



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ PALMER ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Καραμπουρνιώτης Κωνσταντίνος

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Επιβλέπων: Επίκ. Καθηγητής Ν.Μαμάσης



Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο παρακολούθησης του Διατμηματικού – Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «**Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων**» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα της πρώτης κατεύθυνσης αυτού «*Υδρολογίας και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων*».

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η επισκόπηση των πιο σημαντικών δεικτών ξηρασίας, ενώ επιλέχθηκε παράλληλα να πραγματοποιηθεί ενδελεχής ανάλυση της μεθόδου εκτίμησης της δριμύτητας ξηρασίας μέσω του δείκτη Palmer και εφαρμογή της για δεδομένα που είχαν συλλεχθεί στην περιοχή της λίμνης Υλίκης. Επίσης επιλέχθηκε όλη η διαδικασία εφαρμογής του δείκτη Palmer να υλοποιηθεί σε ένα αρχείο excel, το οποίο «στήθηκε» από την αρχή και το οποίο μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας Palmer και σε άλλες περιοχές, δίνοντας την δυνατότητα πειραματισμού και βελτίωσης, δεδομένου ότι όλα τα στάδια υπολογισμού¹ του είναι φανερά στον χρήστη.

Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής επήλθε δύο χρόνια μετά την εισαγωγή μου σε αυτό το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών και περίπου μετά από ένα χρόνο τριβής με το αντικείμενο της ξηρασίας και της σημασίας που αυτή έχει στον άνθρωπο.

Πρώτον από όλους οφείλω, αλλά κυρίως, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω, τον επιβλέποντα καθηγητή μου και ιδιαίτερα υπομονετικό άνθρωπο, Επικ. Καθηγητή Νικόλαο Μαμάση, ο οποίος, όσο τετριμμένο και αν ακούγεται, μου παρείχε ό,τι χρειάστηκα για να μπορέσω να υλοποιήσω αυτή την εργασία.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους του δασκάλους μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου σε αυτό το πρόγραμμα, μιας και είναι σπάνιο μετά από δύο πολύ δύσκολα και απαιτητικά χρόνια, να έχω τόσο όμορφες αναμνήσεις και τόσο ζωντανή την ανάγκη για επιστροφή στα θρανία.

Εκτός Πολυτεχνείου είναι πολλοί αυτοί που θα ήθελα να ευχαριστήσω, για αυτό τον λόγο και για να αποφύγω να γίνω κουραστικός, θα προσπαθήσω να τους

¹ Πολλές εφαρμογές του δείκτη που είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο είναι σε μορφή black box μη δίνοντας την δυνατότητα κατανόησης της υπολογιστικής διαδικασίας και των βημάτων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό του.



κατηγοριοποίησω, ζητώντας προκαταβολικά την κατανόηση αυτών που δεν θα καταφέρω να αναφέρω στις επόμενες τρεις παραγράφους.

Αρχικά, ευχαριστώ τον κ. Αλέξανδρο Χαραλάμπους, εργοδότη, συνάδελφο και φίλο, ο οποίος χωρίς τον παραμικρό ενδοιασμό και γνωρίζοντας τις συνέπειες που αυτό θα είχε στην εκπλήρωση των εργασιακών μου καθηκόντων και στην ποσοτική αλλά και ενδεχομένως ποιοτική υλοποίηση αυτών, δέχθηκε με χαρά να με υποστηρίξει αλλά κυρίως να με παροτρύνει να συνεχίσω τις σπουδές μου παράλληλα με την εργασία μου.

Ευχαριστώ τους φίλους, φίλες και φίλη μου, τους οποίους δε θα επιχειρήσω να αναφέρω ονομαστικά γιατί οι πιθανότητες παράλειψης κάποιου, πλην της τελευταίας, είναι δραματικά υψηλές, που δύο χρόνια τώρα με ανέχτηκαν και κυρίως ανέχτηκαν να ακούν τις δικαιολογίες μου περί έλλειψης χρόνου. Σε αυτό το σημείο βεβαία τονίζω την ισχύ της δικαιολογίας «έχω διάβασμα», η οποία είναι αφοπλιστική και ομολογουμένως θα μου λείψει για κάποιο πεπερασμένο διάστημα, μέχρι δηλαδή το μικρόβιο της ανάγκης για γνώση και εκπαίδευση εμφανιστεί ξανά. Τελευταίους αφήνω τους γονείς μου, Νίκο και Σίσσυ και τον αδερφό μου Ηρακλή. Ότι και να γράψω δεν θα είναι αρκετό, κυρίως για μένα, γιατί γνωρίζω ότι για αυτούς είναι αρκετό να είμαι απλά ευτυχισμένος. Με έχουν στηρίξει και συνεχίζουν να με στηρίζουν σε οτιδήποτε και αν αποφασίζω, για αυτό τον λόγο ένα ευχαριστώ δεν είναι αρκετό, όμως ξέρουν ότι έστω και με αυτόν τον τρόπο αναγνωρίζω όλες τις θυσίες που έκαναν και κάνουν για να μπορέσω να σπουδάσω και να συνεχίζω να προσπαθώ να γίνομαι καλύτερος.

*Στον φίλο μου Νίκο,
Κωνσταντίνος Καραμπουρνιώτης
Οκτώβριος, 2012*



Περιεχόμενα

Πρόλογος - Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iv
Extended Abstract.....	vi
Εισαγωγή.....	xix
1. Κεφάλαιο – Ξηρασία και Λειψυδρία.....	1
1.1 Ακραία υδρολογικά φαινόμενα	1
1.2 Ορισμοί Ξηρασίας και Λειψυδρίας.....	2
1.3 Κατηγορίες ξηρασίας	5
1.4 Βασικά Χαρακτηριστικά Ξηρασίας.....	9
1.4.1 Ένταση.....	9
1.4.2 Διάρκεια	9
1.4.3 Χωρική κατανομή.....	9
1.4.4 Καταστροφικότητα	10
1.5 Παράμετροι εκτίμησης της ξηρασίας	10
1.5.1 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης.....	11
1.5.2 Χαρακτηριστικά δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.....	12
1.5.3 Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής	12
1.5.4 Διαχείριση των υδατικών συστημάτων.....	13
1.5.5 Άλλες παράμετροι.....	14
1.6 Αίτια ξηρασίας.....	15
1.6.1 Αλλαγές στη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας	15
1.6.2 Το Φαινόμενο El – Nino	16
1.6.3 Αστρονομικοί Παράγοντες	17
1.7 Επιπτώσεις Ξηρασίας.....	18
1.8 Διαχείριση Ξηρασίας.....	19
1.8.1 Διαχείριση της κρίσης της ξηρασίας (Drought crisis management)	23
1.8.2 Διαχείριση του κινδύνου εκδήλωσης ξηρασίας (Risk management).....	25
1.9 Ξηρασία στην Ελλάδα	27
1.10 Ξηρασία στην Ευρώπη	29
1.10.1 Πολιτικές εναλλακτικές δυνατότητες.....	30



2.	Κεφάλαιο 2 – Δείκτες ξηρασίας	33
2.1	Ποσοτικοποίηση της Ξηρασίας - Ορισμός των δεικτών Ξηρασίας.....	33
2.1.1	Χαρακτηριστικά ενός καλού δείκτη.....	35
2.2	Ιστορική Αναδρομή	36
2.3	Συνήθεις Δείκτες Ξηρασίας και Λειψυδρίας	39
2.3.1	Δείκτης Ποσοστού επί της Κανονικής Κατακρήμνισης (Percent of Normal) 44	
2.3.2	Δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index - "SPI").....	45
2.3.3	Δείκτης Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer ("The Palmer").....	47
2.3.4	Δείκτης υγρασίας καλλιέργειας (Crop Moisture Index "CMI")	52
2.3.5	Δείκτης Προσφοράς Επιφανειακού Νερού (SWSI - "swazee")	53
2.3.6	Δείκτης Επανόρθωσης Ξηρασίας (Reclamation Drought Index "RDI") 55	
2.3.7	Δείκτης των Δεκατημορίων	56
2.3.8	Δείκτης Ξηρότητας (AI)	58
2.3.9	Δείκτης Βροχόπτωσης (RI)	58
3.	Κεφάλαιο 3 - Ο Δείκτης Palmer – Μεθοδολογία Εκτέλεσης Υπολογισμών.....	60
3.1	Η υπολογιστική διαδικασία	62
3.1.1	Υδρολογικό Μοντέλο Palmer.....	62
3.1.2	Σταθερές και συντελεστές που εξαρτώνται από το κλίμα της περιοχής 65	
3.1.3	Υπολογισμός του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας.....	65
3.1.4	Προσδιορισμός της δριμύτητας ξηρασίας	68
3.1.5	Έναρξη και λήξη υγρής και ξηρής περιόδου.....	68
4.	Κεφάλαιο 4 Σχολιασμός και Παρατηρήσεις επί της Μεθοδολογίας Εκτέλεσης Υπολογισμών.....	80
4.1	Εισαγωγή	80
4.2	Χρήση δεδομένων	81
4.3	Χρήση τεχνικών και οι περιορισμοί τους.....	85
4.4	Διαδικασία υπολογισμού και συζήτηση	93
4.4.1	Υδρολογικός υπολογισμός.....	93



4.5	Δυνητικές τιμές (potential values)	94
4.5.1	Συντελεστής Εξατμισοδιαπνοής, α	96
4.5.2	Συντελεστής Επαναφόρτισης, β	98
4.5.3	Συντελεστής απορροής, γ	99
4.5.4	Συντελεστής απωλειών, δ	99
4.6	Βροχόπτωση CAFEC, P'	100
4.7	Περίσσεια κατακρήμνιση και ελλείμματα	101
4.8	Το κλιματικό χαρακτηριστικό K	101
4.9	Ο δείκτης ανωμαλίας της υγρασίας, z	103
4.10	Ο Παράγοντας της διάρκειας - Η επίδραση του χρόνου	104
4.11	Κατηγορίες ξηρασίας	104
4.12	Τα ξηρότερα Διαστήματα	105
4.13	Καθορισμός μηνιαίων προσαυξήσεων σοβαρότητας ξηρασίας	110
4.14	Επαναξιολόγηση του συντελεστή στάθμισης K - Ευρήματα ανεπάρκειας της τιμής του K	113
4.15	Διαδικασία για την εκτίμηση των μέσων τιμών του K	114
4.16	Ο συντελεστής στάθμισης K ως συνάρτηση άλλων πτυχών του κλίματος	115
4.17	Μηνιαίοι Παράγοντες Στάθμισης	116
4.18	Τελική αναπροσαρμογή των μηνιαίων τιμών K	117
4.19	Τυπική απόκλιση του d ως συντελεστή στάθμισης	118
4.20	Ένα παράδειγμα των υπολογισμών της σοβαρότητας ξηρασίας	118
4.21	Εφαρμογή των τύπων ξηρασίας σε υγρές περιόδους	119
4.22	Τέλος της ξηρασίας ή/και της υγρής περιόδου	120
4.23	Αλλαγές στον δείκτη δριμύτητας ξηρασίας	120
4.24	Καθορισμός του τέλους μίας ξηρασίας	121
4.25	Καθορισμός λήξης μίας υγρής περιόδου	123
4.26	Διαδικασία για τον υπολογισμό της δριμύτητας των ξηρών και υγρών περιόδων	124
5.	Κεφάλαιο 5 Εφαρμογή της Μεθοδολογίας και Ανάλυση Αποτελεσμάτων	125
5.1	Εισαγωγή	125
5.2	Περιοχή Μελέτης - Λίμνη Υλίκη	125



5.2.1	Μορφολογικά στοιχεία.....	125
5.2.2	Προέλευση της Λίμνης Υλίκης	125
5.2.3	Γεωλογικές συνθήκες.....	127
5.2.4	Παραδοχές	127
5.3	Ανάλυση δεδομένων εισόδου	129
5.4	Κατάστρωση υπολογιστικού φύλλου για τον υπολογισμό του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer.....	130
5.5	Ανάλυση των αποτελεσμάτων	130
6.	Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Συζήτηση	140
6.1	Ειδικά συμπεράσματα	140
6.2	Γενικά συμπεράσματα	142
7.	Βιβλιογραφία.....	144
7.1	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	144
7.2	Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία	152
8.	Παραρτήματα	154
8.1	Παράρτημα Ι.....	154
8.2	Παράρτημα ΙΙ.....	160

Πίνακες

Πίνακας 1	Κατάταξη υδρολογικών φαινομένων ως προς τα αίτια πρόκλησης των και την διάρκεια τους.	4
Πίνακας 2	Οικονομικά κόστη κυριοτέρων ξηρασιών στην Ευρώπη.	32
Πίνακας 3	Σημαντικότεροι δείκτες ξηρασίας και λειψυδρίας	40
Πίνακας 4	Κατάταξη της έντασης ξηρασίας κατά τον Palmer.....	67
Πίνακας 5	Περίληπτική παρουσίαση διαδικασίας υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer	73
Πίνακας 6	– Κατάταξη της έντασης ξηρασίας κατά τον Palmer.....	106
Διάγραμμα 7	Διαχρονική εξέλιξη ετήσιων δεδομένων βροχόπτωσης, εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής	130
Πίνακας 8	Μέσες μηνιαίες τιμές όλων των υδρολογικών ετών του μελετώμενου δείγματος σε ίντσες	132



Πίνακας 9 Αποτελέσματα Υπολογισμών για τους συντελεστές εξατμισοδιαπνοής, επαναφόρτισης, απορροής και απωλειών.....	132
Πίνακας 10 Σειρά υπολογισμών για το Κλιματικό Χαρακτηριστικό Κ.....	134
Πίνακας 11 – Επιφανειακή Βροχόπτωση (mm) στη λίμνη Υλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2001-02	154
Πίνακας 12 – Επιφανειακή Εξάτμιση (mm) από τη λίμνη Υλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2001-02.....	156
Πίνακας 13 –Εξατμισοδιαπνοή (mm) από τη λίμνη Υλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2001-02.....	158

Σχήματα, Εικόνες και Διαγράμματα

Σχήμα 1 - Ο «υδρο-παράλογος» κύκλος της ξηρασίας	24
Εικόνα 2 Διάγραμμα συσσωρευμένου Z προς τη διάρκεια των ξηρών περιόδων (Πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.).....	67
Σχήμα 3 Διάγραμμα Ροής Μεθόδου Υπολογισμού του Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer	78
Σχήμα 4 Απεικόνιση των εξισώσεων υπολογισμού του δείκτη Palmer σε 4 διακριτά στάδια εφαρμογής.....	79
Σχήμα 5 Συσσωρευμένος δείκτης κατά τις ξηρότερες περιόδους και για διάφορα χρονικά διαστήματα (Πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. page 20)	105
Εικόνα 6 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Ιούλιο 1934 (Πηγή: weather.about.com)	108
Εικόνα 7 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Ιούλιο 2009 (Πηγή: forestry.about.com).....	108
Εικόνα 8 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Μάρτιο 2011 (Πηγή: NOAA Satellite and Information Service)	109
Εικόνα 9 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Μάρτιο 2011 (Πηγή: NOAA Satellite and Information Service)	109



Εικόνα 10 Η Εξέλιξη της ξηρασίας με βάση τον δείκτη Palmer για τα έτη 1900 – 2002. (Πηγή: earthobservatory.nasa.org)	110
Σχήμα 11 Παρουσίαση της σωρευτικής διαδικασίας (Πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. page 20).....	111
Διάγραμμα 12 - Μέσος ετήσιος παράγοντας στάθμισης σε συνάρτηση της ζήτησης υγρασίας, μέσης προσφοράς υγρασίας, και της μέσης απόλυτης απόκλισης υγρασίας (πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. page 30) ...	116
Διάγραμμα 13 Χρονική εξέλιξη Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer	136
Διάγραμμα 14. Χρονική Εξέλιξη Εξατμισοδιαπνοής (ίντσες), Βροχόπτωσης (ίντσες) και Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer	138
Διάγραμμα 15 Αποθηκευμένη Υγρασία στο ανώτερο και κατώτερο εδαφικό στρώμα	160
Διάγραμμα 16 Δυνητική εξάτμιση και “Υπολογισμένη” Εξάτμιση	161
Διάγραμμα 17 Δυνητικές τιμές Επαναφόρτισης, Απωλειών και Απορροής.....	162
Διάγραμμα 18 Κλιματικά κατάλληλες τιμές (CAFEC) επαναφόρτισης, Απορροής, Απωλειών, Εξατμισοδιαπνοής και Βροχόπτωσης	163
Διάγραμμα 19 Δείκτης Ανωμαλίας Υγρασίας (Z).....	164
Διάγραμμα 20 Χρονική εξέλιξη Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer υπό την παραδοχή ότι και τα δύο εδαφικά στρώματα κατά τις αρχικές συνθήκες ήταν άδεια	165



Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η επισκόπηση των πιο σημαντικών δεικτών ξηρασίας, με παράλληλη ανάλυση και εφαρμογή του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer για δεδομένα που είχαν συλλεχθεί και αφορούν στην περιοχή της λίμνης Υλίκης. Η μέθοδος αποτυπώνεται αναλυτικά σε φύλλο εργασίας excel με στόχο να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας Palmer και σε άλλες περιοχές. Απώτερος στόχος της εργασίας ήταν να δοθεί η δυνατότητα πειραματισμού και βελτίωσης του δείκτη, δεδομένου ότι όλα τα στάδια υπολογισμού² του είναι φανερά στον χρήστη.

Η δομή της εργασίας βασίζεται στα εξής 8 κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1** - Επιχειρείται η παρουσίαση και κατανόηση της ξηρασίας με παράλληλη αναφορά στις διάφορες και διαφορετικές μορφές ξηρασίας, των βασικών χαρακτηριστικών της, των παραμέτρων εκτίμησης της, των αιτιών εμφάνισης της καθώς και των επιπτώσεων της.
- **Κεφάλαιο 2** – Εισάγεται η έννοια του δείκτη ξηρασίας ως μέτρο ποσοτικοποίησης της ξηρασίας και επιχειρείται η ιστορική καταγραφή των σημαντικότερων δεικτών ξηρασίας. Παρουσιάζονται πιο αναλυτικά οι πιο διαδεδομένοι δείκτες ξηρασίας.
- **Κεφάλαιο 3** – Πραγματοποιείται μία σύντομη παρουσίαση της μεθοδολογίας εκτέλεσης υπολογισμών του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer.
- **Κεφάλαιο 4** – Παρουσιάζεται αναλυτική η μεθοδολογία εκτέλεσης υπολογισμών του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer, με παράλληλο σχολιασμό και παράθεση παρατηρήσεων επί της μεθοδολογίας.
- **Κεφάλαιο 5** – Εφαρμόζεται η μεθοδολογία εκτέλεσης υπολογισμών του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer και αναλύονται τα αποτελέσματα αυτής. Παράλληλα, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και οι παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη κατά το στάδιο εφαρμογής της μεθοδολογίας.

² Πολλές εφαρμογές του δείκτη που είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο είναι σε μορφή black box μη δίνοντας την δυνατότητα κατανόησης της υπολογιστικής διαδικασίας και των βημάτων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό του.



- **Κεφάλαιο 6** – Παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας εκτέλεσης υπολογισμών του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer.
- **Κεφάλαιο 7** – Παρατίθενται οι ελληνόγλωσσες και ξενόγλωσσες πηγές της μεταπτυχιακής εργασίας.
- **Κεφάλαιο 8** – Αναλυτική παράθεση όλων των δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων σε πίνακες και διαγράμματα.



Extended Abstract

Drought indices review: Implementation of the Palmer Drought Severity Index in Greece

By *Konstantinos Karampouriotis*

Introduction and Structure

Even though Greece is considered as having adequate water resources, drought is becoming an increasingly often phenomenon that requires on time identification and application of appropriate management practices.

This postgraduate thesis was elaborated as part of the "Water Resources Science and Technology" Interdisciplinary – Interdepartmental Postgraduate Programme of the National and Technical University of Athens (NTUA) and specifically the "Hydrology and Environmental Management of Water Resources" course direction.

This postgraduate thesis provides an overview of the most important drought and scarcity indices. It also attempts to analyze and implement the Palmer Drought Severity Index (PDSI) for data collected from the study area of Lake Yliki. The method has been "built" from scratch and is depicted in detail in an excel spreadsheet in order to be easily implemented in every possible area. The ultimate goal of this work was to enable experimentation and improvement of the PDSI index, since all stages of the method are apparent to the user.

The structure of this postgraduate thesis is the following:

- **Chapter 1** – It is attempted to present and comprehend drought while referring to the different forms of drought, key features, drought estimation parameters, the causes of its occurrence and its impacts.
- **Chapter 2** - Introduction of the drought index as a measure for quantifying drought. Elaboration of a historical record of major drought indices, providing specific details for the most commonly used.
- **Chapter 3** - Brief presentation of the PDSI methodology of drought severity quantification.
- **Chapter 4** - Detailed presentation of the PDSI methodology, while commenting on the methodology.



- **Chapter 5** – Implementation of the PDSI methodology on Lake Yliki's data.
Presentation of the study area and determination of the assumptions considered during the implementation of the methodology.
- **Chapter 6** – Presentation of the conclusions after implementing the PDSI methodology.
- **Chapter 7** – Greek and Foreign Bibliography.
- **Chapter 8** - Detailed presentation of all input data and results in tables and charts.

Analytical Purpose

The purpose of this postgraduate thesis was to create a spreadsheet, "accessible" to users, that will allow them to enter Palmer method's inputs (rainfall and temperature) and with simple adjustments (due to the different sample size of their data) to calculate the Palmer Drought Severity Index (PDSI) for the given area which is being studied.

Moreover, it aimed at analyzing the methodology used to export the results through the implementation of the Palmer's method, due to the fact that many applications of the PDSI were available on the internet in a "black box" form, depriving the ability to understand the computational procedure and steps that were being followed for the calculation of the index.

Another goal of this thesis was to review the most widely used drought indices and finally, apply the methodology developed by Palmer (Palmer, 1965) and studied, reviewed and commented by Alley (Alley, 1984) in Yliki's Lake area.

Drought

Drought is an extreme hydrological phenomenon particularly complex to understand, study, prevent and treat, mainly due to the plurality of parallel actions and parameters involved in its emergence (Apostolou, 2010).

A general definition of drought is that is an extreme hydrological condition characterized by a deficiency of water. Furthermore, a more specific definition is presenting drought as a natural, random, temporary and irregular situation of a



natural irregular process of continuous reduction of precipitation and water availability, with respect to normal values, which extends over a considerable period of time and covers a wide area. However, there is not an axiomatically, objective and universally accepted definition of drought, as it is defined only from the standpoint of a given scientific side or study area.

Drought is considered the most complex of all natural hazards (Wilhite and Glantz, 1985; Wilhite et al., 2000). Its specific characteristic is that it can occur many years after the termination of the phenomenon (Mimikou & Fotopoulos, 2004).

Drought indices

Drought is quantified through drought indices. Drought index is an index that is associated with some of the cumulative effects of a prolonged and abnormal moisture deficiency (World Meteorological Organisation, 1992).

The ultimate characteristics of a complete drought index are the following:

- Simplicity - ease of use and understanding.
- Correct definition - with scientifically accepted physical sense.
- Sensitivity - response to a large range of values.
- Timely response to climate fluctuations.
- Transferability - ability to use the index in different regions.
- Data availability - access to long time series and good data.
- Low cost to produce the index (Tsakiris & Pangalou, 2009).

On the following table 1, the most common drought and scarcity indices of the past century are being overviewed, presenting the researcher who has developed them, the year that were developed, the variables that are being analyzed and their application, where available.



Table 1. Overview of the most common drought and scarcity indices.

A/A	Drought and Scarcity Indices	Researched	Year	Variables being analyzed	Application
1	Munger's Index	Munger	1916	Duration without a 24 hours rainfall bigger than 1,27 mm.	Daily measurement of the danger of for forest fire appearance.
2	Kincer's Index	Kincer	1919	30 or more consecutive days with rainfall smaller than 6,35 mm in 24 hours	Seasonal distribution of drought maps
3	Marcovitch's Index	Marcovitch	1930	Rainfall and temperature	Climatic need of the bean crop.
4	Blumenstock's Index	Blumenstock	1942	Drought duration in days, where the drought has been ended from a rainfall of 2.54 mm in 48h.	Small scale drought
5	Antecedent Precipitation Index	Kohler	1954	Rainfall	A reversed drought index that is used for flood prediction.
6	Moisture Adequacy Index	McGuire and Palmer	1957	Rainfall and soil moisture	Drought on crops.
7	Palmer Drought Severity Index (PDSI)	Palmer	1965	Rainfall and temperature on water balance model	Comparison of meteorological and hydrological drought in space and time.
8	(Precipitation Anomaly Index	Rooy	1965	Rainfall	Drought measurement in monthly and annual step.
9	Deciles Index	Gibbs and Maher	1967	Rainfall	It examines the empiric function of rainfall height distribution, and ranks them in ten probability categories.
10	Crop Moisture Index	Palmer	1968	Rainfall and temperature on water balance model	Drought in crops
11	Keetch–Byram Drought Index	Keetch – Byram	1968	Rainfall and temperature on water balance model	Fire Managers



A/A	Drought and Scarcity Indices	Researched	Year	Variables being analyzed	Application
12	Aridity Index	UNESCO	1979	The mean annual rainfall values and the mean annual potential evapotranspiration	
13	Bhalme and Mooly Drought (BMDI)	Bhalme and Mooly	1980	Rainfall	Drought Calculation in monthly and annual step.
14	Surface Water Supply (SWSI)	Shafter and Dezman	1981	Snowpack, Completeness of saving banks (dams), outflow and rainfall	It is mainly calculated for western river basins, the statistical attributes are not analysed and/or apprehended very well.
15	Standardized Precipitation Index (SPI)	Tom McKee, et al,	1993	Rainfall	Allows the measurement of drought and wet periods through the rainfall deficit, the percentage of "normal rainfall" probability of not exceedance.
16	Soil Moisture Drought Index	Hollinger et al.	1993	Soil Moisture	Drought calculation on annual step.
17	Crop Specific Drought Index (CSDI)	Meyer et al. 1993;	1993	Evapotranspiration	Drought calculation on seasonal step.
18	National Rainfall Index (RI)	Gommes and Petrass	1994	Mean annual rainfall, mean value of a long time series of rainfall and other statistical values such as production of agricultural products.	
19	Crop Condition Index	Kogan	1995	Satellite AVHRR radiation (visible and near-infrared radiation)	It calculates the vegetation "health"
20	Reclamation Drought Index	Weghorst	1996	Rainfall, temperature, snow, outflow, completeness of water saving banks (dams).	
21	Water Exploitation Index (WEI)	Reskin et al	1997	Mean annual water demand to mean annual amount of available water resources.	Expresses the pressure applied by the water demand to water resources and it is applied in large areas.
22	Drought monitoring	Universities and Centres ³	1999	It embodies numerous drought indices and assistant indices in one weekly operational drought monitoring map.	Multiple use

³ University of Nebraska-Lincoln National Drought Mitigation Center, the USDA/OCE/WAOB/Joint Agricultural Weather Facility, the NOAA/NWS/NCEP/CPC, and the NOAA/NESDIS/National Climatic Data Center



The Palmer Drought Severity Index (PDSI)

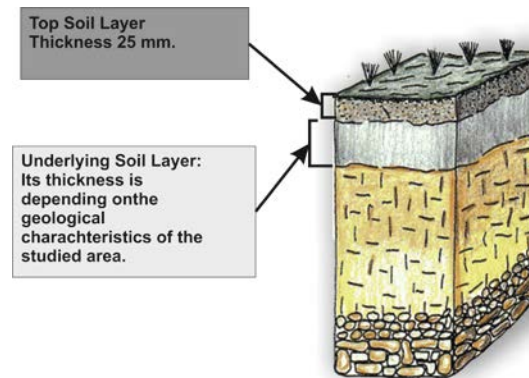
The Palmer Drought Severity index was developed in 1965 by Wayne C. Palmer. It is a hydrological balance index which is based on the application of a water balance concept considering water supply and demand. It is a soil moisture algorithm which is calibrated for relatively homogeneous regions and its ultimate objective is to provide standardized measurements of moisture comparisons between different locations and months. It is widely used by U.S. Government agencies enabling them to address drought. The values that PDSI uses for the quantification of the drought phenomenon and its qualitative attributes are being presented in table 2 below.

Table 2. Classification of recent weather according to Palmer drought severity index

PDSI	Qualitative Attribution
≥ 4.0	Extremely wet
3.0 – 3.99	Very wet
2.0 – 2.99	Moderately wet
1.0 – 1.99	Slightly wet
0.5 – 0.99	Incipient wet spell
0.49 - -0.49	Near normal
-0,5 - -0.99	Incipient drought
-1.0 - -1.99	Mild drought
-2.0 - - 2.99	Moderate drought
-3.0 - -3.99	Severe drought
≤ -4.0	Extreme drought

A specific characteristics of the PDSI is the fact that its results are being recorded in a monthly time step. Moreover, as shown in scheme 1 below, the soil moisture is being stored in two soil layers that are being arbitrarily defined by Palmer (upper soil layer) and by each researcher (underlying layer) that is implementing the Palmer's method on a given study area.

Scheme 1. Definition of the upper and underlying layer used in the Palmer's method.



Furthermore, Palmer's method includes assumptions related to the way that water is being transferred between these two soil layers. For instance, evapotranspiration losses take place only if the potential evapotranspiration is higher than the precipitation and the losses from the top layer are being utilized to the maximum possible extent. On the other hand, losses from the underlying soil layer are subject to the initially stored moisture in the underlying layer, the potential evapotranspiration and the combined available moisture capacity (AWC - Available Moisture Capacity) of two soil layers.

Advantages of the PDSI

The PDSI is the first comprehensive drought index that is widely used, measuring the climate anomaly in an area, placing the current conditions in historical samples, providing spatial and temporal representations of historical droughts and measuring the soil moisture conditions (Willeke et al., 1994). It is very effective in large areas of uniform topography and readily available and standardized, facilitating direct spatial and temporal comparisons.

Disadvantages of the PDSI

Some indicative disadvantages of the PDSI are that it delays to highlight the ongoing drought for several months and it is unsuitable for very mountainous areas or areas with extreme climatic events (Smith et al., 1993). Furthermore, it does not calculate the snow and ice and does not take into account the runoff until the capacity of the top and bottom soil layers are complete in water, thus leading to underestimation of



runoff. Finally, it is widely used in the United States but has little acceptance in other areas (Kogan, 1995).

Brief presentation of the Palmer Drought Severity Index method

In brief, the Palmer Drought severity index method, consists of the following steps:

1. Carry out a hydrologic accounting by months for a long series of years.
2. Summarize the results to obtain certain constants or coefficients which are dependent on the climate of the area being analyzed.
3. Reanalyze the series using the derived coefficients to determine the amount of moisture required for "normal" weather during each month.
4. Convert the departures to indices of moisture anomaly.
5. Analyze the index series to develop:
 - a. Criteria for determining the beginning and ending of drought periods.
 - b. A formula for determining drought severity.

Analytical computational procedure of Palmer's method

Below are presented in brief, the analytical steps that are being implemented in Palmer's computational procedure.

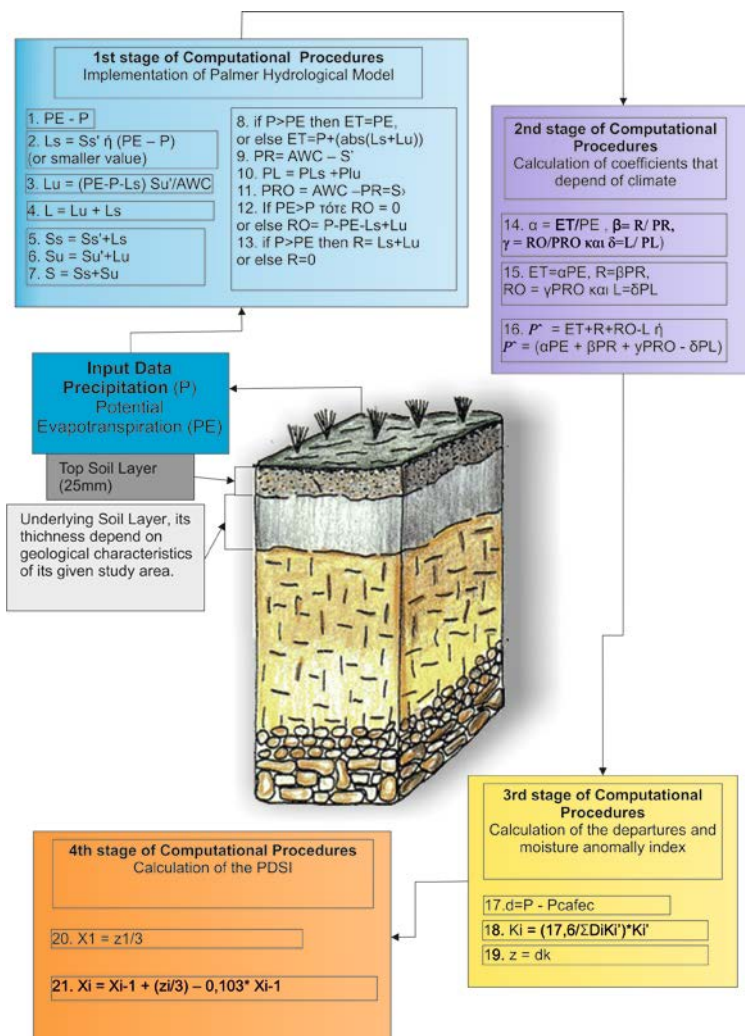
1. Definition of the study area and definition of the necessary assumptions.
2. Finding, processing and tabulation of the monthly rainfall (P) and potential evapotranspiration (PE) data.
3. Calculation of the difference between potential evapotranspiration and precipitation in a monthly step.
4. Definition the available water capacity of the soil (upper layer and the underlying layer) (AWC).
5. Calculation of moisture loss from the upper and underlying soil layer in a monthly step.
6. Calculation of the total losses.
7. Calculation of the stored moisture in the upper and underlying soil layer.
8. Calculation of the total stored moisture.



9. Determination of the “calculated” evapotranspiration.
10. Estimation of the potential recharge (PR), potential loss (PL) and Potential Runoff (PRO).
11. Calculate the average monthly values of all variables of the studied sample.
12. Calculate the following constants Evapotranspiration (a) Recharging (b) Runoff (c) Loss (d).
13. Calculating CAFEC values of Evapotranspiration (ET) Recharging (R), Runoff (RO) and loss (L).
14. Calculation of the CAFEC Precipitation (Pcafec).
15. Calculation of the rainfall excess and deficits deficit (d).
16. Calculation of the climate characteristic K
17. Calculation of the index disorder moisture (z).
18. Calculation of drought severity for the initial month of the studied sample.
19. Calculation of the Drought Severity Index Palmer.

Furthermore, the analytical steps of Palmer’s computational procedure, including basic functions, are being illustrated in scheme 2 below.

Scheme 2. Analytical steps of Palmer’s computational procedure, including basic functions.



Implementation of the Palmer methodology and results

The implementation of Palmer’s methodology in Yliki’s area data has resulted in the conclusion that the applied methodology successfully records the two-year droughts that were recorded during 1988-90 and 2000-2002 in the area.

Taking under consideration diagram 1, which is presented below, the results are grouped in the following four classes.

- First class 1977 – 1985 - Positive PDSI values - Slightly wet climate conditions with an average index value of 1.96.
- Second class 1985 – 1994 - Negative PDSI values - Mild drought climatic conditions with an average index value of -1.36.



- Third class 1994 – 1999 - Positive PDSI values - Near normal climatic conditions with an average index value of 0.16.
- Fourth class 1999 – 2002 - only negative PDSI values - Moderate drought climatic conditions with an average index value of - 2.78.

Diagram 1. Evolution of the Palmer Drought Severity Index

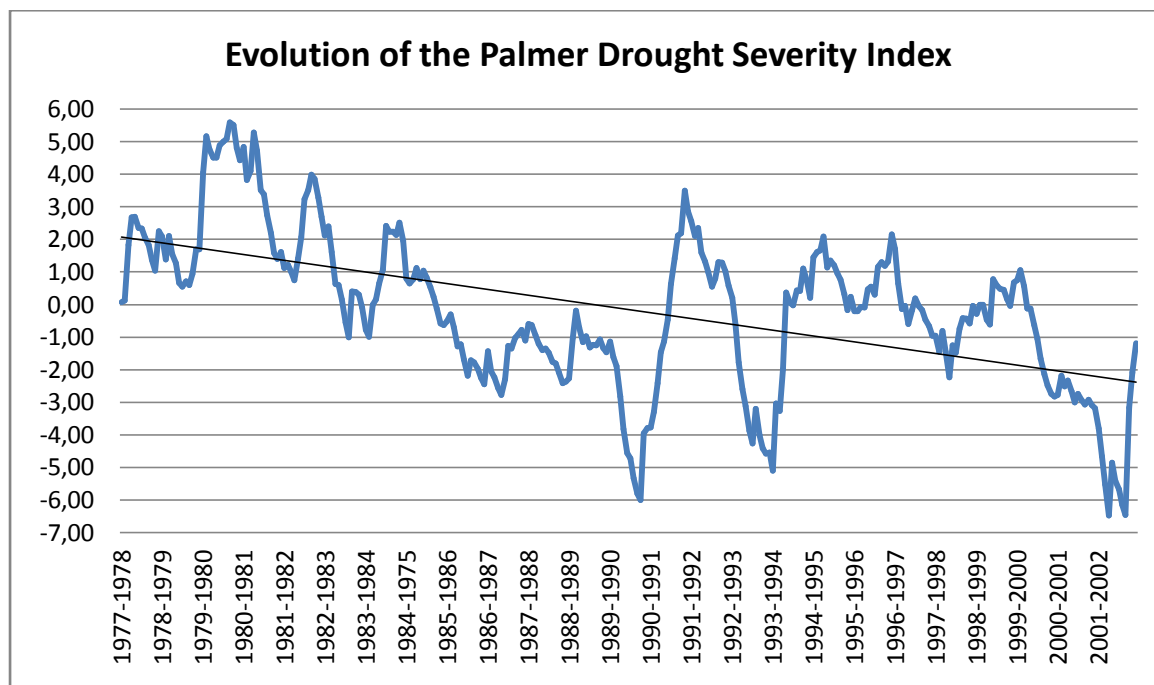


Diagram 2 which is presented below presents an overview of the link between rainfall, evapotranspiration and the PDSI.

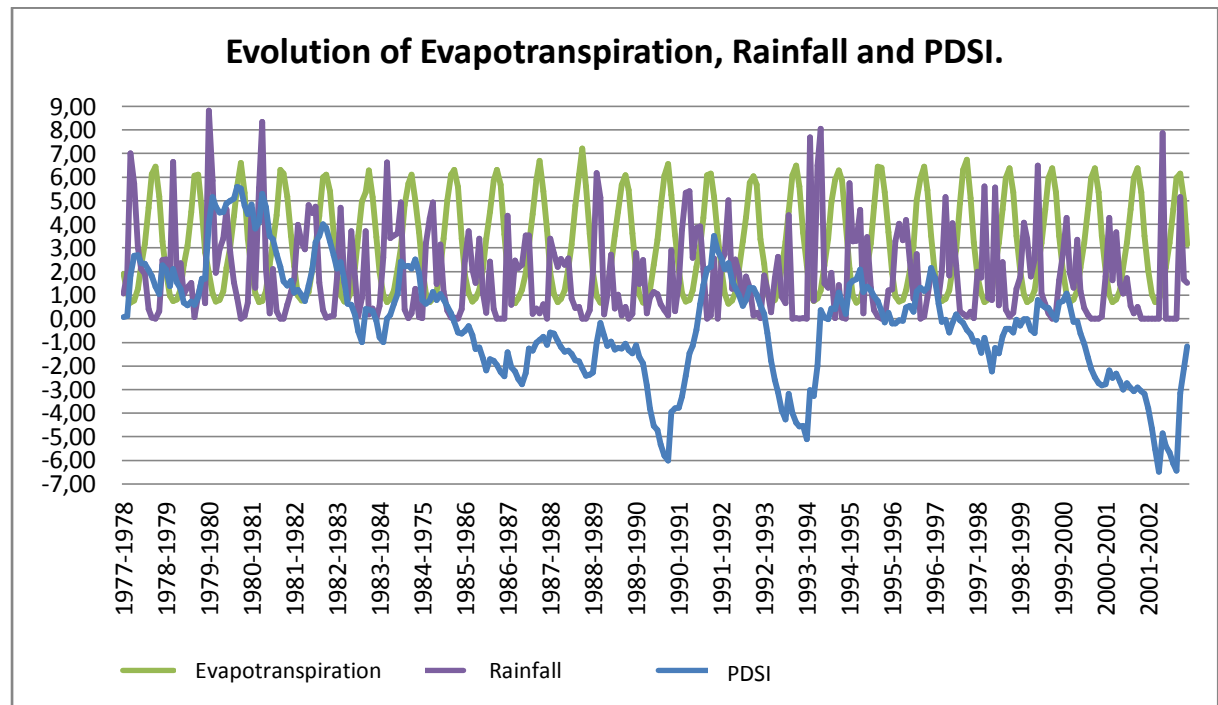
According to the extracted results, evapotranspiration shows a periodicity, both in terms of annual and monthly changes.

However, the relation between rainfall intensity and the PDSI is very close. It appears that low values of rainfall are followed by low values (negative) of the PDSI. The four largest PDSI values are being recorded during January, June and May 2002 and during July 1990 with values of -6.48, - 6.45, -6.15 and -6, respectively. Moreover, it results that 50 items (months) are assigned to near normal climatic conditions ($-0,5 < \text{PDSI} < 0,5$). Furthermore, 18 months show values smaller than -4, while 16 months are recording extremely wet climatic conditions. The periods during which there is an extreme drought with negative values greater than $\text{PDSI} = -4$ are:



- From March until August 1989.
- From June until October 1993.
- From November 2001 until June 2002.

Diagram 2. Evolution of the evapotranspiration, rainfall and Palmer Drought Severity Index



Conclusions

The general conclusions that have been extracted, after the application of Palmer's methodology to Lake Yliki's area, are the following.

- The process and computational steps of the index which are reflected in the excel spreadsheet that has been created, record successfully the biennial extreme droughts that have historically occurred in 1988-89 and 1989-90 as well as during 2000-01 and 2001-02.
- The Palmer index successfully captures the drought conditions in the study area.

The droughts recorded were conducted by indistinct years and does not seem to exhibit any periodicity.



- The calculated values of drought severity index show reasonable results qualitatively classifying the droughts in the extremely dry periods, with values exceeding the benchmark of the very dry season (PDSI <-4).
- There is a trend toward decreasing values of the Palmer index, defining a shift to drier conditions.
- The cases where extreme droughts are recorded are not isolated events that occur sporadically for only one month, but instead are periods lasting at least 5 months.
- Even assuming different initial conditions (initial values) where the two soil layers, upper and underlying, were completely empty, the results of the index are not affected either qualitatively or quantitatively.

Suggestions for further research

The creation of the excel spreadsheet that integrates Palmer's computational procedure and the implementation of Palmer's methodology in Yliki Lake, has triggered the need for further investigation of some aspects of the method that can be optimised. These are the following:

- Recalibration of the PDSI using data from EU regions or from corresponding regions from Greece.
- Integration of a process that will take into account the following:
 - Constructions that regulate the supply of water resources (eg. Dams).
 - The irrigation needs of the studied area.
- Integration of a tool that can calculate the potential evapotranspiration during the first stage of the water balance calculation.
- Creation of a list that provide the thickness of the underlying soil layer through objective criteria (geological characteristics / underground conditions, soil characteristics, etc.).
- Codification of the created excel spreadsheet and creation of an online tool for the determination of drought in Greece.



Εισαγωγή

Η ξηρασία είναι ένα ακραίο υδρολογικό φαινόμενο που παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα ως προς την κατανόηση, μελέτη, πρόληψη και αντιμετώπιση, κυρίως λόγω της παράλληλης δράσης πλήθους παραμέτρων που συμμετέχουν στην εμφάνιση της (Αποστόλου, 2010). Η εμφάνιση της ξηρασίας δεν επηρεάζεται μόνο από τα χαρακτηριστικά των περιοχών που προσβάλλει, για αυτό τον λόγο και δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές, αλλά είναι δυνατόν να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε περιοχή ανά τον κόσμο. Η ξηρασία διαφέρει τόσο από την λειψυδρία όσο και από την ανυδρία μιας και η πρώτη (ξηρασία) αναφέρεται σε μία παροδική κατάσταση του κλίματος που χαρακτηρίζεται από σημαντική ελάττωση του υετού σε μία περιοχή, η δεύτερη (λειψυδρία) αναφέρεται σε μία μόνιμη κατάσταση ανισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης των υδατικών πόρων σε μια περιοχή, ενώ η τρίτη (ανυδρία) αναφέρεται σε ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του κλίματος, το οποίο σε μόνιμη κατάσταση, παρουσιάζει μειωμένη βροχόπτωση, η οποία δεν φτάνει για τη διατήρηση της βλάστησης (Wallen, 1967; Ελληνική Μετεωρολογική Εταιρία, 1998). Η ξηρασία είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο, ως προς την επίλυση του, φαινόμενο, παρόλο που εμφανίζεται και σε ξηρές - ερημικές περιοχές, μπορεί να εμφανιστεί εξίσου και σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από σημαντικά ποσά βροχόπτωσης. Τις περισσότερες φορές μάλιστα προκαλεί πολύ πιο σημαντικά προβλήματα σε σχέση με αυτά που εμφανίζονται στις ξηρές περιοχές. Το παραπάνω φαινομενικά παράλογο συμβάν εξηγείται από το γεγονός ότι στις ξηρές περιοχές τα οικοσυστήματα έχουν προσαρμοστεί στην επιβίωση σε συνθήκες περιορισμένης υγρασίας, ενώ αντίθετα στην περίπτωση περιοχών με υγρό κλίμα, τα οικοσυστήματα δεν έχουν αναπτύξει τα απαραίτητα εργαλεία επιβίωσης σε ακραίες για τα φυσιολογικά δεδομένα καταστάσεις, με αποτέλεσμα να κινδυνεύουν πολύ περισσότερο με αφανισμό.

Εξαιτίας αυτής της πολύπλοκης φύσης που χαρακτηρίζει την ξηρασία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η αρχή, η διάρκεια και το τέλος ενός επεισοδίου ξηρασίας όπως επίσης και τα ακριβή αίτια και οι συνέπειες αυτής. Προκύπτει λοιπόν ότι η ολοκληρωμένη μελέτη του φαινομένου της ξηρασίας απαιτεί την συνεργασία



πολλών ειδικοτήτων (όπως είναι υδρολογία, γεωργία, οικονομία, ιστορία, κοινωνιολογία) έτσι ώστε να επιτευχθεί η διερεύνηση σε βάθος του φαινομένου με τελικό σκοπό την πλήρη κατανόηση, αξιολόγηση και ερμηνεία των αιτιών δημιουργίας του, καθώς και των επιπτώσεών του αλλά και της δημιουργίας των εργαλείων αντιμετώπισης της.



