, H. Vangelis and D. Tigkas, 2009. Assessment of water systems vulnerability to drought. Proceedings of the 7th International Conference of EWRA “Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Instability”, 25-27 June 2009, Limassol (Cyprus), pp. 333-340.
  - G. Tsakiris, I. Nalbantis, D. Pangalou, D. Tigkas and H. Vangelis, 2008. Drought meteorological monitoring network design for the Reconnaissance Drought Index (RDI). Proceedings of the 1st International Conference “Drought management: Scientific and technological innovations” (Option Méditerranéennes, Series A, No. 80), 12-14 June 2008, Zaragoza (Spain), pp. 57-62.
  - H. Vangelis and D. Pangalou, 2008. Designing a Preparedness Plan: Public Participation and Institutional Capacity. Proceedings of the International Symposium “Water Shortage Management”, 20 June 2008, Athens (Greece), pp. 83-98.
  - G. Tsakiris, D. Pangalou, D. Tigkas and H. Vangelis, 2007. Assessing the Areal Extent of Drought. Proceedings of EWRA Symposium “Water Resources Management: New Approaches and Technologies”, 14-16 June 2007, Chania (Greece), pp. 59-66.
  - H. Vangelis, B. Todorovic and G. Tsakiris, 2005. NAIAS – Time integration of Water Development Projects in Strategic Management. Proceedings of the 6th International Conference of EWRA “Sharing a common vision of our water resources”, 7-10 September 2005, Menton (France), (digital format publication).
  - G. Tsakiris, B. Todorovic and H. Vangelis, 2002. NAIAS – A Practical Multi-Criteria Tool for Strategic Water System Management. Proceedings of the 5th International Conference of EWRA “Water Resources Management in the Era of Transition”, 4-8 September 2002, Athens (Greece), pp. 320-329.

#### *Εθνικά Συνέδρια*

- Γ. Τσακίρης, Χ. Βαγγέλης, Δ. Τίγκας και Δ. Παγκάλου, 2009. Μονοδιάστατη Προσομοίωση της Ξηρασίας στην Ανατολική Ελλάδα. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου EYE & ΕΕΔΥΠ «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών» (11ου Εθνικού Συνεδρίου EYE - 7ου ΕΕΔΥΠ), 27-30 Μαΐου 2009, Βόλος, σ. 187-194.
- Γ. Τσακίρης, Δ. Τίγκας και Χ. Βαγγέλης, 2007. Επιπτώσεις της Ξηρασίας και των Κλιματικών Αλλαγών στο Επιφανειακό Δυναμικό Παράκτιων Λεκανών Απορροής στη Β. Πελοπόννησο. Πρακτικά 6ου Εθνικού Συνεδρίου Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) «Ολοκληρωμένη Διαχείριση

Υδατικών Πόρων με βάση τη Λεκάνη Απορροής», 14-16 Ιουνίου 2007, Χανιά, σ. 161-169.

- Γ. Τσακίρης, Δ. Τίγκας, Χ. Βαγγέλης και Π. Σιώρας, 2005. Επιφανειακό υδατικό δυναμικό και επιπτώσεις από σενάρια διακύμανσης και αλλαγών στο κλίμα. Πρακτικά Συμποσίου CadSeaLand «Εκτίμηση Κινδύνων στον Κορινθιακό», 18 Δεκεμβρίου 2005, Δερβένι Κορινθίας, σ. 1-28.
- Δ. Τίγκας, Δ. Παγκάλου, Χ. Βαγγέλης και Γ. Τσακίρης, 2005. Προσδιορισμός σεναρίων ξηρασίας στη λεκάνη του Νέστου με εφαρμογή του νέου δείκτη ξηρασίας RDI. Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), 6-9 Απριλίου 2005, Ξάνθη, σ. 487 – 492.
- Γ. Τσακίρης, Σ. Γιακουμάκης, Β. Κούρου και Χ. Βαγγέλης, 2001. Έργα και Δράσεις για τη Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στα Άνυδρα Νησιά του Αιγαίου. Συμπόσιο “Αιγαίο – Νερό – Βιώσιμη Ανάπτυξη”, Πάρος, 6 & 7 Ιουλίου 2001 (χωρίς κριτές)
- Γ. Τσακίρης και Χ. Βαγγέλης, 2001. Σύστημα Παρακολούθησης της Ξηρασίας με χρήση GIS. 11η Συνάντηση χρηστών Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ξενοδοχείο Holiday Inn, Αθήνα, 8 & 9 Νοεμβρίου 2001 (χωρίς κριτές)
- Χ. Βαγγέλης, Σ. Γιακουμάκης και Γ. Τσακίρης, 1999. Εκτίμηση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού σε έργα επιφανειακής ταμίευσης στα άνυδρα νησιά του Αιγαίου. Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), 17-19 Ιουνίου 1999, Βόλος, σ. 231-238.

### **Διοικητική εμπειρία**

- Υπεύθυνος Γραφείου Έκδοσης EW (EW Publication Office) των διεθνών επιστημονικών περιοδικών “European Water” και “Water Utility Journal” της European Water Resources Association
- Καθήκοντα διοικητικής, τεχνικής και επιστημονικής υποστήριξης στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, με σχέση εργασία Ιδιωτικού Δικαίου Αορίστου Χρόνου (ΙΔΑΧ) στο ΕΜΠ.
- Οργανωτική και γραμματειακή υποστήριξη του 4ου Εθνικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων (Ε.Ε.Δ.Υ.Π.), που διεξήχθη στο Βόλο στις 17 - 19 Ιουνίου 1999.
- Οργανωτική και τεχνική υποστήριξη στην έκδοση των πρακτικών του 5th International Conference of EWRA “Water Resources Management in the Era of Transition”, που διεξήχθη στην Αθήνα στις 4 – 8 Σεπτεμβρίου 2002.
- Διαχείριση των ιστοτόπων: <http://www.waterinfo.gr>; <http://www.ewra.net>.