1. Κεφάλαιο – Ξηρασία και Λειψυδρία

1.1 Ακραία υδρολογικά φαινόμενα

Οι «ακραίες υδρολογικές καταστάσεις» προσδιορίζονται ως οι ακραίες περιπτώσεις ανεπάρκειας ύδατος (ξηρασία) ή υπερβολικής ποσότητας του (πλημμύρα). Στην υδρολογία οι ακραίες αυτές καταστάσεις προσελκύουν το ενδιαφέρον διότι απαιτούν και χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής, συστηματικής μελέτης και ανάπτυξης ειδικών μεθόδων για την ανάλυση, την περιγραφή, την πρόγνωση και την αντιμετώπιση τους. Παράλληλα αποτελούν πεδίο επιστημονικής έρευνας και συγκεκριμένα στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας θα αποτελέσουν τη βάση για τη μελέτη του ακραίου υδρολογικού φαινομένου της ξηρασίας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος. Ωστόσο πέραν του αμιγώς επιστημονικού και τεχνικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν, οι ακραίες υδρολογικές καταστάσεις έχουν μία έντονη κοινωνική διάσταση αφού όταν γίνουν ανεξέλεγκτες μπορούν να επηρεάσουν και να διαταράξουν - σε απλές περιπτώσεις ή ακόμη και να καταστρέψουν τον φυσιολογικό ρυθμό της ζωής σε μεγάλες περιοχές.

Η ξηρασία ως ακραίο περιβαλλοντικό φαινόμενο παρουσιάζει διάφορες μορφές ανάλογα με την παράμετρο με την οποία εκφράζεται και ανάλογα με το κλίμα της περιοχής στο οποίο αναφέρεται. Το κρίσιμο επίπεδο της μεταβλητής με την οποία εκφράζεται η ξηρασία διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (Τσακίρης, 1995).

Σε αντίθεση με άλλα ακραία φαινόμενα (πλημμύρες, καταιγίδες, τυφώνες κλπ), η ξηρασία συνήθως διαφοροποιείται ως προς τη διάρκεια μιας και συνήθως η διάρκεια κατά την οποία επιτελείται είναι χρονικά μεγάλη. Όπως θα διατυπωθεί και σε επόμενες παραγράφους της παρούσας εργασίας, η ξηρασία πάσχει από σαφή και απόλυτο ορισμό καθώς μπορεί να ορισθεί μόνο ανάλογα με την επιστημονική σκοπιά από την οποία μελετάται την δεδομένη στιγμή. Για αυτόν αλλά και για αρκετούς ακόμα λόγους που θα αποτυπωθούν στη συνέχεια, η ξηρασία αποτελεί τον πιο σύνθετο από όλους τους φυσικούς κινδύνους (Wilhite and Glantz, 1985; Wilhite *et al.*, 2000).



1.2 Ορισμοί Ξηρασίας και Λειψυδρίας

Ο αντικειμενικός και οικουμενικά αποδεκτός ορισμός της ξηρασίας είναι πρακτικά αδύνατος, μιας και τόσο τα αίτια αλλά όσο και οι επιπτώσεις της παρουσιάζουν ασύγκριτα μεγάλες διαφορές από περιοχή σε περιοχή. Χαρακτηριστικό είναι ότι μετά από σχεδόν έναν αιώνα επίσημης έρευνας και εμπειριστατωμένης μελέτης στα θέματα που αφορούν την ξηρασία, δεν υπάρχει ένας αξιωματικά αποδεκτός ορισμός της ξηρασίας αλλά δεκάδες, οι οποίοι ωστόσο έχουν πολλά κοινά γνωρίσματα και μπορούν να ερμηνευτούν από ένα κοινό πρίσμα τόσο επιστημονικό (υδρολογικό – μετεωρολογικό) όσο και κοινωνικο-οικονομικό μιας και η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που ερευνάται διεπιστημονικώς.

Σύμφωνα με τον οδηγό διαχείρισης ξηρασίας ο οποίος εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος MedroPlan (Μεσογειακή ετοιμότητα και σχεδιασμός περιορισμού της ξηρασίας) από έγκριτα επιστημονικά ιδρύματα συμπεριλαμβανομένου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η ξηρασία, όπως και τα περισσότερα υδρολογικά φαινόμενα, είναι μία επαναλαμβανόμενη κλιματική κατάσταση που χαρακτηρίζεται από προσωρινά ελλείμματα ύδατος σε σχέση με την κανονική παροχή, σε μια παρατεταμένη χρονική περίοδο – μια εποχή, ένα χρόνο ή πολλά χρόνια.

Ωστόσο και αυτός ο ορισμός είναι σχετικός μιας και οι ξηρασίες διαφέρουν κατά τύπους σε έκταση, διάρκεια και ένταση.

Η ξηρασία, η ξηρότητα, η λειψυδρία και η ερημοποίηση είναι ορισμοί και διεργασίες οι οποίοι τουλάχιστον στις Μεσογειακές χώρες θεωρούνται κοινά και επικαλυπτόμενα φαινόμενα τα οποία συχνά παρερμηνεύονται, όταν χρησιμοποιούνται. Ωστόσο η ανάπτυξη σαφών μεθόδων και η ορθή ερμηνεία αποτελεσμάτων και παραγωγή συμπερασμάτων προϋποθέτει τον καθορισμό όρων και ορισμών.

Συγκριμένα ορίζονται οι εξής έννοιες:

- **Ξηρασία:** Φυσική, περιστασιακή, τυχαία, προσωρινή κατάσταση συνεχούς μείωσης στη βροχόπτωση και στη διαθεσιμότητα ύδατος αναφορικά με τις κανονικές τιμές, που εκτείνεται σε μια σημαντική χρονική περίοδο και καλύπτει μια ευρεία περιοχή.



- **Λειψυδρία:** Δηλώνει μια μόνιμη κατάσταση ανισορροπίας μεταξύ των υδατικών πόρων σε μια περιοχή (ή σε ένα σύστημα υδροδότησης), η οποία χαρακτηρίζεται από ένα ξηρό κλίμα ή/και γρήγορη αύξηση της υδατικής ζήτησης, που σχετίζεται με πληθυσμιακή ανάπτυξη, επέκταση των ξηρικών καλλιεργειών, κ.λπ.
- **Ξηρότητα:** Φυσική μόνιμη κλιματική κατάσταση με πολύ χαμηλές ετήσιες ή εποχιακές βροχοπτώσεις.
- **Έλλειμμα νερού:** Ανθρωπογενής προσωρινή ανισορροπία στη διαθεσιμότητα του ύδατος. Το έλλειμμα νερού σε ένα σύστημα υδροδότησης αντιπροσωπεύει ένα έλλειμμα νερού σε σχέση με τη ζήτηση, το οποίο μπορεί να προκύψει λόγω ξηρασίας ή άλλων ανθρωπογενών αιτιών (π.χ. χαμηλή ποιότητα νερού, κακές υπηρεσίες)
- **Ερημοποίηση:** Αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης πολλών παραμέτρων, με σημαντικότερη την ξηρασία. Με τον όρο ερημοποίηση, εννοείται η διαδικασία σύμφωνα με την οποία η παραγωγική γη υποβαθμίζεται και σταδιακά μετατρέπεται σε αφιλόξενη για την αναπτυσσόμενη βλάστηση. Η ερημοποίηση έχει σημαντικότερες περιβαλλοντικές και κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις, αφού με την υποβάθμιση των φυσικών πόρων μειώνεται η παραγωγικότητα ενός τόπου και κατ' επέκταση το αγροτικό εισόδημα, μετατοπίζοντας τον πληθυσμό σε περιοχές με περισσότερες δυνατότητες απασχόλησης. Ειδικότερα η ερημοποίηση συνεπάγεται απώλεια της βιοποικιλότητας μιας περιοχής, μείωση της παραγωγικότητας του εδάφους, μεταβολή των τοπικών κλιματικών συνθηκών, μείωση της διαθεσιμότητας του γλυκού νερού, αύξηση της συχνότητας και του μεγέθους των πλημμυρών στις κατώτερες περιοχές, μείωση του αγροτικού εισοδήματος, εγκατάλειψη της γης, μετανάστευση του πληθυσμού, ανεργία, αναταραχές (Κωτσοβίνος και Αγγελίδης, 2005). Η ερημοποίηση προκαλείται αρχικά από υπέρ-εκμετάλλευση και ακατάλληλη εδαφική χρήση σε συνδυασμό με την κλιματική διακύμανση (MedroPlan, 2006).

Συνεπώς, ενώ ως «ξηρασία» νοείται μια προσωρινή μείωση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων λόγω, επί παραδείγματι, μειωμένων βροχοπτώσεων, ως «λειψυδρία» νοείται η κατάσταση κατά την οποία η ζήτηση νερού υπερβαίνει, σε



συνθήκες αιφροδίας, τους εκμεταλλεύσιμους υδάτινους πόρους (Επιτροπή των Περιφερειών, 2008).

Στον πίνακα 1 επιχειρείται μία κατάταξη των προαναφερθέντων εννοιών ως προς τα αίτια που τα προκαλούν (φυσικά ή ανθρωπογενή) και ως προς την διάρκεια του φαινομένου (προσωρινό ή μόνιμο).

Πίνακας 1 Κατάταξη υδρολογικών φαινομένων ως προς τα αίτια πρόκλησης των και την διάρκεια τους.

	Φυσικά Αίτια	Ανθρωπογενή αίτια
Προσωρινή Κατάσταση	Ξηρασία	Έλλειμμα νερού
Μόνιμη Κατάσταση	Ξηρότητα	Λειψυδρία Ερημοποίηση

Κάποιοι άλλοι ορισμοί της ξηρασίας παρουσιάζονται από τους Wilhite και Glantz (Wilhite and Glantz, 1985) και από τον Τσακίρη (Τσακίρης, 1995). Συγκεκριμένα σύμφωνα με τους Wilhite και Glantz:

Η ξηρασία είναι μία ακανόνιστη φυσική διαδικασία, η οποία προκύπτει από την έλλειψη βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια μιας εκτεταμένης περιόδου του χρόνου, σε γενικές γραμμές από έναν ή περισσότερους σταθμούς, προκαλώντας ως εκ τούτου υδρολογική ανισορροπία, επηρεάζοντας τις ανθρώπινες και περιβαλλοντικές δραστηριότητες, αποτελεί προϋπόθεση για την έλλειψη βροχοπτώσεων σε σχέση με τη συμπεριφορά η οποία θεωρείται ως φυσιολογική (Wilhite and Glantz, 1985).

Σύμφωνα με έναν γενικό ορισμό από τον Γ. Τσακίρη, η ξηρασία για ένα υδατικό σύστημα είναι το φαινόμενο κατά τη διάρκεια εμφάνισης του οποίου το υδατικό σύστημα βρίσκεται κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο σε σχέση με την κανονική του λειτουργία. Με αυτόν το γενικό ορισμό τίγονται θέματα όχι μόνο της προσφοράς του νερού αλλά και εκείνα της ζήτησης και της αποθήκευσης (Τσακίρης, 1995).

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι δεν είναι αυτή καθαυτή η απόλυτη ποσότητα του νερού που καθορίζει τα όρια κάτω από τα οποία πρέπει κανείς να θεωρεί ότι εμφανίζεται ξηρασία αλλά η διαφορά μεταξύ της αναγκαίας ποσότητας νερού, από αυτήν που είναι διαθέσιμη, για κάποια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Οι λόγοι που καθιστούν το φαινόμενο της ξηρασίας ιδιαίτερα έντονο και απειλητικό είναι οι εξής:



- Παράλληλη αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, της αστικής συγκέντρωσης και της οικονομικής δραστηριότητας.
- Η ανάπτυξη και η βελτίωση της παραγωγικότητας της γεωργίας και της βιομηχανίας βασίζονται στην κατανάλωση νερού.
- Η άνοδος του βιοτικού επιπέδου συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις για νερό.
- Οι αλλαγές στον τρόπο ζωής και στις καλλιέργειες, και οι επεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον, ηθελημένες ή από απροσεξία, διαταράσσουν τους υδατικούς πόρους.

Ανάλογα με πιο από τα παραπάνω προβλήματα είναι το μελετώμενο και πιο κριτήριο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καταστάσεως της ξηρασίας, καθορίζονται αυθαίρετα και τα σχετικά όρια, κάτω από τα οποία θεωρείται ότι εμφανίζεται ξηρασία, και έτσι προσδιορίζεται κάθε φορά ένα ξεχωριστός ορισμός για την ξηρασία. Συνεπώς, το μόνο κοινό που έχουν οι διάφοροι ορισμοί της ξηρασίας, πέρα από τη γενική ιδέα της λειψυδρίας, είναι ότι είναι τελείως εξειδικευμένοι και αυθαίρετοι. Έτσι ενώ ο καθένας νοιώθει τι είναι ξηρασία, δεν είναι εύκολο να την ορίσει και να την εξηγήσει μονοσήμαντα και περιληπτικά. Από όλα αυτά τα παραπάνω προκύπτει ότι η ξηρασία μπορεί να ορισθεί σαν το έλλειμμα (διαφορά) μεταξύ διαθέσιμου νερού και του αναγκαίου (ζητούμενου) νερού, για μία μεγάλη περίοδο του χρόνου σε μία μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Τα ακριβή όρια όμως κάτω από τα οποία γίνεται αποδεκτό ότι υπάρχει ξηρασία δεν μπορούν να καθορισθούν γενικά και απόλυτα, αλλά μόνο σε συνάρτηση με οικονομικά μεγέθη και απαιτήσεις νερού για γενική και παραγωγική χρήση.

1.3 Κατηγορίες ξηρασίας

Η πλήρης κατανόηση του φαινομένου της ξηρασίας ξεφεύγει από τα πλαίσια μελέτης της υδρολογίας μιας και πρόκειται για ένα φαινόμενο που μπορεί να αναλυθεί σε βάθος μόνο από διεπιστημονική προσέγγιση, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ίσως το δυσκολότερο κομμάτι στην κατανόηση του υδρολογικού φαινομένου. (Δαλέζιος, 2004).

Η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο, που τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω κοινωνικό-οικονομικών αναπτυχθέντων συνθηκών και όχι υδρολογικών – κλιματικών



μεταβολών παρουσιάζει σημαντική αύξηση στη συχνότητα εμφάνισής του, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι αναρίθμητοι ορισμοί που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία οι οποίοι σχετίζονται με μετεωρολογικές, υδρολογικές, βιολογικές, οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες που αφορούν στη μετεωρολογική-κλιματική, στη γεωργική, στην υδρολογική και στην κοινωνικοοικονομική ξηρασία (π.χ. Heim, 2002) και μία ακόμα κατηγορία την επιχειρησιακή. Η ξηρασία λοιπόν διακρίνεται στις εξής πέντε κατηγορίες:

- τη μετεωρολογική-κλιματική,
- την υδρολογική,
- τη γεωργική και την
- κοινωνικοοικονομική ξηρασία.
- επιχειρησιακή ξηρασία

Η εμφάνιση ξηρασίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ενός φυσικού φαινομένου με τη λειτουργία των υδατικών συστημάτων από τον άνθρωπο, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε νερό. Συγκεκριμένα οι 5 κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω αναλύονται ως εξής:

- **Η μετεωρολογική-κλιματική ξηρασία.**

Ο ορισμός της πραγματοποιείται με βάση την απόκλιση της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, αριθμός ημερών βροχής) από την αναμενόμενη βροχόπτωση, βάσει του κλίματος της μελετώμενης περιοχής. Η μετεωρολογική ξηρασία προσδιορίζει το βαθμό έλλειψης βροχοπτώσεων από το όριο που δείχνει τις κανονικές συνθήκες (π.χ. το μέσο) σε μια χρονική περίοδο, και τη διάρκεια της περιόδου με μειωμένες βροχοπτώσεις. Οι ορισμοί της μετεωρολογικής ξηρασίας εξαρτώνται από την περιοχή, καθώς οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που έχουν ως αποτέλεσμα έλλειψη βροχόπτωσης είναι αρκετά μεταβλητές από περιοχή σε περιοχή. Η μετεωρολογική ξηρασία, εκτός από βροχοπτώσεις λιγότερες από τις κανονικές, μπορεί επίσης να υποδηλώνει υψηλότερες θερμοκρασίες,



ταχύτατους ανέμους, χαμηλή σχετική υγρασία, αυξημένη εξατμισοδιαπνοή, λιγότερες νεφώσεις και περισσότερη ακτινοβολία με αποτέλεσμα μειωμένη κατακράτηση ακτινοβολίας, μικρότερη απορροή, μειωμένη διήθηση και λιγότερη αναπλήρωση των υπογείων υδάτων. Σε πολλές περιπτώσεις, ο βασικός δείκτης της διαθεσιμότητας ύδατος είναι η βροχόπτωση.

- **Η γεωργική ξηρασία.**

Ο ορισμός της γεωργικής ξηρασίας μπορεί να διαχωριστεί στις επιμέρους περιπτώσεις μελέτης της ξηρικής και αρδευόμενης γεωργίας. Ορίζεται ως έλλειψη της εδαφικής υγρασίας, μετά από μια μετεωρολογική ξηρασία, η οποία έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγή ή/και στην ανάπτυξη της βλάστησης, για την περίπτωση της ξηρικής γεωργίας, ενώ για την περίπτωση της αρδευόμενης γεωργίας η γεωργική ξηρασία ορίζεται ως: έλλειψη ύδατος στις περιοχές άρδευσης λόγω ξηρασίας στους επιφανειακούς ή υπόγειους υδατικούς πόρους που χρησιμοποιούνται για γεωργικές χρήσεις.

Η γεωργική ξηρασία ορίζεται με βάση τις επιδράσεις που έχει η μετεωρολογική ξηρασία στη γεωργία. Είναι πάντα αποτέλεσμα της ανεπάρκειας της εδαφικής υγρασίας να καλύψει τις ανάγκες διαπνοής των φυτών, ώστε να ξεκινήσει ή να συνεχιστεί η ανάπτυξή τους. Οι ανάγκες σε νερό των φυτών εξαρτώνται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, τα βιολογικά χαρακτηριστικά κάθε είδους, το στάδιο ανάπτυξης που βρίσκονται και τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Η κύρια παράμετρος που εξετάζεται είναι η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Μαμάσης & Κουτσογιάννης 2007).

- **Η υδρολογική ξηρασία.**

Η υδρολογική ξηρασία αφορά στις επιπτώσεις της έλλειψης βροχόπτωσης σε ένα υδρολογικό σύστημα. Αναφέρεται στην ελάττωση της παροχής σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Οι υδρολογικές ξηρασίες είναι συνήθως εκτός φάσης ή υστερούν σε εμφάνιση από τις μετεωρολογικές και γεωργικές ξηρασίες επειδή χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να φανούν τα ελλείμματα των βροχοπτώσεων στα στοιχεία του υδρολογικού συστήματος. Η υδρολογική ξηρασία μπορεί να μετρηθεί ως όριο στα επίπεδα της ροής



του ρέματος, της λίμνης και των υπογείων υδάτων. Σχετίζεται με τα αποτελέσματα της μειωμένης βροχόπτωσης στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή του νερού και εκδηλώνεται με τη μείωση της εδαφικής υγρασίας, της παροχής των ποταμών και πηγών, της στάθμης λιμνών και ταμιευτήρων και των αποθεμάτων των υπόγειων νερών.

- **Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία.**

Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία ουσιαστικά εκφράζει την τρωτότητα της κοινωνίας στην έλλειψη νερού. Συνδέει όλες τις προηγούμενες παραμέτρους με την προσφορά και ζήτηση αγαθών που σχετίζονται με τη χρήση νερού, όπως το πόσιμο νερό, τα γεωργικά προϊόντα και την υδροηλεκτρική ενέργεια. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία συμβαίνει όταν η ζήτηση για αυτά τα αγαθά ξεπερνά την προσφορά ως αποτέλεσμα της έλλειψης νερού, όμως η εμφάνισή της εξαρτάται σημαντικά και από τις κοινωνικές και οικονομικές διαδικασίες προσφοράς και ζήτησης των παραπάνω αγαθών. Ακόμη, μπορεί να προκληθεί και μέσα από πολιτικές διαδικασίες, όπως οι διαμάχες μεταξύ κρατών και κοινωνικών ομάδων για τη χρήση του νερού. Σύμφωνα με τον Wilhite (Wilhite, 2005), η κοινωνικό-οικονομική ξηρασία εμπεριέχεται στην γεωργική και στην υδρολογική.

- **Η επιχειρησιακή ξηρασία.**

Οι ξηρασίες μπορεί να έχουν επιπτώσεις στα συστήματα υδροδότησης οδηγώντας σε ελλείμματα νερού. Αυτού του είδους τα ελλείμματα ορισμένες φορές ορίζονται ως επιχειρησιακή ξηρασία, και σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του περιβαλλοντικού, οικονομικού και κοινωνικού συστήματος μπορεί να έχει οικονομικά απροσδιόριστες συνέπειες. Τόσο η μείωση της διαθεσιμότητας ύδατος όσο και οι επιπτώσεις αυτής εξαρτώνται, εκτός από τη σημασία του γεγονότος ξηρασίας και από την αποτελεσματικότητα των μέτρων περιορισμού που έχουν προσαρμοστεί στα συστήματα υδροδότησης και στα κοινωνικό-οικονομικά συστήματα (MedroPlan, 2006).



Όσον αφορά στην έμφαση που δίνεται στην διαχείριση των υδατικών πόρων, η υδρολογική ξηρασία παρουσιάζει την υψηλότερη (MedroPlan, 2006).

Ουσιαστικά οι παραπάνω ορισμοί αποτελούν επιμέρους λειτουργικούς ορισμούς οι οποίοι καθορίζουν την έναρξη, τη σοβαρότητα και το τέλος μιας ξηρασίας και αναφέρονται στον τομέα, το σύστημα ή την κοινωνική ομάδα που υφίσταται τις επιπτώσεις της ξηρασίας. Σε κάθε περίπτωση, οι επιπτώσεις της ξηρασίας εμφανίζονται όταν τα συστήματα παροχής ύδατος δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες και τη ζήτηση που καλύπτονται υπό κανονικές συνθήκες.

1.4 Βασικά Χαρακτηριστικά Ξηρασίας

Τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφόρων επεισοδίων ξηρασίας είναι:

- η ένταση (ελάττωση της βροχόπτωσης και επιπτώσεις),
- η διάρκεια,
- η χωρική κατανομή,
- η καταστροφικότητα

1.4.1 Ένταση

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

1.4.2 Διάρκεια

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

1.4.3 Χωρική κατανομή

Η **γεωγραφική έκταση** κάθε ξηρασίας συναρτάται άμεσα με τα μετεωρολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και τα υπάρχοντα έργα μεταφοράς



νερού. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση τεχνολογικά τροποποιημένων υδατικών συστημάτων που τροφοδοτούνται με νερό από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (π.χ. μέσω έργων εκτροπής ποταμών) οι οποίες απέχουν σημαντικά μεταξύ τους. Στα συστήματα αυτά, η γεωγραφική έκταση της ξηρασίας είναι παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική, αφού μπορεί να επηρεάσει μόνο ένα τμήμα των υδατικών πόρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας που τροφοδοτείται από τις πλούσιες σε βροχοπτώσεις λεκάνες του Μόρνου και του Ευήνου (δυτική Ελλάδα) και από τις σχετικά ξηρότερες λεκάνες του Β. Κηφισού και του Χαράδρου (ανατολική Ελλάδα). Η ανάλυση που έγινε στα δεδομένα εμφάνισης των τύπων ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και των υψών βροχής που καταγράφηκαν σε 5 σταθμούς των παραπάνω περιοχών, έδειξε ότι η διαφοροποίηση των τύπων κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε έτη που είναι υγρά για τη δυτική περιοχή και ξηρά για την ανατολική ή το αντίστροφο (Μαμάσης 1997). Συγκεκριμένα από τα 20 έτη που μελετήθηκαν, σε δύο έτη η βροχόπτωση ήταν αυξημένη κατά 17% στη δυτική περιοχή και μειωμένη κατά 25% στην ανατολική, ενώ σε δύο άλλα έτη η κατάσταση ήταν ανεστραμμένη, αφού η βροχόπτωση ήταν μειωμένη κατά 15% στη δυτική περιοχή και αυξημένη κατά 15% στην ανατολική.

1.4.4 Καταστροφικότητα

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

1.5 Παράμετροι εκτίμησης της ξηρασίας

Η ξηρασία είναι φαινόμενο που μπορεί να συμβεί σχεδόν σε όλες τις κλιματικές ζώνες της γης, αλλά τα χαρακτηριστικά του διαφέρουν σημαντικά από τη μία



περιοχή στην άλλη. Η πραγματοποίηση μετεωρολογικής ξηρασίας (μείωση της βροχόπτωσης) δεν σημαίνει απαραίτητα και την εμφάνιση ελλείμματος υδατικών πόρων σε μια περιοχή.

Αυτό εξαρτάται από:

1. τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (που τελικά πραγματοποιείται)
2. τα χαρακτηριστικά της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής
3. τα χαρακτηριστικά της περιοχής (γεωμορφολογία, ταμιευτήρες)
4. τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων
5. άλλες παραμέτρους (κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές)

1.5.1 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης

Το ετήσιο ύψος βροχής και η χρονική και χωρική κατανομή του αποτελούν θεμελιώδη κλιματικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν σημαντικά στις διάφορες περιοχές της γης. Με βάση τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά έχουν κατά κανόνα προσαρμοστεί η τοπική χλωρίδα και πανίδα και διαμορφωθεί οι σχετικές με το νερό ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα μεγαλύτερα ετήσια ύψη βροχής (άνω των 1500 mm) πραγματοποιούνται στις τροπικές περιοχές γύρω από τον ισημερινό, ενώ τα μικρότερα (κάτω των 300 mm) στις μεγάλες ερήμους (συνήθως βρίσκονται σε γεωγραφικά πλάτη γύρω στις 30°) και τους πόλους. Στις τροπικές περιοχές η βροχόπτωση παρουσιάζει ισοκατανομή στους μήνες, σε αντίθεση με τις ερήμους, όπου είναι δυνατόν να μην πραγματοποιηθεί βροχή για δύο χρόνια και σε μια ξαφνική νεροποντή να καταγραφεί βροχόπτωση διπλάσια από τη μέση ετήσια τιμή. Στις υπόλοιπες περιοχές της γης, η βροχόπτωση διαφέρει ανάλογα με την εποχή του έτους και συνήθως υπάρχουν μία ή περισσότερες ξηρές περιόδους μερικών μηνών. Η χρονική κατανομή της βροχής είναι εξίσου σημαντική με την ποσότητα για την ανάπτυξη της βλάστησης. Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές κοντά στον ισημερινό, όπου επικρατεί μια διαχωρισμένη ξηρή περίοδος μεγαλύτερη των δύο μηνών, όταν οι περιοχές αυτές είναι κάτω από την επίδραση των υποτροπικών αντικυκλώνων. Αν και το ετήσιο ύψος βροχής είναι μεγαλύτερο των 1000 mm, δεν συντηρείται το τροπικό δάσος που απαιτεί βροχόπτωση όλο το έτος, αλλά επικρατεί



υψηλό σκληρό χορτάρι Σαβάνας με διασκορπισμένα, χαμηλά φυλλοβόλα δένδρα, ανθεκτικά σε αυτή την ολιγόμηνη 'ξηρασία'.

1.5.2 Χαρακτηριστικά δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Ο όρος δυνητική εξατμισοδιαπνοή περιγράφει το σύνολο των απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από τις τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα ανέμου αλλά το τμήμα που αφορά στη διαπνοή των φυτών συναρτάται άμεσα από τις βιολογικές λειτουργίες του συγκεκριμένου είδους, στις συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ανέμου, ενώ μειώνεται με την αύξηση της σχετικής υγρασίας. Κατά συνέπεια είναι μεγάλη στις θερμές περιοχές και μικρή στις ψυχρές, ενώ είναι ιδιαίτερα χαμηλή στις πολικές αφού οι χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν στην αύξηση της σχετικής υγρασίας για δεδομένη ποσότητα νερού στον αέρα και στη δημιουργία ενός 'υγρού' περιβάλλοντος. Έτσι αν πραγματοποιηθούν 400 mm ετήσιας βροχής σε ένα ζεστό κλίμα θα υποστηρίξουν μόνο αραιή βλάστηση αλλά σε ένα ψυχρό κλίμα μπορούν να συντηρήσουν ένα δάσος. Συγκεκριμένα, δάση κωνοφόρων (taiga) επιβιώνουν σε ψυχρές περιοχές (Καναδάς, Αλάσκα, Νορβηγία, Σιβηρία), οι οποίες παρουσιάζουν βροχόπτωση μικρότερη από 500 mm ανά έτος. Βορειότερα, σε πολικές περιοχές με βροχόπτωση μικρότερη από 200 mm ανά έτος, συντηρείται η βλάστηση της τούνδρας που αποτελείται από φυτά με πολύ μικρή περίοδο ανάπτυξης, πολύ μικρά δένδρα και διασκορπισμένη ξυλώδη χαμηλή βλάστηση. Αντίθετα, σε θερμές περιοχές κοντά στον ισημερινό, η διατήρηση τροπικού δάσους απαιτεί βροχόπτωση μεγαλύτερη από 1500 mm ανά έτος, ενώ ακόμη και περιοχές με βλάστηση σαβάνας (χορτάρι, χαμηλά δένδρα) δέχονται περίπου 1000 mm ετήσιας βροχόπτωσης.

1.5.3 Υδρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

Η βροχόπτωση και η εξάτμιση σε ένα υδατικό σύστημα καθορίζουν την ποσότητα αλλά όχι και τη χρονική εξέλιξη της επιφανειακής ή υπόγειας απορροής, αφού η τελευταία εξαρτάται από:



τα γεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης και την παρουσία υδραυλικών έργων που ταμιεύουν ή μεταφέρουν νερό. Οι παράμετροι αυτές επιδρούν σημαντικά στο συντελεστή απορροής ο οποίος μπορεί να αυξηθεί με την αλλαγή των χρήσεων γης (αστικοποίηση, πυρκαγιές) ή να μειωθεί με τη κατασκευή ταμιευτήρων, έργων επαναφόρτισης υπόγειων υδροφορέων ή αναδάσωσης. Η αύξηση του συντελεστή απορροής μειώνει τα διαθέσιμα αποθέματα στο υδατικό σύστημα και κάνει πιο πιθανή την εμφάνιση υδρολογικής ξηρασίας. Ακόμη, μειώνει τη χρονική υστέρηση που έχει η υδρολογική ξηρασία σε σχέση με τη μετεωρολογική. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η λειτουργία έργων ταμίευσης και μεταφοράς νερού που μπορούν να ρυθμίσουν την ξηρασία χωροχρονικά, σε κατάντη ή γειτονικές περιοχές για μήνες ή χρόνια. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να αποσοβηθεί η υδρολογική ξηρασία, απελευθερώνοντας νερό σε ξηρές περιόδους ή αντίθετα να προκληθεί (ακόμη και σε υγρές περιόδους) δεσμευοντάς το. Η δεύτερη περίπτωση είναι ιδιαίτερα επίκαιρη στις περιπτώσεις που υπάρχουν ανταγωνιστικές χρήσεις στην ίδια περιοχή ή υδρολογικά συστήματα που ανήκουν σε περισσότερες από μία χώρες. (Έβρος, Νείλος, Τίγρης).

1.5.4 Διαχείριση των υδατικών συστημάτων

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

Η διαχείριση των υδατικών συστημάτων προϋποθέτει τη μελέτη του ισοζυγίου μεταξύ της ζήτησης νερού (και των τάσεών της) και της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων (και της αβεβαιότητάς της). Ακόμη, περιλαμβάνει τη μελέτη των



οικονομικών παραμέτρων που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος (κόστος μεταφοράς νερού) αλλά και τη σχέση των τιμολογίων και της ζήτησης νερού.

Οι τρόποι και μεθοδολογίες διαχείρισης των υδατικών συστημάτων αναφέρονται πρωτίστως στη λειτουργία του υφιστάμενου συστήματος και αφορούν στη ρύθμιση της λειτουργίας των ταμιευτήρων, στον επιμερισμό της απόληψης νερού ανά κύρια, δευτερεύουσα ή εφεδρική πηγή, και στη μεταφορά νερού μέσω του δικτύου εξωτερικών υδραγωγείων. Μπορεί επίσης να αναφέρονται και σε πρόσθετα έργα για την ενίσχυση του συστήματος, εφόσον αυτά απαιτούνται.

1.5.5 Άλλες παράμετροι

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



1.6 Αίτια ξηρασίας

Η αβεβαιότητα στον ακριβή καθορισμό τόσο του χρονικού διαστήματος διατήρησης του φαινομένου όσο και τα όρια της περιοχής στην οποία εμφανίζεται, οδηγεί στην δημιουργία πολλών υποθέσεων γύρω από τα αίτια εμφάνισης του φαινομένου της ξηρασίας (Bryant 1991). Η εμφάνιση της ξηρασίας δεν αποκλείεται να είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης ορισμένων παραμέτρων ή να μην ευθύνεται καμία από αυτές και να πρόκειται για ένα τυχαίο γεγονός.

Οι κύριες θεωρίες που ερμηνεύουν την εμφάνιση κάποιων επεισοδίων ξηρασίας είναι:

- Αλλαγές στη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας
- Φαινόμενο El – Niño
- Αστρονομικοί Παράγοντες

1.6.1 Αλλαγές στη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας

Σύμφωνα με του Gribbin (1978), Brysson και Murray (1979) και Lamb (1982) η εμφάνιση ξηρασίας είναι αποτέλεσμα μιας γενικής αλλαγής στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Πιστεύεται ότι οι μετακινήσεις των κυμάτων Rossby (πλανητικά κύματα) είναι υπεύθυνες, τόσο για την πρόκληση μικρής διάρκειας ξηρασίας όσο και για ημιμόνιμες καταστάσεις του κλίματος σε συγκεκριμένες περιοχές του βορείου Ημισφαιρίου. Συγκεκριμένα, οι Brysson και Murray (1977) υποστηρίζουν ότι η ξηρασία στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου αλλά και της βόρειας Αφρικής οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θέση των κυμάτων Rossby. Η εξαιρετικής έντασης και καταστροφικότητας ξηρασία, που καταγράφηκε το 1976 στη Μεγάλη Βρετανία, δύναται να ήταν αποτέλεσμα μετακίνησης του πολικού αεροχειμάρρου και του πολικού μετώπου προς τα βόρεια, επιτρέποντας την επέκταση του αντικυκλώνα του Ατλαντικού μέχρι τη Μεγάλη Βρετανία, με αποτέλεσμα την επικράτηση μεγάλης ευστάθειας στη περιοχή και απουσία βροχόπτωσης.

Ωστόσο και άλλοι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία, μικρότερης βεβαίως σημασίας. Το ισοζύγιο της ακτινοβολίας μπορεί να μεταβληθεί από την εισαγωγή μεγάλης ποσότητας ηφαιστειακής τέφρας ή



λεπτόκοκκου κονιορτού από τις ερήμους με άμεσο αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των αερίων μαζών και την εμφάνιση του φαινομένου της ξηρασίας στις περιοχές αυτές. Τα φαινόμενα αυτά περιγράφονται και από ιστορικές αναφορές. Τέλος, η διέλευση των αερίων μαζών πάνω από ψυχρές θαλάσσιες μάζες έχει ως αποτέλεσμα το μη πλήρη εμπλουτισμό αυτών με τα απαραίτητα ποσά υγρασίας οπότε έμμεσα παρατηρείται ελάττωση του υετού στις περιοχές όπου αυτές επηρεάζουν.

1.6.2 Το Φαινόμενο El – Nino

Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα των ωκεανών, σε συνδυασμό με την αέναη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ατμόσφαιρας και ωκεανών, αποτελούν τους κύριους παράγοντες καθορισμού των κλιμάτων στην επιφάνεια της γης. Η ελάττωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας, η οποία μπορεί να προκληθεί από την μεταβολή της τροχιάς των θαλάσσιων ρευμάτων, δύναται να προκαλέσει μεταβολή στη συνηθισμένη εμφάνιση των καιρικών φαινομένων σε μια μεγάλη ή μικρή περιοχή στην επιφάνειά του πλανήτη, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί ως ένα επιπλέον αίτιο εμφάνισης ξηρασίας.

Το φαινόμενο El Nino εμφανίζεται στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού. Στο τέλος κάθε ημερολογιακού έτους, εμφανίζεται κατά μήκος των ακτών του Ισημερινού και του Περού, ένα ασθενές, θερμό ωκεάνιο ρεύμα. Ορισμένες χρονιές το ρεύμα αυτό ενισχύεται σημαντικά από απόψεως θέρμανσης και εκτείνεται μέχρι και το κέντρο του Ειρηνικού ωκεανού. Ο χαρακτηρισμός El Nino χρησιμοποιείται μόνο για την περιγραφή των ακραίων επεισοδίων. Η ισχυρή θέρμανση του Ειρηνικού ωκεανού συνδέεται με πλήθος καιρικών ανωμαλιών που παρατηρούνται κατά την διάρκεια αυτών των επεισοδίων.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες στο ανατολικό τμήμα του Ειρηνικού σημειώνονται υψηλές πιέσεις, ενώ στο δυτικό τμήμα του Ειρηνικού (Ινδονησία, Αυστραλία) σημειώνονται χαμηλές πιέσεις. Από την άποψη των επιφανειακών ανέμων, στη περιοχή επικρατούν οι αληγείς άνεμοι, οι οποίοι είναι ανατολικής συνιστώσας. Κατά τη διάρκεια, όμως, του φαινομένου El Nino, η βαρομετρική πίεση του ανατολικού Ειρηνικού μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα, η πίεση στο δυτικό τμήμα του Ειρηνικού αυξάνεται. Οι επιφανειακοί αληγείς άνεμοι εξασθενούν επιτρέποντας έτσι στα θερμά



επιφανειακά νερά να επεκταθούν προς τον ανατολικό Ειρηνικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση θερμού νερού στον ανατολικό Ειρηνικό, ενώ τα ψυχρά και πλούσια σε τροφή νερά από τα βαθύτερα στρώματα δε μπορούν να αναδυθούν στις παράκτιες περιοχές της Αμερικής και έτσι τα θαλάσσια είδη της περιοχής υποφέρουν από έλλειψη τροφής και οξυγόνου. Αυτό το μοντέλο παλινδρόμησης της ατμοσφαιρικής πίεσης ανάμεσα στο δυτικό και ανατολικό τμήμα του Ειρηνικού, είναι σήμερα γνωστό με τον όρο «Ταλάντωση Νότιας Κύμανσης» (El nino Southern Oscillation, ENSO).

Οι περιοχές που επηρεάζονται από την ENSO κυκλοφορία, σύμφωνα με τους Bhalme et al. (1983), θεωρούνται περιοχές εμφάνισης ακραίων υδρολογικών φαινομένων και συγκεκριμένα ξηρασιών και πλημμυρών. Τα φαινόμενα ENSO παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και την ένταση της ξηρασίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση της εμφάνισης του φαινομένου της ξηρασίας.

1.6.3 Αστρονομικοί Παράγοντες

Επίσης υπάρχουν θεωρήσεις ότι οι ηλιακές κηλίδες και οι σεληνιακοί κύκλοι των 18.6 ετών αποτελούν παράγοντες ρύθμισης της εμφάνισης ξηρασίας ή βροχόπτωσης στον πλανήτη. Η περιοδική εμφάνιση τους αποτελεί μέσο πρόγνωσης της ξηρασίας.

Σύμφωνα με τον Currie (Currie, 1981; 1984) έχει διαπιστωθεί σχέση ανάμεσα στους κύκλους των ηλιακών κηλίδων με την κυκλοφορία στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Από την διακύμανση της πολικότητας των ηλιακών κηλίδων στο χρόνο παρατηρείται κύκλος 22 ετών (περιοδικότητα), ο οποίος αποτελείται από δύο 11-ετής κύκλους αντίθετης πολικότητας. Τα ελάχιστα της πολικότητας, στη διακύμανση των ηλιακών κηλίδων, αντιστοιχούν σε επεισόδια ξηρασίας, μικρής ή μεγάλης έντασης.

Οι σεληνιακοί κύκλοι των 18.6 ετών αντιπροσωπεύουν τη διακύμανση της τροχιάς της σελήνης, σε σχέση με τον ισημερινό του ηλίου. Η τροχιά της σελήνης δημιουργεί, σε κανονικές συνθήκες, γωνία 5° από τον ισημερινό του ηλίου. Στο τέλος μιας πλήρους περιστροφής, η σελήνη δεν επιστρέφει στην αρχική της θέση αλλά έχει μετατοπιστεί λίγο μακρύτερα στο εσωτερικό της τροχιάς της. Κάθε 9.3 έτη, η τροχιά της σελήνης φτάνει στο υψηλότερο σημείο και τότε η σελήνη βρίσκεται πιο κοντά στον Ισημερινό της Γης, δηλαδή βρίσκεται στη θέση του ελαχίστου. Με την έλευση



των επόμενων 9.3 ετών, η σελήνη επιστρέφει στην αρχική της θέση, κ.ο.κ. Σύμφωνα με τον Currie (1981; 1984) αποδεικνύεται ότι τα μέγιστα των 18.6 ετών, σεληνιακού κύκλου, συνδέονται με την εμφάνιση πλημμύρων ή ξηρασιών σε διάφορες περιοχές. Παρατηρείται λοιπόν ότι υπάρχουν και θεωρήσεις ότι το φαινόμενο της Νότιας Κύμανσης (ENSO) και οι διάφοροι αστρονομικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την εμφάνιση ξηρασίας σε ορισμένες περιοχές. Τα φαινόμενα αυτά όμως εκφράζουν μόλις το 15-30% της ολικής διακύμανσης της βροχόπτωσης, οπότε το 70% περίπου της πιθανότητας εμφάνισης ξηρασίας σε κάποια περιοχή οφείλεται σε άλλους κλιματικούς παράγοντες που τελούν ακόμα υπό έρευνα (Bryant, 1991).

1.7 Επιπτώσεις Ξηρασίας

Οι επιπτώσεις της ξηρασίας παρουσιάζουν σοβαρές κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις περιοχές στις οποίες εμφανίζονται αφού οι υπάρχοντες επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι βαθμιαία μπορεί να μειώνονται. Οι συνέπειες είναι πιο εμφανείς αρχικά στην ύδρευση νησιών και πόλεων χωρίς ανεπτυγμένο σύγχρονο υδροδοτικό σύστημα, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην άρδευση από επιφανειακά και υπόγεια νερά όλων των γεωργικών περιοχών. Επιπλέον, η μείωση των υδατικών πόρων συμβάλλει και στην υποβάθμιση της ποιότητας αυτών με ότι αυτή συνεπάγεται. Ωστόσο, οι δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον γίνονται εκτός από σοβαρές και επικίνδυνες μιας και αυξάνεται η πιθανότητα δασικών πυρκαγιών. Επιπλέον προκαλείται ξήρανση και προσβολή πολλών δασικών ειδών από ασθένειες και έντομα, υποβάθμιση των βιοτόπων της άγριας πανίδας, μείωση του πληθυσμού της ιχθυοπανίδας στα υδατορεύματα, ρύπανση της ατμόσφαιρας, αισθητική υποβάθμιση των τοπίων κ.λπ.

Από την διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει λοιπόν ότι η ξηρασία συμβάλλει σε σημαντικές απώλειες των γεωργικών καλλιεργειών (Karl and Koscielny, 1982; Austin et al., 1998; Quiring and Parakyriakou, 2003), καταστροφές στα φυσικά οικοσυστήματα (Kogan, 1995, 1997), αύξηση στον κίνδυνο εμφάνισης δασικών πυρκαγιών (Orwing and Abrams, 1997; Abrams et al., 1998; Pausas, 2004) υποβάθμιση του εδάφους και ερημοποίηση (Schlesinger et al., 1990; Glantz, 1994; Bruins and Berliner, 1998; Nicholson et al., 1998; Pickup, 1998). Επίσης μπορούν να



προκαλέσουν κοινωνική ανησυχία (Morales et al., 2000), υποσιτισμό και πτώχευση (Garcia, 1984; Kanti, 1998).

Λόγω της αυξανόμενης ερημοποίησης (Mabbutt, 1985; Le Houerou, 1996; Geist and Lambin, 2004) η ικανότητα υπολογισμού των συνεπειών της ξηρασίας είναι ζωτικής σημασίας. Στα πλαίσια της λεγόμενης πραγματοποιούμενης κλιματικής αλλαγής έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες ξηρασίας (Byun and Wilhite, 1999) και έχει δοθεί προτεραιότητα στην ανάπτυξη σχεδίων παρακολούθησης ξηρασίας (drought monitoring plans) σε πολλές από αυτές (Wilhite, 1997; Svoboda et al., 2002).

Οι επιπτώσεις της ξηρασίας ποικίλουν ως προς τη σοβαρότητά τους, τη διάρκεια τους και τη χωρική τους έκταση. Αντίθετα με τις πλημμύρες, η εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεών τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθόσον οι συνέπειες μιας ξηρασίας μπορούν να εμφανιστούν πολλά χρόνια μετά τον τερματισμό του φαινομένου (Μιμίκου & Φωτόπουλος, 2004). Παρόλο που είναι κοινά αποδεκτός ο κίνδυνος από τις ξηρασίες, δεν υπάρχει Ευρωπαϊκή Οδηγία μέχρι σήμερα για την αντιμετώπιση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης λόγω ξηρασιών (όπως αντίθετα υπάρχει οδηγία για την αντιμετώπιση των πλημμύρων). Κατά συνέπεια, ο ορθολογικός τρόπος διαχείρισης του ακραίου υδρολογικού φαινομένου της ξηρασίας πρέπει να προηγείται της εμφάνισης και συνεπώς αντιμετώπισης πλέον των επιπτώσεων της πριν την επικράτησή της, αφού αυτός είναι και ο προτεινόμενος ορθολογικός τρόπος διαχείρισης ενός ακραίου φαινομένου (Μπαλούτσος et al. 2006).

Η παράγραφος αυτή συνδέεται άρρηκτα με την παράγραφο που ακολουθεί και αφορά στην διαχείριση του φαινομένου της ξηρασίας.

1.8 Διαχείριση Ξηρασίας

Έχει καταστεί σαφές πλέον ότι τόσο η ξηρασία όσο και η λειψυδρία είναι διεπιστημονικά φαινόμενα κατά το στάδιο μελέτης και τεχνικού τους προσδιορισμού, ωστόσο αποτελούν και υπόθεση ευθύνης όχι μόνο για τους φορείς διαχείρισης των υδάτινων πόρων αλλά και για πολλούς ακόμα φορείς που άπτονται των συνεπειών που μπορεί να προκαλέσουν τα φαινόμενα αυτά. Η ξηρασία έχει άμεσες επιπτώσεις στον κοινωνικό αντίκτυπο αλλά και σε οικονομικούς τομείς που χρησιμοποιούν το νερό και εξαρτώνται από αυτό, όπως στη γεωργία, τον τουρισμό,



τη βιομηχανία, την ενέργεια και τις μεταφορές. Από την πλευρά του τομέα της ενέργειας που προαναφέρθηκε, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποτελεί φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας, εξαρτάται απόλυτα από τους υδατικούς πόρους. Η ξηρασία έχει ευρύτερες επιπτώσεις στους φυσικούς πόρους εν γένει, μέσω των αρνητικών «παρενεργειών» στην βιοποικιλότητα, την ποιότητα του νερού, την αύξηση των κινδύνων δασικών πυρκαγιών και την υποβάθμιση του εδάφους.

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

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

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

Η **αύξηση του διαθέσιμου νερού** συνήθως γίνεται με την κατασκευή έργων άντλησης υπόγειων υδροφορέων, ταμίευσης επιφανειακών υδάτων (ώστε να είναι



διαθέσιμα τις ξηρές περιόδους) και μεταφοράς νερού από γειτονικές περιοχές. Εναλλακτικά, υπάρχουν οι τεχνικές της αφαλάτωσης θαλάσσιου ή υφάλμυρου νερού και της τροποποίησης καιρού (τεχνητή βροχή). Όμως, η αφαλάτωση έχει σχετικά μεγάλο κόστος, ενώ η τεχνητή βροχή έχει αμφίβολα αποτελέσματα και έτσι οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

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

Η **βέλτιστη λειτουργία των υδατικών συστημάτων** προϋποθέτει την μελέτη ορθολογικών, αποδοτικών και βιώσιμων τρόπων και μεθοδολογιών λειτουργίας με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και



οικονομικά πρόσφορη κάλυψη της ζήτησης, μέσω της κατάλληλης αξιοποίησης των υδατικών πόρων που διατίθενται για την κάλυψη της ζήτησης αυτής. Ειδικότερα για τη μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων είναι απαραίτητη η χρήση εργαλείων πληροφορικής μέσω των οποίων προσδιορίζονται τα σημεία προσφοράς και ζήτησης νερού και πραγματοποιείται η μαθηματική προσομοίωση του υδατικού συστήματος. Οι αναζητούμενοι τρόποι διαχείρισης θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα (δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι), αποδοτικότητα (δηλαδή να αξιοποιούν τους υδατικούς πόρους στο μέγιστο δυνατό βαθμό), και βιωσιμότητα (δηλαδή να μη δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των αναγκών του σήμερα). Το αποτέλεσμα της βέλτιστης λειτουργίας είναι η κάλυψη της ζήτησης να γίνεται με αξιοπιστία (μείωση της πιθανότητας μη κάλυψης της ζήτησης νερού σε αποδεκτά επίπεδα), με νερό ασφαλούς ποιότητας, με μεθόδους που δεν δημιουργούν προβλήματα στο περιβάλλον (οικοσυστήματα) και με οικονομικά πρόσφορο τρόπο (Κουτσογιάννης κ.α, 2002). Ειδικότερα η έννοια της αξιοπιστίας αναφέρεται πρωτίστως στη μείωση της αβεβαιότητας που προκαλεί η μεταβλητότητα της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων (ξηρασίες) αλλά περιλαμβάνει και άλλες πηγές αβεβαιότητας, όπως τα δυσμενή έκτακτα περιστατικά (βλάβες) στα έργα του συστήματος (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2007).

Μια διορθωτική προσέγγιση βασίζεται στην εφαρμογή μέτρων και δράσεων μετά την εκκίνηση και την αντίληψη του φαινομένου ξηρασίας. Η προσέγγιση αυτή λαμβάνεται σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Συχνά έχει ως αποτέλεσμα αναποτελεσματικές τεχνικές και οικονομικές λύσεις, καθώς οι δράσεις λαμβάνονται μέσα σε λίγο χρόνο για την εκτίμηση των βέλτιστων δράσεων και η συμμετοχή των άμεσα ενδιαφερόμενων είναι πολύ περιορισμένη.

Μια προληπτική προσέγγιση περιλαμβάνει τον έγκαιρο σχεδιασμό των μέτρων, με τα κατάλληλα εργαλεία σχεδιασμού και τη συμμετοχή των άμεσα ενδιαφερομένων. Η προληπτική προσέγγιση βασίζεται τόσο στα βραχυπρόθεσμα όσο και στα μακροπρόθεσμα μέτρα και περιλαμβάνει τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή των συστημάτων για μια έγκαιρη προειδοποίηση των συνθηκών ξηρασίας. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσέγγιση για «τη διαχείριση της



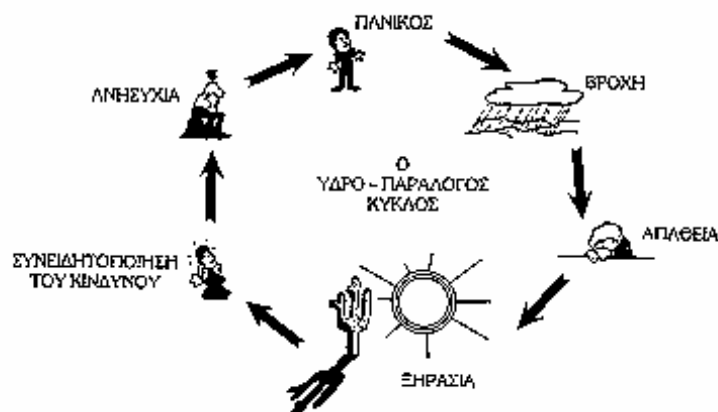
επικινδυνότητας». Μια προληπτική προσέγγιση έγκειται στον έγκαιρο σχεδιασμό των απαραίτητων μέτρων για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ξηρασίας. Μια τέτοια προσέγγιση περιλαμβάνει ετοιμότητα στα εργαλεία σχεδιασμού, ώστε να αποφευχθούν ή να μειωθούν οι συνέπειες μιας δύσκολης κατάστασης, και την εφαρμογή αυτών σε περίπτωση ξηρασίας. Η προληπτική προσέγγιση προβλέπει τη συνεχή καταγραφή των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών και της κατάστασης των υδατικών αποθεμάτων, ώστε να αναγνωριστούν πιθανές καταστάσεις κρίσης και να εφαρμοστούν τα απαραίτητα μέτρα πριν εμφανιστεί πραγματική ανάγκη σε νερό. Εν τούτοις, αν δεν είναι δυνατό να αποφευχθεί μια υδατική κρίση που εμφανίζεται ως φυσική δημόσια καταστροφή (μετά την κυβερνητική ανακοίνωση), το Σχέδιο Απρόοπτης Ξηρασίας υλοποιείται μέχρι την επαναφορά σε κανονικές συνθήκες. Είναι προφανές ότι μια προληπτική προσέγγιση, ακόμα κι αν είναι πιο περίπλοκη, είναι πιο αποτελεσματική από την παραδοσιακή προσέγγιση, καθώς επιτρέπει τον προσδιορισμό εκ των προτέρων μέτρων περιορισμού (τόσο μακροπρόθεσμα όσο και βραχυπρόθεσμα), βελτιώνοντας την ποιότητα των παρεμβάσεων (MedgroPlan, 2006).

Οι ξηρασίες πλέον θεωρούνται κανονικά χαρακτηριστικά της διακύμανσης του κλίματος. Επομένως ανεξάρτητα από τις θεωρήσεις περί αλλαγής του ή όχι από ανθρωπογενείς επιδράσεις, ξηρασίες θα εμφανιστούν αναπόφευκτα. Στην Ελλάδα μετά τις ισχυρές ξηρασίες του 1989-90 και του 2001-2002, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές ενέργειες σε επίπεδο προσφοράς και ζήτησης νερού για τη μείωση των επιπτώσεων από την μελλοντική τους επανεμφάνιση. Ωστόσο ο σχεδιασμός αντιμετώπισης των επιπτώσεων ενός τέτοιου φαινομένου πρέπει να είναι διαρκής και να πραγματοποιείται από διεπιστημονική ομάδα ειδικών με ολιστική προοπτική αφού η ξηρασία είναι η συνισταμένη των αποτελεσμάτων της διατάραξης των μετεωρολογικών, υδρολογικών, αγροτικών και κοινωνικό-οικονομικών συνθηκών μιας περιοχής. Παρακάτω παρουσιάζονται περιληπτικά μέθοδοι για την ορθολογική διαχείριση του ακραίου φαινομένου της ξηρασίας.

1.8.1 Διαχείριση της κρίσης της ξηρασίας (Drought crisis management)

Στην περίπτωση διαχείρισης της κρίσης της ξηρασίας, η αντιμετώπιση των δυσμενών της επιπτώσεων επιχειρείται συχνά με κατασταλτικά κυρίως μέτρα που

λαμβάνονται μετά την εκδήλωσή του φαινομένου. Τέτοιου είδους μέτρα αφορούν αρχικά στην αύξηση της προσφοράς νερού και στη μείωση της ζήτησης του ενώ δεν αποκλείουν και την αποζημίωση των πληγέντων όπου και όποτε είναι αυτό εφικτό. Τα προαναφερθέντα μέτρα διαρκούν τόσο όσο και η ξηρασία ενώ τα αποτελέσματά τους κατά κανόνα δεν κρίνονται ικανοποιητικά ούτε για τους πληγέντες ούτε για του φορείς διαχείρισης. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη υποδομής και αντοχής των συστημάτων που πλήττονται από την ξηρασία αλλά και στην ανετοιμότητα των διαχειριστών των φυσικών πόρων και των υδατικών συστημάτων να εκτιμήσουν εγκαίρως την ένταση, διάρκεια και την περιοχή επικράτησης της ξηρασίας. Κατά το στάδιο διαχείρισης της κρίσης ξηρασίας αρκετά από τα μέτρα και έργα που προτείνονται από τους αρμόδιους φορείς κατά τη διάρκεια της ξηρασίας, εγκαταλείπονται ημιτελή ή δεν κατασκευάζονται καθόλου μόλις αρχίσουν οι βροχοπτώσεις και μετριαστούν οι άμεσες εμφανείς επιπτώσεις της ξηρασίας. Βέβαια αυτές οι επιπτώσεις δεν αργούν να επανέλθουν μέχρι την εμφάνιση ξηρασίας η οποία δύναται να παρουσιάσει πιο δυσμενείς επιπτώσεις. Ο φαύλος αυτός κύκλος “διαχείρισης” της ξηρασίας απεικονίζεται με τον υδρο-παράλογο κύκλο της ξηρασίας (Τσακίρης, 1995) στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί και αποδεικνύει τον κίνδυνο που ενέχει η ξηρασία λόγω της λανθασμένης σύνδεσης της (λήξης της) με ένα επεισόδιο βροχοπτώσης.



Σχήμα 1 - Ο «υδρο-παράλογος» κύκλος της ξηρασίας

(Πηγή: Τσακίρης, Υδατικοί πόροι: Ι Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, 1995).



1.8.2 Διαχείριση του κινδύνου εκδήλωσης ξηρασίας (Risk management)

Η αναποτελεσματικότητα των μεθόδων διαχείρισης “της κρίσης της ξηρασίας” οδηγεί αναπόφευκτα στην λήψη μέτρων και πολιτικών για την διάσπαση του ‘υδρο-παράλογου’ κύκλου της και στην προσαρμογή του σε μέτρα, έργα και πολιτικές που αφορούν στο σχεδιασμό του κινδύνου εκδήλωσης ξηρασίας σε μια περιοχή παρά στη διαχείριση αυτής κατά την επικράτηση. Η πραγματοποίηση σχεδιασμού και η σύνταξη εθνικού σχεδίου και γενικότερα η χάραξη εθνικής πολιτικής και στρατηγικής αντιμετώπισης των ξηρασιών θεωρείται ενέργεια άμεσης προτεραιότητας. Συγκεκριμένα ως σχέδια αντιμετώπισης ξηρασιών ορίζονται οι ενέργειες και τα μέτρα εκείνα που λαμβάνονται εκ των προτέρων από τα κέντρα λήψης των αποφάσεων, τη βιομηχανία αλλά και από τους πολίτες μιας χώρας, για τη μείωση των δυσμενών τους επιπτώσεων.

Οι μέθοδοι σύνταξης και εφαρμογής τέτοιων σχεδίων διαφέρουν από χώρα σε χώρα λόγω των διαφορετικών κλιματικών χαρακτηριστικών, την οικονομία, την κοινωνική της δομή, τους φυσικούς της πόρους κλπ. Σε γενικές γραμμές όμως ένα εθνικό σχέδιο αντιμετώπισης ξηρασίας μπορεί να περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Τη συγκρότηση Τακτικής Επιτροπής από διεπιστημονική ομάδα ειδικών στις ξηρασίες για την επίβλεψη και το συντονισμό του σχεδίου, καθώς και το συντονισμό της πολιτικής μετά τη σύνταξη του σχεδίου και κατά τη διάρκεια εμφάνισης ξηρασιών.
2. Τη χάραξη πολιτικής για τις ξηρασίες και τον καθορισμό των αντικειμενικών στόχων του σχεδίου.
3. Την επίλυση των αντιπαραθέσεων μεταξύ ομάδων με περιβαλλοντικά και οικονομικά συμφέροντα.
4. Την καταγραφή των φυσικών πόρων, του ανθρώπινου δυναμικού και των οικονομικών και νομικών περιορισμών εφαρμογής του σχεδίου.
5. Τη σύνταξη των μεθόδων μείωσης των επιπτώσεων των ξηρασιών.
6. Τον καθορισμό θεμάτων για έρευνα.



7. Το συντονισμό νομοθετικών και πολιτικών θεμάτων.
8. Την εφαρμογή του σχεδίου ξηρασίας.
9. Τη σύνταξη προγραμμάτων εκπαίδευσης των πολιτών σχετικά με την αντιμετώπιση των ξηρασιών.
10. Την καθιέρωση διαδικασιών αξιολόγησης του σχεδίου.

Παρά τόσο την αναγκαιότητα όσο και χρησιμότητά του, η αποδοχή ενός τέτοιου σχεδίου προσκρούει σε σημαντικό αριθμό δυσκολιών και κυρίως:

- Στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων των ξηρασιών για μακρό χρονικό διάστημα με περιστασιακά μέτρα ή μέτρα διαχείρισης της κρίσης.
- Στην αβεβαιότητα που επικρατεί ως προς το χρόνο εμφάνισης, αλλά και ως προς τα χαρακτηριστικά των μελλοντικών ξηρασιών.
- Στην έλλειψη ενδιαφέροντος από τις κυβερνήσεις, τους πολίτες και τα ΜΜΕ για φαινόμενα που θα συμβούν στο μέλλον και
- Στην πιθανή παρανόηση των επιστημονικών απόψεων για τις ξηρασίες από τα κέντρα λήψης των αποφάσεων ή τα ΜΜΕ.

Οι παραπάνω δυσκολίες αποδοχής και σύνταξης ενός τέτοιου σχεδίου μπορούν να παρακαμφθούν αν ληφθεί υπόψη πως οι ξηρασίες πλήττουν το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού από κάθε άλλη φυσική καταστροφή, οι επιπτώσεις τους θα είναι πιο δυσμενείς στο μέλλον, το κόστος μείωσης αυτών είναι πολύ μεγαλύτερο από τη σύνταξη και λειτουργία του σχεδίου και επιπλέον υπάρχει όλη η βασική υποδομή και το επιστημονικό δυναμικό στην Ελλάδα για τη σύνταξή του. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός τέτοιου σχεδίου στο υπάρχον σχέδιο αντιμετώπισης των φυσικών καταστροφών ή σε ένα ευρύ σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων. Ακόμα υπενθυμίζεται πως η προστασία όχι μόνο από ξηρασίες αλλά και από κάθε φυσική καταστροφή, είναι ανάγκη και “αίτημα” των πολιτών της χώρας μας και ηθική υποχρέωση της κάθε κυβέρνησης και των αρμόδιων φορέων της. Τέλος προστίθεται πως η αντοχή μιας χώρας στους κινδύνους από φυσικές καταστροφές αποτελεί τον καθρέπτη οργάνωσης και ανάπτυξης αυτής (Μπαλούτσος et al. 2006).



Όμως η ξηρασία είναι ένα αναπόφευκτο φαινόμενο, και για αυτό δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται μόνο με τη λήψη έκτακτων μέτρων (ως αιφνίδια φυσική καταστροφή), αλλά με προληπτικά μέτρα όπως η κατασκευή έργων και η ορθή διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

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

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

Δεδομένου ότι η ξηρασία σπάνια καταλήγει σε καταστροφή των υποδομών, είναι πολύ πιο δύσκολη η ποσοτικοποίηση των επιδράσεών της και η πρόβλεψη αρωγής στους πληγέντες. (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2007)

1.9 Ξηρασία στην Ελλάδα

Το συνολικό υδατικό δυναμικό που εμφανίζει η Ελλάδα είναι σχετικά μεγάλο, ενώ ταυτόχρονα δεν υστερεί ούτε σε βροχοπτώσεις, ούτε σε χιονοπτώσεις. Ωστόσο, το γεωγραφικό και γεωμορφολογικό ανάγλυφο της και γενικά οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν είναι τέτοιες που συμβάλλουν στην άνιση κατανομή των βροχοπτώσεων τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Χαρακτηριστικά, το ανατολικό Αιγαίο και η δυτική Ελλάδα εμφανίζουν μεγαλύτερα ύψη βροχής σε σχέση με το κεντρικό



και νότιο Αιγαίο. Επίσης οι ορεινές περιοχές εμφανίζουν μεγαλύτερα ύψη βροχής και χιονιού σε σχέση με τις πεδινές περιοχές, ενώ το καλοκαίρι, απαντώνται τα μικρότερα ύψη βροχής σε σύγκριση με τις άλλες εποχές του χρόνου. Όλα αυτά τα παραδείγματα ανισοκατανομής χαρακτηρίζουν τις κανονικές συνθήκες του Ελληνικού κλίματος.

Ωστόσο, συχνά παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις από αυτήν την κανονική κατάσταση, όπως είναι για παράδειγμα η εμφάνιση ακραίων φαινομένων όπως η ξηρασία σε οποιοσδήποτε περιοχές της Ελλάδας και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Οι ξηρασίες το 2001-2002 στην Ελλάδα, προκάλεσαν εκτεταμένες ζημιές στον αγροτικό τομέα, καταστρέφοντας σημαντικές εκτάσεις καλλιεργειών σε 29 νομούς. Μόνο στη Θεσσαλία, περισσότερα από 40 τετραγωνικά χιλιόμετρα βαμβακοκαλλιεργειών καταστράφηκαν, αφού το διαθέσιμο για άρδευση νερό δεν έφτανε για την κάλυψη των ελαχίστων αρδευτικών απαιτήσεων. Μέσα στο έτος 2001, οι καταστροφές στις καλλιέργειες στην Ελλάδα, εκτιμήθηκαν ίσες με €3.500.000. Το ποσό αυτό δεν περιλαμβάνει τα κόστη έλλειψης νερού σε άλλες χρήσεις (πχ. ύδρευση, αναψυχή). Οι επιπτώσεις την ίδια χρονιά στα υδάτινα οικοσυστήματα ήταν εξαιρετικά οδυνηρές. Ολόκληρα οικοσυστήματα λιμνών και ποταμών απειλήθηκαν με εξαφάνιση, όταν οι ποταμοί σταμάτησαν να έχουν βασική ροή το καλοκαίρι και στις λίμνες παρατηρήθηκε μεγάλη πτώση στάθμης. Περιοχές στην Καρδίτσα και στη Θεσσαλία είχαν το μεγαλύτερο πρόβλημα (Μιμίκου & Φωτόπουλος, 2004).

Ιστορικά, οι πρώτες γραπτές πληροφορίες για την εκδήλωση ξηρασιών παρουσιάζονται σε αρχαία ελληνικά ιστορικά κείμενα. Στα κείμενα αυτά οι ξηρασίες συνήθως αναφέρονται ως σοβαρά εμπόδια στην εξέλιξη πολεμικών επιχειρήσεων. Ωστόσο, αναφορές για την εκδήλωση του φαινομένου στην Ελλάδα υπάρχουν και σε κείμενα όλων των μετέπειτα χρονικών περιόδων.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι έχουν καταγραφεί ξηρασίες κατά την Αιάκειο περίοδο και τη Μυκηναϊκή Εποχή όπως επίσης και η Ξηρασία Φορονέως, η Ξηρασία Ερεχθέως, η Ξηρασία Δαναού – αφού γύρισε από την Αίγυπτο – λόγω οργής



Ποσειδώνα, Ξηρασία Αγοράς τον 8ο αιώνα π.χ., γι' αυτό υπάρχουν Ιερά αφιερωμένα στον Όμβριο Δία.

Άλλη έμμεση πληροφορία για την εκδήλωση ξηρασιών στην Ελλάδα στο παρελθόν είναι οι δενδροχρονολογικές σειρές που έχουν καταρτισθεί από κλιματολόγους και μετεωρολόγους.

Πέραν των εμμέσων πληροφοριών, άμεσες ποσοτικές πληροφορίες για την εκδήλωση ξηρασιών στην Ελλάδα υπάρχουν μόνο για τα τελευταία 40 –50 χρόνια λόγω της λειτουργίας βροχομετρικών σταθμών. Αντιθέτως για την περιοχή της πρωτεύουσας τέτοια στοιχεία καλύπτουν μία πιο μακρά περίοδο από το 1860 μέχρι σήμερα. Σύμφωνα με τα υδρομετεωρολογικά στοιχεία η περιοχή της Αττικής κατά την περίοδο 1860 – 2005 επλήγη τουλάχιστον από 31 ξηρασίες (Μπαλούτσος et al.). Οι προαναφερθείσες ξηρασίες εκδηλώθηκαν ανά ακαθόριστα έτη και δεν φαίνεται να είχαν κάποια περιοδικότητα. Εξάιρεση αποτελεί μόνο η διετής ξηρασία του 1989-90 και εκείνη του 2001-2002 που συνέπεσαν με το μέγιστο αριθμό ηλιακών κηλίδων οι οποίες επηρεάζουν την ακτινοβολία προς τη γη.

Επομένως, είναι αναγκαία και επιβεβλημένη η λήψη μέτρων για την ορθολογική αντιμετώπιση του κινδύνου εκδήλωσης του ακραίου κλιματικού φαινομένου ξηρασία, ο προγραμματισμός και κατασκευή κατάλληλων έργων για περιοχές ελλειμματικές και τρωτές στην ξηρασία και η ανάπτυξη και εφαρμογή ορθολογικών διαχειριστικών προγραμμάτων που θα ελαχιστοποιούν τη διακινδύνευση και τις επιπτώσεις της ξηρασίας (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2007).

1.10 Ξηρασία στην Ευρώπη

Αν και η Ευρωπαϊκή ήπειρος θεωρείται ότι ως επί το πλείστον διαθέτει επαρκείς υδάτινους πόρους, παρατηρούνται όλο και συχνότερα φαινόμενα λειψυδρίας και ξηρασίας. Κατά την προηγούμενη τριακονταετία σημειώθηκε ουσιαστική αύξηση των ξηρασιών ως προς τον αριθμό και την ένταση τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το κόστος για την ευρωπαϊκή οικονομία κατά την εν λόγω περίοδο ήταν τουλάχιστον 100 δισεκατομμύρια €. Το 2003, μία από τις πλέον εκτεταμένες ξηρασίες έπληξε πάνω από 100 εκατ. ανθρώπους και σχεδόν το ένα τρίτο της έκτασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης με συνολικό κόστος περίπου 8,7 δισεκατομμύρια €.



Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στρεφόμενη προς τη λήψη μέτρων κατέληξε, σε αρχική δέσμη πολιτικών εναλλακτικών δυνατοτήτων που θα πρέπει να αξιοποιηθούν σε ευρωπαϊκό, εθνικό και περιφερειακό επίπεδο για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας και της ξηρασίας, καθώς και για το μετριασμό των επιπτώσεών τους στο εσωτερικό της Ένωσης.

Η δέσμη των προτεινόμενων πολιτικών όσον αφορά το νερό έχει ως στόχο να στραφεί η ΕΕ προς μια οικονομία αποτελεσματικής αξιοποίησης και εξοικονόμησης του νερού.

1.10.1 Πολιτικές εναλλακτικές δυνατότητες

Η ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας και των ξηρασιών βάσει του συνδυασμού διάφορων εναλλακτικών λύσεων αναμένεται να αποδώσει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την επιδίωξη μονοθεματικών στόχων.

Στο επίκεντρο των πολιτικών εναλλακτικών δυνατοτήτων βρίσκεται η ανάγκη για ορθή τιμολόγηση του νερού. Η αρχή “ο χρήστης πληρώνει” θα πρέπει να καταστεί ο κανόνας ανεξάρτητα της προέλευσης του νερού. Ως εκ τούτου θεωρούνται καθοριστικής σημασίας οι προσπάθειες που θα καταβληθούν για την επιβολή υποχρεωτικών προγραμμάτων μετρήσεων. Η εξοικονόμηση και η αποτελεσματική αξιοποίηση του νερού επιβάλλεται να προωθηθούν δεόντως, δεδομένου ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει τεράστιες δυνατότητες όσον αφορά την εξοικονόμηση του νερού. Ενώ υπολογίζεται ότι περίπου 20% του διαθέσιμου νερού κατασπαταλάται, από πρόσφατα δεδομένα προκύπτει ότι το ποσοστό αυτό ενδέχεται να είναι μέχρι 40%. Κατά συνέπεια, επιβάλλεται να πραγματοποιηθούν ουσιαστικές αλλαγές όσον αφορά τον τρόπο χρήσης και διοχέτευσης του νερού στους χρήστες. Για παράδειγμα είναι εύκολο να προαχθεί η εγκατάσταση συσκευών εξοικονόμησης ύδατος στις βρύσες, τις κεφαλές των καταιωνιστήρων (ντους) και τις τουαλέτες. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, επιβάλλεται να λαμβάνεται δεόντως υπόψη η κατάλληλη κατανομή κατά τη χρήση του νερού μεταξύ των επιμέρους οικονομικών τομέων. Η χάραξη των πολιτικών πρέπει να βασίζεται σε “σαφή ιεραρχία του νερού”, με την έννοια ότι πρέπει να καταστεί προτεραιότητα την εξοικονόμησή του. Η εύστοχη τιμολόγηση του νερού και η λήψη μέτρων αποτελεσματικής αξιοποίησης των



δαπανών για τη βελτίωση της διαχείρισης της ζήτησής του θα πρέπει επίσης να εξεταστούν πριν αποφασιστεί η δημιουργία επιπλέον υποδομών. Ως εκ τούτου, η ολοκλήρωση της αειφόρου χρήσης του νερού και του εδάφους θα πρέπει να καταστεί συστατικό στοιχείο της διαδικασίας χάραξης πολιτικών σε τομείς όπως η γεωργία και ο τουρισμός. Όλες οι δραστηριότητες θα πρέπει να προσαρμόζονται στις τοπικές διαθέσιμες ποσότητες ύδατος (Ανακοίνωση της Επιτροπής COM 414, 2007).

Η βασική κατευθυντήρια αρχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η χρησιμοποίηση της οδηγίας πλαίσιο για το νερό ως βασικό μεθοδολογικό πλαίσιο για την επίτευξη προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή σε προβλήματα λειψυδρίας περιοχές και να μειώσει τις επιπτώσεις της ξηρασίας. Σε αυτό το πλαίσιο οι επιμέρους κατευθυντήριες αρχές αφορούν στην αξιοποίηση των στόχων της οδηγίας πλαίσιο για τα ύδατα. Τα σχέδια διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών που απαιτούνται από την οδηγία πλαίσιο προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την αντιμετώπιση των συνεπειών θεμάτων ξηρασίας και λειψυδρίας.

Η σημασία της ξηρασίας αλλά και οι επιπτώσεις αυτής στα Ευρωπαϊκά κράτη παρουσιάζεται στον πίνακα 2 που ακολουθεί ο οποίος παρουσιάζει τόσο τις περιοχές που επλήγησαν όσο και το κόστος που προέκυψε από την εκδήλωση του φαινομένου της ξηρασίας.



Πίνακας 2 Οικονομικά κόστη κυριότερων ξηρασιών στην Ευρώπη.

Πηγή: (Μιμίκου & Φωτόπουλος, 2004)

Περίοδος	Περιοχές που επηρεάστηκαν		Κόστος (Δισ. US \$)
	Περιοχή	Κράτος	
1976	Δυτική Ευρώπη	Μεγάλη Βρετανία (Μόνο στο Λονδίνο)	~ 1.0
1981- 82	Ιβηρική Χερσόνησος	Πορτογαλία, Ισπανία, Νότια Γαλλία, Κορσική, Ιταλία	> 6.2
1988- 91	Μεσόγειος	Πορτογαλία, Ισπανία, Νότια Γαλλία, Ιταλία, Αλβανία, Ελλάδα	> 2.6
1992- 94	Ανατολική Ευρώπη	Γερμανία, Δανία, Πολωνία, Λιθουανία, Ουγγαρία, Γιουγκοσλαβία, Ουκρανία, Μολδαβία	> 1.4
2000-2004	Κεντρική Ευρώπη	Ρουμανία, Ουγγαρία, Πολωνία, Βουλγαρία, Ελλάδα, Γιουγκοσλαβία, Τσεχία, Αυστρία, Ελβετία, Ιταλία, Γερμανία, Βέλγιο, Δανία, Ολλανδία, Νορβηγία, Αγγλία, Γαλλία, Ισπανία, Πορτογαλία	> 15.0



2. Κεφάλαιο 2 – Δείκτες ξηρασίας

2.1 Ποσοτικοποίηση της Ξηρασίας - Ορισμός των δεικτών Ξηρασίας

Ο Παγκόσμιος μετεωρολογικός οργανισμός (World Meteorological Organization) ορίζει ένα δείκτη ξηρασίας ως "ένα δείκτη ο οποίος σχετίζεται με κάποιες από τις σωρευτικές συνέπειες μιας παρατεταμένης και ανώμαλης ανεπάρκειας υγρασίας» (Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας 1992). Υπάρχουν τέσσερα βασικά κριτήρια τα οποία κάθε δείκτης ξηρασίας θα πρέπει να πληροί (Friedman - 1957):

- το χρονικό διάστημα θα έπρεπε να είναι κατάλληλο για υπολογισμό ακόμα και επί χάρτου.
- ο δείκτης θα πρέπει να είναι μια ποσοτική μέτρηση των μεγάλης κλίμακας και παρατεταμένων συνθηκών ξηρασίας.
- ο δείκτης θα πρέπει να είναι εφαρμόσιμος στο πρόβλημα που μελετάται.
- μια μακρά ακριβή καταγραφή του δείκτη για το παρελθόν θα πρέπει να είναι διαθέσιμη ή να μπορεί να υπολογιστεί.

Ένα πέμπτο κριτήριο που θα πρέπει να προστίθεται στους δείκτες που χρησιμοποιούνται στην επιχειρησιακή παρακολούθηση της ξηρασίας είναι το κάτωθι:

- ο δείκτης θα πρέπει να μπορεί να υπολογιστεί σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για μακροπρόθεσμες παλαιοκλιματικές μελέτες (π.χ., δείκτες που βασίζονται σε παγετώνες και αποδεικτικά στοιχεία από αλλουβιακά, σε ωκεανούς και ιζήματα λιμνών, σε δακτυλίους δένδρων, ανάλυση γύρης, ιστορικά έγγραφα, μελέτη της ετήσιας απόδοσης των καλλιεργειών) δεν δύνανται να εφαρμοστούν στην επιχειρησιακή παρακολούθηση της ξηρασίας, λόγω της φύσης των παλαιοκλιματικών δεικτών και της δυσκολίας των υπαρχόντων μέσων να συμμετέχουν στη συλλογή παλαιοκλιματικών δεδομένων σε επιχειρησιακή βάση πραγματικού χρόνου. Υπάρχουν λίγες μόνο περιπτώσεις (π.χ., παροχή του ποταμού Νείλου στην Αίγυπτο) όπου δείκτες χρήσιμοι για παλαιοκλιματικές μελέτες είναι διαθέσιμοι σε επιχειρησιακή βάση.



Οι **Δείκτες Ξηρασίας ή Ξηρότητας** είναι αριθμητικοί δείκτες μέτρησης της ξηρασίας δηλαδή του βαθμού ξηρότητας του κλίματος σε μια δεδομένη θέση. Χρησιμεύουν ώστε να προσδιορίσουν, να εντοπίσουν ή ακόμα και να οριοθετήσουν τις περιοχές που πάσχουν από έλλειμμα του διαθέσιμου ύδατος, γεγονός που μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις όχι μόνο στην αποτελεσματική χρήση του εδάφους αλλά και στην οικολογία της περιοχής.

Το μεγάλο πλήθος ορισμών της ξηρασίας, τα διαφορετικά χαρακτηριστικά που εμφανίζει σε σχέση με την τοπογραφία και το κλίμα της κάθε περιοχής και οι πολύπλοκες φυσικές διεργασίες που συνδέονται με την εμφάνισή της, επέβαλλαν τη δημιουργία δεικτών ξηρασίας, έτσι ώστε να είναι εφικτή η αναγνώριση, η καταγραφή της έντασης και έκτασης των επεισοδίων ξηρασίας αλλά και για να υπάρχει η δυνατότητα αξιολόγησης της ξηρασίας σε τοπικό επίπεδο και σε ευρύτερες περιοχές.

Οι δείκτες ξηρασίας χρησιμοποιούν δεδομένα από τη βροχόπτωση, χιονόπτωση, απορροή, αποθέματα νερού στο έδαφος και άλλους δείκτες προσφοράς νερού. Η τιμή του δείκτη ξηρασίας είναι συνήθως ένας μοναδικός αριθμός, πολύ πιο χρήσιμος από ό, τι τα ανεπεξέργαστα δεδομένα που χρησιμεύουν στη λήψη αποφάσεων.

Η οριζόντια χρήση των δεικτών συνεισφέρει στη μελέτη:

Επεισοδίων ξηρασίας: η ορθή χρήση και ερμηνεία των δεικτών μπορεί να δώσει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ξεχωριστού επεισοδίου ξηρασίας (ένταση, χρονική διάρκεια, γεωγραφική έκταση, καταστροφικότητα)

Επανεμφάνιση των επεισοδίων ξηρασίας: η μελέτη των τιμών του δείκτη στη διάρκεια του χρόνου μπορεί να δώσει την πιθανότητα επανεμφάνισης των επεισοδίων ξηρασίας.

Υπάρχουν διάφοροι δείκτες που υπολογίζουν την ποσότητα κατακρήμνισης που παρεκκλίνει από τα καθιερωμένα ιστορικά δεδομένα για δεδομένη χρονική περίοδο. Παρά το γεγονός ότι κανένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες δεν είναι εγγενώς ανώτερος από τους υπόλοιπους για όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο υπάρχουν μερικοί δείκτες που παρουσιάζονται πιο κατάλληλοι από άλλους για ορισμένες χρήσεις. Για παράδειγμα, ο Δείκτης Δριμύτητας Ξηρασίας του Palmer



(Palmer Drought Severity Index - PDSI), έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από το Υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ για να προσδιοριστεί πότε θα χορηγηθεί βοήθεια έκτακτης ανάγκης για την ξηρασία. Παρόλα αυτά ο δείκτης Palmer είναι καλύτερος, όταν αναφέρεται σε μεγάλες περιοχές ενιαίας τοπογραφίας. Δυτικά κράτη, με ορεινό έδαφος πολύπλοκα περιφερειακά μικροκλίματα, θεωρείται ότι είναι χρήσιμο να συμπληρωθούν επικουρικά από τον δείκτη Palmer με άλλους δείκτες, όπως το Δείκτη Προσφοράς Επιφανειακού Νερού (Surface Water Supply Index), ο οποίος λαμβάνει τη χιονόπτωση και άλλες μοναδικές συνθήκες υπόψη.

Το Εθνικό Κέντρο αντιμετώπισης ξηρασίας της Αμερικής χρησιμοποιεί μια νεότερη εκδοχή δείκτη, τον Δείκτη Τυποποιημένης βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index - SPI), με σκοπό να παρακολουθεί τις συνθήκες της προσφοράς υγρασίας. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του δείκτη είναι ότι εντοπίζει την επερχόμενη ξηρασία μήνες νωρίτερα από τον Δείκτη Palmer και ότι υπολογίζεται σε διάφορες χρονικές κλίμακες.

Οι περισσότεροι διαχειριστές νερού συμβουλεύονται έναν ή περισσότερους δείκτες πριν από τη λήψη μιας απόφασης. Παρακάτω ακολουθεί μια εισαγωγή σε κάθε ένα από τους σημαντικότερους δείκτες ξηρασίας με κριτήριο την επιλογή τους την αποδοχή και χρήση τους από τους εμπλεκόμενους με θέματα διαχείρισης εδάφους και νερού φορείς.

2.1.1 Χαρακτηριστικά ενός καλού δείκτη

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός καλού δείκτη ξηρασίας μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 7 κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

1. η απλότητα του δείκτη – ευχρηστία και κατανόηση,
2. ο ορθός ορισμός του, - επιστημονικά αποδεκτός με φυσική έννοια,
3. η ευαισθησία, - ανταπόκριση σε μεγάλο εύρος τιμών,
4. η έγκαιρη ανταπόκριση του δείκτη στις κλιματικές διακυμάνσεις,
5. η μεταβιβασιμότητα, - δυνατότητα χρήση του δείκτη σε διάφορες περιοχές,
6. η διαθεσιμότητα στοιχείων, - πρόσβαση σε μεγάλου μήκους χρονοσειρές και καλής ποιότητας δεδομένα
7. το χαμηλό κόστος επεξεργασίας δεδομένων για την παραγωγή του δείκτη.



Από την μελέτη των παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι κάποιες από τις ιδιότητες του καλού δείκτη ξηρασίας έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους. Παραδείγματος χάριν, ένας δείκτης που απαιτεί για τον υπολογισμό του αρκετά είδη δεδομένων, ενδεχομένως να είναι πιο σωστά ορισμένος και επιστημονικά πιο αποδεκτός (ιδιότητα 2), ωστόσο μπορεί να μην είναι διαθέσιμα όλα τα απαιτούμενα στοιχεία (ιδιότητα 6) (Tsakiris and Pangalou, 2009).

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Κοινό στοιχείο σε όλους τους τύπους ξηρασίας είναι το γεγονός ότι προέρχονται από ανεπάρκεια βροχοπτώσεων η οποία οδηγεί σε έλλειψη νερού για κάποια δραστηριότητα ή για κάποια ομάδα (Wilhite και Glantz 1985). Αξιόπιστες μετρήσεις βροχόπτωσης έγιναν διαθέσιμες περίπου δύο αιώνες πριν, και ως εκ τούτου, πρακτικά σε όλους τους ορισμούς των δεικτών ξηρασίας αλλά και στους ίδιους τους δείκτες περιλαμβάνεται αυτή η μεταβλητή, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία μετεωρολογίας (WMO Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός 1975a). Πρώτοι ορισμοί της μετεωρολογικής ξηρασίας ενσωμάτωναν κάποιο μέτρο βροχόπτωσης σε μια δεδομένη περίοδο του χρόνου (Tannehill 1947 – WMO Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός 1975, Wilhite και Glantz 1985). Ξηρασία θεωρείται ότι υφίσταται όταν τα κριτήρια καθορισμού της ξηρασίας τηρούνται. Τότε ο δείκτης θα είναι μέτρο της διάρκειας της ξηρασίας ή / και της έντασης αυτής. Οι υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό στην απορροή, καθώς αυτή η μεταβλητή συνοψίζει και είναι το υποπροϊόν ουσιαστικά κάθε υδρομετεωρολογικής διαδικασίας που διεξάγεται σε λεκάνες απορροής. Στις υδρολογικές μελέτες που περιλάμβαναν τον ρυθμό απορροής ρευμάτων, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ των δύο συνιστωσών της συνολικής απορροής: άμεση απορροή και μόνιμη ροή (Linsley et al. 1958). Μελέτες για την ξηρασία χρησιμοποιώντας δεδομένα απορροής έχουν στηριχθεί σε μετρήσεις της βασικής ροής ή της μέσης ροής για κάποιο χρονικό διάστημα (για παράδειγμα, μηνιαίες ή ετήσιες ροές) για να υπολογιστεί ο μέσος όρος βασισμένος στις κορυφές της άμεσης απορροής (Yevjevich 1967, Dracup et al. 1980, Frick et al. 1990). Κατά τη διάρκεια της πρώτης δεκαετίας του εικοστού αιώνα, η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία της Αμερικής όρισε ως ξηρασία την κατάσταση κατά την διάρκεια της οποίας, για 21 ή



περισσότερες ημέρες οι βροχοπτώσεις είναι μειωμένες κατά 30% ή και περισσότερο κάτω από τα φυσιολογικά για την περίοδο όρια (Henry 1906, Steila 1987). Ένα μέτρο της ξηρασίας που χρησιμοποιούνταν συχνά εκείνη την εποχή ήταν το συσσωρευμένο έλλειμμα της βροχόπτωσης, ή η συσσωρευμένη απόκλιση από την κανονική (accumulated precipitation deficit ή the accumulated departure from normal). Άλλα παραδείγματα πρώιμων κριτηρίων προσδιορισμού της ξηρασίας ήταν τα ακόλουθα:

- 1) 15 συνεχόμενες ημέρες χωρίς βροχή,
- 2) 21 ή περισσότερες ημέρες με υετό λιγότερο από το ένα τρίτο του κανονικού
- 3) ετήσια βροχόπτωση που είναι μικρότερη από το 75% της κανονικής,
- 4) Η μηνιαία βροχόπτωση είναι μικρότερη από το 60% της κανονικής, και
- 5) οποιοδήποτε ποσό των βροχοπτώσεων μικρότερο από το 85% της κανονικής.

Στα τέλη του 1957, χρησιμοποιήθηκε η ετήσια βροχόπτωση, ως δείκτη ξηρασίας σε μια μελέτη ξηρασίας στο Τέξας (Friedman, 1957). Παρόμοια κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες χώρες είναι τα εξής:

- 1) Μεγάλη Βρετανία: 15 συνεχόμενες ημέρες, με λιγότερο από 0,25 χιλιοστά.
- 2) Ινδία: Βροχόπτωση ίση με το μισό της κανονικής βροχόπτωσης ή λιγότερο για μια εβδομάδα, ή πραγματική εποχική ανεπάρκεια βροχόπτωσης, περισσότερη από δύο φορές τη μέση απόκλιση.
- 3) Ρωσία: 10 ημέρες, με συνολική βροχόπτωση που δεν υπερβαίνει τα 5 χιλιοστά.
- 4) Μπαλί: περίοδος 6 ημερών χωρίς βροχή
- 5) Λιβύη: ετήσια βροχόπτωση που είναι λιγότερο από 180 mm.

Οι περισσότεροι από αυτούς τους ορισμούς / δείκτες ίσχυαν μόνο στην συγκεκριμένη περιοχή εφαρμογής τους. Δείκτες που έχουν αναπτυχθεί για μια περιοχή μπορεί να μην εφαρμόζονται σε άλλες περιοχές επειδή οι μετεωρολογικές συνθήκες που οδηγούν σε ξηρασία είναι ιδιαίτερα μεταβαλλόμενες σε όλο τον κόσμο. Επίσης, δείκτες που έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρηση της έντασης της μετεωρολογικής ξηρασίας, για παράδειγμα, ήταν ανεπαρκείς για γεωργικές, υδρολογικές, ή άλλες εφαρμογές.



Οι ελλείψεις αυτές αναγνωρίστηκαν νωρίς (Abbe 1894, Henry 1906). Τα προβλήματα με τους αναπτυσσόμενους δείκτες γεωργικής ξηρασίας, είναι ότι πρέπει να εξετάζουν τον τύπο της βλάστησης, τον τύπο του εδάφους (ο οποίος καθορίζει την ικανότητα του εδάφους σε αποθήκευση υγρασίας), την προηγούμενη υγρασία του εδάφους, και την εξατμισοδιαπνοή καθώς επηρεάζεται από την ταχύτητα αέρα, την θερμοκρασία και υγρασία του αέρα. Πολλά από αυτά τα κλιματολογικά στοιχεία δεν είχαν ευρέως μετρηθεί, ή δεν μπορούσαν να ενσωματωθούν σε έναν δείκτη ξηρασίας. Ο Abbe το (1894) σημείωσε: «Από γεωργική άποψη, μια ξηρασία δεν είναι απλώς μια ανεπάρκεια των βροχοπτώσεων, αλλά η έλλειψη διαθέσιμου νερού για τη χρήση του σε καλλιέργειες. Έτσι, μια ξηρασία που επηρεάζει τη γεωργία είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα πολλών εκτιμήσεων. Ως εκ τούτου, τόσο από γεωργικής όσο από της μηχανικής άποψης, είναι ανέφικτο να καθοριστεί η ένταση της ξηρασίας με ακριβείς όρους. Το Γραφείο Κλιματολογίας των Ηνωμένων Πολιτειών, Henry (1906) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, «σε γενικές γραμμές, οι κλιματολογικές στατιστικές αδυνατούν από μόνες τους να δώσουν επαρκή και ακριβή προσδιορισμό της διάρκειας ή της έντασης της γεωργικής ξηρασίας. Συμπληρωματικές παρατηρήσεις από την κατάσταση της βλάστησης σε κάθε τόπο είναι ιδιαίτερα απαραίτητες. Κατά το πρώτο μισό του εικοστού αιώνα, οι επιστήμονες εστίασαν τις προσπάθειές τους στην αντιμετώπιση αυτών των ανεπαρκειών, καθώς και στο να συνεχιστεί η ανάπτυξη δεικτών ξηρασίας σχετικά με την συγκεκριμένη εφαρμογή στην οποία θα εξεταστούν. Ο Munger (1916) ανέπτυξε ένα αντικειμενικό μέτρο για την εκτίμηση του συγκριτικού κινδύνου για δασικές πυρκαγιές από χρόνο σε χρόνο και περιοχή σε περιοχή, μετά τον προσδιορισμό ότι η συχνότητα εμποτισμού του εδάφους από τις βροχές είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή σχετικά με την επικινδυνότητα των πυρκαγιών.

Η ξηρασία είναι ένα επαναλαμβανόμενο και παγκόσμιας κλίμακας φαινόμενο και το οποίο έχει χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά τα οποία μεταβάλλονται από μία Περιφέρεια σε μία άλλη (Tallaksen and van Lanen 2004).



2.3 Συνήθεις Δείκτες Ξηρασίας και Λειψυδρίας

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται οι σημαντικότεροι δείκτες ξηρασίας και λειψυδρίας που είτε έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν είτε χρησιμοποιούνται ακόμα για την μελέτη του φαινομένου της ξηρασίας. Στον πίνακα 3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι δείκτες με χρονολογική σειρά ενώ παρατίθενται και οι μέθοδοι υπολογισμού και οι μεταβλητές εισόδου που απαιτούνται για τον υπολογισμό του δείκτη.



Πίνακας 3 Σημαντικότεροι δείκτες ξηρασίας και λειψυδρίας

A/A	Δείκτης ξηρασίας	Ερευνητής	Έτος εμφάνισης	Μεταβλητές που αναλύονται	Εφαρμογή
1	Δείκτης Munger (Munger's Index)	Munger	1916	Διάρκεια περιόδου, χωρίς 24 ωρη κατακρήμνιση ύψους 1,27 χιλιοστών.	Καθημερινή μέτρηση του κινδύνου για εμφάνιση δασικών πυρκαγιών
2	Δείκτης Kincer (Kincer's Index)	Kincer	1919	30 ή περισσότερες συνεχόμενες μέρες με μικρότερη από 6,35 mm κατακρήμνισης σε 24 ώρες	Χάρτες εποχικής κατανομής
3	Δείκτης Marcovitch (Marcovitch's Index)	Marcovitch	1930	Θερμοκρασία και βροχόπτωση	Κλιματικές απαιτήσεις του σπόρου του φασολιού
4	Δείκτης Blumenstock (Blumenstock's Index)	Blumenstock	1942	Διάρκεια ξηρασίας σε μέρες, όπου η ξηρασία τερματίστηκε από κατακρήμνιση ύψους 2.54 mm σε διάρκεια 48h.	Ξηρασία μικρής κλίμακας
5	Προηγηθείς Δείκτης Βροχόπτωσης (Antecedent Precipitation Index)	Kohler	1954	Βροχόπτωση	Ένας αντίστροφος δείκτης ξηρασίας που χρησιμοποιείται για πρόβλεψη πλημμύρας
6	Δείκτης επάρκειας υγρασίας (Moisture Adequacy Index)	McGuire and Palmer	1957	Βροχόπτωση και εδαφική υγρασία	Ξηρασία στις καλλιέργειες
7	Δείκτης Palmer	Palmer	1965	Κατακρήμνιση και θερμοκρασία σε μοντέλο	Σύγκριση μετεωρολογικής και



A/A	Δείκτης ξηρασίας	Ερευνητής	Έτος εμφάνισης	Μεταβλητές που αναλύονται	Εφαρμογή
	(PDSI και PHDI) (Palmer's Index PDSI and PHDI)			υδατικού ισοζυγίου	υδρολογικής ξηρασίας έναντι στο χώρο και χρόνο
8	Δείκτης ανωμαλίας βροχόπτωσης (Precipitation Anomaly Index)	Rooy	1965	Βροχόπτωση	Υπολογισμός ξηρασίας με μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα
9	Δείκτης των Δεκατημορίων (Deciles Index)	Gibbs and Maher	1967	Βροχόπτωση	Υπολογισμός ξηρασίας σε μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα
10	Δείκτης υγρασίας καλλιέργειας (CMI) (Crop Moisture Index)	Palmer	1968	Κατακρήμνιση και θερμοκρασία σε μοντέλο υδατικού ισοζυγίου	Ξηρασία στις καλλιέργειες
11	Δείκτης Keetch – Byram (Keetch–Byram Drought Index)	Keetch – Byram	1968	Κατακρήμνιση και θερμοκρασία σε μοντέλο υδατικού ισοζυγίου	Χρήση από του διαχειριστές πυρκαγιών
12	Δείκτης Ξηρότητας	UNESCO	1979	Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής και το μέσο ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισιοδιαπνοής.	
13	Δείκτης Ξηρασίας Bhalme and Mooly Drought (BMDI) (Bhalme and Mooly)	Bhalme and Mooly	1980	Βροχόπτωση	Υπολογισμός ξηρασίας με μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα



A/A	Δείκτης ξηρασίας	Ερευνητής	Έτος εμφάνισης	Μεταβλητές που αναλύονται	Εφαρμογή
	Drought Index)				
14	Δείκτης Προσφοράς Επιφανειακού Νερού (SWSI) (Surface Water Supply Index)	Shafter and Dezman	1981	Ποσότητα χιονιού (Snowpack), πληρότητα ταμιευτήρων, απορροή και κατακρήμνιση,	υπολογίζεται κυρίως λεκάνες απορροής των ποταμών σε δυτικές περιοχές, οι στατιστικές ιδιότητες του δεν αναλύονται ή/και κατανοούνται καλά
15	Δείκτη Τυποποιημένης Βροχόπτωσης (SPI) (Standardized Precipitation Index)	Tom McKee, et al,	1993	Κατακρήμνιση	Επιτρέπει τη μέτρηση της ξηρασίας και υγρών περιόδων μέσω του ελλείμματος βροχοπτώσεων, το ποσοστό της "Κανονική βροχόπτωσης", πιθανότητα μη υπέρβασης
16	Δείκτης Ξηρασίας Εδαφικής Υγρασίας	Hollinger et al.	1993	Εδαφική Υγρασία	Υπολογισμός ξηρασίας με ετήσιο χρονικό βήμα
17	Δείκτης Ξηρασίας Συγκεκριμένης καλλιέργειας (CSDI)	Meyer et al. 1993;	1993	Εξαμυσοδιαπνοή	Υπολογισμός ξηρασίας με εποχικό χρονικό βήμα
18	Εθνικός Δείκτης Βροχόπτωσης (RI)	Gommes and Petrass	1994	Μέση ετήσια βροχόπτωση, μέση τιμή των βροχοπτώσεων μεγάλης χρονοσειράς και άλλα στατιστικά μεγέθη, όπως π.χ. η παραγωγή αγροτικών προϊόντων.	



A/A	Δείκτης ξηρασίας	Ερευνητής	Έτος εμφάνισης	Μεταβλητές που αναλύονται	Εφαρμογή
19	Δείκτης κατάστασης καλλιέργειας (Vegetation Condition Index)	Kogan	1995	Δορυφορική AVHRR ακτινοβολία (ορατή και εγγύς-ύπερυερθη ακτινοβολία)	Μέτρα την "Υγεία" της βλάστησης
20	Δείκτης Στοιχείου προσφοράς – στοιχείου ζήτησης	Weghorst	1996	Κατακρήμνιση, θερμοκρασία, ποσότητα χιονιού, απορροή, πλήρωση ταμιευτήρα	
21	Δείκτης Αξιοποίησης Νερού (Water Exploitation Index, WEI)	Reskin et al	1997	Μέση ετήσια συνολική ζήτηση γλυκού νερού προς τις μέσες υπερετήσιες ποσότητες των διαθέσιμων υδατικών πόρων.	Εκφράζει τη πίεση που ασκεί η ζήτηση νερού στους υδατικούς πόρους και εφαρμόζεται σε μεγάλες χωρικές κλίμακες
22	Παρακολούθηση Ξηρασίας (Drought Monitor)	Διάφοροι Φορείς ⁴	1999	Ενσωματώνει αρκετούς δείκτες ξηρασίας και βοηθητικούς δείκτες σε έναν εβδομαδιαίο επιχειρησιακό χάρτη παρακολούθησης ξηρασίας	Πολλαπλών χρήσεων

⁴ Πανεπιστήμιο της Nebraska, Εθνικό κέντρο αντιμετώπισης της ξηρασίας Lincoln, Το USDA/OCE/WAOB/Joint Agricultural Weather Facility, το NOAA/NWS/NCEP/CPC και το NOAA/NESDIS/National Κέντρο κλιματικών δεδομένων.



2.3.1 Δείκτης Ποσοστού επί της Κανονικής Κατακρήμνισης (*Percent of Normal*)

Το ποσοστό της κανονικής βροχόπτωσης είναι μία από τις απλούστερες μετρήσεις της βροχόπτωσης για μια θέση. Αναλύσεις που χρησιμοποιούν το ποσοστό της κανονικής βροχόπτωσης είναι πολύ αποτελεσματικές όταν χρησιμοποιούνται για μία μόνο περιοχή ή μια ενιαία εποχή. Ο Δείκτης του Ποσοστού της κανονικής κατακρήμνισης είναι επίσης εύκολο να παρερμηνευτεί και να δίνει διαφορετικές ενδείξεις των συνθηκών, ανάλογα με την τοποθεσία και την εποχή. Υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική βροχόπτωση με την κανονική βροχόπτωση – η οποία συνήθως θεωρείται ότι είναι ο μέσος όρος των 30 τελευταίων ετών - και πολλαπλασιάζοντας επί 100. Αυτός ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί για μια σειρά από χρονικές κλίμακες. Συνήθως αυτές οι χρονικές κλίμακες κυμαίνονται από ένα μήνα ως μια ομάδα μηνών που αντιπροσωπεύουν μια συγκεκριμένη εποχή, σε ένα έτος ή σε ένα υδρολογικό έτος. Η κανονική βροχόπτωση για μια συγκεκριμένη θέση θεωρείται ότι είναι 100%.

Ένα από τα μειονεκτήματα της χρήσης του ποσοστού της κανονικής βροχόπτωσης είναι ότι η μέση τιμή ή μέσος όρος κατακρήμνισης δεν είναι συχνά το ίδιο με τη μέση βροχόπτωση, η οποία παρουσιάζεται να είναι η τιμή επαυξημένη κατά 50% των περιστατικών βροχόπτωσης σε ένα μακροπρόθεσμο κλιματικό αρχείο. Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι βροχοπτώσεις σε μηνιαία ή εποχιακή κλίμακα δεν έχουν κανονική κατανομή. Η χρήση του ποσοστού της κανονικής βροχόπτωσης συνεπάγεται μια κανονική κατανομή, όπου η μέση τιμή (mean) και ο διάμεσος (median) θεωρείται ότι έχουν την ίδια τιμή. Ένα παράδειγμα της σύγχυσης που αυτό θα μπορούσε να δημιουργήσει φαίνεται

Περιγραφή: Ο Δείκτης Ποσοστού επί της Κανονικής Κατανομής είναι ένας απλός στον υπολογισμό δείκτης που υποστηρίζει τις ανάγκες του γενικού κοινού.

Πλεονεκτήματα:

Ιδιαίτερα αποδοτικός στην σύγκριση μίας περιοχής ή μίας εποχής.

Μειονεκτήματα:

Μπορεί εύκολα να παρερμηνευτεί μιας και ο όρος «κανονική» είναι ένα μαθηματικό κατασκεύασμα το οποίο δεν αντιστοιχεί αναγκαστικά στο πως αναμένεται να είναι ο καιρός.

από τη μακροχρόνια καταγραφή βροχοπτώσεων στη Μελβούρνη της Αυστραλίας, για το μήνα Ιανουάριο. Ο διάμεσος (median) βροχοπτώσεων του μήνα Ιανουαρίου



είναι 36,0 χιλιοστά (mm), που σημαίνει ότι στα μισά χρόνια που μελετώνται καταγράφεται μηνιαία βροχόπτωση μικρότερη από 36,0 χιλιοστά (mm) στα υπόλοιπα μισά χρόνια καταγράφεται βροχόπτωση πάνω από 36,0 χιλιοστά. Ωστόσο, μία συνολική μηνιαία βροχόπτωση Ιανουαρίου της τάξης των 36,0 χιλιοστών θα αντιστοιχούσε μόνο στο 75% της κανονικής, σε σύγκριση με τη μέση τιμή, η οποία συχνά θεωρείται ότι είναι αρκετά ξηρή. Λόγω της ποικιλίας στα καταγεγραμμένα αρχεία βροχόπτωσης σε σχέση με τον χρόνο και τη θέση, δεν υπάρχει κανένας τρόπος να καθοριστεί η συχνότητα των αποκλίσεων από το κανονικό ή να συγκριθούν διαφορετικές τοποθεσίες. Αυτό το καθιστά δύσκολο να συνδεθεί μια αποκλίνουσα τιμή με συγκεκριμένη επίπτωση που είναι αποτέλεσμα της απόκλισης, αποτρέποντας τις προσπάθειες για την άμβλυση των κινδύνων ξηρασίας με βάση τις παρεκκλίσεις από τη συνήθη μορφή και ένα σχέδιο αντίδρασης (Willeke et al. 1994).

2.3.2 Δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index - "SPI")

Η κατανόηση ότι ελλείμματα κατακρημνισμάτων έχουν διαφορετικές επιπτώσεις για τα υπόγεια ύδατα, τους ταμειυτήρες, την εδαφική υγρασία, τη χιονόπτωση (snowpack) και την απορροή (streamflow) οδήγησε τον McKee et al. (1993) να αναπτύξουν τον Δείκτη τυποποιημένης Βροχόπτωσης (SPI). Ο SPI έχει σχεδιαστεί για την ποσοτικοποίηση του ελλείμματος βροχοπτώσεων για πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Αυτές οι χρονικές κλίμακες αντανακλούν τις επιπτώσεις της ξηρασίας στη διαθεσιμότητα των διαφόρων υδάτινων πόρων. Οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους

Ο SPI είναι ένας δείκτης βασισμένος στην πιθανότητα βροχόπτωσης σε κάθε χρονική κλίμακα.

Που χρησιμοποιείται: πολλοί διαχειριστές ξηρασίας εκτιμούν την ευελιξία του SPI

Πλεονεκτήματα: ο SPI μπορεί να υπολογιστεί για διαφορετικές χρονικές κλίμακες, μπορεί να παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση για την ξηρασία και να συμβάλλει στην εκτίμηση της σοβαρότητας της ξηρασίας. Είναι λιγότερο πολύπλοκος από τον Palmer

Μειονεκτήματα: Οι τιμές του βασίζονται σε προκαταρκτικά δεδομένα τα οποία μπορούν να αλλάξουν.

Αναπτύχθηκε από: Tom McKee, et al, Colorado State University, 1993.



ανταποκρίνονται σε σχετικά μικρή χρονική κλίμακα στις ανωμαλίες που σχετίζονται με την βροχόπτωση, ενώ τα υπόγεια ύδατα, η επιφανειακή απορροή (streamflow), και οι ταμιευτήρες αντανakλούν τις μακροπρόθεσμες ανωμαλίες κατακρήμνισης. Για τους λόγους αυτούς ο McKee et al. (1993) υπολόγισε αρχικά τον SPI για χρονικές κλίμακες 3, 6, 12, 24 και 48 μηνών.

Ο υπολογισμός του SPI για οποιαδήποτε θέση βασίζεται στην μακροχρόνια καταγραφή βροχόπτωσης για την επιθυμητή περίοδο. Αυτή η μακροπρόθεσμη καταγραφή έχει τοποθετηθεί σε μια κατανομή πιθανοτήτων, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε κανονική κατανομή, έτσι ώστε ο μέσος SPI για τη θέση και το επιθυμητό χρονικό διάστημα να είναι μηδέν (Edwards και McKee 1997). Θετικές τιμές SPI υποδεικνύουν μεγαλύτερη από τη μέση βροχόπτωση, ενώ οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μικρότερη από μέση βροχόπτωση. Επειδή ο SPI κανονικοποιείται, πιο υγρά και πιο ξηρά κλίματα μπορούν να αντιπροσωπεύονται με τον ίδιο τρόπο, και υγρές περίοδοι μπορεί επίσης να παρακολουθούνται με χρήση του SPI.

Ο McKee et al. (1993) χρησιμοποίησε το σύστημα ταξινόμησης που παρατίθεται στον πίνακα τιμών του SPI για τον καθορισμό της έντασης ξηρασίας που προκύπτει βάσει του SPI. Ο McKee et al. (1993) όρισε

επίσης τα κριτήρια για ένα "συμβάν ξηρασίας» για οποιαδήποτε από τις χρονικές κλίμακες. Επεισόδιο ξηρασίας εκδηλώνεται κάθε φορά που ο SPI είναι συνεχώς αρνητικός και φτάνει μια ένταση, όπου ο SPI είναι -1,0 ή μικρότερος. Η εκδήλωση της ξηρασίας τελειώνει όταν ο SPI γίνεται θετικός. Κάθε περίπτωση ξηρασίας, ως εκ τούτου, έχει χρονική διάρκεια που καθορίζεται από την αρχή και το τέλος της, και μια ένταση για κάθε μήνα που το φαινόμενο συνεχίζεται. Το συσσωρευμένο μέγεθος της ξηρασίας μπορεί επίσης να είναι το μέγεθος της ξηρασίας, και είναι το θετικό άθροισμα των SPI για όλους τους μήνες σε περίπτωση ξηρασίας.

Τιμές του SPI	
2.0+	Ιδιαίτερα υγρό
1,5-1,99	Πολύ υγρό
1,0-1,49	Μέτρια υγρό
-0,99 – 0,99	Σχεδόν υγρό
-1,0- -1,49	Μέτρια ξηρό
-1,5 - -1,99	Πολύ ξηρό
-2 και λιγότερο	ακραία ξηρό



Με βάση ανάλυση βροχομετρικών σταθμών στο Κολοράντο, ο McKee διαπίστωσε ότι με βάση τον SPI καταγράφεται ήπια ξηρασία κατά το 24% του χρόνου, μέτρια ξηρασία 9,2% του χρόνου, σοβαρή ξηρασία το 4.4% του χρόνου και ακραία ξηρασία το 2,3 % του χρόνο (McKee et al. 1993). Επειδή ο SPI είναι τυποποιημένος, τα ποσοστά αυτά αναμένονται από μια κανονική κατανομή του SPI. Το 2,3% του SPI στο πλαίσιο της κατηγορίας "ακραίας ξηρασίας" είναι ένα ποσοστό που συνήθως αναμένεται για μια «ακραία» περίπτωση (Wilhite 1995). Αντίθετα, ο δείκτης Palmer φτάνει την «ακραία» κατηγορία πάνω από το 10% του χρόνου σε παρόμοιες περιοχές μελέτης. Αυτή η τυποποίηση επιτρέπει στον SPI να προσδιορίζει την σπανιότητα της τρέχουσας ξηρασίας, καθώς και τη πιθανότητα βροχόπτωσης που είναι απαραίτητη για να τερματίσει την υπάρχουσα κατάσταση ξηρασίας (McKee et al. 1993).

Ο SPI έχει χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για να παρακολουθεί τις συνθήκες σε ολόκληρο το Κολοράντο, από το 1994 (McKee et al. 1995).

2.3.3 Δείκτης Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer ("The Palmer")

Το 1965, ο Palmer ανέπτυξε ένα δείκτη για τη μέτρηση της απόκλισης (departure) της προσφοράς υγρασίας (Palmer 1965). Ο Palmer, βάσισε τον δείκτη του στην έννοια της προσφοράς και της ζήτησης της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το έλλειμμα βροχοπτώσεων σε συγκεκριμένες θέσεις. Στόχος του Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer (PDSI), ήταν να προσφέρει τυποποιημένες μετρήσεις υγρασίας, έτσι ώστε οι συγκρίσεις που θα πραγματοποιούνται με βάση τον δείκτη να έχουν νόημα μεταξύ τοποθεσιών και μεταξύ των μηνών (Palmer 1965).



Ο PDSI είναι ένας μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας και ανταποκρίνεται στις καιρικές συνθήκες που είναι αφύσικα ξηρές ή ασυνήθιστα υγρές. Όταν οι συνθήκες αλλάζουν, από ξηρές σε κανονικές ή υγρές, για παράδειγμα, η ξηρασία που μετράται από τον PDSI τελειώνει χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η απορροή, οι λίμνες και τα επίπεδα των ταμιευτήρων, και άλλες μακροπρόθεσμες υδρολογικές επιπτώσεις (Karl και Knight 1985). Ο PDSI υπολογίζεται με βάση τις βροχοπτώσεις και τα δεδομένα της θερμοκρασίας, καθώς και την τοπική διαθέσιμη περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (AWC). Από τις εισόδους, όλοι οι βασικοί όροι της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου μπορεί να προσδιοριστούν, συμπεριλαμβανομένων της εξατμισοδιαπνοής, επαναφόρτισης του εδάφους, την απορροή, και την απώλεια υγρασίας από το επιφανειακό στρώμα. Ανθρώπινες επιπτώσεις στο υδατικό ισοζύγιο, όπως η άρδευση, δεν λαμβάνονται υπόψη. Πλήρεις περιγραφές των εξισώσεων μπορούν να βρεθούν στην αρχική μελέτη Palmer (1965) και στην πιο πρόσφατη ανάλυση Alley (1984).

Ο Palmer ανέπτυξε τον PDSI έτσι ώστε να περιλαμβάνει τη διάρκεια μιας ξηρασίας. Το κίνητρό του ήταν το εξής: ένας ασυνήθιστα υγρός μήνας στα μέσα μια μακροχρόνιας ξηρασίας, δεν θα πρέπει να έχει σημαντική επίπτωση στο δείκτη, ή μια σειρά από μήνες με σχεδόν φυσιολογική βροχόπτωση μετά από σοβαρή ξηρασία δεν σημαίνει ότι ολοκληρώνουν μία ξηρασία. Ως εκ τούτου, ο Palmer ανέπτυξε τα κριτήρια για τον προσδιορισμό του πότε μια ξηρασία αρχίζει και τελειώνει, τα οποία προσαρμόζουν τον PDSI αναλόγως. Ο Palmer (1965)

Περιγραφή: Ο Palmer είναι ένας αλγόριθμος εδαφικής υγρασίας ο οποίος βαθμονομείται για σχετικά ομοιογενείς περιοχές

Ποιος χρησιμοποιεί: πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες των ΗΠΑ και άλλα κράτη βασίζονται στον δείκτη Palmer για την ενεργοποίηση των προγραμμάτων αντιμετώπισης της ξηρασίας

Πλεονεκτήματα: ο πρώτος ολοκληρωμένος δείκτης ξηρασίας που αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες

Μειονεκτήματα: Οι τιμές του δείκτη Palmer ενδέχεται να καθυστερούν να αναδείξουν τις υφιστάμενες ξηρασίες για αρκετούς μήνες. Λιγότερο κατάλληλος για τις ορεινές περιοχές ή για περιοχές με ακραία κλιματικά φαινόμενα. Έχει μια απροσδιόριστη, ενσωματωμένη χρονική κλίμακα που μπορεί να είναι παραπλανητική

Αναπτύχθηκε από : W.C. Palmer, 1965



περιέγραψε την προσπάθεια αυτή, έδωσε παραδείγματα τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς από τον Alley (1984). Σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, ο δείκτης Palmer δεν είναι πλέον ένας μετεωρολογικός δείκτης, αλλά ένας υδρολογικός δείκτης ο οποίος αναφέρεται ως δείκτης υδρολογικής ξηρασίας Palmer (PHDI), επειδή βασίζεται στην εισροή υγρασίας (βροχοπτώσεις), εκροή και αποθήκευση, και δεν λαμβάνει υπόψη τη μακροπρόθεσμη τάση (Karl και Knight 1985).

Το 1989, μια τροποποιημένη μέθοδος για τον υπολογισμό του PDSI ξεκίνησε επιχειρησιακά (Heddinghaus και Sabol 1991). Αυτός ο τροποποιημένος PDSI διαφέρει από τον PDSI κατά τη διάρκεια των μεταβατικών περιόδων μεταξύ ξηρού και υγρού. Λόγω των ομοιοτήτων μεταξύ αυτών των δεικτών Palmer, οι όροι "Δείκτης Palmer" και «Δείκτης Ξηρασίας Palmer" χρησιμοποιήθηκαν για να περιγράψουν τα γενικά χαρακτηριστικά των δύο δεικτών.

Ο Δείκτης Palmer κυμαίνεται περίπου μεταξύ -6,0 και 6,0. Ο Palmer επέλεξε αυθαίρετα την κλίμακα ταξινόμησης των συνθηκών υγρασίας με βάση την αρχική του έρευνα στην κεντρική Αϊόβα και το δυτικό Κάνσας (Palmer 1965).

Στην ιδανική περίπτωση, ο δείκτης Palmer

Τιμές του Palmer	
4.0+	Ιδιαίτερα υγρό
3.0 – 3.99	Πολύ υγρό
2.0 – 2.99	Μέτρια υγρό
1.0 – 1.99	Σχεδόν υγρό
0.5 – 0.99	Ελάχιστα υγρό
0.49 -- 0.49	Σχεδόν κανονικό
-0,5 - -0.99	Ελάχιστα ξηρό
-1.0 - -1.99	Σχεδόν ξηρό
-2.0 -- 2.99	Μέτρια ξηρό
-3.0 - -3.99	Πολύ ξηρό
-4.0 ή μικρότερος	Ιδιαίτερα Ξηρό

είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε ένα -4,0 στη Νότια Καρολίνα να έχει την ίδια έννοια όσον αφορά την απόκλιση (departure) υγρασίας με βάση φυσιολογικές κλιματολογικές συνθήκες, όπως ένα -4,0 στο Idaho (Alley 1984). Ο Δείκτης Palmer συνήθως υπολογίζεται σε μηνιαία βάση, με αποτέλεσμα να υπάρχει στις εθνικές κλιματολογικές υπηρεσίες της Αμερικής αρχειοθετημένα στοιχεία των μηνιαίων τιμών PDSI για κάθε τμήμα του κλίματος στις Ηνωμένες Πολιτείες από το 1895 μέχρι σήμερα. Επιπλέον, οι εβδομαδιαίες τιμές του Δείκτη Palmer (στην πραγματικότητα τροποποιημένες τιμές του PDSI) υπολογίζονται για τα τμήματα του κλίματος κατά τη



διάρκεια κάθε καλλιεργητικής περιόδου και είναι διαθέσιμες στο Εβδομαδιαίο Δελτίο Καιρού και των καλλιεργειών. Οι εβδομαδιαίοι χάρτες του δείκτη Palmer είναι επίσης διαθέσιμοι στο διαδίκτυο από το Κέντρο πρόβλεψης του κλίματος.

Ο Δείκτης Palmer είναι δημοφιλής και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για μια ποικιλία εφαρμογών σε όλες τις Ηνωμένες Πολιτείες. Είναι η πιο αποτελεσματική μέτρηση για ευαίσθητους τομείς στις συνθήκες υγρασίας του εδάφους, όπως είναι η γεωργία (Willeke et al. 1994). Είναι επίσης χρήσιμο εργαλείο παρακολούθησης της ξηρασίας και έχει χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει ενέργειες που σχετίζονται με τα σχέδια έκτακτης ανάγκης της ξηρασίας (Willeke et al. 1994). Ο Alley (1984) προσδιόρισε τρία θετικά χαρακτηριστικά του Δείκτη Palmer που συμβάλλουν στη δημοτικότητα του: (1) παρέχει στους υπευθύνους λήψης αποφάσεων, μια μέτρηση της ανωμαλίας του κλίματος σε μια περιοχή (2), παρέχει την δυνατότητα να τοποθετηθούν οι τρέχουσες συνθήκες σε ιστορικά δείγματα και (3) παρέχει χωρικές και χρονικές παραστάσεις ιστορικών ξηρασιών. Αρκετά κράτη, συμπεριλαμβανομένης της Νέας Υόρκης, Κολοράντο, Αϊντάχο, και Γιούτα, χρησιμοποιούν τον Δείκτη Palmer ως ένα μέρος των συστημάτων παρακολούθησης της ξηρασίας.

Υπάρχουν σημαντικά προβλήματα κατά τη χρήση του Δείκτη Palmer, τα οποία και περιγράφονται λεπτομερώς από τον Alley (1984) και Karl και Knight (1985). Τα μειονεκτήματα του Δείκτη Palmer έχουν ως εξής:

- Οι τιμές ποσοτικοποίησης της έντασης της ξηρασίας που σηματοδοτούν την έναρξη και το τέλος μιας ξηρασίας επιλέγονταν αυθαίρετα με βάση την έρευνα του Palmer στην κεντρική και δυτική Αϊόβα του Κάνσας και δεν έχουν ιδιαίτερη επιστημονική έννοια.
- Ο Δείκτης Palmer είναι ευαίσθητος στην τοπική διαθέσιμη περιεκτικότητα του κάθε τύπου εδάφους σε νερό (AWC). Έτσι, η εφαρμογή του δείκτη για ένα τμήμα του κλίματος μπορεί να είναι πολύ γενική.
- Τα δύο στρώματα του εδάφους κατά τους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου απλοποιούνται ώστε μπορεί να μην είναι ακριβώς αντιπροσωπευτικά για μια περιοχή.



- Χιονόπτωση, χιονοκάλυψη, και παγωμένο έδαφος δεν περιλαμβάνονται στο δείκτη. Όλες οι κατακρημνίσεις αντιμετωπίζονται ως βροχή, έτσι η χρονική στιγμή της τιμής της PDSI ή PHDI ενδέχεται να είναι ανακριβείς κατά τους χειμερινούς μήνες και την άνοιξη στις περιοχές όπου το χιόνι εμφανίζεται.
- Η φυσική υστέρηση από τη στιγμή εμφάνισης της βροχόπτωσης και της προκύπτουσας απορροής δεν λαμβάνεται υπόψη. Επιπλέον, δεν επιτρέπεται να ληφθεί υπόψη η απορροή στο μοντέλο μέχρι τη στιγμή που η χωρητικότητα επιφανειακών και υπόγειων στρωμάτων του εδάφους είναι πλήρης σε νερό, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε υποτίμηση των απορροών.
- Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με τη μέθοδο Thornthwaite. Η τεχνική αυτή έχει ευρεία αποδοχή, αλλά εξακολουθεί να είναι προσεγγιστική.

Αρκετοί άλλοι ερευνητές έχουν υποβάλει επιπρόσθετους περιορισμούς όσον αφορά στον Δείκτη Palmer. Ο McKee et al. (1995) πρότεινε ότι ο PDSI έχει σχεδιαστεί για τη γεωργία, αλλά δεν αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις υδρολογικές επιπτώσεις που προκύπτουν από μεγαλύτερες ξηρασίες. Ο Δείκτης Palmer εφαρμόζεται επίσης στις Ηνωμένες Πολιτείες ενώ έχει μικρή αποδοχή σε άλλα κράτη (Kogan 1995). Μια εξήγηση για αυτό προβλέπεται από τον Smith et al. (1993), ο οποίος πρότεινε ότι ο δείκτης δεν λειτουργεί καλά σε περιοχές όπου υπάρχουν ακραίες μεταβολές της βροχόπτωσης ή της απορροής. Σημαντικά παραδείγματα αποτελούν η Αυστραλία και η Νότιος Αφρική. Μια άλλη αδυναμία του Δείκτη Palmer είναι ότι η ταξινόμηση σε «ακραία» και «σοβαρή» ξηρασία εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα σε ορισμένες περιοχές της χώρας από ό, τι σε άλλες (Willeke et al. 1994).



2.3.4 Δείκτης υγρασίας καλλιέργειας (Crop Moisture Index "CMI")

Ο Δείκτης υγρασίας καλλιέργειας (CMI) χρησιμοποιεί μια μετεωρολογική προσέγγιση για την εβδομαδιαία παρακολούθηση των συνθηκών καλλιέργειας. Αναπτύχθηκε από τον Palmer (1968) από διαδικασίες στο πλαίσιο του υπολογισμού του PDSI. Ο PDSI παρακολουθεί μακροχρόνια μετεωρολογικά υγρές και ξηρές περιόδους. Ο CMI σχεδιάστηκε για να αξιολογήσει τις βραχυπρόθεσμες συνθήκες υγρασίας σε περιοχές με καλλιέργειες μείζονος παραγωγής. Βασίζεται στη μέση θερμοκρασία και συνολική βροχόπτωση για κάθε εβδομάδα μέσα σε μία κλιματική περιοχή, καθώς και την τιμή του δείκτη CMI της προηγούμενης εβδομάδας. Ο CMI ανταποκρίνεται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, και είναι σταθμισμένος με βάση την τοποθεσία και την ώρα, έτσι ώστε οι χάρτες, που εμφανίζουν συνήθως τον εβδομαδιαίο CMI στις Ηνωμένες Πολιτείες, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συγκρίνουν τις συνθήκες υγρασίας σε διαφορετικές θέσεις.

Περιγραφή: Είναι παράγωγο του δείκτη Palmer. Ο CMI αντανakλά την προσφορά υγρασίας σε σύντομο χρονικό διάστημα σε μεγάλες καλλιεργήσιμες περιοχές παραγωγής και δεν έχει σκοπό να αξιολογήσει τη μακροπρόθεσμη ξηρασία.

Πλεονεκτήματα: Μπορεί αν διαπιστώσει τυχούσες γεωργικές ξηρασίες

Αναπτύχθηκε από: W.C. Palmer, 1968

Επειδή έχει σχεδιαστεί για να παρακολουθεί τις βραχυπρόθεσμες συνθήκες υγρασίας που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών, ο CMI δεν είναι ένα καλό μακροπρόθεσμο εργαλείο παρακολούθησης της ξηρασίας. Η ταχεία αντίδραση του CMI στις αλλαγές των βραχυπρόθεσμων συνθηκών μπορεί να παράσχει παραπλανητικές πληροφορίες σχετικά με τις μακροπρόθεσμες συνθήκες. Για παράδειγμα, μια ευεργετική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας μπορεί να επιτρέψει στον CMI να υποδείξει κατάλληλες συνθήκες υγρασίας, ενώ η μακροχρόνια ξηρασία σε αυτή τη θέση εξακολουθεί να υφίσταται. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του CMI που περιορίζει τη χρήση του ως ένα μακροπρόθεσμο εργαλείο παρακολούθησης της ξηρασίας είναι ότι ο CMI συνήθως ξεκινά και τελειώνει κάθε καλλιεργητική περίοδο κοντά στο μηδέν. Αυτός ο περιορισμός εμποδίζει τον CMI από το να χρησιμοποιηθεί για να παρακολουθεί τις συνθήκες



υγρασίας εκτός καλλιεργητικής περιόδου, ιδιαίτερα σε ξηρασίες που εκτείνονται σε διάστημα πολλών ετών. Ο CMI, επίσης μπορεί να μην ισχύει κατά τη διάρκεια της φύτευσης των σπερμάτων, κατά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου σε μία ορισμένη καλλιέργεια του.

2.3.5 Δείκτης Προσφοράς Επιφανειακού Νερού (SWSI - "swazee")

Ο Δείκτης Προσφοράς Επιφανειακού Νερού (SWSI) αναπτύχθηκε από τους Shafer και Dezman (1982) για να συμπληρώσει τον δείκτη Palmer για τις συνθήκες υγρασίας σε ολόκληρη την πολιτεία του Κολοράντο. Ο Δείκτης Palmer είναι βασικά ένας αλγόριθμος υγρασίας του εδάφους βαθμονομημένος για σχετικά ομοιογενείς περιοχές, αλλά δεν έχει σχεδιαστεί για να αντιπροσωπεύει μεγάλες τοπογραφικές διαφορές που υπάρχουν σε μια περιοχή και δεν αντιπροσωπεύει τη συσσώρευση του χιονιού και τις επόμενες απορροές. Οι Shafer και Dezman σχεδίασαν τον SWSI έτσι ώστε να είναι ένας δείκτης των συνθηκών των επιφανειακών

Περιγραφή: Ο SWSI έχει σχεδιαστεί για να συμπληρώσει τον Palmer στην πολιτεία του Κολοράντο, όπου η ορεινή ποσότητα χιονιού αποτελεί βασικό στοιχείο της προσφοράς νερού, που υπολογίζεται ανά λεκάνη απορροής ποταμού, με βάση την ποσότητα χιονιού, απορροή, βροχόπτωση, και την πλήρωση των ταμιευτήρων.

Πλεονεκτήματα: αντιπροσωπεύει συνθήκες προσφοράς νερού μοναδικά για κάθε λεκάνη απορροής

Μειονεκτήματα: αλλαγή ενός σταθμού συλλογής δεδομένων ή αλλαγή στη διαχειριστική πολιτική των υδάτων απαιτεί επαναξιολόγηση των νέων αλγορίθμων. Ο δείκτης είναι μοναδικός για κάθε λεκάνη απορροής, γεγονός που περιορίζει τις συγκρίσεις μεταξύ λεκανών

Αναπτύχθηκε από: Shafer και Dezman, 1982

υδάτων και περιέγραψαν τον δείκτη ως «εξαρτώμενο από το ορεινό νερό (mountain water dependent)» στο οποίο βουνό το χιόνι είναι ένα σημαντικό συστατικό.

Ο στόχος του SWSI ήταν να ενσωματώσει και τα υδρολογικά και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά σε μια ενιαία τιμή του δείκτη που μοιάζει με το Δείκτη Palmer για κάθε σημαντική λεκάνη απορροής ποταμού στην πολιτεία του Κολοράντο (Shafer και Dezman 1982). Οι τιμές αυτές είναι τυποποιημένες ώστε να επιτρέπουν τη σύγκριση μεταξύ των λεκανών απορροής. Τέσσερις μεταβλητές εισόδου απαιτούνται στο πλαίσιο του SWSI: Η ποσότητα χιονιού (snowpack), η απορροή, η βροχόπτωση, και η πλήρωση των ταμιευτήρων (reservoir storage). Επειδή εξαρτάται



από την εποχή, ο SWSI υπολογίζεται μόνο με την ποσότητα χιονιού (snowpack), την κατακρήμνιση και την πλήρωση των ταμιευτήρων τον χειμώνα. Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, η απορροή αντικαθιστά την ποσότητα χιονιού ως συνιστώσα στο πλαίσιο της εξίσωσης του SWSI.

Η διαδικασία για τον καθορισμό του SWSI για μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής έχει ως εξής: τα μηνιαία στοιχεία συλλέγονται και αθροίζονται για όλους τους

βροχομετρικούς σταθμούς, ταμιευτήρες, και ποσότητα χιονιού/ απορροή μετρώντας τους σταθμούς πάνω από την λεκάνη. Κάθε αθροισμένο στοιχείο κανονικοποιείται χρησιμοποιώντας μια ανάλυση συχνότητας που συγκεντρώθηκε από ένα μακροχρόνιο σύνολο δεδομένων. Η πιθανότητα μη υπέρβασης - η πιθανότητα επόμενα αθροίσματα του στοιχείου να μην είναι μεγαλύτερα από το τρέχον άθροισμα - καθορίζεται για

Περιγραφή: Όπως και ο SWSI, ο RDI υπολογίζεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, ενσωματώνοντας τη θερμοκρασία καθώς και την κατακρήμνιση, τη χιονόπτωση, την απορροή και την πλήρωση των ταμιευτήρων ως μεταβλητές εισόδου.
Που χρησιμοποιείται: το Τμήμα Βελτιώσεων της Οκλαχόμα χρησιμοποιεί τον δείκτη ως μέρος του σχεδίου διαχείρισης ξηρασίας
Πλεονεκτήματα: με την προσθήκη μιας συνιστώσας της θερμοκρασίας, αντιπροσωπεύεται επίσης η εξάτμιση
Μειονεκτήματα: επειδή ο δείκτης είναι μοναδικός για κάθε λεκάνη απορροής ποταμού, είναι περιορισμένες οι συγκρίσεις μεταξύ λεκανών
Αναπτύχθηκε από: Τμήμα Βελτιώσεων, με σκοπό την απελευθέρωση έκτακτης βοήθειας για την ξηρασία

κάθε στοιχείο με βάση την ανάλυση συχνότητας. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση των πιθανοτήτων μεταξύ των στοιχείων. Σε κάθε στοιχείο αντιστοιχεί ένα βάρος, ανάλογα με την τυπική συμβολή του ως προς τα επιφανειακά ύδατα εντός της λεκάνης, και αυτά τα σταθμισμένα στοιχεία αθροίζονται για να καθορίσουν μια τιμή του δείκτη SWSI που αντιπροσωπεύει το σύνολο της λεκάνης. Όπως και ο Δείκτης Palmer, ο SWSI επικεντρώνεται στο μηδέν και έχει ένα εύρος μεταξύ -4,2 και 4,2.

Ο SWSI έχει χρησιμοποιηθεί, μαζί με το Δείκτη Palmer, για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του Σχεδίου Ξηρασίας του Κολοράντο. Ένα από τα πλεονεκτήματά του είναι ότι είναι απλός να υπολογίσει και να δίνει μια αντιπροσωπευτική μέτρηση



της προσφοράς των επιφανειακών υδάτων σε μία ολόκληρη περιοχή. Έχει τροποποιηθεί και εφαρμόζεται και σε άλλες δυτικές χώρες.

Αρκετά χαρακτηριστικά του SWSI περιορίζουν την εφαρμογή του. Επειδή ο υπολογισμός του SWSI είναι μοναδικός για κάθε λεκάνη απορροής ή περιφέρεια, είναι δύσκολο να συγκριθούν τιμές του SWSI μεταξύ λεκανών ή περιφερειών (Doesken et al. 1991). Μέσα σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής ή περιφέρεια, η διακοπή λειτουργίας κάποιου σταθμού συνεπάγεται ότι νέοι σταθμοί θα πρέπει να προστεθούν στο σύστημα και νέες κατανομές συχνοτήτων θα πρέπει να καθοριστούν για το συγκεκριμένο στοιχείο. Πρόσθετες αλλαγές στη διαχείριση του νερού μέσα σε μια λεκάνη, όπως οι εκτροπές της ροής ή προσθήκη νέων ταμιευτήρων, σημαίνει ότι ολόκληρος ο αλγόριθμος SWSI για την εν λόγω λεκάνη χρειάζεται να επανασχεδιασθεί για να ληφθούν υπόψη οι αλλαγές στο βάρος κάθε συνιστώσας. Έτσι, είναι δύσκολο να διατηρηθεί μία ομοιογενής χρονοσειρά του δείκτη (Heddinghaus και Sabol 1991). Ακραία καιρικά φαινόμενα επίσης δύναται να προκαλέσουν κάποιο πρόβλημα, αν τα γεγονότα είναι πέρα από τις ιστορικές χρονοσειρές τότε ο δείκτης θα πρέπει να επαναξιολογηθεί για να συμπεριλάβει αυτά τα γεγονότα κατά την κατανομή συχνότητας ενός στοιχείου της λεκάνης.

2.3.6 Δείκτης Επανόρθωσης Ξηρασίας (Reclamation Drought Index “RDI”)

Ο Δείκτης Επανόρθωσης Ξηρασίας (Reclamation Drought Index) πρόσφατα αναπτύχθηκε ως εργαλείο για τον καθορισμό της σοβαρότητας και διάρκειας της ξηρασίας, καθώς και για την πρόβλεψη της έναρξης και λήξης των περιόδων ξηρασίας. Η ώθηση για την εκπόνηση του RDI προήλθε από την Δράση για Επανόρθωση από τη ξηρασία των κρατών το 1988, που επιτρέπει στα κράτη να ζητήσουν βοήθεια από το Τμήμα των Βελτιώσεων για την άμβλυση των επιπτώσεων της ξηρασίας.

Τιμές του RDI	
4.0+	Ιδιαίτερα υγρό
1,5-4,00	Μέτρια υγρό
1,0-1,50	Κανονικά έως ήπια υγρό
0 -- 1,50	Κανονικά έως ήπια ξηρό
- 1,5 -- 4,00	Μέτρια ξηρό
-4,00 ή λιγότερο	Ιδιαίτερα ξηρό



Όπως και με το SWSI, ο RDI υπολογίζεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, και ενσωματώνει τα στοιχεία της προσφοράς της βροχόπτωσης, της ποσότητας χιονιού, της απορροής, και τα επίπεδα στους ταμιευτήρες. Ο RDI μπορεί να προσαρμοστεί σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή και η κύρια δύναμή του είναι η ικανότητά του να λαμβάνονται υπόψη τόσο το κλίμα όσοι και οι παράγοντες προσφοράς νερού.

Η Οκλαχόμα έχει αναπτύξει τη δική της έκδοση του RDI και σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει το δείκτη ως ένα εργαλείο στο πλαίσιο του συστήματος παρακολούθησης που ορίζεται στο σχέδιο ξηρασίας του κράτους. Οι τιμές του RDI είναι παρόμοιες με αυτές του SPI, PDSI, και SWSI.

2.3.7 Δείκτης των Δεκατημορίων

Η τακτοποίηση των μηνιαίων στοιχείων βροχοπτώσεων σε δεκατημόρια είναι μία άλλη τεχνική παρακολούθησης της ξηρασίας. Αναπτύχθηκε από τους Gibbs και Maher

Περιγραφή: ομαδοποιεί τη μηνιαία βροχόπτωση σε δεκατημόρια, έτσι εξ ορισμού, "πολύ χαμηλότερες από το κανονικό" καιρικές συνθήκες δεν μπορούν να εμφανίζονται πιο συχνά από το 20 τοις εκατό του χρόνου
Που χρησιμοποιείται: Αυστραλία
Πλεονεκτήματα: παρέχει μια ακριβή στατιστική μέτρηση της βροχόπτωσης
Μειονεκτήματα: ακριβείς υπολογισμοί απαιτούν μια μακρά εγγραφή κλιματικών δεδομένων
Αναπτύχθηκε από: Gibbs και Maher, 1967

(1967) με σκοπό την αποφυγή μερικών από τις αδυναμίες του δείκτη "Ποσοστού επί του κανονικού (Percent of Normal)". Η τεχνική που αναπτύχθηκε χωρίζει την κατανομή των περιστατικών κατά τη διάρκεια μιας μακροχρόνιας καταγραφής βροχοπτώσεων σε δέκατα της κατανομής. Κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές καλείται «δεκατημόριο.» Το πρώτο δεκατημόριο είναι το ποσό των βροχοπτώσεων που δεν υπερβαίνεται από το χαμηλότερο 10% των περιστατικών βροχόπτωσης. Το δεύτερο δεκατημόριο είναι το ποσό βροχόπτωσης που δεν υπερβαίνει το χαμηλότερο 20% των περιστατικών. Αυτά τα δεκατημόρια συνεχίζονται μέχρι το ποσό βροχής που προσδιορίζεται από το δέκατο δεκατημόριο είναι το μεγαλύτερο ποσό βροχοπτώσεων κατά την μακροχρόνια καταγραφή. Εξ ορισμού, το πέμπτο δεκατημόριο είναι το μεσαίο, και αυτό είναι το ποσό βροχόπτωσης που δεν



υπερβαίνεται από το 50% των περιστατικών κατά τη διάρκεια της καταγραφής. Τα δεκατημόρια ομαδοποιούνται σε πέντε κλάσεις.

Η μέθοδος των δεκατημορίων επιλέχθηκε ως η μετεωρολογική μέτρηση της ξηρασίας στο σύστημα παρακολούθησης ξηρασίας της Αυστραλίας, γιατί είναι σχετικά εύκολο να υπολογιστεί, και απαιτεί λιγότερα δεδομένα και λιγότερες υποθέσεις από ό, τι ο Δείκτης Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer (Smith et al. 1993). Σε αυτό το σύστημα, οι γεωργοί και κτηνοτρόφοι μπορούν να ζητήσουν τη βοήθεια της κυβέρνησης μόνο εάν η ξηρασία αποδεικνύεται ότι είναι ένα γεγονός που συμβαίνει

Τιμές του Δείκτη Δεκατημορίων	
Δεκατημόριο 1-2 μικρότερο από 20%	Πολύ κάτω από το κανονικό
Δεκατημόριο 3- 4 μικρότερο από 20%	Κάτω από το κανονικό
Δεκατημόριο 5-6 μικρότερο από 20%	Κοντά στο κανονικό
Δεκατημόριο 7-8 μικρότερο από 20%	Πάνω από το κανονικό
Δεκατημόριο 9- 10 μικρότερο από 20%	Πολύ πάνω από το κανονικό

με περίοδο επαναφοράς 20-25 χρόνια (δεκατημόρια 1 και 2 πάνω από μία 100-ετή καταγραφή) και έχει διαρκέσει περισσότερο από 12 μήνες (White και O'Meagher 1995). Αυτή η ομοιομορφία στις ταξινομήσεις της ξηρασίας, σε αντίθεση με ένα σύστημα που βασίζεται στο «Ποσοστό επί της κανονικής βροχόπτωσης», έχει βοηθήσει τις αρχές της Αυστραλίας για τον προσδιορισμό κατάλληλων απαντήσεων στην ξηρασία. Ένα μειονέκτημα του δείκτη δεκατημορίου είναι ότι απαιτεί μία μεγάλη κλιματολογική καταγραφή που είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του δεκατημορίου με ακρίβεια.



2.3.8 Δείκτης Ξηρότητας (AI)

Σύμφωνα με την ταξινόμηση της UNESCO (1979) η κλιματική ξηρότητα μπορεί να παρουσιαστεί με τον δείκτη ξηρότητας (Aridity Index - AI) που είναι το πηλίκο του μέσου ετήσιου ύψους βροχής προς το μέσο ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισιοδιαπνοής. Με βάση αυτόν το δείκτη μια περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως υπερβολικά ξηρή, ξηρή, ημίξηρη, ύφυγρη ή υγρή. Αναλυτικά, ο δείκτης υπολογίζεται από την εξίσωση: $AI = P / PET$

0,03 και μικρότερο	Ιδιαίτερα Ξηρό
0.03 - 0.20	Ξηρό
0.20 - 0.50	Ήπια ξηρό
0.50 - 0.75	Ήπια υγρό
>0.75	Υγρό

όπου, P: το μέσο ετήσιο ύψος βροχής και PET: το μέσο ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισιοδιαπνοής.

Σε περίπτωση που το χρονικό βήμα εξέτασης είναι μικρότερο του έτους, π.χ. μηνιαίο, γίνεται χρήση της μηνιαίας βροχόπτωσης και της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισιοδιαπνοής. Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται οι τιμές που λαμβάνει ο δείκτης και ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός του κλίματος μιας περιοχής βάση αυτών. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο AI χρησιμοποιείται διότι υπολογίζεται σχετικά εύκολα, εφόσον δεν απαιτεί πληθώρα δεδομένων και αποτελεί μία καλή λύση για την ένδειξη εμφάνισης της ξηρασίας αφού εμπεριέχει δύο βασικούς υδρολογικούς παράγοντες, τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισιοδιαπνοή.

2.3.9 Δείκτης Βροχόπτωσης (RI)

Ο Εθνικός Δείκτης Βροχόπτωσης (RI) δημιουργήθηκε (Gommes and Petrassi, 1994) για να συγκρίνει τιμές βροχόπτωσης με έντονη διακύμανση σε ηπειρωτική κλίμακα στην Αφρική (Hayes, 1999). Για κάθε χώρα υπολογίστηκε ο δείκτης βασιζόμενος στην ετήσια μέση βροχόπτωση της κάθε χώρας διορθωμένη σύμφωνα με τη μέση τιμή των βροχοπτώσεων μεγάλης χρονοσειράς για κάθε σταθμό χωριστά. Η κλίμακα ανά χώρα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συνδέεται και με άλλα στατιστικά μεγέθη, όπως είναι η παραγωγή αγροτικών προϊόντων.

Οι Gommes and Petrassi (1994) υποστηρίζουν ότι ο δείκτης βροχόπτωσης (RI) συνδυάζεται ικανοποιητικά με την εθνική παραγωγή αγροτικών προϊόντων στην



Αφρική. Επειδή ο δείκτης διορθώνεται με βάση την ετήσια βροχόπτωση, οι σταθμοί εκείνοι που βρίσκονται σε υγρότερες περιοχές της χώρας εμφανίζουν μεγαλύτερη επίδραση στο δείκτη σε σχέση με τους σταθμούς που βρίσκονται σε ξηρές περιοχές της χώρας. Έτσι, αν ο δείκτης έχει σαν σκοπό να συνδυάσει τη βροχόπτωση με την ανάπτυξη των φυτών, τότε ο δείκτης βροχόπτωσης (RI) μπορεί να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα. Στην περίπτωση όμως που ο δείκτης χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό υδρολογικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων ενός επεισοδίου ξηρασίας τότε τα αποτελέσματα του είναι χωρίς σημασία.

Ο δείκτης βροχόπτωσης RI είναι ανεξάρτητος των πραγματικών ποσών βροχόπτωσης, τα οποία μπορεί να εμφανίζουν ιδιαίτερα περιοχικά χαρακτηριστικά, ενώ επιτρέπει συγκρίσεις μεγάλης κλίμακας περιλαμβάνοντας ολόκληρη τη χώρα (Hayes, 1999). Στη περίπτωση που κάποιος σταθμός παρουσιάζει κενά στα δεδομένα του τότε ο εθνικός δείκτης (RI) μπορεί να υπολογιστεί χωρίς το σταθμό αυτό. Αυτό δίνει την δυνατότητα στο εθνικό δείκτη βροχόπτωσης να εμφανίζει μεγάλες χρονοσειρές. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης για πέντε σταθμούς στο Καμερούν από το 1900, τότε ο δείκτης βροχόπτωσης μπορεί να υπολογιστεί από το 1900. Αν όμως ο αριθμός των σταθμών αυξηθεί στους 15 από το 1960, τότε ο δείκτης βροχόπτωσης μπορεί να υπολογιστεί και να διορθωθεί σύμφωνα με το νέο αριθμό των σταθμών.



3. Κεφάλαιο 3 - Ο Δείκτης Palmer – Μεθοδολογία Εκτέλεσης Υπολογισμών

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η ξηρασία είναι από τη φύση της ένα τοπικό-περιφερειακό φαινόμενο. Για αυτό τον λόγο, έχουν αναπτυχθεί πολλοί δείκτες οι οποίοι προσπαθούν να υπολογίσουν την ένταση της ξηρασίας σε αυτό το χωρικό επίπεδο. Ένας από τους πιο γνωστούς δείκτες, ο οποίος έχει ευρέως εφαρμοστεί, είναι ο Δείκτης Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer ή αλλιώς γνωστός ως PDSI (Palmer Drought Severity Index).

Πολλές ποσοτικές μετρήσεις της ξηρασίας έχουν αναπτυχθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες, με βάση τον τομέα και τη θέση την οποία επηρεάζουν, τον τομέα εφαρμογής τους, και το βαθμό κατανόησης των φαινομένων που περιλαμβάνουν οι υπολογισμοί τους. Το πολύπλοκο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου που αναπτύχθηκε από τον W. Palmer στα μέσα του εικοστού αιώνα αποτελεί σημείο καμπής στην εξέλιξη των δεικτών ξηρασίας. Παρόλα αυτά, παρά τη σημαντική βελτίωση που επέφερε, σε σχέση με τις απλές μετρήσεις που πραγματοποιούνταν στις αρχές του εικοστού αιώνα, ο δείκτης Palmer πάσχει από κάποιες εγγενής αδυναμίες. Οι μετα-Palmer λύσεις περιλαμβάνουν σύγχρονους δείκτες, όπως τον Δείκτη Προσφοράς Επιφανειακού Νερού (SWSI) και τον τυποποιημένο δείκτη κατακρήμνισης (SPI) και τον δείκτη παρακολούθησης ξηρασίας (DMI) (Surface Water Supply Index, Standardized Precipitation Index και Drought Monitor Index).

Ωστόσο, η ευρεία χρήση και εφαρμογή του δείκτη Palmer τον καθιστά εξίσου σημαντικό με τους σύγχρονους δείκτες. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να μελετηθεί στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Ο Palmer καθόρισε ως περίοδο ξηρασίας, μία χρονική περίοδο χωρισμένη σε χρονικά βήματα της τάξης μηνών ή ετών, κατά την οποία η πραγματική υγρασία (actual moisture supply) σε ένα ορισμένο χωρικά τόπο, είναι συνεχώς μειούμενη συγκριτικά με την κλιματικά αναμενόμενη (climatically expected) ή κλιματικά κατάλληλη (climatically appropriate). Με βάση αυτόν τον ορισμό, ο Palmer ανέπτυξε τον δείκτη PDSI ως μέσο μέτρησης της δριμύτητας (severity) της ξηρασίας. Ο δείκτης αυτός συνήθως αναφέρεται και απλά ως δείκτης Palmer (Alley 1984).



Γενικά, ο δείκτης Palmer παρουσιάζει ευρεία χρήση. Συγκεκριμένα, τιμές του PDSI έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την καλλιεργητική περίοδο από το Υπουργείο Εμπορίου και Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο για την ανάδειξη της χωρικής έκτασης και δριμύτητας ξηρασιών στην Βορειοανατολική Αμερική, (Palmer 1967) και σε όλη την επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών κατά το θερμό και ξηρό καλοκαίρι του 1980 (Karl and Quayle, 1981). Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση των ξηρασιών των δεκαετιών του 1930, 1950 και 1970 στις Η.Π.Α (Felch, 1978). Ακόμα ο δείκτης PDSI, έχει χρησιμοποιηθεί για την μελέτη των χωρικών και περιστασιακών χαρακτηριστικών των δεικτών στην περιοχή της Nebraska (U.S.A) (Lawson et al, 1971). Έχει χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό της συχνότητας σημαντικών δριμύτατων ξηρασιών στις Νοτιοανατολικές περιοχές των Η.Π.Α (Dickerson and Dethier, 1970). Χάρτες του εφαρμοσμένου δείκτη PDSI έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μίας ανεπεξέργαστης (crude) σχέσης μεταξύ περιοχών που έχουν εμφανίσει ξηρασία και αναπτυγμένο κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιάς στην Μινεσότα (Η.Π.Α) και στο Γουισκόνσιν (Η.Π.Α). Τέλος, ο Puckett (1981) κατασκεύασε ένα αρχείο 230 ετών του PDSI για τη Βόρεια Virginia με σχέση που προέκυψε από τις μεταβολές του πλάτους των δακτυλίων των δέντρων (tree rings).

Η μέθοδος Palmer, παρόλο που αναφέρεται ως δείκτης μετεωρολογικής ξηρασίας, λαμβάνει υπόψη τη βροχόπτωση, την εξατμισοδιαπνοή και την κατάσταση της εδαφικής υγρασίας, οι οποίοι είναι καθοριστικοί παράγοντες της υδρολογικής ξηρασίας. Ο δείκτης PDSI, σχετίζεται με την υδρολογική παροχή ποταμών, λιμνών και ταμιευτήρων και για αυτό το λόγο είναι αντικείμενο ενδιαφέροντος υδρολόγων, μετεωρολόγων και κλιματολόγων. Τέλος, ο δείκτης χρησιμοποιήθηκε και για την αξιολόγηση δεικτών που αναπτύχθηκαν για δημοτικά και αρδευτικά συστήματα υδροδότησης στην περιοχή της UTAH στις Η.Π.Α.

Μία χωρική μελέτη των ξηρασιών γενικά απαιτεί έναν «αντικειμενικό» δείκτη για την μέτρηση της δριμύτητας της ξηρασίας. Ο PDSI είναι ένας από τους λίγους δείκτες ξηρασίας που είναι άμεσα διαθέσιμος και τυποποιημένος (standardized) για να διευκολύνει τις άμεσες συγκρίσεις του PDSI μεταξύ διαφορετικών περιοχών.



Σε αυτήν την εργασία, θα συζητηθεί η διαδικασία υπολογισμού του PDSI μέσω μίας ανάλυσης της μεθόδου. Οι υπολογιστικές διαδικασίες θα παρουσιαστούν με πέντε τρόπους

- α) Περιγραφικά με περιγραφική παρουσίαση των βημάτων υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer)
- β) Περιληπτικά με περιληπτική παρουσίαση της διαδικασίας υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer
- γ) Λεπτομερώς με μία αναλυτική παρουσίαση του δείκτη σε διακριτά βήματα.
- δ) Σχηματικά με την παράθεση ενός διαγράμματος ροής της υπολογιστικής διαδικασίας.
- ε) Επίσης σχηματικά με την απεικόνιση των εξισώσεων υπολογισμού του δείκτη Palmer σε 4 διακριτά βήματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αναλυτική παρουσίαση του δείκτη (γ), ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται οι υπόλοιποι τρεις τρόποι (α, β και δ).

3.1 Η υπολογιστική διαδικασία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η υπολογιστική διαδικασία του δείκτη Palmer, παραθέτοντας όλα τα βήματα υπολογισμού του δείκτη παραλείποντας σχόλια και λεπτομέρειες επί της διαδικασίας, κάτι που θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Σημειώνεται ότι η διαδικασία που παρουσιάζεται σε αυτό και στο επόμενο κεφάλαιο εφαρμόστηκε σε ένα αρχείο excel, το οποίο «στήθηκε» από την αρχή και μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας και σε άλλες περιοχές, δίνοντας την δυνατότητα πειραματισμού και βελτίωσης, δεδομένου ότι όλα τα στάδια υπολογισμού⁵ του είναι φανερά στον χρήστη.

3.1.1 Υδρολογικό Μοντέλο Palmer

Η μέθοδος του Palmer ξεκινά με ένα υδατικό ισοζύγιο, συνήθως με μηνιαίο ή εβδομαδιαίο χρονικό βήμα, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης και

⁵ Πολλές εφαρμογές του δείκτη που είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο είναι σε μορφή black box μη δίνοντας την δυνατότητα κατανόησης της υπολογιστικής διαδικασίας και των βημάτων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό του.



θερμοκρασίας⁶. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία τα δεδομένα εισόδου είναι διαθέσιμα σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Στο υδατικό ισοζύγιο της μεθόδου Palmer, η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε δύο στρώματα (επιφανειακό και υποκείμενο). Το επιφανειακό στρώμα έχει σταθερό βάθος 25mm. Αυτή είναι επίσης και η ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκευθεί στο επιφανειακό στρώμα. Το πάχος του υποκείμενου στρώματος είναι μεταβαλλόμενο και έχει διαθέσιμη ικανότητα αποθήκευσης η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής που μελετάται. Ο τρόπος μεταφοράς νερού μεταξύ των δύο εδαφικών στρωμάτων καθορίζεται από κάποιες παραδοχές οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου. Συγκεκριμένα, η αποθηκευμένη ποσότητα υγρασίας δεν μπορεί να εξαχθεί από το υποκείμενο στρώμα, μέχρις ότου απομακρυνθεί όλη η διαθέσιμη υγρασία από το υπερκείμενο-επιφανειακό στρώμα. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PE - Potential Evapotranspiration) συνήθως υπολογίζεται με τη εφαρμογή της μεθόδου Thornthwaite⁷ (1948). Απώλειες από το έδαφος λόγω εξατμισοδιαπνοής παρατηρούνται αν $PE > P$, όπου P είναι η βροχόπτωση (Precipitation) για κάθε μελετώμενο μήνα. Οι απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής από το υπερκείμενο στρώμα (L_s) θεωρούνται ότι πραγματοποιούνται κατά τον δυνητικό-μέγιστο δυνατό βαθμό. Οι απώλειες από το υποκείμενο εδαφικό στρώμα (L_u) εξαρτώνται από την αρχικά αποθηκευμένη ποσότητα υγρασίας στο υποκείμενο στρώμα, την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, και τη συνδυασμένη διαθέσιμη ικανότητα υγρασίας (AWC - Available Moisture Capacity) και στα δύο εδαφικά στρώματα. Έτσι, αν $PE > P$

- $L_s = S_s$ ⁸ ή $(PE - P)$ (1) -(Επιλέγεται η μικρότερη τιμή εκ των δύο)
- $L_u = (PE - P - L_s) S_u / AWC$ ⁹, $L_u \leq S_u$

Όπου P είναι η βροχόπτωση και S_s και S_u είναι οι ποσότητες της διαθέσιμης υγρασίας αποθηκευμένης στην αρχή του μήνα στο επιφανειακό και υποκείμενο

⁶ Η θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Αν είναι ήδη διαθέσιμη η εξατμισοδιαπνοή τότε η θερμοκρασία δεν αποτελεί στοιχείο εισόδου για την υπολογιστική διαδικασία.

⁷ Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη μέθοδος για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής.

⁸ S_s = Αποθηκευμένη Υγρασία στο άνωθεν εδαφικό στρώμα κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα (προηγούμενο μήνα).

⁹ AWC = Available Water Capacity – Διαθέσιμη Ικανότητα Αποθήκευσης Υγρασίας (Είναι το άθροισμα της ικανότητας του ανώτερου και υποκείμενου εδαφικού στρώματος το οποίο είναι σταθερό και δεν μεταβάλλεται)



εδαφικό στρώμα αντίστοιχα. Απορροή θεωρείται ότι πραγματοποιείται μόνο και μόνο αν και τα δύο στρώματα φτάσουν την συνδυασμένη ικανότητα υγρασίας τους (AWC). Δηλαδή απορροή έχουμε όταν και τα δύο εδαφικά στρώματα είναι πλήρη.

Ως μέρος του υδατικού ισοζυγίου, η μέθοδος του Palmer υπολογίζει τρεις επιπλέον μεταβλητές:

- Την δυνητική επαναφόρτιση (potential recharge)
- Τις δυνητικές απώλειες (potential loss)
- Και την δυνητική απορροή (potential runoff)

Η δυνητική επαναφόρτιση (PR) ορίζεται ως η ποσότητα της υγρασίας που απαιτείται για να φέρει το έδαφος στην ικανότητα πεδίου (field capacity):

- $PR = AWC - (S_s - S_u)$ ή $AWC - S'$ (1)

Οι δυνητικές απώλειες ορίζονται ως η ποσότητα της υγρασίας, η οποία θα μπορούσε να χαθεί από το έδαφος μέσω της εξατμισοδιαπνοής με δεδομένο ότι η βροχόπτωση σε αυτό το διάστημα θα ήταν μηδενική:

- $PL = PL_s^{10} + PL_u^{11}$, (2)

Η δυνητική απορροή (PRO) ορίζεται ως η δυνητική βροχόπτωση μείον τη δυνητική επαναφόρτιση. Η δυνητική βροχόπτωση ορίζεται ως ίση με τη συνδυασμένη ικανότητα υγρασίας. Έτσι:

- $PRO = AWC - PR = S' = S_s + S_u$ (3)

Ο Palmer αναγνώρισε την αδυναμία αυτής της παραδοχής και σημείωσε ότι σε αναθεώρηση της ανάλυσης του θα επαναπροσδιόριζε την δυνητική βροχόπτωση ως μία τιμή 3 φορές τη φυσιολογική βροχόπτωση του μήνα. Ακόμα και αυτός ο ορισμός θεωρείται αυθαίρετος, ωστόσο η βροχόπτωση και η συνδυασμένη ικανότητα υγρασίας (AWC) είναι δύο μη συσχετιζόμενοι όροι.

¹⁰ $PL_s = H$ μικρότερη τιμή μεταξύ της PE και του S_s'

¹¹ $PL_u = (PE - PL_s)S'_u / AWC$



3.1.2 Σταθερές και συντελεστές που εξαρτώνται από το κλίμα της περιοχής

Οι τέσσερις δυναμικές τιμές: PE, PR, PL και PRO, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό τεσσάρων συντελεστών οι οποίοι εξαρτώνται από το κλίμα της μελετώμενης περιοχής:

$$\begin{aligned} a &= \overline{ET} / \overline{PE} \\ \beta &= \overline{R} / \overline{PR} \\ \gamma &= \overline{RO} / \overline{PRO} \\ \delta &= L / \overline{PL} \end{aligned} \quad (4)$$

Οι συντελεστές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες τιμές j. Με αυτόν τον τρόπο, ένα διαφορετικό σετ συντελεστών καθορίζεται για κάθε έναν από τους δώδεκα μήνες.

Αυτοί οι συντελεστές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αποκλίσεων (d) για κάθε μήνα μεταξύ της πραγματικής βροχόπτωσης του μήνα (P) και της κλιματικά κατάλληλης βροχόπτωσης P CAFEC που θα αντιστοιχούσε στην περιοχή (Climatically appropriate for existing conditions) έτσι ώστε:

- $d = P - P_{cafec} \text{ (15)} = P - (\alpha PE + \beta PR + \gamma PRO - \delta PL) \text{ (5)}$

Ο ορισμός της P_{cafec} στην ως άνω εξίσωση είναι ένα ανάλογο υδατικού ισοζυγίου όπου η βροχόπτωση είναι ίση με την εξατμισοδιαπνοή συν την απορροή (και την επαναφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα) συν ή μείον όποιας αλλαγής στην αποθηκευμένη εδαφική υγρασία.

3.1.3 Υπολογισμός του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης «ανωμαλίας» της υγρασίας Z, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

- $Z = K_j d, \text{ (6)}$

Όπου K_j ένας δείκτης βαρύτητας όπου ορίζεται ως:

$$K_i = \left(\frac{17.6}{\sum_{i=1}^{12} \overline{D}_i K_i} \right) K_i' \quad (7)$$



Όπου D_i είναι ο μέσος όρος της απόλυτης τιμής του d για τον μήνα j και

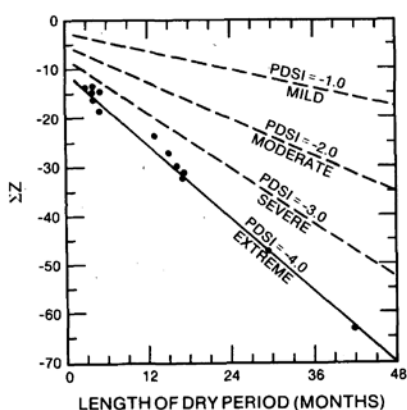
$$\hat{K}_j = 1.5 \log_{10} \left(\frac{T_j + 2,8}{\bar{D}_j} \right) + 0.5 \quad (8)$$

Όπου

$$T_j = (\bar{P}E_j + \bar{R}_j + \bar{R}O_j) / \bar{P}_j + \bar{L}_j$$

Η παράμετρος T_j είναι ένα μέτρο του λόγου απαίτησης υγρασίας προς την παροχή υγρασίας για τον μελετώμενο μήνα και περιοχή. Ο σκοπός των παραγόντων βαρύτητας είναι η προσαρμογή των αποκλίσεων (d) από την φυσιολογική βροχόπτωση έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμοι σε διαφορετικές περιοχές για διαφορετικούς μήνες. Χαρακτηριστικά σημειώνεται ότι μία τιμή $Z=-4.0$ κατά τον Ιούλιο σε μία περιοχή Α, είναι ισοδύναμη με μία τιμή $Z=-4.0$ κατά τον μήνα Φεβρουάριο σε μία περιοχή Β, όσον αφορά στην απόκλιση της υγρασίας από τις κλιματικά φυσιολογικές τιμές για τους μελετώμενους μήνες. Ο παράγοντας βαρύτητας K_j , τείνει να είναι μεγάλος σε ξηρές περιοχές και μικρός σε υγρές περιοχές. Κατά την παραγωγή του K_j , ο Palmer υπέθεσε ότι οι οικονομικές επιπτώσεις του πιο ξηρού έτους σε μία περιοχή ήταν ίδιες με αυτές του ξηρότερου έτους σε άλλες περιοχές. Η επίδραση μεγάλου εύρους μεταβολών στην χρήση των υδάτων, όπως η δημιουργία ταμιευτήρων, η αστικοποίηση ή οι πρακτικές άρδευσης δεν λαμβάνονται υπόψη. Οι εξισώσεις 7 και 8 παράχθηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από 9 περιοχές των Η.Π.Α. Η πολυπλοκότητα τους και η ασυνήθιστη μορφή τους απορρέουν από την δυσκολία που συνάντησε ο Palmer κατά την παραγωγή τους.

Ο δείκτης ανωμαλίας υγρασίας Z , είναι μία σχετική απόκλιση του καιρού ενός συγκεκριμένου μήνα, σε μία συγκεκριμένη περιοχή, από τη μέση κατάσταση υγρασίας του συγκεκριμένου μήνα. Ο Palmer αξιολόγησε τη συσσώρευση του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας Z , για τις 13 πιο ξηρές περιόδους, στις δύο περιοχές μελέτης του (Κάνσας και Αιόβα) και σημείωσε ότι αναπαριστώνται γραφικά ως ευθεία σε ένα διάγραμμα συσσωρευμένου Z προς τη διάρκεια των ξηρών περιόδων όπως φαίνεται στην εικόνα 2 που ακολουθεί.



Εικόνα 2 Διάγραμμα συσσωρευμένου Z προς τη διάρκεια των ξηρών περιόδων (Πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.)

Η μέθοδος ορίζει αυτές τις περιόδους ως περιόδους εξαιρετικής ξηρασίας και προσδιορίζει μία αριθμητική τιμή δριμύτητας ξηρασίας (PDSI=-4.0) σε μία ευθεία η οποία διαπερνά τα 13 αυτά σημεία. Στη συνέχεια η μέθοδος υποδιαιρεί την περιοχή μεταξύ της εξαιρετικής ξηρασίας και μία συσσωρευμένης τιμής Z ίσης με 0, με τρεις ευθείες, οι οποίες καθορίζονται αυθαίρετα ως τα άνω όρια της «δριμείας ξηρασίας» (severe drought) PDSI = -3.0, «μέτριας ξηρασίας» (moderate drought) PDSI = -2.0 και ήπιας ξηρασίας (mild drought) PDSI = -1.0. Η κατάταξη της έντασης ξηρασίας κατά τον Palmer παρουσιάζεται στον πίνακα 4 που ακολουθεί.

Πίνακας 4 Κατάταξη της έντασης ξηρασίας κατά τον Palmer.

Τιμή Δείκτη	Ποιοτικός Προσδιορισμός Κατάστασης
>=4.0	Εξαιρετικά υγρή
3.0 – 3.99	Πολύ υγρή
2.0 – 2.99	Μέτρια υγρή
1.0 – 1.99	Ήπια υγρή
0.5 – 0.99	Ελάχιστα υγρή
0.49 - -0.49	Σχεδόν κανονική
-0,5 - -0.99	Ελάχιστα ξηρή
-1.0 - -1.99	Ήπια ξηρή
-2.0 - - 2.99	Μέτρια ξηρή
-3.0 - -3.99	Πολύ ξηρή



Τιμή Δείκτη	Ποιοτικός Προσδιορισμός Κατάστασης
≤ 4.0	Εξαιρετικά Ξηρή

3.1.4 Προσδιορισμός της δριμύτητας ξηρασίας

Με βάση την εικόνα 2, η δριμύτητα της ξηρασίας για τον μήνα i $X(i)$, μπορεί να περιγραφεί από:

- $X_i = \Sigma Z(t)/(2.691 + 0,309i)$ (9)

Σημειώνεται ότι φαίνεται να υπάρχει ένα μικρό τυπογραφικό λάθος στην εξίσωση (9), όπως φαίνεται στην σελίδα 21 του Palmer (1965). Η εξίσωση 9 δίνει την ίδια βαρύτητα στις ελλείψεις υγρασίας που πραγματοποιήθηκαν πολλούς μήνες πριν, όπως και με τις ελλείψεις υγρασίας του τελευταίου μήνα. Ο Palmer πρότεινε ότι ένας πιο κατάλληλος δείκτης θα ήταν της μορφής:

- $X_i = Z(i)/3 - cX(i-1)$ (10)

Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις 9 και 10 είναι ισοδύναμες για τον πρώτο μήνα μίας ξηρής περιόδου [$X(i-1) = 0$]. Ο Palmer καθόρισε το c να είναι 0.897. Αυτή η τιμή του c διατηρεί το X σε ένα δεδομένο ύψος από μήνα σε μήνα για τιμές συσσωρευμένου Z οι οποίες διατηρούν μία ξηρασία συνεχούς δριμύτητας στην εικόνα 2. Η τελική έκφραση του Palmer για την δριμύτητα της ξηρασίας είναι:

- $X_i = 0,897 X(i-1) + Z(i)/3$ (11)

Όπου $X(i)$ είναι η τιμή του PDSI για τον μήνα i . Μετά από μία ξηρή περίοδο, συνεχόμενος φυσιολογικός ή υγρός καιρός θα καταλήξει τελικά σε τιμές του X , υπολογισμένες χρησιμοποιώντας την εξίσωση 11, οι οποίες θα προσεγγίζουν το μηδέν. Ωστόσο, ο Palmer (1965) θεώρησε αυτή την προϋπόθεση ιδιαίτερα αυστηρή για τον τερματισμό μίας ξηρασίας. Η εφαρμογή της εξίσωσης 11 απαιτεί αναγνώριση του αρχικού μήνα έναρξης του φαινομένου. Παρόμοια συμπεράσματα ανέκυψαν και για τις υγρές περιόδους.

3.1.5 Έναρξη και λήξη υγρής και ξηρής περιόδου

Στην περίπτωση του καθορισμού της έναρξης και λήξης των υγρών και ξηρών περιόδων η μέθοδος του Palmer αντιμετωπίζει το πρόβλημα κρατώντας ξεχωριστά



στοιχεία και για την εξίσωση 11 σημειώνοντας τρεις δείκτες οι οποίοι καθορίζονται ως εξής:

X1 = δείκτης δριμύτητας ενός υγρού γεγονότος (wet spell) το οποίο αρχίζει να εγκαθιδρύεται.

X2 = δείκτης δριμύτητας για μία ξηρασία η οποία αρχίζει να εγκαθιδρύεται.

X3 = δείκτης δριμύτητας για οποιοδήποτε υγρό γεγονός ή ξηρασία η οποία έχει ήδη εγκαθιδρυθεί.

Η μεταβλητή X1 είναι περιορισμένη σε μη αρνητικές τιμές και η X2 σε μη θετικές τιμές. Οι τιμές του X1 και X2 τίθενται ως μηδέν όταν οι υπολογισμοί της εξίσωσης 11 παραβιάζουν τους ως άνω περιορισμούς. Μία ξηρασία θεωρείται εγκαθιδρυμένη όταν το $X2 \leq -1.00$ για πρώτη φορά μετά τη λήξη μίας προηγούμενης εγκαθιδρυμένης ξηρασίας ή υγρού γεγονότος. Ένα υγρό γεγονός θεωρείται εγκαθιδρυμένο όταν το $X1 \geq 1.00$ για πρώτη φορά μετά τη λήξη μίας προηγούμενης εγκαθιδρυμένης ξηρασίας ή υγρού γεγονότος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, $X3=X2$ για μία εγκαθιδρυμένη ξηρασία ή $X3=X1$ για ένα εγκαθιδρυμένο υγρό γεγονός. Μία εγκαθιδρυμένη ξηρασία ή υγρό γεγονός θεωρείται ότι έχει οριστικά τελειώσει όταν ο δείκτης πλησιάσει την σχεδόν κανονική «near normal» κατηγορία η οποία κείται μεταξύ -0,50 και +0,50. Σε αυτήν την περίπτωση το X3 επανέρχεται στο μηδέν. Ο τερματισμός μίας εγκαθιδρυμένης ξηρασίας θεωρείται ότι πραγματοποιείται όταν $Z(i) \geq Z_e(i)$ όπου,

$$\bullet \quad Z_e(i) = -2.691 X3(i-1) - 1,5 \quad (12)$$

Όπου $Z_e(i)$ είναι η υγρασία που απαιτείται για να μειωθεί η δριμύτητα μίας εγκαθιδρυμένης ξηρασίας στο -0.50 σε ένα μήνα. Παρομοίως, ο τερματισμός ενός εγκαθιδρυμένου υγρού γεγονότος θεωρείται ότι πραγματοποιείται όταν $Z(i) \leq Z_e(i)$ όπου σε αυτήν την περίπτωση:

$$\bullet \quad Z_e(i) = -2.691 X3(i-1) + 1,5 \quad (13)$$

Οι εξισώσεις 12 και 13 είναι παράγωγα την επίλυση της εξίσωσης 11 ως προς $Z(i)$ και αντικαθιστώντας -0.50 και 0.50, αντίστοιχα στο $X(i)$. Με τη χρήση των εξισώσεων 12 ή 13 για τον καθορισμό του τερματισμού μίας ξηρασίας ή ενός υγρού γεγονότος, ο Palmer (1965) βασίζεται στον υπολογισμό ενός ποσοστού πιθανότητας λήξης μιας εγκαθιδρυμένης ξηρασίας ή υγρού γεγονότος, όπου:



- $Pe(i) = [100 * \Sigma U(i-j)] / (Ze(i) + \Sigma U(i-j)) \quad (14)$

Όπου $0 \leq Pe(i) \leq 100$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι Pe δεν είναι ακριβώς η πιθανότητα ως μία συνηθισμένη έννοια, αλλά ένα μέτρο του λόγου υγρασίας που παραλείφθηκε ως απαραίτητο για να τερματιστεί μία εγκαθιδρυμένη υγρασία ή ένα υγρό γεγονός. Ο ορισμός του $U(i)$ εξαρτάται από το αν η ξηρασία ή το υγρό γεγονός έχει εγκαθιδρυθεί. Στην περίπτωση μία εγκαθιδρυμένης ξηρασίας, ο Palmer σημειώνει ότι η τιμή $Z = -0.15$ θα διατηρήσει τον δείκτη του -0.50 από μήνα σε μήνα. Για αυτόν τον λόγο, κάθε τιμή του $Z \leq -0.15$ θα τείνει να τερματίσει μία ξηρασία. Ο ορισμός του $U(i)$ είναι ο ακόλουθος.

- $U(i) = Z(i) + 0.15 \quad (15)$

Μετά από την εγκαθίδρυση μίας ξηρασίας ($X \leq -1.00$) η εξίσωση 15 εφαρμόζεται στον πρώτο μήνα έχοντας $Z \leq -0.15$ και υπολογίζεται για κάθε διαδοχικό μήνα μέχρις ότου οι υπολογισμοί δείξουν μία τιμή του Pe ίση είτε με 0 είτε με 100. Η παράμετρος j^* στην εξίσωση 14 αντιστοιχεί στον αριθμό των διαδοχικών τιμών του $U(i)$ υπολογιζόμενα αμέσως πριν από τον τρέχοντα μήνα. Παρόμοιοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για να αξιολογήσουν την πιθανότητα Pe για ένα εγκαθιδρυμένο υγρό γεγονός εκτός από την περίπτωση: $U(i) = Z(i) - 0.15 \quad (15)$.

Υπάρχει μία ασυνέχεια στην χρήση της εξίσωσης 14 η οποία υποδεικνύει το τέλος μίας ξηρασίας ή ενός υγρού γεγονότος. Αυτό πραγματοποιείται διότι η εξίσωση 14 μπορεί να υποδεικνύει ότι μία ξηρασία έχει τελειώσει [$Pe(i) = 100$] ακόμα και αν $Z(i) < Ze(i)$. Για να παρουσιαστεί αυτή η ασυνέχεια, πρώτα πρέπει να τονισθεί ότι $Pe(i)$ στην εξίσωση 14 θα ισούται ή θα ξεπεράσει το 100 όπου:

- $U(i) \geq Ze(i) \quad (16)$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 15 στην 16,

- $Z(i) \geq Ze(i) - 0.15,$

ως κριτήριο που εξάγεται από την εξίσωση 14 για τον τερματισμό ενός εγκαθιδρυμένου γεγονότος ξηρασίας, προκειμένου $Z(i) \geq Ze(i)$. Ομοίως, η εξίσωση 14 μπορεί να υποδείξει ένα εγκαθιδρυμένο υγρό γεγονός ακόμα και αν $Z(i) > Ze(i)$.

Ο δείκτης ξηρασίας X για ένα συγκεκριμένο μήνα ορίζεται ίσος με το X_1 , X_2 και X_3 . Συχνά, μόνο ένας από του τρεις δείκτες είναι μη μηδενικός, και ο X ορίζεται στον μη μηδενικό δείκτη. Ωστόσο, πολλές αντικρουόμενες περιπτώσεις μπορεί να



πραγματοποιηθούν και ο κατάλληλος δείκτης για χρήση ως X δεν είναι πάντα προφανής. Για παράδειγμα, είναι κοινό για δύο υγρά γεγονότα ($X_1 > 0$) και ένα ξηρό γεγονός ($X_2 < 0$) ταυτόχρονα να υποδεικνύονται ως ότι αρχίζουν να εγκαθιδρύονται. Είναι επίσης κοινό για μία κατάσταση όπου $X_1 \geq 1.00$ και $X_3 \leq -1.00$ να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα.

Για να επιλεγεί η πιο κατάλληλη τιμή του X όταν η επιλογή του δείκτη δεν είναι η προφανής, ο Palmer δημιούργησε ένα σετ από κανόνες λειτουργίας οι οποίοι βασίζονται στον υπολογισμό των τιμών X_1 , X_2 και X_3 για αρκετούς μήνες και στη συνέχεια να γίνεται οπισθοδρομικός έλεγχος ο οποίος να βασίζεται στην κατεύθυνση όπου ο καιρός φαινόταν ότι κατευθύνεται.

Εάν η τιμή P_e γίνει μηδέν κατά τη διάρκεια μιας εγκαθιδρυμένης ξηρασίας υγρής περιόδου, τότε $X = X_3$ για όλες τις τιμές του X μεταξύ και συμπεριλαμβανομένων των μηνών κατά τους οποίους $P_e = 0,0$. Κάθε φορά που μία υγρή περίοδος ή ξηρασία έχει εγκαθιδρυθεί και $0 < P_e < 100$, δεν μπορεί να αποδοθεί τιμή για τον δείκτη PDSI μέχρι η P_e να φτάσει στο 0 ή στο 100. Αυτό προφανώς προκαλεί προβλήματα όταν ο δείκτης PDSI χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακή λειτουργία (υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο). Αυτό το πρόβλημα λύνεται αφήνοντας $X = X_3$, όταν $0 < P_e \sim 50$ είτε $X = X_1$ ή $X = X_2$, όποιο αποτελέσματα έχει αντίθετο πρόσημο από το X_3 , όταν $50 < P_e < 100$ (T. Heddinghaus, προσωπική επικοινωνία, 1983). Άλλα backtracking προβλήματα επιλύονται με την επιλογή του δείκτη PDSI ως X_1 ή X_2 , όποιο από τα δύο έχει τη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή, όποτε X_3 ισούται με μηδέν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι υπολειπόμενοι τέσσερις τρόποι παρουσίασης της υπολογιστικής διαδικασίας του δείκτη Palmer (α , β , δ και ϵ).



Περιγραφική παρουσίαση των βημάτων υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer.

Πραγματοποίηση ενός υδρολογικού υπολογισμού σε μηνιαίο βήμα για μια μακρά σειρά ετών.

- Εφαρμογή Υδρολογικού Μοντέλου Palmer με δεδομένα εισόδου τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Συγκέντρωση των αποτελεσμάτων του υδρολογικού υπολογισμού.

- Δημιουργία/εξαγωγή συγκεκριμένων σταθερών ή συντελεστών που εξαρτώνται από το κλίμα της περιοχής που μελετάται.

Επανάληψη της ανάλυσης σειράς δεδομένων με τη χρήση των παρηγμένων συντελεστών

- Καθορισμός του ποσού της υγρασίας που απαιτείται για τις "κανονικές" καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια κάθε μήνα. Υπολογισμός αποκλίσεων από το "κανονικό" κλίμα της μελετώμενης περιοχής.

Μετατροπή των αποκλίσεων σε δείκτες ανωμαλίας υγρασίας.

- Υπολογισμός του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας, ο οποίος παρέχει συγκρίσιμα μέτρα της σχετικής κλιματικής ανωμαλίας.

Ανάλυση των σειρών δεικτών για την ανάπτυξη:

- Κριτηρίων για τον προσδιορισμό της έναρξης και του τέλους των περιόδων ξηρασίας
- Τύπου για τον προσδιορισμό της δριμύτητας ξηρασίας



Πίνακας 5 Περιληπτική παρουσίαση διαδικασίας υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer

A/A	Διαδικασία	Εξίσωση	Παρατηρήσεις
1	Καθορισμός περιοχής μελέτης		
2	Ανάκτηση, επεξεργασία και πινακοποίηση μηνιαίων δεδομένων βροχόπτωσης (P) και εξατμισοδιαπνοής (PE)		
3	Υπολογισμός της διαφοράς εξατμισοδιαπνοής και βροχόπτωσης σε μηνιαίο βήμα.	$PE - P$	
4	Καθορισμός διαθέσιμης χωρητικότητας του εδάφους (άνω στρώματος και υποκείμενου στρώματος) σε υγρασία.	$AWC = \text{Available Water Capacity} - \text{Διαθέσιμη Ικανότητα Αποθήκευσης Υγρασίας}$ $=$ Το άθροισμα της ικανότητας αποθήκευσης υγρασίας του ανώτερου και υποκείμενου εδαφικού στρώματος το οποίο είναι σταθερό και δεν μεταβάλλεται.	Ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου της μεθόδου Palmer λειτουργεί με βάση ένα σύστημα δύο εδαφικών στρωμάτων, του άνω στρώματος και του υποκείμενου. Η χωρητικότητα του άνω στρώματος είναι πάντα 25 (1 ίντσα). Η διαθέσιμη χωρητικότητα του υποκείμενου στρώματος εξαρτάται από το βάθος της αποτελεσματικής ριζικής ζώνης και τα χαρακτηριστικά του μελετώμενου εδάφους και ορίζεται από τον μελετητή.
5	Υπολογισμός απώλειας υγρασίας από το ανώτερο εδαφικό στρώμα (ΔS_s ή L_s) σε μηνιαίο βήμα.	$L_s = S_s'^{12}$ ή $(PE - P) (1)$ (Επιλέγεται η μικρότερη τιμή εκ των δύο)	Συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης: $S_s' = \text{max value}^{13}$ και $P >= PE$ then $\Delta S_s^{14} = 0$

¹² S_s' = Αποθηκευμένη Υγρασία στο άνωθεν εδαφικό στρώμα κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα (προηγούμενο μήνα).

¹³ Max value = Τιμή που σύμφωνα με τον Palmer είναι 1.



A/A	Διαδικασία	Εξίσωση	Παρατηρήσεις
			$Ss' < \max \text{ value}$ και $P \geq PE$ then $\min(\Delta Ss = 1 - Ss' \text{ or } \Delta Ss = P - PE)$ $Ss' = \max \text{ value}$ και $P < PE$ then $\min(\text{abs}(\Delta Ss = -Ss' \text{ or } \Delta Ss = -(PE - P)))$ $Ss' < \max \text{ value}$ και $P < PE$ then $\min(\text{abs}(\Delta Ss = -Ss' \text{ or } \Delta Ss = -(PE - P)))$
6	Υπολογισμός απώλειας υγρασίας από το κατώτερο εδαφικό στρώμα * ΔSu ή Lu) σε μηνιαίο βήμα.	$Lu = (PE - P - Ls) Su' / AWC^{15}$, $Lu \leq Su' (2)$	Συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης: $Su'^{16} = \max \text{ value}^{17}$ και $P \geq PE$ then $\Delta Su = 0$ $Su' < \max \text{ value}$ και $P \geq PE$ then $(P - PE - Ls)$ $Su' = \max \text{ value}$ και $P < PE$ then $-(PE - P - \text{Abs}(Ls)) * (Su' / AWC)$ $Su' < \max \text{ value}$ και $P < PE$ then $-(PE - P - \text{Abs}(Ls)) * (Su' / AWC)$
7	Υπολογισμός συνολικών απωλειών (L)	$L = Lu + Ls$	Εάν $(Ls + Lu) \geq 0$ τότε $L = 0$ Αλλιώς $L = \text{abs}(Ls + Lu)$
8	Υπολογισμός αποθηκευμένης υγρασίας στο ανώτερο εδαφικό στρώμα (Ss)	$Ss = Ss' + Ls$	

¹⁴ ΔSs = Μεταβολή υγρασίας στο άνωθεν εδαφικό στρώμα

¹⁵ AWC = Available Water Capacity – Διαθέσιμη Ικανότητα Αποθήκευσης Υγρασίας (Είναι το άθροισμα της ικανότητας του ανώτερου και υποκείμενου εδαφικού στρώματος το οποίο είναι σταθερό και δεν μεταβάλλεται)

¹⁶ Su' = Αποθηκευμένη Υγρασία στο υποκείμενο εδαφικό στρώμα κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα.

¹⁷ Τμή που σύμφωνα με τον Palmer καθορίζεται από γεωλογικά χαρακτηριστικά της μελετώμενης περιοχής.



A/A	Διαδικασία	Εξίσωση	Παρατηρήσεις
9	Υπολογισμός αποθηκευμένης υγρασίας στο υποκείμενο εδαφικό στρώμα (S_u)	$S_u = S_u' + L_u$	
10	Συνολική αποθηκευμένη υγρασία (S)	$S = S_s + S_u$	
11	Υπολογισμός υπολογισθείσας εξατμισοδιαπνοής (ET)	Εάν $P > PE$ τότε $ET = PE$, Αλλιώς $ET = P + (\text{abs}(L_s + L_u))$	$IF(P > PE; PE; P + (\text{ABS}(L_s + L_u)))$
12	Υπολογισμός της Δυνητικής επαναφόρτιση (PR)	$PR = AWC^{18} - S'^{19}$	Η Δυνητική επαναφόρτιση μετρά υποθετικά τη μέγιστη κατάσταση που θα μπορούσε να υπάρξει. Η δυνητική επαναφόρτιση ορίζεται ως το ποσό της υγρασίας που απαιτείται για να φέρει το χώμα στην μέγιστη φέρουσα ικανότητα του.
13	Υπολογισμός της Δυνητικής Απώλειας (PL)	$PL = PL_s^{20} + PL_u^{21}, (4)$	Η Δυνητική Απώλεια ορίζεται ως το ποσό της υγρασίας που θα μπορούσε να χαθεί από το έδαφος υπό την προϋπόθεση ότι η κατακρήμνιση κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής ήταν μηδέν.
14	Υπολογισμός της Δυνητικής Απορροής, (PRO)	$PRO = AWC - PR = S' (5)$	
15	Υπολογισμός της Απορροής (RO)	Εάν $PE > P$ τότε $RO = 0$	$IF(PE > P; 0; P - PE - L_s + L_u)$

¹⁸ AWC = Available Water Capacity – Διαθέσιμη Ικανότητα Αποθήκευσης Υγρασίας (Είναι το άθροισμα της ικανότητας του ανώτερου και υποκείμενου εδαφικού στρώματος το οποίο είναι σταθερό και δεν μεταβάλλεται)

¹⁹ S_s' = Η ποσότητα της διαθέσιμης υγρασίας και στα δύο στρώματα του εδάφους κατά την έναρξη του μήνα(προηγούμενο χρονικό βήμα)

²⁰ PL_s = Η μικρότερη τιμή μεταξύ της PE και του S_s'

²¹ $PL_u = (PE - PL_s) S'_u / AWC$



A/A	Διαδικασία	Εξίσωση	Παρατηρήσεις
		Αλλιώς RO= P-PE-Ls+Lu	
16	Υπολογισμός της Επαναφόρτισης (R)	Εάν P>PE τότε R= Ls+Lu Αλλιώς R=0	=IF(P>P;Ls+Lu;0)
17	Υπολογισμών των κάτωθι συντελεστών: Συντελεστής Εξατμισοδιαπνοής, α Συντελεστής Επαναφόρτισης, β Συντελεστής απορροής, γ Συντελεστής απωλειών, δ	$a = \overline{ET} / \overline{PE}$ (6) $\beta = \overline{R} / \overline{PR}$ (7) $\gamma = \overline{RO} / \overline{PRO}$ (8) $\delta = L / \overline{PL}$ (9)	Όλες οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών αφορούν σε μέσες μηνιαίες τιμές για μεγάλη χρονική διάρκεια (long term means).
19	Υπολογισμός των CAFEC ²² τιμών: εξατμισοδιαπνοής (ET), επαναφόρτισης, (R), απορροής, (RO) και απώλειας (L)	<ul style="list-style-type: none"> • ET=αPE (10) • R=βPR (11) • RO = γPRO (12) • L=δPL (13) 	Οι τιμές CAFEC είναι οι τιμές που θα θεωρούνταν κατάλληλες να ισχύουν με βάση το κλίμα της περιοχής. Τα α, β, γ και δ έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα
20	Υπολογισμός της Βροχόπτωσης CAFEC, \hat{P}	$\hat{P} = ET+R+RO-L$ (14)	$\hat{P} = (\alpha PE + \beta PR + \gamma PRO - \delta PL)$
21	Υπολογισμός της περίσσειας κατακρήμνισης και των ελλειμμάτων (d)	$d=P - P_{cafec}$ (15)	Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της

²² CAFEC = Climatically Appropriate For the Conditions



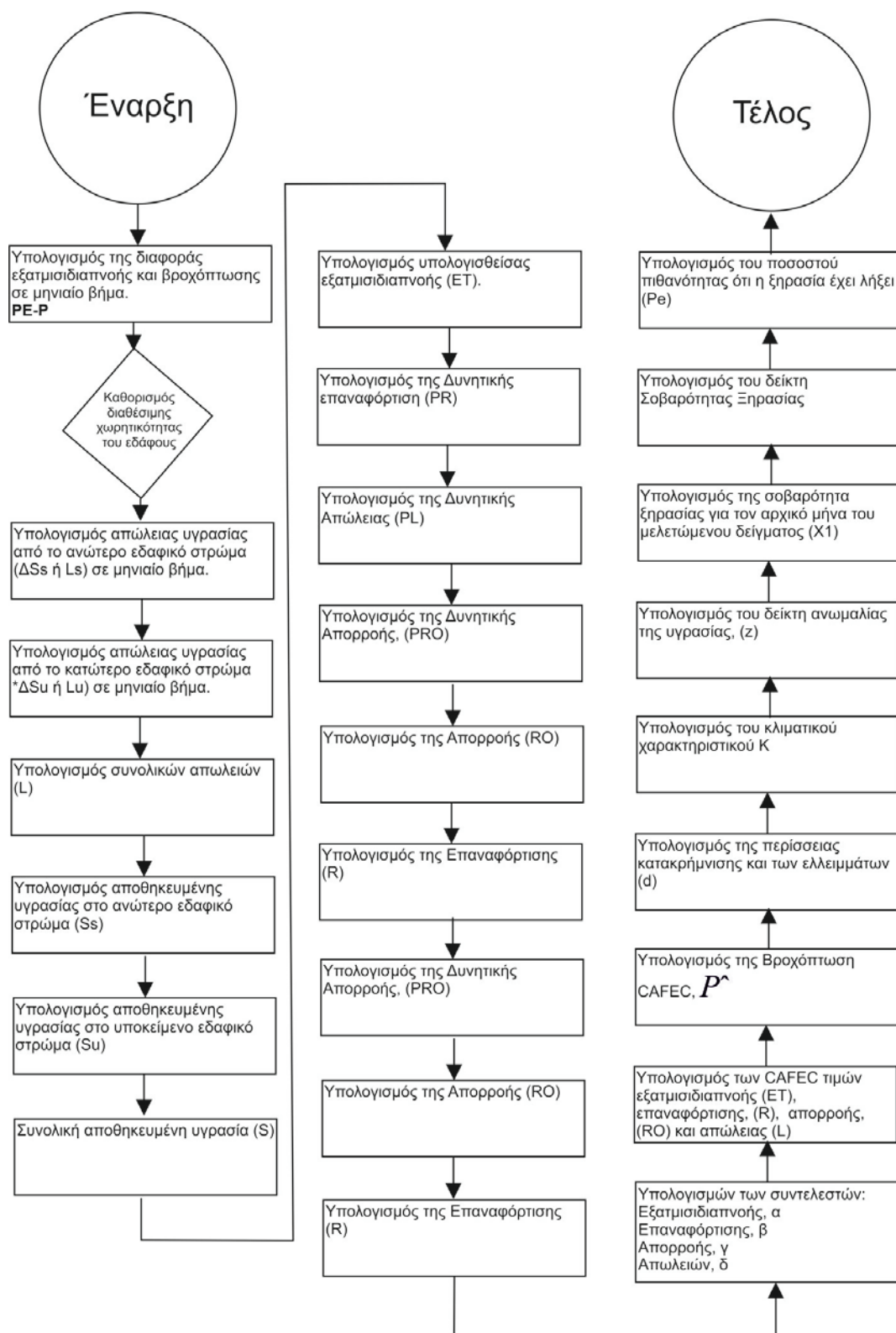
A/A	Διαδικασία	Εξίσωση	Παρατηρήσεις
			βροχόπτωσης CAFEC για κάθε μήνα είναι ένα σημαντικό μέτρο της απόκλισης της υγρασίας από τον κανονικό καιρό.
22	Υπολογισμός του κλιματικού χαρακτηριστικού K	$K_i = \left(\frac{17.6}{\sum_{i=1}^{12} \bar{D}_i K_i'} \right) K_i' \text{ } ^{2324}$	Μέτρο της τοπικής σημασίας της απόκλισης υγρασίας που έχει παραχθεί.
23	Υπολογισμός του δείκτη ανωμαλίας της υγρασίας, (z)	$z = dk \text{ (19)}$	Χρησιμοποιείται για να παρέχει ένα συγκρίσιμο μέτρο της σχετικής κλιματικής ανωμαλίας.
24	Υπολογισμός της σοβαρότητα ξηρασίας για τον αρχικό μήνα του μελετώμενου δείγματος (X_1)	$X_1 = z_1/3 \text{ (21)}$	
25	Υπολογισμός του δείκτη Σοβαρότητας Ξηρασίας	$X_i = X_{i-1} + (z_i/3) - 0,103 * X_{i-1} \text{ (25)}$	

$$^{23} K_i' = 1.5 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{P}\bar{E} + \bar{R} + \bar{R}\bar{O}}{\bar{P} + \bar{L}} + 2.8 \right) \bar{D}^{-1} \right] + 0.5$$

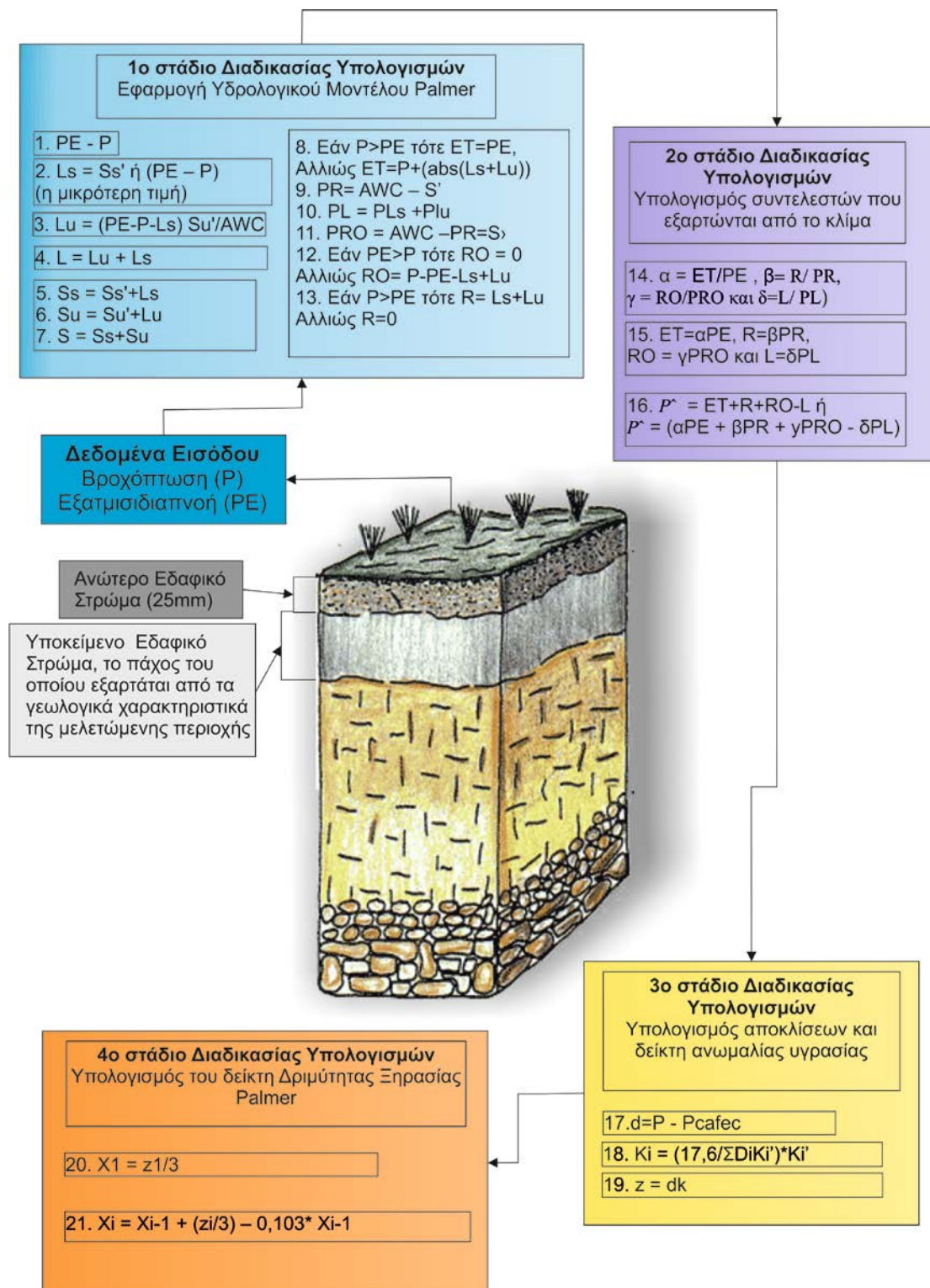
²⁴ D = μέσος μηνιαίος όρος των αποτελεσμάτων της εξίσωσης $d = P - P_{\text{cafec}}$ (15)



Σχήμα 3 Διάγραμμα Ροής Μεθόδου Υπολογισμού του Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer



Σχήμα 4 Απεικόνιση των εξισώσεων υπολογισμού του δείκτη Palmer σε 4 διακριτά στάδια εφαρμογής.





4. Κεφάλαιο 4 Σχολιασμός και Παρατηρήσεις επί της Μεθοδολογίας Εκτέλεσης Υπολογισμών

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφαλαίο σχολιάζονται τα μεθοδολογικά βήματα για τον υπολογισμό ξηρασίας με την μέθοδο Palmer.

Το πρόβλημα στο οποίο κατά βάση αναφέρεται και προσπαθεί να επιλύσει η μέθοδος που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο είναι η ανάπτυξη ενός εργαλείου για τον υπολογισμό του ποσού της βροχόπτωσης, που θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί σε μια δεδομένη περιοχή κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου, προκειμένου ο "καιρός" κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής να είναι κανονικός-φυσιολογικός, υπό την έννοια ότι η προσφορά υγρασίας κατά την περίοδο αυτή να ικανοποιεί το μέσο κλιματικά αναμενόμενο ποσοστό της απόλυτης απαίτησης σε υγρασία κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής. Συνεπώς, η μέθοδος απαντά στο ερώτημα, πόση βροχόπτωση θα έπρεπε να είχε συμβεί κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου, ούτως ώστε να υπάρχουν διαθέσιμοι οι απαραίτητοι υδάτινοι πόροι στην περιοχή για να καλυφθούν οι ανάλογες ανάγκες της περιοχής. Μετά τον καθορισμό της «αναγκαίας» αυτής βροχόπτωσης, η τελευταία θα μπορεί να συγκριθεί άμεσα με το ποσό που πραγματικά έχει πραγματοποιηθεί και κατά συνέπεια τη δημιουργία ενός μέτρου σύγκρισης της απόκλισης της προσφοράς υγρασίας από την «κανονική» ή κλιματικά κατάλληλη προσφορά.

Η προέλευση των αποκλίσεων (πλεονασμάτων και ελλειμμάτων) υγρασίας κατά τη διάρκεια πολλών χρονικών περιόδων δεν μπορεί να λύσει το πρόβλημα, διότι ένας συντελεστής διάρκειας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ενώ αυτές οι αποκλίσεις υγρασίας δεν αποτελούν μια σειρά που προέρχεται από έναν ενιαίο στατιστικό πληθυσμό (H. C. S. Thom, 1960).

Αποκλίσεις από μια σειρά, για παράδειγμα Μάιων, σε μια δεδομένη περιοχή αντιπροσωπεύουν ένα διαφορετικό πληθυσμό από τις αποκλίσεις των Σεπτεμβρίων στην ίδια περιοχή, και οι αποκλίσεις για έναν άλλο μήνα σε ένα διαφορετικό μέρος εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν έναν άλλο πληθυσμό. Για να αναπτυχθεί ένας δείκτης ξηρασίας, ο οποίος είναι σχετικά ανεξάρτητος του χώρου και του χρόνου,



πρέπει να σταθμίζονται αυτές οι διάφορες αποκλίσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ως συγκρίσιμοι δείκτες της ανωμαλίας υγρασίας. Συνεπώς είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός συντελεστή στάθμισης, ο οποίος θα μετατρέπει τις διάφορες αποκλίσεις σύμφωνα με την προφανή τους σημασία στον καιρό και το κλίμα της περιοχής που μελετάται. Για παράδειγμα, αν σε μία περιοχή η πραγματική προσφορά υγρασίας ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη προσφερόμενη υγρασία, σε περίοδο που κατά βάση η βροχόπτωση ξεπερνά τις ανάγκες σε νερό κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η απόκλιση δεν θα ήταν μεγάλης συνέπειας. Από την άλλη πλευρά, μια παρόμοια έλλειψη τον Αύγουστο ή το Σεπτέμβριο θα ήταν πολύ σημαντική σε ένα κλίμα όπου οποιαδήποτε ανωμαλία με τη μορφή έλλειψης υγρασίας κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών θα αύξανε τις επιπτώσεις της ανεπαρκούς προσφοράς που ισχύει ακόμα και σε κανονικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, συστηματικές διαδικασίες πρέπει να παράγονται για την οριοθέτηση μίας μη φυσιολογικής περιόδου.

4.2 Χρήση δεδομένων

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένας δείκτης ο οποίος θα επιτρέπει χωρικές καθώς και χρονικές συγκρίσεις των στατιστικών στοιχείων της ξηρασίας, ο Palmer επέλεξε δύο ανόμοια κλιματολογικά περιοχές για την αρχική του μελέτη. Οι 31 νομοί που περιλαμβάνει το δυτικό τμήμα του Κάνσας ομαδοποιήθηκαν από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία σε μία κλιματική ενότητα (τώρα πλέον υποδιαιρούνται σε τρεις). Ως εκ τούτου, υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία θερμοκρασίας και βροχόπτωσης (S. D. Flora, 1948) για την περιοχή σε μηνιαία βάση από τον Ιανουάριο του 1887. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ένα ημι-άνυδρο προς ξηρό και υπόυγρο κλίμα. Οι χειμώνες είναι κρύοι και τα καλοκαίρια ζεστά, με περίπου 330-350 mm της ετήσιας βροχόπτωσης να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της περιόδου που δεν υπάρχει χιόνι-πάγος (freeze-free) για περίπου 5,5 έως 6 μήνες (70% της συνολικής βροχόπτωσης) (U.S. Weather Bureau, 1959). Εκτός από τη διαθεσιμότητα των στοιχείων, η περιοχή του δυτικού Κάνσας επιλέχθηκε επειδή ο Palmer γνώριζε καλά από προσωπική εμπειρία το κλίμα της περιοχής και ανέμενε, ή τουλάχιστον ήλπιζε, ότι η γεωργική εμπειρία του στη δυτική περιοχή του Kansas (Great Plains) (W. C. Palmer, 1965) θα του επιτρέψει να κάνει μια καλύτερη εκτίμηση των



επιπτώσεων της έλλειψης υγρασίας στον τομέα αυτό. Το δυτικό Κάνσας είναι για ορισμένους, ένας πάρα πολύ μεγάλος τομέας για να αντιμετωπίζεται ως μία ενιαία μονάδα, παρόλα αυτά για τους σκοπούς της ανάπτυξης και χρήσης του δείκτη αυτού δεν θεωρείται ότι δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα.

Η δεύτερη περιοχή μελέτης αποτελείται από 12 νομούς της κεντρικής κλιματολογικής διαίρεσης της Αϊόβα. Για αυτόν τον τομέα, στο σύνολό του, τα μηνιαία δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης ελήφθησαν για το χρονικό διάστημα από τον Ιανουάριο του 1931 έως το Δεκέμβριο 1957. Τα δεδομένα αυτά συνιστούν ίσως πιο ομοιογενείς σειρές από ό, τι τα δεδομένα του Κάνσας, ωστόσο η αραιή κάλυψη των δεδομένων στο Κάνσας κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ετών δεν θεωρείτο πιθανό να προκατέβαλε τη μελέτη του Palmer σε σημαντικό βαθμό. Το κλίμα της κεντρικής Αϊόβα μπορεί να χαρακτηριστεί ως υπόυγρο - υγρό. Σε σύγκριση με το δυτικό Κάνσας, οι χειμώνες και τα καλοκαίρια είναι ψυχρότερα. Περίπου 500 mm, που αντιστοιχούν στο 65% της ετήσιας βροχόπτωσης, εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της περιόδου που δεν υπάρχει χιόνι-πάγος, η οποία έχει διάρκεια περίπου 5,5 έως 6 μήνες (U.S. Weather Bureau, 1959). Ενώ και οι δύο περιοχές έχουν ηπειρωτικό κλίμα, αυτό της κεντρικής Αϊόβα είναι αναμφισβήτητα περισσότερο υγρό, όπως αποδεικνύεται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Η μέση βροχόπτωση στην κεντρική Αϊόβα είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 250 mm από αυτή του Δυτικού Κάνσας, σε ετήσιο χρονικό βήμα.
- Η Αϊόβα έχει περίπου 40% περισσότερες ημέρες με μετρήσιμες βροχοπτώσεις από ό, τι η περιοχή του Κάνσας.
- Η σχετική υγρασία στην Αϊόβα κυμαίνεται 12 με 15% υψηλότερά από ό, τι στο Κάνσας.
- Το Δυτικό Κάνσας έχει περισσότερη ηλιοφάνεια από την κεντρική Αϊόβα. Ως εκ τούτου δέχεται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία.
- Οι μέσες ταχύτητες ανέμου είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στο Κάνσας από ό, τι στην Αϊόβα.

Η διαπίστωση αυτή, αποδεικνύει ότι οι καιρικές συνθήκες που θα μπορούσε να θεωρηθούν κανονικές για το Δυτικό Κάνσας θα μπορούσε να θεωρηθούν εξαιρετικά



ξηρές αν εμφανιζόντουσαν στην κεντρική Αϊόβα. Στο μέτρο που η οικονομία της Αϊόβα δεν προσανατολίζεται σε αυτές τις ξηρές καιρικές συνθήκες, σημαντικές απώλειες και δυσκολίες θα μπορούσαν να προκληθούν. Οι ντόπιοι πιθανότατα θα θεωρούσαν ότι είχε πραγματοποιηθεί μία καταστροφική ξηρασία. Από την άλλη πλευρά, μία μικρότερη απόκλιση ως προς την απόλυτη ξηρασία θα δημιουργούσε μια πολύ σοβαρή διαταραχή της οικονομίας στο δυτικό Κάνσας, επειδή μια πολύ μικρή ποσότητα βροχής είναι πολύ πιο σημαντική από ό, τι είναι στην Αϊόβα. Είναι προφανές ότι η επίδραση της έλλειψης υγρασίας είναι σχετική.

Ως εκ τούτου, οι δύο αυτοί τομείς επελέγησαν επειδή τα κλίματα τους είναι διαφορετικά, με στόχο να ταιριάξουν σε ένα σύστημα τοπικού επιπέδου, το οποίο θα παράγει ένα σημαντικό μέτρο ξηρασίας. Όπως έχει ήδη διαφανεί, επιλέγονται ζώνες για μελέτη και όχι σημεία. Στη ανάπτυξη αυτής της μεθόδου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σημειακά δεδομένα, αλλά για αναπτυξιακούς σκοπούς, θεωρείται πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν επιφανειακοί μέσοι όροι, αποφεύγοντας έτσι την υπερβολική μεταβλητότητα του σημείου στις καιρικές συνθήκες. Στόχος είναι η εξέταση της ξηρασίας, η οποία είναι συχνά παρατεταμένη και εκτεταμένη, και όχι των ξηρών περιόδων που είναι γενικά μικρότερης διάρκειας ή και περισσότερο ή λιγότερο τυχαίες στην εμφάνιση τους σημειακά. Στην πραγματικότητα, η μέθοδος του Palmer έχει εφαρμοστεί σε σημειακά δεδομένα, αλλά τα αποτελέσματα της έχουν περισσότερο κλιματολογική έννοια και μπορεί να ερμηνευτούν καλύτερα εάν εφαρμόζονται σε ομογενείς κλιματολογικές περιοχές παρά σε χωρικά σημεία.

Η μελέτη του Palmer βασίζεται σε περιόδους με χρονικό βήμα μελέτης τον έναν μήνα. Το γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η κατανομή των βροχοπτώσεων εντός του μήνα, μπορεί να θεωρηθεί ειδική περίπτωση. Αν και αυτή η ειδική περίπτωση παράγει σφάλματα, στο χρονοδιάγραμμα των υπολογιζόμενων ελλειμμάτων υγρασίας, δεν είναι πιθανό να προκαταβάλει σοβαρά το μέγεθος της συνολικής έλλειψης υγρασίας κατά τη διάρκεια ασυνήθιστα ξηρών περιόδων, δηλαδή με βάση το στοιχείο με το οποίο γίνεται κατά κύριο λόγο η μελέτη του Palmer. Ένας πολύ πρακτικός λόγος για τη χρήση μηνιαίων στοιχείων είναι ότι αυτή είναι η μορφή με την οποία τα στοιχεία είναι πιο εύκολα διαθέσιμα, αλλά το πιο σημαντικό είναι το



γεγονός ότι η χρήση ημερήσιων ή εβδομαδιαίων δεδομένων θα αύξαναν τον όγκο εργασίας σχεδόν στο σημείο όπου η έρευνά του θα είχε φτάσει σε επίπεδο καριέρας και όχι έρευνας. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα είναι ο μηνιαίος **μέσος όρος θερμοκρασιών** και **βροχόπτωσης** (precipitation) για κάθε μήνα κατά την περίοδο Ιανουαρίου του 1887 έως το Δεκέμβριο 1957 για το δυτικό Κάνσας και αντίστοιχοι επιφανειακοί μέσοι όροι για την κεντρική Αϊόβα για την περίοδο Ιανουαρίου 1931 έως Δεκέμβριου 1957.



4.3 Χρήση τεχνικών και οι περιορισμοί τους

Το υδατικό ισοζύγιο ή η υδρολογική λογιστική προσέγγιση για την κλιματική ανάλυση, επιτρέπει τον υπολογισμό μιας αρκετά ρεαλιστικής εικόνας του χρόνου διανομής των πλεονασμάτων και ελλειμμάτων υγρασίας. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου έχουν αναλυθεί και συζητηθεί πολύ συχνά στην επιστημονική βιβλιογραφία. Μερικές αναγκαίες γενικές παρατηρήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η εξάτμιση είναι μια πολύ πολύπλοκη διαδικασία. Ωστόσο, κατά την ανάπτυξη του εν λόγω δείκτη το δίκτυο παρατήρησης των απαιτούμενων δεδομένων δεν ήταν διαθέσιμο για μερικά από τα στοιχεία, όπως της καθαρής ακτινοβολίας, του ελλείμματος πίεσης ατμών (vapour pressure deficit) και της ταχύτητας ανέμου στα κατάλληλα επίπεδα. Αυτή η επιπλοκή οδήγησε μια σειρά από ερευνητές να προσπαθούν να εκτιμήσουν την εξάτμιση με βάση τα πιο πολυάριθμα δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης.

Ένα από τα κύρια εργαλεία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής είναι αυτό του Thornthwaite (C. W. Thornthwaite, 1948). Ο Τύπος Thornthwaite έχει επικριθεί ευρέως για την εμπειρική φύση του αλλά αδιαμφισβήτητα έχει ευρεία χρήση και εφαρμογή. Είναι προφανές ότι ο Thornthwaite είχε γνώση των φυσικών παραγόντων που εμπλέκονται στις διαδικασίες της εξάτμισης και της διαπνοής (Thornthwaite and Holzman, 1942). Το εμπειρικό του σύστημα, παρέχει απλώς μία προσέγγιση της υγρασίας σε σύγκριση με την κλιματική προσέγγιση της κλιματικής ζήτησης υγρασίας. Παρά την απλότητά της και τους προφανείς περιορισμούς της, ακόμα και ο Penman, θεωρεί ότι η σχέση Thornthwaite κάνει εκπληκτικά καλά τη δουλειά για την οποία προορίζεται (H. L. Penman, 1956). Αν και η μελέτη ξηρασίας του Palmer πραγματοποιήθηκε με βάση αυτή τη μέθοδο για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, δεν υπάρχει κανένας λόγος να μη χρησιμοποιηθεί διαφορετική μέθοδος, ούτως ώστε να αντικαταστήσει το βασικό εργαλείο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Το γεγονός ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αυτών των μεθόδων στη βιβλιογραφία, αποδεικνύει ότι το πρόβλημα δεν είναι καθόλου απλό και ότι καμία λύση μέχρι τώρα δεν διαπιστώθηκε ότι είναι απολύτως ικανοποιητική.



Στη μελέτη του Palmer η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε από τον τύπο του Thornthwaite, μέσω του Διαγράμματος Palmer-Havens (Palmer and Havens, 1960) και χρησιμοποιείται ως μέτρο ζήτησης της κλιματικής υγρασίας. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια ρεαλιστική υδρολογική λογιστική, οι περισσότεροι ερευνητές έχουν διαπιστώσει ότι είναι αναγκαίο να παραχθεί η "πραγματική" εξατμισοδιαπνοή ως συνάρτηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της ξηρότητας του εδάφους. Υπάρχουν κάποιες δυσκολίες που εμπλέκονται σε αυτό το ζήτημα της διαθεσιμότητας της υγρασίας του εδάφους, το οποίο θεωρείται ένα άλυτο εγχείρημα σημαντικού βεληνεκού, το οποίο υφίσταται για πολλά χρόνια (Veihmeyer and Hendrickson, 1955). Σύμφωνα με την άποψη κλιματολόγων πάνω σε αυτό το θέμα, φαίνεται ότι οι West και Perkman (West and Perkman, 1953) έχουν επισημάνει τη διαφωνία τους μέσω παρατηρήσεων τους σχετικά με το βαθμό στον οποίο οι ρίζες των φυτών διαπερνούν σε βάθος τα εδάφη σε κάποιες περιπτώσεις, καθώς θεωρούν ότι μόνο εν μέρει καταλαμβάνουν το έδαφος κάτω από άλλες συνθήκες.

Καθώς δεν φαίνεται να υπάρχει καθολικά αποδεκτή διαδικασία για την αντιμετώπιση του ζητήματος όσον αφορά στη διαθεσιμότητα του νερού, πρέπει να θεσπιστούν κανόνες για να μετατρέψουν την ισχύουσα άγνοια σε εργασιακή πρακτική.

Μια εμπειρική διαδικασία που εξέτασε ο Marlatt (Marlatt et al, 1957) το 1957 μετά από πρόταση του Palmer και κρίθηκε αρκετά ικανοποιητική, περιλαμβάνεται στη μελέτη του Palmer για την ανάπτυξη του ομώνυμου δείκτη ξηρασίας. Αυτή η διαδικασία, η οποία είχε επίσης επιχειρηθεί και από τον Kohler (M. A. Kohler, 1957) περίπου την ίδια εποχή ή λίγο νωρίτερα, αποτελείται από τη διαίρεση του εδάφους σε δύο αυθαίρετα στρώματα. Το απροσδιόριστο ανώτερο στρώμα, που ονομάζεται επιφάνεια του εδάφους και περίπου ισοδυναμεί με το μέγεθος της κεφαλής του αρότρου (U.S. Agricultural Research Administration, 1951), θεωρείται να περιέχει 1 ίντσα (25 mm) ικανότητας να φέρει υγρασία στον εν λόγο τομέα. Αυτό είναι το στρώμα πάνω στο οποίο πέφτει η βροχή και από το οποίο πραγματοποιείται εξάτμιση. Ως εκ τούτου, στον υπολογισμό υγρασίας υποτίθεται ότι η εξατμισοδιαπνοή που πραγματοποιείται από αυτό το στρώμα γίνεται στο δυνητικό



βαθμό, έως ότου όλη η διαθέσιμη υγρασία του εν λόγω στρώματος έχει αφαιρεθεί. Μόνο τότε μπορεί να απομακρυνθεί υγρασία από το υποκείμενο στρώμα του εδάφους. Επίσης, θεωρείται ότι δεν πραγματοποιείται επαναφόρτιση (recharge) του υποκείμενου στρώματος της ριζικής ζώνης μέχρις ότου το επιφανειακό στρώμα έχει επανέλθει στην φέρουσα ικανότητα του. Η διαθέσιμη χωρητικότητα του εδάφους στο χαμηλότερο στρώμα εξαρτάται από το βάθος της αποτελεσματικής ριζικής ζώνης και τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην υπό μελέτη περιοχή. Περαιτέρω, υποτίθεται ότι η έλλειψη από την υποκείμενη στρώση εξαρτάται από την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία καθώς και την υπολογιζόμενη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PE) και την διαθέσιμη ικανότητα χωρητικότητας (AWC) του εδαφικού συστήματος. Ως εκ τούτου,

- $L_s = S_s' \text{ ή } (PE - P) \text{ (1)}$ (Η μικρότερη τιμή εκ των δύο)
- και $L_u = (PE - P - L_s)S_u' / AWC, \quad L_u \leq S_u' \text{ (2)}$

Σε αυτό το σημείο και στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και μελέτης του δείκτη Palmer και συγκεκριμένα κατά το στάδιο κατάστρωσης του υπολογιστικού φύλλου για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου της μεθόδου Palmer, σημειώνεται ότι τόσο η εξίσωση 1 όσο και η εξίσωση 2 δεν ήταν δυνατόν να παράγουν τα αποτελέσματα που είχε παράγει ο Palmer. Για αυτό το λόγο με βάση τη φυσική σημασία του υδατικού ισοζυγίου αλλά και τους κανόνες λειτουργίας των δύο εδαφικών στρωμάτων, όπως αυτοί καθορίζονται από τον Palmer, έγινε μία πιο ενδελεχής μελέτη των συνθηκών που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία των εδαφικών στρωμάτων ως δεξαμενές αποθήκευσης υγρασίας. Συγκεκριμένα οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για το άνωθεν εδαφικό στρώμα είναι οι εξής:

- $S_s'^{25} = \max \text{ value}^{26}$ και $P \geq PE$ then $\Delta S_s^{27} = 0$
- $S_s' < \max \text{ value}$ και $P \geq PE$ then $\min(\Delta S_s = 1 - S_s' \text{ or } \Delta S_s = P - PE)$
- $S_s' = \max \text{ value}$ και $P < PE$ then $\min(\text{abs}(\Delta S_s = -S_s' \text{ or } \Delta S_s = -(PE - P)))$
- $S_s' < \max \text{ value}$ και $P < PE$ then $\min(\text{abs}(\Delta S_s = -S_s' \text{ or } \Delta S_s = -(PE - P)))$

²⁵ Αποθηκευμένη Υγρασία στο άνωθεν εδαφικό στρώμα κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα.

²⁶ Τιμή που σύμφωνα με τον Palmer είναι 1.

²⁷ ΔS_s = Μεταβολή υγρασίας στο άνωθεν εδαφικό στρώμα



Ομοίως, για το υποκείμενο στρώμα οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- $Su'^{28} = \max \text{value}^{29}$ και $P \geq PE$ then $\Delta Su = 0$
- $Su' < \max \text{value}$ και $P \geq PE$ then $(P - PE - Ls)$
- $Su' = \max \text{value}$ και $P < PE$ then $-(PE - P - \text{Abs}(Ls)) * (Su' / AWC)$
- $Su' < \max \text{value}$ και $P < PE$ then $-(PE - P - \text{Abs}(Ls)) * (Su' / AWC)$

Επιπλέον, υποτίθεται ότι δεν πραγματοποιείται απορροή μέχρις ότου και τα δύο εδαφικά στρώματα πληρωθούν. Όπως έχει επισημάνει και ο Kohler (M. A. Kohler, 1957), η παραπάνω υπόθεση δεν είναι απολύτως ικανοποιητική και μελετάται περαιτέρω στη συνέχεια του κεφαλαίου. Όπως προαναφέρθηκε οι μέγιστες απαιτήσεις σε νερό μιας περιοχής υπολογίζονται από την μέθοδο υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής του Thornthwaite. Η εξατμισοδιαπνοή είναι μία εμπειρικά παραγόμενη ποσότητα που προέρχεται από τα δεδομένα του Seabrook (Drexel Institute of Technology, 1957) και άλλες πηγές (Decker and Gerber 1957), όσον αφορά στη μελέτη ανάπτυξης του δείκτη από τον Palmer. Όσον αφορά στα πειραματικά δεδομένα, εκτιμάται ότι μπορεί να είναι λάθος σε ποσοστό 100 % ή περισσότερο, σε περιστασιακές μεμονωμένες ημέρες, και να δείχνουν ένα μέσο ημερήσιο απόλυτο σφάλμα περίπου 35%. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η χρονική περίοδος, η μέση απόλυτη επί τοις εκατό τιμή σφάλματος μειώνεται σε περίπου 10 με 15 %, για τις περιόδους από περίπου 2 εβδομάδες ή και περισσότερο. Αυτό δείχνει ότι για την κλιματολογική ανάλυση της μηνιαίας απαίτησης υγρασίας, η υπολογιζόμενη εξατμισοδιαπνοή δεν είναι ιδιαίτερα λάθος στα κλίματα του τύπου που χρησιμοποιούνται στην έρευνα του Palmer.

Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής είναι, κατά συνέπεια, ισχύουσα μόνο κατά τις περιόδους όπου η βλάστηση αναπτύσσεται ενεργά. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια ψυχρών μηνών η εξατμισοδιαπνοή δεν μπορεί να είναι ένα ιδιαίτερα καλό μέτρο των αναγκών υγρασίας μιας περιοχής. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στις περισσότερες εύκρατες περιοχές η βροχόπτωση υπερβαίνει κανονικά την

²⁸ Su' = Αποθηκευμένη Υγρασία στο υποκείμενο εδαφικό στρώμα κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα.

²⁹ Τιμή που σύμφωνα με τον Palmer καθορίζεται από γεωλογικά χαρακτηριστικά της μελετώμενης περιοχής.



δυναμική εξατμισοδιαπνοή κατά τη διάρκεια των κρύων μηνών, το ζήτημα των απαιτήσεων υγρασίας γίνεται ένα πρόβλημα σχετικά με τις αναμενόμενες προσθήκες παρά ελλείμματα του αποθέματος υγρασίας εντός μιας περιοχής. Αυτές οι προσθήκες μπορεί να είναι προσθήκες στο αποθεματικό υγρασίας του εδάφους, μίας λίμνης, δεξαμενής κτλ.

Σε αυτές τις περιπτώσεις η εξατμισοδιαπνοή δεν έχει σχετικό νόημα, και μπορεί να θεωρηθεί ότι η απαίτηση υγρασίας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων σχετίζεται με κάποιο στοιχείο που θα μπορούσε να ονομαστεί «δυναμική επαναφόρτιση» (potential recharge). Ακριβώς όπως η δυναμική εξατμισοδιαπνοή μετρά την ποσότητα υγρασίας που θα μπορούσε να χρησιμοποιείται υπό την προϋπόθεση ότι η παροχή νερού δεν ήταν περιορισμένη, έτσι η δυναμική επαναφόρτιση θα μετρήσει το ποσό της υγρασίας που θα μπορούσε να προστίθεται στο σύστημα εάν έβρεχε επαρκώς. Ο τρόπος με τον οποίο η έννοια της δυναμικής επαναφόρτισης έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη μελέτη αναλύεται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Είναι προφανές ότι η προσφορά και η ζήτηση χρησιμοποιούνται ως οικονομικές έννοιες και, αν και είναι συχνά παραπλανητικό, το πρόβλημα υγρασίας παρουσιάζει ορισμένες ομοιότητες με την προσφορά και ζήτηση των προβλημάτων γραμμών παραγωγής. Κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής της ζήτησης, η ζήτηση μπορεί να ξεπεράσει την παραγωγή (προσφορά) και τα αποθέματα που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενες περιόδους να χρησιμοποιηθούν για να ικανοποιηθεί το αίτημα της ζήτησης. Κατά τις περιόδους ελάχιστης ζήτησης, οι απαιτήσεις παραγωγής είναι εκείνες που είναι αναγκαίες για τη δημιουργία κατάλληλου αποθέματος.

Στην περίπτωση του προβλήματος της υγρασίας η πλευρά της προσφοράς αντιπροσωπεύεται από την υγρασία που παρέχεται άμεσα μέσω των βροχοπτώσεων, κατά τη διάρκεια της μελετώμενης περιόδου, συν το ποσό της αποθηκευμένης υγρασίας στο παρελθόν που έχει αποσυρθεί για να βοηθήσει την κάλυψη της ζήτησης της περιόδου. Η άντληση από μία λίμνη, ταμειυτήρα, ή και το έδαφος δεν μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί. Ο βαθμός στον οποίο η προσφορά υγρασίας αυξάνεται με την υγρασία που είχε προηγουμένως αποθηκευτεί, εκπροσωπείται από τις εκτιμήσεις του ποσού της εξάντλησης της διαθέσιμης



εδαφικής υγρασίας. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται μόνο επειδή είναι μία βολική μέθοδος μετατροπής του καιρού σε συγκεκριμένους αριθμούς, σε μονάδες μέτρησης της ζήτησης και χρήσης νερού. Ελάττωση της υγρασίας του εδάφους πρέπει να βασίζεται σε εκτιμήσεις εξατμισοδιαπνοής (ET). Επιπλέον στα προβλήματα που αναφέρθηκαν, εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής απαιτούν τη χρήση μιας ρεαλιστικής τιμής για τη διαθέσιμη χωρητικότητα του εδάφους σε νερό (AWC – Available Water Capacity) στην υπό εξέταση περιοχή. Η AWC ποικίλλει σημαντικά από έδαφος σε έδαφος, ωστόσο, όχι περισσότερο από ότι το μικροκλίμα και για τους σκοπούς αυτής της μελέτης της μετεωρολογικής ξηρασίας, η AWC μπορεί να λαμβάνεται ως η αξία η οποία είναι περισσότερο ή λιγότερο αντιπροσωπευτική της περιοχής γενικότερα. Για τις μελέτες γεωργικής ξηρασίας συγκεκριμένα, η AWC (Available Water Capacity) πρέπει να είναι γνωστή (Holcombe and Wiegmann, 1955), ή το πρόβλημα θα πρέπει να λυθεί για ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων, όπως έγινε από τους Van Bavel και Verlinden (Van Bavel and Verlinden, 1956). Σημαντικό έργο έχει γίνει για την επίλυση του προβλήματος της διαθεσιμότητας της υγρασίας στο έδαφος, και ένα μεγάλο μέρος αυτού του έργου για το νερό, το έδαφος και την ανάπτυξη των φυτών έχει δημοσιευθεί από του Richards και Wadleigh (Richards and Wadleigh, 1952). Ωστόσο υπάρχει ανεπάρκεια των άμεσα διαθέσιμων πληροφοριών των διαφόρων εδαφών, ακόμη και με την κατά προσέγγιση διαθέσιμη δυναμικότητα σε νερό. Στη μελέτη του Palmer, στο Δυτικό Κάνσας το έδαφος παρουσιάζει αρκετά καλή διεισδυτικότητα, έτσι θεωρήθηκε ότι η AWC είναι 6 ίντσες για αυτή τη μελέτη (1 ίντσα το επιφανειακό στρώμα και 5 ίντσες το υποκείμενο στρώμα). Είναι πιθανό ότι οι 6 ίντσες που επιλέχθηκαν να είναι μία πολύ μικρή τιμή, ωστόσο, πειράματα με τη χρήση 4 και 8 ιντσών έδωσαν ουσιαστικά τα ίδια αποτελέσματα στο συγκεκριμένο μελετώμενο τομέα, γιατί η βροχόπτωση σε αυτόν τον τομέα είναι συνήθως ανεπαρκής για να παράσχει περισσότερες από 3 ή 4 ίντσες αποθηκευμένης υγρασίας. Για την Κεντρική Αϊόβα όλα τα εδάφη είναι σε θέση να συγκρατήσουν αρκετά μεγάλες ποσότητες του διαθέσιμου νερού (Pierre and Riecken, 1958). Στη μελέτη του Palmer θεωρήθηκε ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα νερού είναι 10 ίντσες. Για την πιθανή ζώνη ανάπτυξης των ριζών σε αυτήν την περιοχή, ορίστηκε 1 ίντσα για το επιφανειακό στρώμα και 9



ίντσες για τα χαμηλότερα στρώματα. Προφανώς δεν διαθέτουν όλα τα σημεία στην περιοχή εδάφη που έχουν ακριβώς 10 ίντσες αποθηκευτική ικανότητα, ωστόσο αυτό αποτελεί μία λογική υπόθεση που θα χρησιμοποιηθεί για την περιοχή στο σύνολό της. Στη μελετώμενη περιοχή στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θεωρήθηκε ότι οι συνθήκες εδάφους και αποθηκευτικής ικανότητας αυτού είναι παρόμοιες με αυτές της Κεντρικής Αιόβα, δηλαδή $AWC=10$ ίντσες.

Μια άλλη δυσκολία στην πραγματοποίηση εκτιμήσεων εξαμυσοδιαπνοής περιλαμβάνει την απορροή, η οποία φυσικά διαφέρει πολύ από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από το έδαφος, την τοπογραφία, και πολλούς άλλους παράγοντες (Kohler and Linsley, 1951). Σύμφωνα με τον Palmer, θα ήταν δυνατό να ενσωματωθεί στη μελέτη κάποια συστηματική διαδικασία για το χειρισμό της απορροής με έναν πιο ρεαλιστικό τρόπο από ό, τι έχει πραγματοποιηθεί. Ο Palmer, έκανε σε αυτό το σημείο την υπόθεση ότι ίσως, στο χρόνο, η απορροή μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της έλλειψης υγρασίας και της βροχόπτωσης, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις που προτάθηκαν από τους Kohler και Richards (Kohler and Richards, 1962). Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη του Palmer, υποτίθεται ότι η απορροή συμβαίνει, όταν έχει πραγματοποιηθεί βροχόπτωση και το πλήρες ποσό του διαθέσιμου νερού έχει ήδη αποθηκευτεί στο έδαφος.

Αυτή η υπόθεση δεν φαίνεται να δημιουργεί ιδιαίτερα σοβαρές αποκλίσεις από την πραγματικότητα³⁰, μιας και οι διαφορές που μπορεί να παρατηρούνται οφείλονται σε μόνο λίγες ημέρες εφοδιασμού υγρασίας στο μέσο του καλοκαιριού (midsummer). Το πιο σοβαρό αντεπιχείρημα σε αυτήν την υπόθεση είναι ότι η απορροή δεν συμβαίνει πάντοτε την κατάλληλη στιγμή. Αυτά τα σφάλματα χρονισμού πιθανώς να παράγουν κάποια προκατάληψη στην ανάλυση. Είναι πιθανό ότι στο μελετώμενο κλίμα η κατάσταση υγρασίας, εμφανίζεται μερικές φορές ελαφρώς ευνοϊκότερη από ό, τι πραγματικά ήταν, ιδιαίτερα το καλοκαίρι. Σημειώνεται ξανά, ότι η μελέτη αυτή πραγματεύεται περιοχές και όχι σημεία και ότι οι βροχοπτώσεις σε υπερβολικές τιμές σπάνια καλύπτουν μεγάλες περιοχές (Thom,

³⁰ Όταν πρόκειται για μία μελέτη άρδευσης, ακόμα και ένα μικρό σφάλμα μπορεί να μην είναι ανεκτό, αλλά για τον τύπο της κλιματολογικής ανάλυσης που γίνεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας το ποσό της βροχόπτωσης η οποία είναι επιφορτισμένη με την απορροή φαίνεται να είναι λογικά σωστό.



1954), έτσι η κλιματολογική ανάλυση είναι πιθανόν να μην επηρεάζεται τόσο σοβαρά όσο θα μπορούσε αρχικά να υποτεθεί.



4.4 Διαδικασία υπολογισμού και συζήτηση

Εν συντομία, η διαδικασία, η οποία περιγράφεται με λεπτομέρεια στη συνέχεια του κεφαλαίου, αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Πραγματοποίηση ενός υδρολογικού υπολογισμού σε μηνιαίο βήμα για μια μακρά σειρά ετών.
2. Σύνοψη των αποτελεσμάτων για την επίτευξη συγκεκριμένων σταθερών ή συντελεστών που εξαρτώνται από το κλίμα της περιοχής που μελετάται.
3. Ανάλυση της σειράς δεδομένων με τη χρήση των παρηγμένων συντελεστών για να καθοριστεί το ποσό της υγρασίας που απαιτείται για τις "κανονικές" καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια κάθε μήνα.
4. Μετατροπή των αποκλίσεων σε δείκτες ανωμαλίας υγρασίας.
5. Ανάλυση των σειρών δεικτών για την ανάπτυξη:
 - α. Κριτηρίων για τον προσδιορισμό της έναρξης και του τέλους των περιόδων ξηρασίας.
 - β. Ένας τύπος για τον καθορισμό της δριμύτητας ξηρασίας.

4.4.1 Υδρολογικός υπολογισμός

Η διαδικασία υδρολογικού υπολογισμού απεικονίζεται από τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής της Λίμνης Υλίκης για τα έτη 1978 – 2002, τα οποία παρουσιάζονται **στο παράρτημα I και συγκεκριμένα στους πίνακες 11 και 12**. Το προηγούμενο έτος, το 1977, θεωρείται ότι ήταν σχετικά υγρό στην περιοχή και οι δύο εδαφικές στρώσεις υπολογίζεται να είχαν πληρώσει τη μέγιστη αποθηκευτική τους ικανότητα στο τέλος υδρολογικού έτους. Όσον αφορά τώρα στη μέθοδο υπολογισμού του υδρολογικού κύκλου κατά τον Palmer, όταν η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PE) υπερέβη την βροχόπτωση (P) η διαφορά των δύο μεταβλητών, ως ποσότητα υγρασίας, αποσύρεται από το επιφανειακό στρώμα (σύμφωνα με την εξίσωση (1) μειώνοντας έτσι την αποθήκευση στο επιφανειακό στρώμα αναλόγως). Η έλλειψη από το υποκείμενο έδαφος, εάν η διαφορά εξατμισοδιαπνοής και βροχόπτωσης είναι μικρότερη από 1, θεωρείται ότι είναι μηδενική και η αποθήκευση στο υποκείμενο έδαφος παραμένει αμετάβλητη από τον προηγούμενο μήνα. Σημειώνεται επίσης, ότι και η συνολική απώλεια, L, τόσο από τα εδαφικά στρώματα υπολογίζεται και καταγράφεται. Η καθαρή



επαναφόρτιση (net recharge) και η απορροή σημειώνονται εάν παρατηρείται αντίστοιχα επαναφόρτιση του υπερκείμενου και υποκείμενου στρώματος (καθαρή επαναφόρτιση) και απορροή του εισερχόμενου φορτίου υγρασίας όταν τα εδαφικά στρώματα έχουν πληρωθεί με υγρασία. Συγκεκριμένα, εάν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή τότε η καθαρή επαναφόρτιση είναι ίση με το άθροισμα των απωλειών των δύο εδαφικών στρωμάτων, αλλιώς είναι μηδενική. Αντίστοιχα αν η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη από τη βροχόπτωση, τότε η απορροή είναι μηδενική, αλλιώς ισούται με τη βροχόπτωση, μείον τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, μείον το άθροισμα των απωλειών των εδαφικών στρωμάτων. Οι ποσότητες υγρασίας που αποσύρονται από τα εδαφικά στρώματα σε κάθε χρονικό βήμα, προστίθενται στην κατακρήμνιση για να δώσουν μια άλλη μελετώμενη μεταβλητή, την υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή (computed evapotranspiration) για τον υπολογισμό της οποίας ισχύουν τα εξής:

Εάν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή τότε η υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή είναι ίση με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Στην αντίθετη περίπτωση είναι ίση με το άθροισμα της βροχόπτωσης συν το αποτέλεσμα του αθροίσματος της απώλειας του επιφανειακού και υποκείμενου στρώματος σε απόλυτη τιμή.

Η στήλη που αθροίζει την πληρότητα των δύο εδαφικών στρωμάτων σε κάθε χρονικό βήμα δείχνει το διαθέσιμο νερό που βρίσκεται και στα δύο στρώματα του εδάφους στο τέλος κάθε μήνα. Με την εξίσωση (2) υπολογίζεται η απώλεια από το κατώτερο τμήμα του εδάφους, η οποία μειώνει τη διαθέσιμη υγρασία του εδάφους.

4.5 Δυνητικές τιμές (potential values)

Υπάρχουν μερικά στοιχεία που υπολογίζονται κατά τον υδρολογικό υπολογισμό, τα οποία, αν και δεν χρησιμοποιούνται άμεσα σε υπολογισμούς υδατικού ισοζυγίου, αποτελούν μέρος της διαδικασίας υπολογισμού του ισοζυγίου γιατί θα χρειαστούν αργότερα. Η δυνητική επαναφόρτιση (PR) είναι ένα τέτοιο στοιχείο. Ως δυνητική επαναφόρτιση μπορεί να θεωρηθεί ένα μέτρο κάπως παρόμοιο με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Είναι παρόμοιες υπό την έννοια ότι μετρά υποθετικά τη μέγιστη κατάσταση που θα μπορούσε να υπάρχει. Ακριβώς όπως η διαφορά μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μετρά μία πτυχή της



έλλειψης υγρασίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, η διαφορά μεταξύ επαναφόρτισης και δυνητικής επαναφόρτισης συνδέεται με μια άλλη πτυχή της ανεπάρκειας υγρασίας. Η δυνητική επαναφόρτιση ορίζεται ως το ποσό της υγρασίας που απαιτείται για να φέρει το χώμα στην μέγιστη φέρουσα ικανότητα του.

- $PR = AWC - S' \quad (3)$,

όπου S' είναι η ποσότητα της διαθέσιμης υγρασίας και στα δύο στρώματα του εδάφους κατά την έναρξη του μήνα.

Η δυνητική απώλεια (PL) εκφράζει μια άλλη μέτρηση της μέγιστης κατάσταση που θα μπορούσε να υπάρχει. Ορίζεται ως το ποσό της υγρασίας που θα μπορούσε να χαθεί από το έδαφος υπό την προϋπόθεση ότι η κατακρήμνιση κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής ήταν μηδέν. Υποτίθεται ότι η PE για την περίοδο αυτή και οι συνθήκες αρχικής υγρασίας του εδάφους ήταν όπως «παρατηρήθηκαν».

- $PL = PL_s + PL_u \quad (4)$

Όπου PL_s είναι η μικρότερη τιμή μεταξύ της PE και του S'_s

Και $PL_u = (PE - PL_s)S'_u / AWC$

Η **δυνητική απώλεια** επιτρέπει σε κάποιον να εξελίξει ένα μέτρο μιας κατάστασης, όπως υπήρχε στη μελετώμενη περιοχή. Στον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου δεν μπορεί κανείς να παραμελήσει την απορροή γιατί υπό ορισμένες συνθήκες, είναι το πιο σημαντικό πράγμα που λαμβάνει χώρα. Έχοντας μελετήσει τα μέτρα της δυνητικής επαναφόρτισης και δυνητικής απώλειας καθώς και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, απομένει ακόμα το μέτρο της δυνητικής απορροής, PRO.

Όταν το έδαφος βρίσκεται στην φέρουσα ικανότητα του, η δυνατότητα επαναφόρτισης του είναι μηδενική. Έχοντας επίσης ένα μέτρο της δυνητικής απορροής, καθίσταται δυνατό να γίνει διαχείριση της κατάστασης υγρασίας με τρόπο παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται για τις άλλες πτυχές. Η ανάπτυξη αυτή αποδείχθηκε ότι είναι πιο δύσκολο από ότι αναμενόταν. Στην πραγματικότητα, βέβαια, η μέγιστη απορροή που θα μπορούσε να συμβεί σε μια δεδομένη κατάσταση (υποθέτοντας ότι $PE = 0$ και σύμφωνα με τους κανόνες υπολογισμού οι οποίοι χρησιμοποιούνται) θα ισούται με τη βροχόπτωση μείον το ποσό που θα



μπορούσε να προστίθεται στο έδαφος. Αποδεικνύεται ότι αυτό το μέτρο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη μελέτη, επειδή η προσέγγιση που χρησιμοποιείται απαιτεί ότι η πραγματική βροχόπτωση δεν θα πρέπει να εισαχθεί σε αυτό στάδιο της ανάπτυξης. Μετά από πειράματα και εκτιμήσεις της δυνητικής απορροής, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος απλός συλλογισμός.

Στην αρχή μπορεί εύλογα να υποτεθεί ότι η απορροή είναι πιο πιθανό να είναι μικρή όταν η δυνητική επαναφόρτιση είναι μεγάλη και αντίστοιχα να είναι μεγάλη, όταν το έδαφος είναι ήδη σε φέρουσα χωρητικότητα. Επομένως η επαναφόρτιση, είναι μηδέν. Επιστρέφοντας στην εξίσωση (3), είναι προφανές ότι η δυνητική επαναφόρτιση είναι μεγαλύτερη όταν η S' είναι μικρότερη και το αντίστροφο. Για μια πιο ικανοποιητική σχέση μπορεί να υποτεθεί ότι η δυνητική απορροή είναι συνάρτηση του ποσού της υγρασίας του εδάφους:

- **$PRO = AWC - PR = S'$ (5)**

Αυτή η ενέργεια αντιστοιχίζει "την δυνητική βροχόπτωση", ως ίση με την AWC. Αυτή η υπόθεση αν και όχι ιδιαίτερα κομψή, είναι η καλύτερη που θα μπορούσε να εφαρμοστεί την εποχή δημιουργίας του δείκτη και σύμφωνα με τον Palmer έχει δουλέψει καλύτερα από τα αναμενόμενα.

Για την συνέχιση των υπολογισμών του δείκτη Palmer με βάση το υδρολογικό υπολογιστικό φύλλο που έχει ήδη καταστρωθεί, γίνεται υπολογισμός των μηνιαίων μέσων τιμών των διαφόρων σημαντικών στοιχείων που έχουν παρουσιαστεί. Σημειώνεται ότι όταν επεξεργάζονται τα δεδομένα με τον τρόπο αυτό, αποκομίζεται η μέση τιμή της επαναφόρτισης της υγρασίας του εδάφους καθώς και η τιμή για τη μέση απώλεια της υγρασίας του εδάφους για τους περισσότερους μήνες.

4.5.1 Συντελεστής Εξατμισοδιαπνοής, α

Σε υγρά κλίματα, η εξατμισοδιαπνοή είναι συνήθως σχεδόν ίση με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, αλλά σε ξηρά κλίματα η συνήθης κατάσταση είναι η εξατμισοδιαπνοή να είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη δυνητική. Το γεγονός αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ποσού της εξατμισοδιαπνοής (ET) που αναμένεται σε κάποιο συγκεκριμένο κλίμα. Για κάποιο



συγκεκριμένο μήνα η αναλογία της μέσης PE με τον μέσο όρο της ET, είναι ο μέσος όρος της ET διά, του μέσου όρου της PE για τον ίδιο μήνα και αποκαλείται **συντελεστής της εξατμισοδιαπνοής, α**

- $\alpha = ET/PE$ (6)

Αυτοί οι συντελεστές έχουν υπολογιστεί για κάθε μήνα στην περιοχή. Οι συντελεστές αυτοί από μόνοι τους είναι σημαντικοί για τη μέτρηση του γεωργικού κλίματος. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ποσού της ET που θα ήταν φυσιολογική για έναν συγκεκριμένο τόπο, αφού έχει ληφθεί υπόψη η ζήτηση υγρασίας (PE) κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα. Επί παραδείγματι, αν ένας συγκεκριμένος μήνας ήταν πολύ θερμότερος από το κανονικό, για παράδειγμα PE = 6,00 ίντσες, τότε η ET θα πρέπει να είναι $\alpha \times 6$ ίντσες ώστε η ET να φέρει κανονικά τη σχέση της με την κλιματική ζήτηση για υγρασία. Αυτή η παραγμένη εξατμισοδιαπνοή, σε αυτήν την περίπτωση, θα ονομάζεται "CAFEC³¹», (κλιματικά κατάλληλη για τις υφιστάμενες συνθήκες) εξατμισοδιαπνοή. Αυτή η παραγμένη εξατμισοδιαπνοή μπορεί να συγκριθεί με την ET, όπως υπολογίζεται στο υδρολογικό ισοζύγιο και ως εκ τούτου δημιουργείται ένα μέτρο υπολογισμού της ανωμαλίας αυτής της ιδιαίτερης πτυχής της κατάστασης της υγρασίας.

³¹ Climatically Appropriate For Existing Conditions



4.5.2 Συντελεστής Επαναφόρτισης, β

Σε πολλά μέρη, η επαναφόρτιση του εδάφους με υγρασία είναι εποχιακή υπόθεση. Συνήθως η κύρια περίοδος επαναφόρτισης είναι από τον Νοέμβριο μέχρι τον Μάρτιο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η δυνητική εξατμισοδιαπνοή PE είναι πολύ μικρή, και η ανάγκη για υγρασία είναι μια ανάγκη για την ανοικοδόμηση της προσφοράς υγρασίας που εξαντλήθηκε από τις καιρικές συνθήκες του περασμένου καλοκαιριού. Ακριβώς όπως η υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή ET δεν μπορεί να υπερβαίνει την PE, έτσι και η επαναφόρτιση R δεν μπορεί να υπερβαίνει τη δυνητική επαναφόρτιση PR, η οποία είναι και συνήθως πολύ μικρότερη από την δυνητική εκτός από κλίματα που είναι υγρά έως πολύ υγρά και σε περιοχές με μικρή ικανότητα αποθήκευσης νερού. Η αναλογία του μέσου όρου της επαναφόρτισης με το μέσο όρο δυνατότητας επαναφόρτισης ονομάζεται συντελεστής επαναφόρτισης, β.

- **$B=R/PR$ (7)**

Οι συντελεστές αυτοί, όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τη δυνητική επαναφόρτιση για ένα συγκεκριμένο μήνα, μπορεί να υπολογίσουν την επαναφόρτιση CAFEC, δηλαδή, την επαναφόρτιση που θα ήταν κλιματικά κατάλληλη για τις συνθήκες της εποχής και του τόπου που εξετάζονται. Για παράδειγμα, αν η PR σε μία περιοχή, στις αρχές ενός μήνα ήταν 6 ίντσες και ο συντελεστής επαναφόρτισης κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα στην περιοχή είναι 0,07. Η επαναφόρτιση CAFEC θα είναι $6 * 0.07 = 0,42$ ίντσες. Αυτό σημαίνει ότι η προσθήκη ποσότητας 0,42 ιντσών στην υγρασία του εδάφους κατά τη διάρκεια του μελετώμενου μήνα θα ήταν κλιματικά κατάλληλη ενόψει της αρχικής ξηρότητας του εδάφους. Στην πραγματικότητα, εάν η υπολογιζόμενη επαναφόρτιση είναι μηδέν, το 0,42 θα αντιπροσωπεύει μία ανωμαλία στο έλλειμμα του εμπλουτισμού υγρασίας του εδάφους. Στο προηγούμενο τμήμα σχετικά με το συντελεστή εξατμισοδιαπνοής υπολογίστηκε η τιμή της αναμενόμενης εξατμισοδιαπνοής για έναν μελετώμενο μήνα. Σε αυτό αν προστεθούν οι 0,42 ίντσες του αναμενόμενου εμπλουτισμού προκύπτει μία ανάγκη για υγρασία. Αυτό δεν είναι μία μέτρηση της μέγιστης ανάγκης υγρασίας αλλά ονομάζεται "συνήθης ή εγκατεστημένη χρήση υγρασίας".



4.5.3 Συντελεστής απορροής, γ

Όπως επισημάνθηκε νωρίτερα, η δυνητική απορροή σχετίζεται με την αρχική ποσότητα του διαθέσιμου νερού του εδάφους και για λόγους απλότητας έχει οριστεί ίση με την εξίσωση (5). Ο συντελεστής απορροής γ μπορεί να επιτευχθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και οι προηγουμένως συζητηθέντες συντελεστές.

- $\gamma = RO/PRO = RO/S'$ (8)

Η απορροή CAFEC μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή γ του μελετώμενου μήνα με το ποσό της υγρασίας στο χώμα στο τέλος του προηγούμενου μήνα. Αυτό δίνει μία ποσοτική εκτίμηση για την απορροή CAFEC για 'αυτό το συγκεκριμένο μήνα. Αν προστεθεί σε αυτό η CAFEC εξατμισοδιαπνοή και η CAFEC επαναφόρτιση για αυτό το μήνα, προκύπτει μία ποσότητα υγρασίας που αντιπροσωπεύει το ποσό της υγρασίας που χρειάζεται για να διατηρήσει τους υδάτινους πόρους της περιοχής σε ένα "κανονικό" επίπεδο. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί την ποσότητα της βροχόπτωσης που «απαιτείται», επειδή μπορεί να υπήρχε στις αρχές του μελετώμενου μήνα κάποια υγρασία του εδάφους που θα μπορούσε να αναμένεται να παρέχει ένα μέρος της εξατμισοδιαπνοής, εάν ήταν απαραίτητο. Ο υπολογισμός της «αναμενόμενης» απώλειας από το έδαφος αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

4.5.4 Συντελεστής απωλειών, δ

Ακολουθώντας παρόμοια επιχειρηματολογία ο συντελεστής απωλειών, δ , συνοψίζεται ως εξής:

- $\delta = L/PL$ (9)

Η CAFEC απώλειες από το έδαφος είναι ίσες με $\delta \times PL$. Αυτή η ποσότητα μπορεί να αφαιρεθεί από την προηγουμένως υπολογισθείσα ποσότητα υγρασίας που απαιτείται, δίνοντας έτσι την ποσότητα της CAFEC βροχόπτωσης. Αυτό είναι το ποσό της βροχόπτωσης που θα διατηρήσει τους υδάτινους πόρους της περιοχής σε επίπεδο κατάλληλο για την καθορισμένη οικονομική δραστηριότητα της περιοχής.



4.6 Βροχόπτωση CAFEC, P'

Συνοψίζοντας, για κάθε μεμονωμένο μήνα υπολογίζονται οι ποσότητες CAFEC για την εξατμισοδιαπνοή, επαναφόρτιση, απορροή, απώλεια, και βροχόπτωση.

Λόγω του τρόπου με τον οποίο κάθε ένα από αυτά τα συστατικά της CAFEC βροχόπτωσης υπολογίζονται, το καθένα έχει μια μέση τιμή ίση με τη μέση αξία του ομολόγου του. Έχουμε λοιπόν:

- $ET = \alpha PE$ (10)
- $R = \beta PR$ (11)
- $RO = \gamma PRO$ (12)
- $L = \delta PL$ (13)
- $P = ET + R + RO - L$ (14)

Ο υπολογισμένος μέσος όρος των ετών της CAFEC εξατμισοδιαπνοής για κάποιο μήνα πρέπει να είναι ίδιος με τη μέση τιμή των ίδιων ετών μελέτης της εξατμισοδιαπνοής, όπως καθορίζεται από τον αρχικό υδρολογικό υπολογισμό. Το ίδιο σκεπτικό ισχύει και για τις άλλες συνιστώσες της CAFEC βροχόπτωσης. (Φυσικά, η τιμή της CAFEC και η «πραγματική» αξία σπάνια θα συμφωνήσουν σε ένα συγκεκριμένο μήνα.) Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι ο μακροπρόθεσμος μέσος όρος της CAFEC βροχόπτωσης είναι ίσος με τη μακροπρόθεσμη πραγματική βροχόπτωση. Αυτό σημαίνει απλά ότι ο μέσος όρος απόκλισης της πραγματικής βροχόπτωσης από την βροχόπτωση CAFEC είναι μηδέν και έτσι συνεπάγεται ότι δεν έχει εισαχθεί καμία προκατάληψη. Οι αποκλίσεις μεμονωμένων μηνών αποτελούν, συνεπώς, αποκλίσεις από το μέσο κλίμα της περιοχής που μελετάται. Αυτές οι αποκλίσεις συσχετίζονται, αλλά δεν είναι ταυτόσημες, με τη μηνιαία απόκλιση από τη βροχόπτωση σε σύγκριση με το μακροπρόθεσμο μέσο. Στην πραγματικότητα, υπό περίπτωση οι δύο αποκλίσεις μπορεί να είναι αντίθετου πρόσημου. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σε σπάνιες περιπτώσεις η CAFEC βροχόπτωση αποδεικνύεται να έχει αρνητικό πρόσημο. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν ο καιρός είναι πολύ υγρός κατά τη διάρκεια μιας εποχής που κανονικά είναι αρκετά ξηρή. Αρνητικές τιμές ερμηνεύονται ως ένδειξη ότι στο παρελθόν ο καιρός ήταν ασυνήθιστα υγρός και ότι η περιοχή θα παραμείνει ασυνήθιστα υγρή για ένα μήνα ακόμα και αν δεν βρέξει καθόλου κατά τη διάρκεια του μήνα αυτού. Αν και η ιδέα των "αρνητικών"



βροχοπτώσεων είναι λίγο ανησυχητική, οι λίγες περιπτώσεις στις οποίες η P ήταν αρνητική έχουν παράγει λογικά αποτελέσματα που εμφανίζονται χωρίς να εισάγουν οποιεσδήποτε δυσκολίες.

4.7 Περίσσεια κατακρήμνισης και ελλείμματα

Όταν όλη η σειρά των δεδομένων που έχουν διατυπωθεί όπως και η βροχόπτωση CAFEC έχουν υπολογιστεί για κάθε μήνα, η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της βροχόπτωσης CAFEC για κάθε μήνα είναι:

- $d = P - P_{\text{cafec}}$ (15)

Η εξίσωση 15 φαίνεται να είναι σημαντικό μέτρο της απόκλισης της υγρασίας από τον «κανονικό» καιρό.

4.8 Το κλιματικό χαρακτηριστικό K

Οι τιμές των παραγμένων μηνιαίων αποκλίσεων από την υγρασία υπολογίζονται για το σύνολο της διάρκειας των μηνών των υπαρχόντων δεδομένων. Από πρακτική πλευρά καθώς και από στατιστικές εκτιμήσεις είναι προφανές ότι μια δεδομένη απόκλιση σημαίνει διαφορετικά πράγματα σε διαφορετικούς τόπους και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Μπορούν να συγκριθούν μια σειρά από τέτοιες αποκλίσεις, αλλά δεν μπορούν να συγκριθούν αποκλίσεις διαφορετικών μηνών ή αποκλίσεις που υπολογίζονται για μια διαφορετική περιοχή εκτός αν καθοριστεί εκ των προτέρων ότι τα σύνολα δεδομένων είναι πραγματικά συγκρίσιμα. Αυτό σημαίνει ότι η σημασία της κάθε απόκλισης εξαρτάται κατά κάποιο τρόπο από τη κανονική υγρασία του κλίματος για το μήνα και το μέρος που εξετάζεται. Για τον καθορισμό του δείκτη Palmer και προκειμένου να αξιολογηθεί αυτή η σημασία, υποτέθηκε ότι οι οικονομικές συνέπειες της ξηρότερης χρόνιας στις μελετώμενες (κατά το στάδιο δημιουργίας του δείκτη) περιοχές ήταν περίπου εξίσου σοβαρές.

Πρώτος τρόπος υπολογισμού είναι ο υπολογισμός της συνολικής απόκλισης υγρασίας και στη συνέχεια της μηνιαίας απόκλισης, θεωρώντας πάντα τις ξηρότερες περιόδους παρόμοιας διάρκειας στις μελετώμενες περιοχές. Με την παραδοχή ότι οι ξηρές περίοδοι ήταν περίπου ίσης σημασίας σε τοπικό επίπεδο, μπορεί να πολλαπλασιαστεί κάθε μία τιμή μηνιαίας απόκλισης υγρασίας με έναν παράγοντα, K , και να γραφτεί ως εξής:



- **$K_{\text{περιοχής μελέτης A}} \times d_{\text{περιοχής μελέτης A}} = K_{\text{περιοχής μελέτης B}} \times d_{\text{περιοχής μελέτης B}}$ (16)**

Τα K αντιπροσωπεύουν μέσους όρους για κάποιο, ακόμη απροσδιόριστο, χαρακτηριστικό των κλιμάτων αυτών στις μελετώμενες περιοχές κατά τη διάρκεια των χρονικών περιόδων που μελετώνται, δηλαδή, ισχύουν για τις περιόδους ως σύνολο και όχι για κάθε μήνα ξεχωριστά. Ωστόσο, αντιμετωπίζονται ως σταθερές και αξιολογούνται από μερικές μετρημένες πτυχές του τοπικού κλίματος. Όσο μικρότερη είναι η προσφορά, σε σχέση με τη ζήτηση, τόσο μεγαλύτερη είναι η σημασία μιας δεδομένης έλλειψης. Ο καλύτερος τρόπος υπολογισμού της μέσης ζήτησης υγρασίας μπορεί να επιτευχθεί με τον εξής τρόπο. Για μερικούς μήνες μπορεί να εκτιμάται από την μέση υπολογισμένη PE και για μερικούς μήνες μπορεί να εκτιμάται από το μέσο ποσό της επαναφόρτισης που συμβαίνει. Ωστόσο, για μερικούς μήνες την άνοιξης και του φθινοπώρου οι μέσες υπολογισμένες τιμές της PE και R είναι περίπου ίσες και είναι και οι δύο σημαντικές.

Συνεπώς, η μέση ζήτηση για υγρασία σε κάθε περίοδο μπορεί να εκτιμηθεί από την εξατμισοδιαπνοή και την επαναφόρτιση ($PE + R$). Η μέση προσφορά υγρασίας δεν εξαρτάται πάντα εξ ολοκλήρου από την βροχόπτωση. Σε ορισμένες περιπτώσεις η βροχόπτωση από μόνη της δεν αντιπροσωπεύει πραγματικά όλη την προσφορά υγρασίας επειδή χρησιμοποιείται και η προηγουμένως αποθηκευμένη. Ως εκ τούτου, ο μέσος όρος παροχής υγρασίας για ένα μήνα ή περίοδο μπορεί να μετράται από την μέση υπολογισμένη τιμή της βροχόπτωσης και των απωλειών ($P + L$).

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το K , το κλιματικό χαρακτηριστικό, μπορεί εύλογα να εκτιμηθεί για καθέναν από τους 12 ημερολογιακούς μήνες, ως εξής:

- **$k = (PE+R)/(P+L)$ (18)**

όπου k είναι μια πρώτη προσέγγιση του K . Αυτοί οι αριθμοί προορίζονται ως μέτρα της τοπικής σημασίας της απόκλισης υγρασίας που έχει παραχθεί. Ωστόσο, στη συνέχεια του κεφαλαίου αποδεικνύεται ότι η εξίσωση (18) δεν λειτούργησε πολύ καλά σε ορισμένα άλλα κλίματα (πέρα από τις μελετώμενες περιοχές του Palmer) και έτσι παρουσιάζεται και εφαρμόζεται μία διαφορετική εξίσωση για τον υπολογισμό του συντελεστή K . Δεδομένου ότι οι εργασίες για την τελική εύρεση του K εξαρτιόνταν από την πρώτη προσέγγιση, του k , η ακόλουθη παράγραφος



περιγράφει την ανάπτυξη του συντελεστή k με την "back tracking μέθοδο", η οποία εξελίχθηκε στην τελική εξίσωση για τον συντελεστή K .

4.9 Ο δείκτης ανωμαλίας της υγρασίας, z

Οι μηνιαίες σταθερές τιμές k χρησιμοποιούνται ως συντελεστές βαρύτητας για κάθε μία από τις μηνιαίες αποκλίσεις υγρασίας κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Οι αποκλίσεις πολλαπλασιάζονται με τους αντίστοιχους συντελεστές για να λάβουν τις τιμές του δείκτη z . Ο δείκτης που παράγεται πρέπει να παρέχει συγκρίσιμα μέτρα της σχετικής κλιματικής ανωμαλίας. Ο μηνιαίος "δείκτης ανωμαλίας της υγρασίας, z ," επομένως ορίζεται ως εξής:

- $z = dk$ (19)

Αυτές οι τιμές δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ποσότητα (ίντσες) απόκλισης της προσφοράς από την κανονική υγρασία. Οι αποκλίσεις έχουν πλέον σταθμιστεί και πρέπει να θεωρούνται μόνο ως τιμές δεικτών. Κάθε αριθμός εκφράζει σε μηνιαία βάση, την απόκλιση του καιρού του μήνα από το μέσο όρο κλιματικής υγρασίας του μήνα αυτού. Καθένα από αυτά έχει, προφανώς, προσαρμοστεί ή σταθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η ίδια κλίμακα- η τεταγμένη, γραφικώς σκεπτόμενοι – να είναι εφαρμοστέα σε όλες τις τιμές. Μικρές ανωμαλίες της υγρασίας μπορεί να συμβούν σε οποιαδήποτε στιγμή και σε οποιοδήποτε μέρος. Επίσης θα πρέπει να αναμένεται το γεγονός ότι στις μελετώμενες περιοχές όπου δημιουργήθηκε ο δείκτης Palmer, πολύ σπάνια εμφανίζονται μεγάλες ανωμαλίες κατά τη χειμερινή περίοδο, από το Νοέμβριο μέχρι τον Φεβρουάριο. Το μεγαλύτερο μέρος των ανωμαλιών στην ψυχρή περίοδο είναι θετικές και παρατηρούνται λόγω του γεγονότος ότι οι μεγάλες μηνιαίες βροχοπτώσεις μπορεί μερικές φορές να εμφανίζονται κατά την ψυχρή περίοδο. Αντίθετα, ακόμη και μια πλήρης αποτυχία προφοράς υγρασίας κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε κρύου μήνα δεν θα οδηγήσει σε κάποια πολύ μεγάλη απόκλιση της προσφοράς υγρασίας από το κανονικό, επειδή σε αυτά τα συγκεκριμένα κλίματα η ζήτηση υγρασίας ή η CAFEC βροχόπτωση κατά την ψυχρή περίοδο είναι πάντα μάλλον μικρή. Οι πραγματικά σημαντικές αρνητικές ανωμαλίες υγρασίας συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των ζεστών εποχών. Αυτό, είναι αναμενόμενο διότι η απαίτηση υγρασίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί να



είναι αρκετά μεγάλη και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η προσφορά υγρασίας μπορεί να αποτύχει σχεδόν εντελώς.

4.10 Ο Παράγοντας της διάρκειας - Η επίδραση του χρόνου

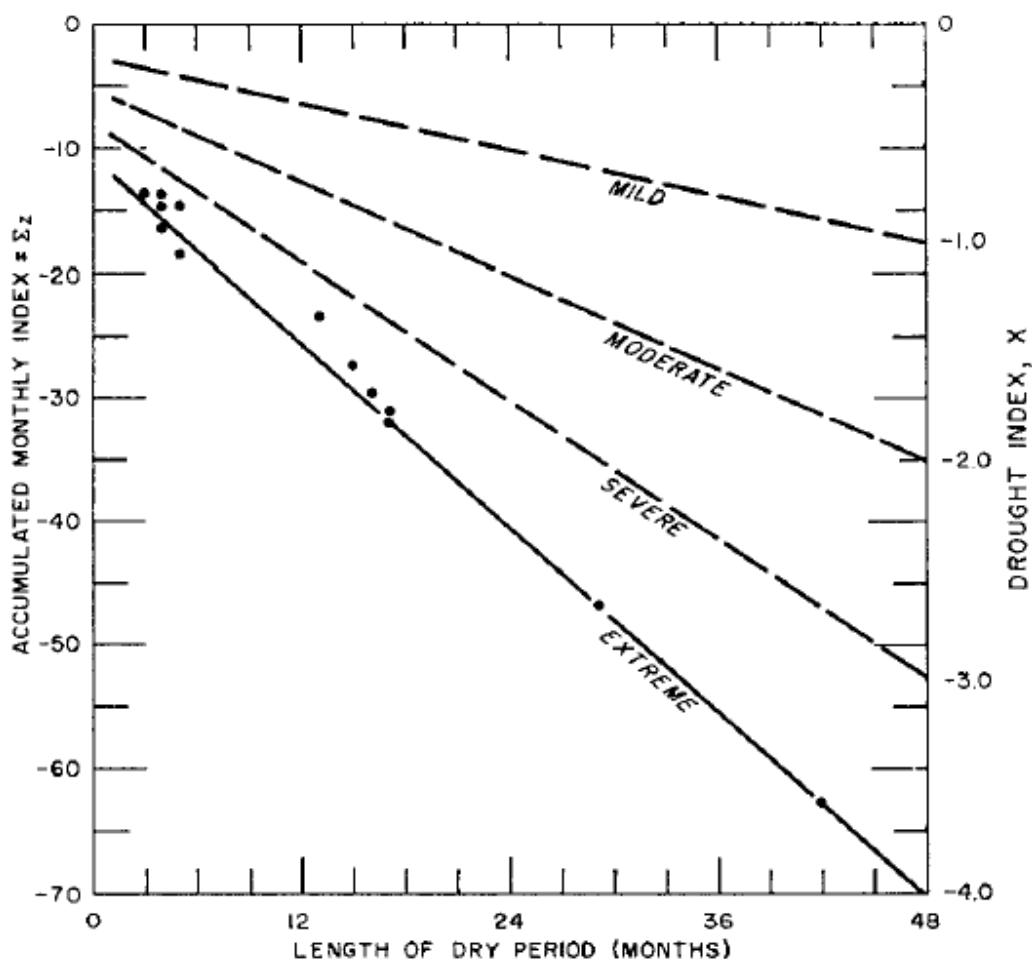
Όπως έχουν επισημάνει οι Thomas και Hildreth (Hildreth and Thomas, 1956) στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι το πρώτο έτος της χαμηλής βροχόπτωσης που είναι καταστροφικό για την καλλιέργεια και την εκτροφή ζώων, αλλά οι παρατεταμένες περίοδοι που παρατείνονται για 2, 3, ή 4 χρόνια στη σειρά. Τα ίδια επιχειρήματα εφαρμόζονται και για τις υδρολογικές πτυχές της ξηρασίας. Μια σχετικά σύντομη περίοδος, ασυνήθιστα ξηρών συνθηκών θα μειώσει τα επίπεδα λιμνών και ταμιευτήρων αλλά η κατάσταση δεν γίνεται πραγματικά σοβαρή μέχρις ότου η παρατεταμένη περίοδος ξηρασίας να φέρει την προσφορά νερού σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο. Ως εκ τούτου, γίνεται διάκριση μεταξύ, της ήπιας ξηρασίας και της ακραίας ή καταστροφικής ξηρασίας, ούτως ώστε η διάρκεια της ανώμαλα άνυδρης περιόδου να λαμβάνεται υπόψη.

4.11 Κατηγορίες ξηρασίας

Είναι λογικό, και σίγουρα θα ήταν βολικό, να υπήρχαν ονόματα που αποδίδονται στις διάφορες κατηγορίες της σοβαρότητας της ξηρασίας όπως έχουν αυθαίρετα χρησιμοποιηθεί ονομασίες και ορισμοί σε άλλες μετεωρολογικές καταστάσεις όπως η πυκνή ομίχλη, η μέτρια βροχή, και άλλα φαινόμενα. Φαίνεται ότι η σοβαρότητα της ξηρασίας θα μπορούσε να εκφράζεται κατάλληλα από τέσσερις κατηγορίες, ήπια, μέτρια, σοβαρή, και ακραία. Ωστόσο, δεν υπάρχουν ικανοποιητικοί ορισμοί για αυτές τις εκφράσεις. Επίσης δε φαίνεται να υπάρχει ούτε η δυνατότητα για να γίνει έστω και μια ημι-αντικειμενική προσέγγιση για τους συγκεκριμένους ορισμούς της "ήπιας", "μέτριας", ή "ακραίας" ξηρασίας. Για αυτό το λόγο υποτίθεται ότι "ακραία" ξηρασία σημειώθηκε στις δύο μελετώμενες περιοχές (Κάνσας και Αϊόβα) κατά τη διάρκεια μερικών από τις πιο ξηρές περιόδους των καταγεγραμμένων στοιχείων της περιόδου. Με αυτόν τον τρόπο δύναται να περιγραφεί το φαινόμενο της ακραίας ξηρασίας μέσω της συσσώρευσης των τιμών του μηνιαίου δείκτη.

4.12 Τα ξηρότερα Διαστήματα

Ο Palmer δημιούργησε έναν δείκτη συσσωρευμένης ανωμαλίας υγρασίας στις περιοχές μελέτης (Αιόβα και Κάνσας). Αυτές οι περίοδοι που επιλέχθηκαν αντιπροσωπεύουν το μέγιστο ρυθμό με τον οποίο οι αρνητικές τιμές του μηνιαίου δείκτη έχουν συσσωρευτεί κατά διάφορα χρονικά διαστήματα. Τα δεδομένα αυτά όπως τα κατέγραψε ο Palmer παρουσιάζονται στο Σχήμα 5 που ακολουθεί.



Σχήμα 5 Συσσωρευμένος δείκτης κατά τις ξηρότερες περιόδους και για διάφορα χρονικά διαστήματα (Πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. page 20)

Η ευθεία γραμμή επ' αυτού σχεδιάστηκε με το μάτι. Αυτή η ευθεία δεν παρουσιάζει ποσοστό συσσώρευσης των τιμών του δείκτη, επισημαίνει απλώς τον κατά προσέγγιση μέγιστο ρυθμό που έχει παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια εξαιρετικά ξηρών περιόδων με διαφορετικά χρονικά μήκη. Για παράδειγμα, οι z-τιμές είναι



γνωστό ότι συσσωρεύονται με μέση τιμή $-3,0$ ανά μήνα για 6 μήνες περίπου, αλλά με τη μέση τιμή των μόλις $-1,5$ ανά μήνα για διάστημα πάνω από 42 μήνες. Ως εκ τούτου, αυτή η γραμμή μπορεί να αντιπροσωπεύσει ακραία ξηρασία, δηλαδή, μία εξαιρετικά ξηρή και πολύ ασυνήθιστη κατάσταση παρουσιάζεται αν $z = -12,00$ για ένα μήνα καθώς και εάν $\Sigma z = -70,1$ σε 4 χρόνια. Αυτή είναι μία από τις οικογένειες γραμμών που μπορούν να εξαχθούν. Αφού η οριζόντια γραμμή στο επάνω μέρος του διαγράμματος αντιπροσωπεύει το «φυσιολογικό», η συντεταγμένη από την κανονική σε ακραίες τιμές χωρίστηκε σε τέσσερα ίσα μήκη και το σώμα του γραφήματος αντίστοιχα διαιρέθηκε με διακεκομμένες γραμμές οι οποίες αυθαίρετα χαρακτηρίστηκαν ως "ήπια", "μέτρια" και "σοβαρή" ξηρασία. Είναι βολικό να εκχωρηθεί μια αριθμητική τιμή της σοβαρότητας της ξηρασίας $-4,0$ στη γραμμή για ακραία ξηρασία, $-3,0$ στη σοβαρή ξηρασία, $-2,0$ στη μέτρια ξηρασία, και $-1,0$ στην ήπια ξηρασία. Η σταθερή γραμμή είναι επομένως η γραμμή $-4,0$ και η εξίσωση μπορεί να καθορίζεται σημειώνοντας ότι από t (διάρκεια) = 1 μήνα και $z = -12,0$ έως $t = 48$ μήνες και $\Sigma z = -70,1$, η σοβαρότητα της ξηρασίας είναι $= -4,0$. Ως εκ τούτου, η σοβαρότητα προσεγγίζεται από την εξίσωση:

- $X_i = \Sigma z_i / (0,309 * t + 2,691)$ (20)

Η κατάταξη της έντασης ξηρασίας κατά τον Palmer όπως παρατίθεται και στην παράγραφο 3.1.3, παρουσιάζεται στον πίνακα 6 που ακολουθεί.

Πίνακας 6 – Κατάταξη της έντασης ξηρασίας κατά τον Palmer

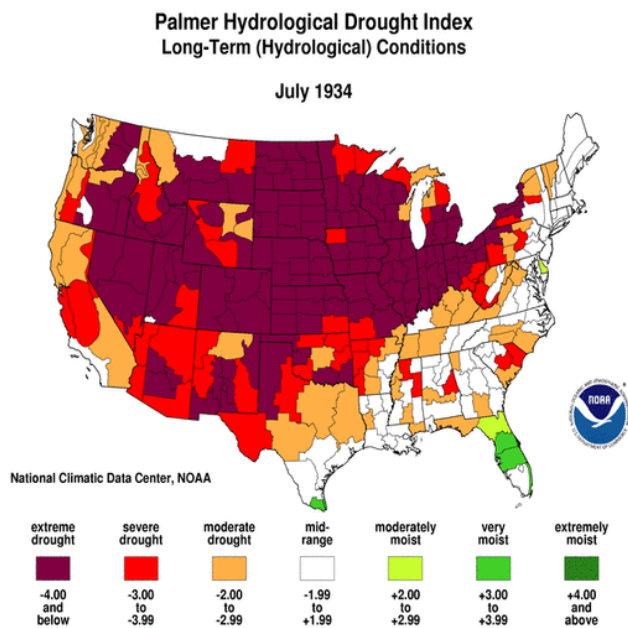
Τιμή Δείκτη	Ποιοτικός Προσδιορισμός Κατάστασης
≥ 4.0	Εξαιρετικά υγρή
3.0 – 3.99	Πολύ υγρή
2.0 – 2.99	Μέτρια υγρή
1.0 – 1.99	Ήπια υγρή
0.5 – 0.99	Ελάχιστα υγρή
0.49 - -0.49	Σχεδόν κανονική
-0,5 - -0.99	Ελάχιστα ξηρή
-1.0 - -1.99	Ήπια ξηρή
-2.0 - - 2.99	Μέτρια ξηρή



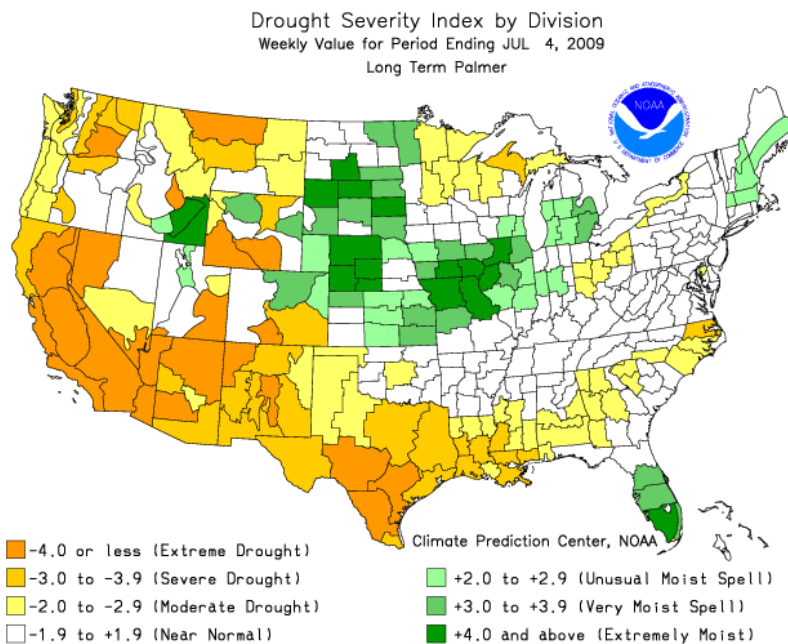
Τιμή Δείκτη	Ποιοτικός Προσδιορισμός Κατάστασης
-3.0 - -3.99	Πολύ ξηρή
<=4.0	Εξαιρετικά Ξηρή

Στις εικόνες 6-10 που παρατίθενται στην συνέχεια παρουσιάζεται επί μορφή χάρτου η εφαρμογή του δείκτη Palmer στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους καθώς και η εξέλιξη της ξηρασίας με βάση τον δείκτη Palmer κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 1900-2002 σε παγκόσμιο επίπεδο.

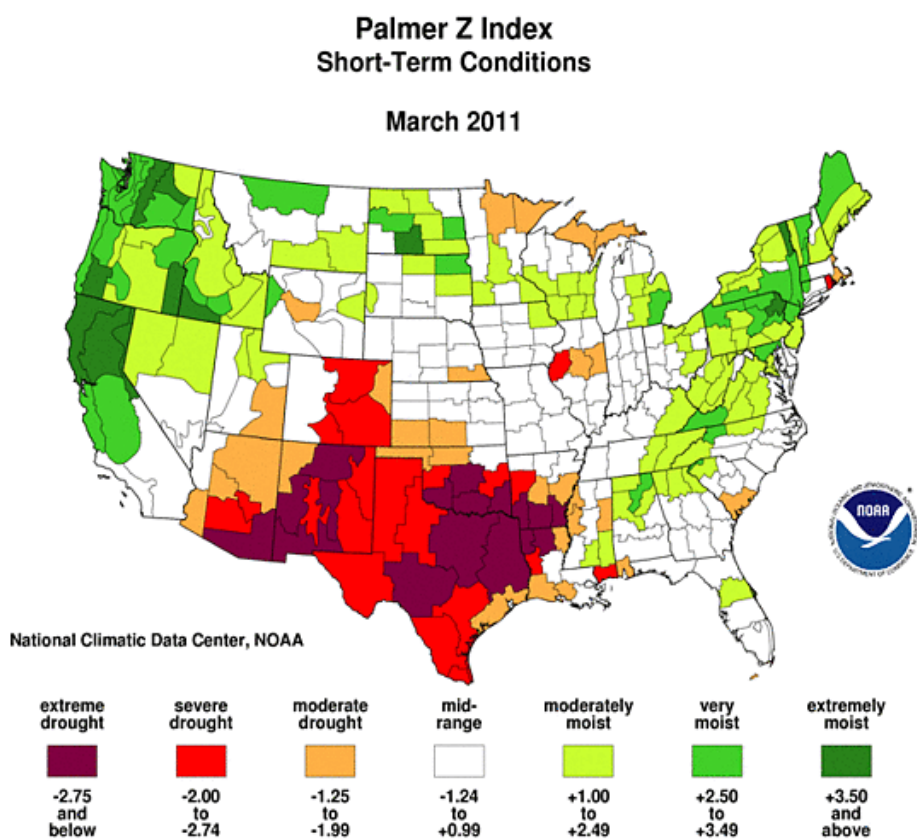
Εικόνα 6 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Ιούλιο 1934 (Πηγή: weather.about.com)



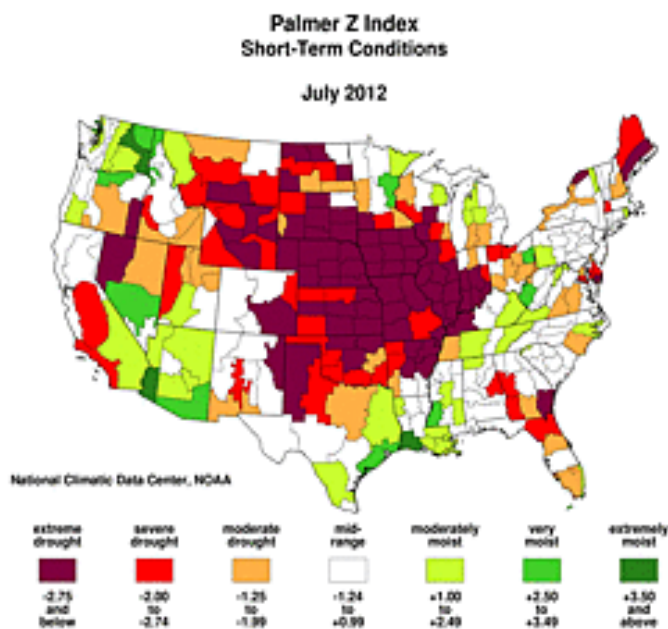
Εικόνα 7 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Ιούλιο 2009 (Πηγή: forestry.about.com)



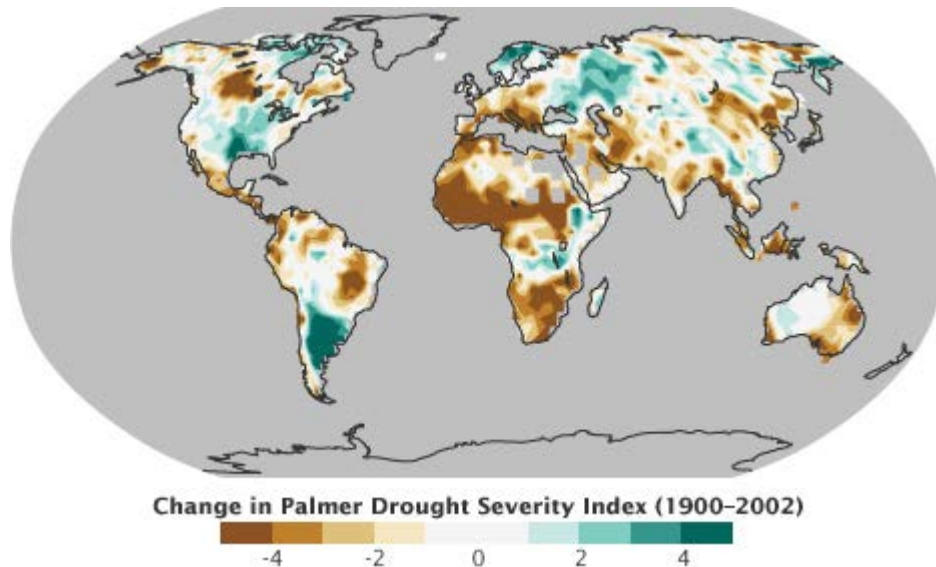
Εικόνα 8 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Μάρτιο 2011 (Πηγή: [NOAA Satellite and Information Service](#))



Εικόνα 9 Εφαρμογή του Δείκτη Ξηρασίας Palmer στις πολιτείες της Αμερικής για τον Μάρτιο 2011 (Πηγή: [NOAA Satellite and Information Service](#))



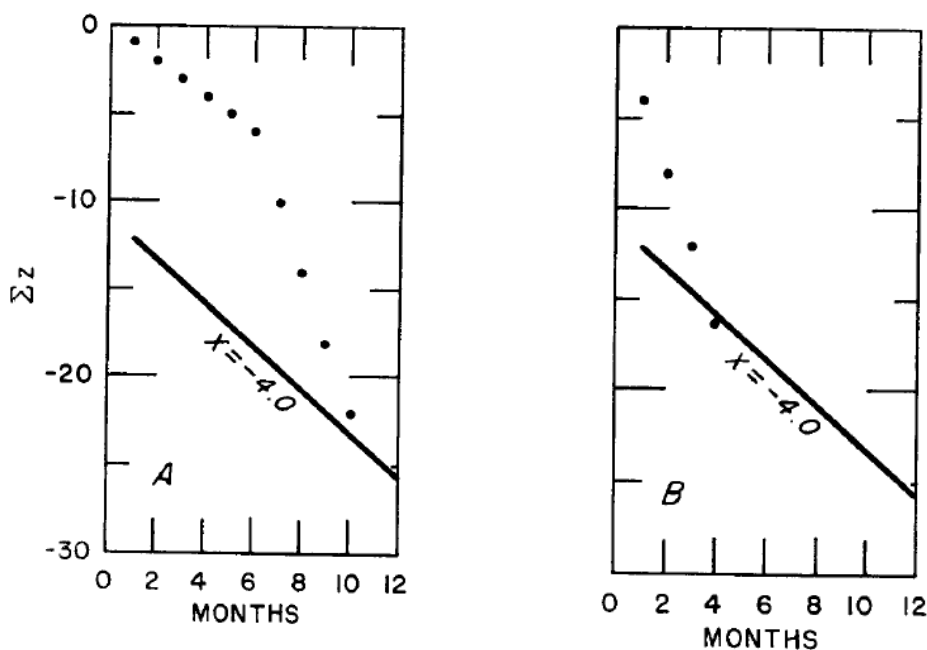
Εικόνα 10 Η Εξέλιξη της ξηρασίας με βάση τον δείκτη Palmer για τα έτη 1900 – 2002. (Πηγή: earthobservatory.nasa.org)



4.13 Καθορισμός μηνιαίων προσαυξήσεων σοβαρότητας ξηρασίας

Η εξίσωση 20 είναι μόνο μια πρώτη προσέγγιση της σχέσης που επιδιώκεται να σχηματιστεί, διότι βασίζεται σε αλγεβρικό άθροισμα του δείκτη, z , σε διάφορες χρονικές περιόδους του χρόνου. Αυτός δεν είναι ο καλύτερος τρόπος για την επίλυση του προβλήματος, διότι αυτή η σωρευτική διαδικασία προκαλεί το γεγονός ότι η επίδραση ενός μήνα – επί παραδείγματι, ένα πολύ υγρό μήνα- σε μια μακρά σειρά ξηρών μηνών, να αντανακλάται άμεσα στο Σz ακόμη και πολλά χρόνια αργότερα. Προφανώς, αυτό είναι μη ρεαλιστικό, διότι ένας μεμονωμένος υγρός μήνας κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου ξηρού καλοκαιριού δεν θα πρέπει, από το ακόλουθο καλοκαίρι, να έχει μεγάλη επιρροή στη σοβαρότητα μίας ξηρασίας που συνεχίστηκε κατά τη διάρκεια της ενδιάμεσης περιόδου.

Στην πραγματικότητα, η διαδικασία αυτή δημιουργεί μία παραπλανητική εικόνα. Το Σχήμα 11 δείχνει πόσο παραπλανητική μπορεί να είναι η σωρευτική διαδικασία. Το Σχήμα 11.A κατασκευάστηκε με την παραδοχή ότι $z = -1,0$ κάθε μήνα για 6 μήνες και στη συνέχεια $Z = -4,0$ κατά τη διάρκεια καθενός από τους ακόλουθους 4 μήνες.



Σχήμα 11 Παρουσίαση της σωρευτικής διαδικασίας (Πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. page 20)

Σχήμα 11. A – Έξι ξηροί μήνες **Σχήμα 11. B** – Τέσσερις πολύ ξηροί ακολουθούμενοι από 4 πολύ ξηρούς μήνες.
 μήνες.

Οι συνολικές συσσωρευμένες τιμές είναι ως εκ τούτου για το πρώτο διάγραμμα, -22,0 για χρονικό διάστημα 10 μηνών. Σημειώνεται ότι τον 10^ο μήνα η γραμμή δεν φθάνει μέχρι την ακραία ξηρασία. Τώρα υποτίθεται ότι οι πρώτοι 6 μήνες ήταν καθένας τους πολύ υγρός, και ότι οι υπόλοιποι 4 μήνες έκαστος είχαν $Z = -4,0$ όπως πριν. Στην περίπτωση αυτή η ξηρή περίοδος αρχίζει με τον πρώτο μήνα όπου η τιμή $Z = -4,0$. Αυτοί οι 4 ξηροί μήνες σχηματίζουν την καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 11. B. Σημειώνεται ότι η τιμή για τον τελευταίο μήνα τώρα πέφτει κάτω από την ακραία γραμμή ξηρασίας. Ως εκ τούτου, αντιμετωπίζεται ένα αποτέλεσμα που δείχνει ότι οι τέσσερις πολύ ξηροί μήνες οι οποίοι ακολουθούνται από έξι υγρούς μήνες παράγουν περισσότερο σοβαρή ξηρασία απ'ότι παράγεται από τους ίδιους τέσσερις πολύ ξηρούς μήνες οι οποίοι ακολουθούνται από έξι μήνες σχετικά ξηρού καιρού. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι η σωρευτική διαδικασία είναι παραπλανητική και



δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος, λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Το πρόβλημα πρέπει, επομένως, να αναχθεί σε μία βάση αύξησης κατά τρόπο ώστε κάθε διαδοχικός μήνας να αξιολογείται από την άποψη της συμβολής του στην σοβαρότητα της ξηρασίας. Στην πραγματικότητα, αυτό θα εξαλείψει την άμεση εξέταση του παράγοντα του χρόνου (duration factor) και θα φέρει τη διάρκεια έμμεσα ως αποτέλεσμα της συσσώρευσης διαδοχικών μηνιαίων εισφορών με τη σοβαρότητα της ξηρασίας. Προκειμένου να αξιολογηθεί η συμβολή του κάθε μήνα, μπορεί να τεθεί $i = 1$ και $t = 1$ στην εξίσωση (20). Έτσι προκύπτει:

- $X_1 = z_1/3$ (21),

από τη στιγμή που πρόκειται για αρχικό μήνα. Ωστόσο, σε διαδοχικούς μήνες, ένα ορισμένο ποσό μη ομαλής ξηρασίας ($z < 0$) θα πρέπει απλώς να διατηρεί τη σοβαρότητα της υφιστάμενης ξηρασίας. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει κατανοητό ενστικτωδώς ότι μία ακραία ξηρασία δεν θα συνεχίσει να είναι ακραία, αν επόμενοι μήνες είναι κανονικοί ή μόνο πολύ λίγο ξηρότεροι από το κανονικό. Το ερώτημα είναι, πόση «ξηρότητα» είναι αναγκαία για τη διατήρηση μίας ξηρασίας δεδομένης σοβαρότητας, δηλαδή, για $\Delta X = 0$. Από την εξίσωση (20) ή από το σχήμα 5, είναι προφανές ότι η τιμή Sz πρέπει να αυξηθεί επειδή το t αυξάνεται προκειμένου να διατηρηθεί μια δεδομένη τιμή του X . Το ποσοστό της αύξησης του χρονικού διαστήματος t είναι σταθερό, δηλαδή, το t αυξάνεται κατά 1 κάθε μήνα, αυξάνοντας έτσι τον παρονομαστή με βήμα των 0,309. Ως εκ τούτου, το ποσοστό στο οποίο ο δείκτης, z , πρέπει να αυξηθεί προκειμένου να διατηρηθεί μια σταθερή τιμή του X ($\Delta X = 0$), εξαρτάται από την τιμή του X που πρέπει να διατηρηθεί. Αυτό το σκεπτικό δείχνει ότι για όλους τους μήνες, ύστερα από τον αρχικό ξηρό μήνα ένας πρόσθετος όρος πρέπει να προστεθεί στην εξίσωση (22). Έτσι η εξίσωση γίνεται της μορφής:

- $\Delta X_i = (z_i/3) + c * X_{i-1}$, (23), όπου $\Delta X_i = X_i - X_{i-1}$

Το πρόβλημα τώρα έγκειται στον προσδιορισμό του παράγοντα c . Επιστρέφοντας στην εξίσωση 20, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του παράγοντα Z_i η οποία θα διατηρήσει μια δεδομένη τιμή του X από μήνα σε μήνα. Ο Palmer υπολόγισε τις τιμές του z στον i -μήνα για δύο αυθαίρετες τιμές της $X_{i-1} = X_i$ και δύο αυθαίρετες



τιμές του t . Τοποθετώντας τις τιμές της Z_i , X_{i-1} και ΔX στην εξίσωση (23), προκύπτει ότι:

- $\Delta X = 0 = (-0,309/3) - 1,0 * c$
- και $\Delta X = 0 = (-0,927/3) - 3,0 * c$

Ο παράγοντας c λοιπόν είναι $-0,103$ και η τελική εξίσωση είναι της μορφής:

- $\Delta X_i = (z_i/3) - 0,103 * X_{i-1}$ (24)

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η μηνιαία συνεισφορά στη σοβαρότητα της ξηρασίας. Φυσικά, το άθροισμα των αυξήσεων είναι που δίνει την ίδια τη σοβαρότητα, δηλαδή,

- $X_i = X_{i-1} + (z_i/3) - 0,103 * X_{i-1}$ (25)

4.14 Επαναξιολόγηση του συντελεστή στάθμισης K - Ευρήματα ανεπάρκειας της τιμής του K

Η πρώτη μέθοδος που παρουσίασε ο Palmer ολοκληρώθηκε με τη χρήση του συντελεστή στάθμισης K όπως είχε προσδιοριστεί παραπάνω. Τα αποτελέσματα που εφαρμόστηκαν στις περιοχές του δυτικού Κάνσας και της κεντρικής Αϊόβα, φάνηκαν εύλογα και ρεαλιστικά. Ωστόσο, όταν ολόκληρη η μέθοδος εφαρμόστηκε και σε άλλες περιοχές με αρκετά διαφορετικούς τύπους κλίματος, ορισμένα από τα αποτελέσματα ήταν ιδιόμορφα και μη ρεαλιστικά. Για παράδειγμα, στο Κάνσας και στην Αϊόβα οι πιο ακραίες περίοδοι ξηρασίας παρήγαγαν μέγιστες τιμές του δείκτη ξηρασίας περίπου $-5,0$ έως $-6,0$. Αυτό φαινόταν λογικό καθώς το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να δείξει ακραία ξηρασία, όταν ο δείκτης υπερβαίνει το $-4,0$. Ωστόσο, μία ανάλυση για τη νότια κλιματολογική διαίρεση του Τέξας παρήγαγε τιμές του δείκτη που κυμαίνονταν ως $-10,23$. Οι τιμές αυτές ήταν προφανώς μακριά από την αναμενόμενη μέγιστη τιμή η οποία κυμαινόταν γύρω στο $-6,0$. Κατά την αξιολόγηση της μεθόδου διαπιστώθηκε ότι ορισμένοι από τους μηνιαίους συντελεστές βαρύτητας διόγκωναν τις αποκλίσεις, με ένα μη ρεαλιστικό τρόπο. Η άλλη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έδειξε ιδιαίτερα περίεργα αποτελέσματα για το δυτικό Τένεσι από τον M. H. Bailey, κρατικό κλιματολόγο του Τενεσί. Η σπουδαιότερη από τις πλημμύρες στην ιστορία της περιοχής (Ιανουάριος 1937) παρήγαγε έναν δείκτη, X , μόνο ελαφρώς μεγαλύτερο από το μηδέν. Και πάλι ο λόγος για αυτό το μη αναμενόμενο αποτέλεσμα ήταν οι εσφαλμένες τιμές του k .



Συγκεκριμένα, οι τιμές του K ήταν τόσο μικρές που ακόμα και τεράστιες αποκλίσεις υγρασίας ήταν αρκετά ασήμαντες όταν πολλαπλασιάζονταν με το συντελεστή στάθμισης, k . Το σύστημα υπολογισμού λοιπόν θα πρέπει να μετρά τις ασυνήθιστα υγρές περιόδους καθώς και τις ασυνήθιστα ξηρές περιόδους. Προφανώς, ο δείκτης, X , θα πρέπει να λάβει μία μεγάλη θετική προσαύξηση κατά τη διάρκεια αυτού του εξαιρετικά υγρού μήνα που προαναφέρεται. Από την εξίσωση (22) διαφαίνεται ότι αυτό θα συμβεί μόνο εάν το K για τον συγκεκριμένο μήνα (βλ. εξίσωση 19), είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες.

4.15 Διαδικασία για την εκτίμηση των μέσων τιμών του K

Αρχικά ως η απλούστερη διαδικασία για την επαναξιολόγηση του συντελεστή στάθμισης K ήταν να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (20) για να καθορίσει τι Σz πρέπει να υφίσταται για ακραία ξηρασία κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 12 μηνών.

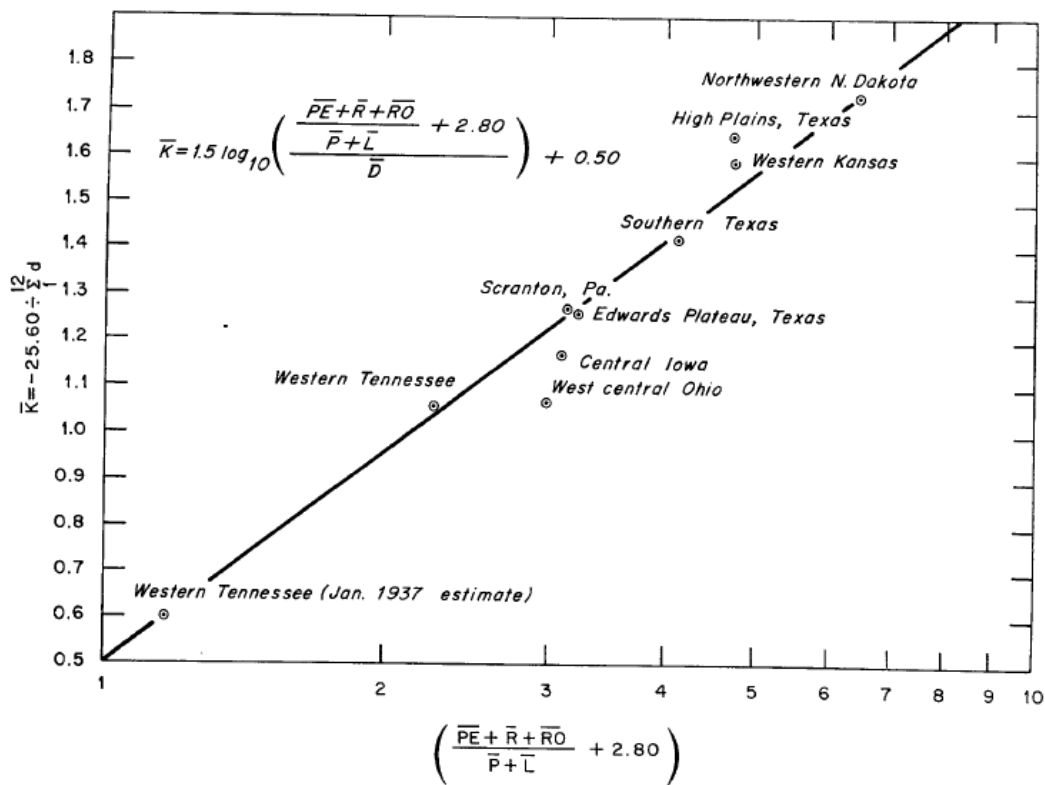
Αποδείχθηκε ότι για $x = -4,0$ και $t = 12$ μήνες, το άθροισμα των σταθμισμένων αποκλίσεων πρέπει να είναι $-25,60$. Αν πάλι υποθεθεί ότι η ξηρότερη περίοδος 12 μηνών αντιπροσωπεύει ακραία ξηρασία σε οποιαδήποτε περιοχή, μπορεί να εξαχθεί ένας νέος σταθμισμένος μέσος παράγοντας 12-μηνών, K , διαιρώντας το $-25,60$ από το 12-μηνών άθροισμα του d για τις ξηρότερες περιόδους που είναι καταγεγραμμένες. Στο παράδειγμα του Palmer σημειώνεται ότι η ξηρότερη περίοδος 12 μηνών στο δυτικό Κάνσας ξεκίνησε με το Μάιο του 1934 και συνεχίστηκε μέχρι τον Απρίλιο του 1935. Το άθροισμα των τιμών d για την περίοδο αυτή ήταν $-16,62$. Μια περίοδος σχεδόν τόσο ξηρή άρχισε με τον ξηρό Μάρτιο του 1956 και συνεχίστηκε έως το Φεβρουάριο του 1957. Αυτό το άθροισμα των d των 12 μηνών ήταν $-15,60$. Υπολογίζοντας τον μέσο όρο αυτών των δύο τιμών, για να εξαιρεθεί η μικρή μεταβλητότητα της δειγματοληψίας, υπολογίζεται η μέση τιμή του αθροίσματος των 12 μηνών, η οποία είναι ίση με $d = -16,11$. Διαιρώντας την τιμή των $-25,60$ (Η τιμή του Σz για 12 μήνες ακραίας ξηρασίας) με την τιμή $-16,11$ που μόλις υπολογίστηκε παράγεται το αποτέλεσμα των 1,59. Αυτό λοιπόν είναι το K για το δυτικό Κάνσας. Πρόκειται για έναν μέσο σταθμισμένο παράγοντα, ο οποίος αποτελεί μέσο όρο των 12 μηνιαίων συντελεστών. Αντίστοιχα, στην κεντρική Αϊόβα οι ξηρότερες περίοδοι 12 μηνών ήταν από τον Ιούνιο του 1933 μέχρι το Μάιο του 1934 και τον Αύγουστο του 1955 έως τον Ιούλιο 1956, με τιμή του d για το διάστημα



των 12 αυτών μηνών να είναι -23,02 και -20,56 αντίστοιχα. Η μέση τιμή των δύο τιμών είναι -21,79. Όταν διαιρεθεί το -25,60 από το -21,79 το αποτέλεσμα είναι 1,17 το οποίο αντιστοιχεί στο K της κεντρικής Αϊόβα. Η ίδια ακριβώς διαδικασία πραγματοποιήθηκε με αναλύσεις δεδομένων από εννέα διαφορετικούς τομείς για τους οποίους υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Οι περιοχές αυτές ήταν τα κλιματολογικά τμήματα της βορειοδυτικής- βόρειας Ντακότας, του δυτικού Κάνσας, της κεντρικής Αϊόβα, του Τέξας, το οροπέδιο Edwards του Τέξας, το νότιο Τέξας, το δυτικό Τένεσι, το δυτικό-κεντρικό Οχάιο, και μια σημειακή ανάλυση για το Scranton, PA. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για το K κυμαίνονταν από 1,06 στο δυτικό Τενεσί έως 1,73 στη βορειοδυτική Βόρεια Ντακότα.

4.16 Ο συντελεστής στάθμισης K ως συνάρτηση άλλων πτυχών του κλίματος

Από την αξιολόγηση των αποτυχιών των αρχικών τιμών του k ήταν προφανές ότι το K θα πρέπει να εξαρτηθεί από τη μέση προσφορά νερού, $P + L$, όπως είχε αρχικά χρησιμοποιηθεί. Ήταν επίσης προφανές ότι η μέση απορροή, RO , θα πρέπει να θεωρείται ως μέρος της "ζήτησης" υγρασίας πέραν του μέσου όρου της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, PE , και του μέσου όρου επαναφόρτισης, R . Επίσης, ήταν προφανές ότι το K διαφέρει αντιστρόφως με το D , τον μέσο όρο των απόλυτων τιμών του d . Μετά από κάποια πειράματα με διάφορες εμπειρικές σχέσεις, εξελίχθηκε το ημι-λογαριθμικό διάγραμμα το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια (διάγραμμα 12). Χωρίς αμφιβολία, θα είχε επιτευχθεί μεγαλύτερη διασπορά αν είχαν χρησιμοποιηθεί περισσότεροι σταθμοί από περισσότερες περιοχές.



Διάγραμμα 12 - Μέσος ετήσιος παράγοντας στάθμισης σε συνάρτηση της ζήτησης υγρασίας, μέσης προσφοράς υγρασίας, και της μέσης απόλυτης απόκλισης υγρασίας (πηγή: Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. page 30)

Αυτή η σχέση μπορεί να είναι τυχαία, αλλά φαίνεται λογική. Το πρόβλημα είναι επίσης περίπλοκο λόγω της μεταβλητότητας της δειγματοληψίας. Οι τιμές K στο διάγραμμα 12 βασίστηκαν στην ξηρότερη περίοδο 12-μηνών σε αυτά τα διάφορα σημεία και η τετμημένη του διαγράμματος αποτελείται από μέσες τιμές για όλη τη διάρκεια του υπό ανάλυση δείγματος των 30 ετών από το 1931-1960 στις περισσότερες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή PE είναι η μέση ετήσια τιμή της εξατμισοδιαπνοής, η οποία διαιρείται δια του 12. Ομοίως και οι άλλες μέσες τιμές έχουν υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο.

4.17 Μηνιαίοι Παράγοντες Στάθμισης

Το επόμενο βήμα ήταν να εφαρμοστεί αυτή η εμπειρική σχέση σε κάθε έναν από τους 12 ημερολογιακούς μήνες, σε καθένα από τα διάφορα μέρη και συνεπώς, να δημιουργηθούν οι 12 τιμές K για κάθε θέση. Σημειώνεται, ότι από εδώ και στο εξής, ο παράγοντας D είναι ο μηνιαίος μέσος των απολύτων τιμών του d, και οι τιμές K



είναι ο σταθμισμένος παράγοντας για κάθε μήνα από την εξίσωση που αναπτύχθηκε από το διάγραμμα 12.

$$K'_i = 1.5 \log_{10} \left[\left(\frac{\overline{PE} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2.8 \right) \overline{D}^{-1} \right] + 0.5 \quad (26)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μέσες τιμές που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη αυτής της εξίσωσης είναι μέσες ετήσιες τιμές διαιρεμένες δια του 12. Κατά την εφαρμογή της εξίσωσης (26), για τον υπολογισμό των μηνιαίων συντελεστών στάθμισης, οι μέσες τιμές που χρησιμοποιούνται είναι οι μέσοι για κάθε έναν από τους 12 ημερολογιακούς μήνες.

4.18 Τελική αναπροσαρμογή των μηνιαίων τιμών K

Αν η εξίσωση (26) παράγει λογικές, "σωστές" τιμές για χρήση στην εξίσωση (19), τότε το μέσο ετήσιο άθροισμα των μέσων σταθμισμένων αποκλίσεων πρέπει να είναι περίπου το ίδιο για όλες τις θέσεις που αναλύονται. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου του ο Palmer κατέγραψε αυτούς τους σταθμισμένους μέσους όρους αποκλίσεων, DK' για κάθε μήνα και το άθροισμα τους για τους 12 μήνες. Τα ποσά αυτά συμφωνούν αρκετά καλά, αλλά όχι ικανοποιητικά καλά. Η διαφωνία δείχνει ότι οι αποκλίσεις έχουν λάβει περισσότερο βάρος σε ορισμένα μέρη παρά σε άλλα. Για παράδειγμα, οι παράγοντες στάθμισης στο Τενεσί πρέπει να είναι πολύ μεγάλοι, ενώ στη Βόρεια Ντακότα οι παράγοντες στάθμισης πρέπει να είναι πάρα πολύ μικροί. Αυτή η διαφορά αποδεικνύεται από τη χρήση των τιμών του K για να υπολογιστεί η σοβαρότητα της ξηρασίας (με χρήση της εξίσωσης (19) και (25)) για μερικές από τις πιο ξηρές περιόδους που έχουν καταγραφεί σε καθένα από αυτά τα μέρη. Επί παραδείγματι, οι τιμές του δείκτη ξηρασίας που υπολογίζονται με βάση την K', έδειξαν ότι η ξηρασία στο δυτικό Τενεσί γίνεται πιο ακραία από ό, τι στη βορειοδυτική - βόρεια Ντακότα ή στο δυτικό Κάνσας. Αυτό το αποτέλεσμα δεν έδειχνε λογικό, έτσι προτάθηκε οι παράγοντες στάθμισης να λάβουν περαιτέρω ρυθμίσεις.

Τα ετήσια ποσά της DK' για τις περιοχές μελέτης κυμαίνονταν από 12,46 έως 20,97. Η μέση τιμή για τους εννέα αυτούς τομείς είναι 17,67. Αν όλοι οι παράγοντες στάθμισης προσαρμόζονται έτσι ώστε όλα τα ετήσια ποσά της DK να είναι 17,67, τα



αποτελέσματα της ανάλυσης ξηρασίας θα προκύψει να είναι πιο συγκρίσιμα. Οι τιμές K λοιπόν υπολογίζονται με βάση την εξίσωση:

$$K_i = \left(\frac{17.6}{\sum_{i=1}^{12} \bar{D}_i K_i'} \right) K_i' \quad (27)$$

Η εξίσωση 27 ολοκληρώνει την παραγωγή των συντελεστών στάθμισης. Προφανώς προσδίδουν μία εύλογη συγκρισιμότητα μεταξύ των περιοχών, αλλά δεν φαίνεται να υπάρχει τρόπος να σιγουρευτεί ότι έχει καθιερωθεί περισσότερο από καλή συγκρισιμότητα μεταξύ των μηνών. Θα ήταν προτιμότερο η σταθερά, 17,67 να βασιστεί σε αναλύσεις από πολλά άλλα μέρη, ωστόσο οι εννέα τομείς αντιπροσωπεύουν πολλά διαφορετικά κλίματα και η τιμή 17,67 φαίνεται να λειτουργεί αρκετά καλά.

4.19 Τυπική απόκλιση του d ως συντελεστή στάθμισης.

Εύλογα τίθεται θέμα, γιατί η τυπική απόκλιση του d δεν χρησιμοποιείται ως παράγοντας στάθμισης, επιτρέποντας τη μελέτη μιας τυποποιημένης μεταβλητής. Έγινε προσπάθεια πάνω σε αυτήν την πρόταση, αλλά τα αποτελέσματα δεν ήταν ρεαλιστικά, εν μέρει επειδή ορισμένες από τις διανομές του d ήταν μάλλον ασύμμετρες. Άλλος πιθανός παράγοντας είναι ότι η τοπική σημασία μίας δεδομένης απόκλισης υγρασίας δεν εξαρτάται μόνο από τη θέση της στη διανομή των αποκλίσεων. Για παράδειγμα, η τυπική απόκλιση του d μπορεί να έχει ίδια τιμή στον Οκτώβρη σε μία περιοχή και στον Ιούλιο σε μία άλλη. Είναι προφανές ότι κατά τον υπολογισμό της συγκεκριμένης έλλειψης υγρασίας, κατά πάσα πιθανότητα θα προκύψει ότι δεν θα ήταν εξίσου σημαντική και στις δύο θέσεις.

4.20 Ένα παράδειγμα των υπολογισμών της σοβαρότητας ξηρασίας

Όταν μετά από διαδοχικά υγρές περιόδους παρατηρείται ένας ξηρός μήνας, ο δείκτης ξηρασίας για τον προηγούμενο μήνα είναι, φυσικά, μηδέν. Έχει προηγουμένως καθοριστεί η έναρξη της ήπιας ξηρασίας, όταν ο Δείκτης Σοβαρότητας φτάνει το -1,0. Για την καλύτερη εφαρμογή της μεθόδου μπορούμε να ονομάσουμε "αρχόμενη" ξηρασία, μια κατάσταση, η οποία καθορίζεται αυθαίρετα από μία τιμή του δείκτη σοβαρότητας μεταξύ - 0,50 και -1,0. Μέχρι ο δείκτης



σοβαρότητας φτάσει το -1,0, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι (εξ ορισμού) η ξηρασία έχει αρχίσει. Αυτό παρέχει μία πολύ βολική μέθοδο για τον μεθοδικό καθορισμό της αρχής των περιόδων ξηρασίας. Επιπλέον, παρέχει μια βάση για την προετοιμασία καταστάσεων, εκφράζοντας την πιθανότητα ότι η ξηρασία έχει αρχίσει. Η τάση για επιμονή στην παρουσίαση καταστάσεων ξηρασίας κάνει τέτοιες δηλώσεις πιθανότητα να έχουν μεγάλη σημασία από πρακτική σκοπιά. Είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η σοβαρότητα της μετεωρολογικής ξηρασίας από τις παρατηρήσεις σχετικά με τις γεωργικές συνθήκες, επειδή τυχαίες βροχές, μερικές φορές, παράγουν πολύ ικανοποιητικές αποδόσεις σε ορισμένες καλλιέργειες κατά τη διάρκεια της σεζόν που ήταν, στο σύνολό τους, πολύ ξηρότερη από το κανονικό. Επίσης φαίνεται να υπάρχει μια τάση για υπερβολή στην κατάσταση των καλλιεργητικών εκθέσεων-αναφορών για τις καλλιέργειες. Μια εβδομάδα ζεστού και ξηρού καιρού φαίνεται να οδηγεί σε αναφορές ότι οι καλλιέργειες είναι σχεδόν καταστραμμένες, ενώ μία βροχή λιγότερο από 25 mm την ακόλουθη εβδομάδα μπορεί να οδηγήσει σε προβλέψεις για συγκομιδή. Αυτός ήταν ένας από τους λόγους που ήταν απαραίτητο να ξεκινήσει η εξέλιξη της ανάλυσης ξηρασίας με επιλεγμένες περιπτώσεις κατά τις οποίες ήταν τόσο ξηρές ώστε να μην υπάρχει παραμικρή αμφιβολία ως προς το γεγονός ότι η ξηρασία ήταν πολύ σοβαρή από όλες τις απόψεις, τόσο γεωργικές όσο και υδρολογικές.

4.21 Εφαρμογή των τύπων ξηρασίας σε υγρές περιόδους

Φαίνεται λογικό να υποτεθεί ότι μη φυσιολογικές ελλείψεις υγρασίας που θα μπορούσε να δημιουργήσουν, για παράδειγμα, μία μέτρια ξηρασία, θα μπορούσε να δημιουργήσουν και μια μέτρια υγρή περίοδο που θα είχε μάλλον θετικές, παρά αρνητικές αποκλίσεις υγρασίας. Με άλλα λόγια, μπορούν οι εξισώσεις της ξηρασίας να εφαρμοστούν σε υγρές περιόδους απλώς αλλάζοντας τα πρόσημα όπου είναι απαραίτητο. Για παράδειγμα, η εξίσωση (15) παρουσιάζει τόσο θετικές αποκλίσεις όσο και αρνητικές. Επίσης, από την εξίσωση (19) η μηνιαία ανωμαλία υγρασίας Z, μπορεί να είναι τόσο θετική όσο και αρνητική. Ομοίως, η εξίσωση (25) θα δώσει θετικές τιμές, όταν ο μηνιαίος δείκτης είναι θετικός. Στο μέτρο που οι εξισώσεις θα παρέχουν ένα μέτρο της υγρασίας οι ακόλουθες κατηγορίες περισσότερο ή λιγότερο έχουν συσταθεί αυθαίρετα. Αρχικά ο στόχος της παρούσας μελέτης ήταν



να ασχοληθεί μόνο με ασυνήθιστες περιόδους ξηρασίας, αλλά αυτό αποδείχθηκε ότι δεν είναι απολύτως εφικτό. Είναι δύσκολο να καθοριστούν οι αρχές και τις τέλη των ξηρών περιόδων, εκτός εάν κάποιος αναγνωρίζει και λαμβάνει υπόψη τις υγρές περιόδους. Για παράδειγμα, ένα σχετικά ξηρός μήνας, θα εμφανίζεται ως ξεχωριστή περίοδο ξηρασίας, εκτός αν αναγνωρίζεται ότι αυτός ο μήνας αποτελούσε μόνο μια μικρή και μάλλον ευεργετική διακοπή σε μια αρκετά μακρά περίοδο ασυνήθιστα υγρών καιρικών συνθήκες.

4.22 Τέλος της ξηρασίας ή/και της υγρής περιόδου

Σε γενικές γραμμές, η αρχή της ξηρασίας ακολουθεί στενά την εμφάνιση μιας εκτεταμένης περιόδου ασυνήθιστα ξηρού καιρού. Επομένως, κατά συνέπεια, το τέλος της μετεωρολογικής ξηρασίας θα πρέπει να συμπίπτει με κάποιες μάλλον σημαντικές και αρκετά απότομες αναπροσαρμογές του μοτίβου κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας το οποίο αρχίζει να παράγει καιρό ο οποίος είναι φυσιολογικός ή βροχερός και συνεχίζει έτσι για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Αυτή η επιστροφή στον κανονικό καιρό τερματίζει τη μετεωρολογική ξηρασία, αλλά δεν τελειώνει συνήθως τα αποτελέσματα της ξηρασίας. Τα αποτελέσματα μπορούν να διαρκέσουν για εβδομάδες ή μήνες ή και χρόνια ανάλογα με το ποιες επιπτώσεις λαμβάνονται υπόψη. Αυτές οι συνεχιζόμενες συνέπειες αποτελούν ένα ξεχωριστό πρόβλημα, το οποίο είναι εκτός από το πεδίο εφαρμογής της παρούσας μελέτης.

4.23 Αλλαγές στον δείκτη δριμύτητας ξηρασίας

Εάν η ξηρασία συνεχίζεται και ο καιρός γίνεται συνεχώς κανονικός ή υγρός, ο δείκτης δριμύτητας από την εξίσωση (25) τελικά θα φτάσει το μηδέν. Ωστόσο, δεν φαίνεται λογικό να απαιτείται ο δείκτης να πέσει στο μηδέν πριν να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ξηρασία έχει σίγουρα λήξει. Από την εξέταση ενός αριθμού περιπτώσεων αυτό φαίνεται να είναι μία πολύ αυστηρή απαίτηση. Για παράδειγμα, ξηρασία που μόλις εγκαθιδρύθηκε, όπου για παράδειγμα, $X = -1,10$, από την εξίσωση (25), θα απαιτούσε $Z = 2,97$, προκειμένου να μειωθεί ο δείκτης στο μηδέν σε ένα μόνο μήνα. Αυτό φαίνεται σαν μια υπερβολική απαίτηση, αλλά είναι απλά ο υπολογισμός του αριθμού των μηνών των ακριβώς κανονικών συνθηκών ($Z = 0$) που απαιτούνται για να φέρουν τον δείκτη ξηρασίας στο μηδέν. Αυτό μπορεί επίσης να



γίνει από την εξίσωση (25). Διαπιστώνεται ότι το X μειώνεται από $-1,10$ στο $-0,99$ σε 1 μήνα, σε $-0,52$, σε 7 μήνες, και πλησιάζει το μηδέν σε περίπου 3 χρόνια. Προφανώς, η εξέταση του γεγονότος ότι η ξηρασία παύει να υφίσταται, πραγματοποιείται πολύ πριν από το τέλος του 1 έτους, πόσο μάλλον 3 χρόνια μετά. Από την άλλη, εάν η ξηρασία τελειώνει μόλις ο δείκτης είναι μικρότερος του $-1,0$, ο φυσιολογικός καιρός, θα τελείωνε την ξηρασία του $-1,10$ σε ένα μήνα. Αυτή η υπόθεση είναι επίσης ακραία, γιατί σίγουρα δεν θα μπορούσε, η ξηρασία να είχε λήξει απλώς και μόνο επειδή ένας μήνας ήταν φυσιολογικός. Από τις παραπάνω εικασίες φαίνεται λογικό να υποτεθεί ότι η ξηρασία τελειώνει όταν ο Δείκτης Δριμύτητας φτάνει σε κάποιες τιμές μεταξύ 0 και $-1,0$. Για να παρουσιάζει συνέπεια και την ίδια στιγμή να μην υπάρχει κίνδυνος να «σπάσει» μία παρατεταμένη περίοδος ξηρασίας σε μια σειρά σύντομων αλλά ξεχωριστών περιόδων ξηρασίας, το κατώτατο όριο της αρχόμενης ξηρασίας, $-0,50$, επιλέχθηκε ως η αξία του δείκτη η οποία θα θεωρείται ότι σίγουρα έχει τελειώσει μία ξηρασία. Με άλλα λόγια, μόλις η σοβαρότητα του δείκτη φτάσει την κατηγορία "σχεδόν κανονικό", η οποία βρίσκεται μεταξύ $0,50$ και $-0,50$, δεν υπάρχει πλέον ξηρασία.

4.24 Καθορισμός του τέλους μίας ξηρασίας

Στην προηγούμενη ενότητα θεωρήθηκε ότι ξηρασία μπορεί να θεωρείται οριστικά ότι έχει τερματιστεί μόλις ο δείκτης ξηρασίας φτάσει στη "σχεδόν κανονική (near normal)" κατηγορία. Το ερώτημα, λοιπόν, είναι, πόση υγρασία θα πρέπει να μειώσει τη σοβαρότητα μιας συγκεκριμένης ξηρασίας σε $-0,50$. Αυτό μπορεί να λυθεί με την αντικατάσταση των κατάλληλων τιμών στην εξίσωση (25).

Έστω $X_i = -0,50$, τότε:

- $-0,50 = X_{i-1} + (z/3) - 0,103 * X_{i-1}$

και

- $Z = -2,691X_{i-1} - 1,50.$

Επομένως, η τιμή Z που θα τερματίσει μία ξηρασία σε έναν και μόνο μήνα είναι:

- $Z_e = -2,691X_{i-1} - 1,50. (28)$



Θεωρώντας ότι η ξηρασία έχει σίγουρα λήξει όταν $X = -0,50$, θεωρείται επίσης ότι υπάρχει κάποια αλγεβρικά μικρότερη τιμή του Z που θα μπορούσε να συμβαίνει από μήνα σε μήνα και τελικά να παράγει μία τιμή $X = -0,50$ για κάθε μήνα. Όταν $\Delta X = 0$ και $X_{i-1} = -0,50$, προκύπτει από την εξίσωση (24) ότι $Z = -0,15$. Αυτό δείχνει ότι μια περίοδος ξηρασίας μπορεί να λήξει ακόμη και αν ο καιρός είναι σταθερά ελαφρώς ξηρότερος από το κανονικό. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε τιμή $Z \geq -0,15$ θα τείνει να τερματίσει μια ξηρασία, και η "αποτελεσματική υγρασία» είναι:

- $U_w = Z + 0,15$ (29)

Μετά από την σίγουρη έναρξη μίας ξηρασίας ($X \leq -1,00$), η εξίσωση (29) ισχύει για τον πρώτο "υγρό" μήνα, δηλαδή, τον πρώτο μήνα που έχει $Z \geq -0,15$. Το U θα πρέπει στη συνέχεια να υπολογίζεται για κάθε διαδοχικό μήνα έως ότου οι υπολογισμοί δείχνουν είτε 0 τοις εκατό ή 100 τοις εκατό πιθανότητα ότι η ξηρασία έχει λήξει. Εάν το ποσό της υγρασίας που απαιτείται για τον τερματισμό μιας ξηρασίας στον πρώτο υγρό μήνα (Z_e από την εξίσωση (28)) είναι μεγαλύτερη από την πραγματική υγρασία (U_w από την εξίσωση (29)) για το μήνα αυτό, η σοβαρότητα ξηρασίας θα μειωθεί, αλλά η ξηρασία δεν θα έχει σίγουρα λήξει. Ωστόσο, δεδομένου ότι η δριμύτητα ξηρασίας θα έχει μειωθεί από τον πρώτο υγρό μήνα, δεν θα απαιτηθεί μεγαλύτερη υγρασία στο τέλος του δεύτερου μήνα, δηλαδή, το Z_e θα είναι μικρότερο τον επόμενο μήνα και το συνολικό ποσό της υγρασίας που απαιτείται για τον τερματισμό της ξηρασίας θα είναι η νέα τιμή Z_e υπολογισμένη για τον i -μηνα, συν την προηγούμενως συσσωρευμένη υγρασία, δηλαδή,

- $Z_e + \sum U_{i-j} - U_i$

Όπου, $U = U_w$, i αναφέρεται στον i -οστό μήνα, δηλαδή, το μήνα που εξετάζεται, j δείχνει τον αριθμό των μηνών της υστέρησης, π.χ., U_{i-j} σε $j = 1$ αναφέρεται στην τιμή των U_w κατά τον προηγούμενο μήνα, και $j = j^*$, το ανώτατο όριο της άθροισης, δείχνει ότι U_w είναι συνοψισμένο πίσω στο χρόνο και συμπεριλαμβανομένης της τιμής στο j^* μήνα, όπου ο μήνας j^* είναι ο πρώτος μήνας της τρέχουσας υγρής περιόδου. Αν $\sum U_w < 0$, $\sum U = 0$. Διαφορετικά, προκύπτουν αρνητικές πιθανότητες. Το ποσοστό πιθανότητας ότι η ξηρασία έχει λήξει λοιπόν είναι:

- $Pe = [(\sum U_{i-j}) / (Z_e + \sum U_{i-j} - U_i)] \times 100 - 100V/Q$ (30)



Είναι συχνό φαινόμενο μια περίοδος ξηρασίας να διακόπτεται προσωρινά από ένα μήνα ή από ασυνήθιστα υγρές καιρικές συνθήκες. Τέτοιες εμφανίσεις σχεδόν πάντα δίνουν αφορμή για εικασίες ότι η ξηρασία έχει λήξει. Αυστηρά από την σκοπιά της υγρασίας του εδάφους και της γεωργικής ξηρασίας, η ξηρασία έχει λήξει, τουλάχιστον προσωρινά, αλλά από τη μετεωρολογική σκοπιά ή ακόμα και από την οικονομική σκοπιά, μία σύντομη υγρή περίοδος μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι μικρής σημασίας.

4.25 Καθορισμός λήξης μίας υγρής περιόδου.

Για την μελέτη υγρών περιόδων μεθοδικά με τον ίδιο τρόπο, όπως με τις περιόδους ξηρασίας, απαιτούνται κάποιες αλλαγές πρόσημων στις εξισώσεις για τον υπολογισμό της πιθανότητας ότι μια ξηρασία έχει λήξει. Για να προσδιοριστεί ο δείκτης, Z_e , ο οποίος θα τερματίσει μία υγρή περίοδο σε ένα μόνο μήνα, πρέπει να αναπτυχθεί μια εξίσωση παρόμοια με την εξίσωση (28). Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να υποκατασταθεί το $X = +0,50$ στην εξίσωση (25) και να γίνει της μορφής:

- **$Z = -2.691X_{i-1} + 1,50. (31)$**

Αυτό δίνει ένα μέτρο του ποσού της ανώμαλης ξηρότητας ($-Z$) που απαιτείται για να μειώσει τη σοβαρότητα μιας υγρής περιόδου σε 0.50 σε ένα μόνο μήνα. Ακριβώς όπως μια περίοδος ξηρασίας μπορεί να λήξει ακόμη και αν ο καιρός είναι σταθερά ελαφρώς ξηρότερος από το κανονικό, μια υγρή περίοδος μπορεί επίσης να λήξει με το να συνεχίζει να είναι λίγο πιο υγρή από το κανονικό. Αντικαθιστώντας $\Delta X = 0$ και $X_{i-1} = 0,50$ στην εξίσωση (24) παίρνουμε την τιμή Z που θα τείνει να τερματίσει μια υγρή περίοδο. Η «αποτελεσματική ξηρότητα» γίνεται:

- **$U_d = Z - 0.15 (32)$**

Η εξίσωση (30) για τον προσδιορισμό της πιθανότητας ότι η ξηρασία έχει λήξει μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για να υπολογιστεί η πιθανότητα ότι μια υγρή περίοδος έχει λήξει. Η επόμενη ενότητα του κεφαλαίου περιγράφει τη διαδικασία για τη χρήση αυτών των εξισώσεων για να κάνει μια πλήρη κλιματολογική ανάλυση των πτυχών της υγρασίας του καιρού. Ο όρος, σοβαρότητα, η οποία συνήθως εφαρμόζεται στις ξηρές αντί στις υγρές περιόδους, εφαρμόζεται εδώ και στις δύο. Αυτό αν και δεν μπορεί να είναι μια πολύ ακριβής χρήση του όρου, είναι βολική και



δεν φαίνεται να υπάρχει ένας εναλλακτικός επιτυχημένος όρος για να χρησιμοποιείται στη θέση του.

4.26 Διαδικασία για τον υπολογισμό της δριμύτητας των ξηρών και υγρών περιόδων

Για την εκτέλεση των υπολογισμών για τον καθορισμό της μηνιαίας σοβαρότητας της ξηρασίας, X , από μία μακρά σειρά των μηνιαίων τιμών του δείκτη, Z , πρέπει να καταγραφούν οι υγρές περίοδοι καθώς και οι ξηρασίες. Ως εκ τούτου, μια σειρά από υπολογισμούς πρέπει να πραγματοποιούνται για κάθε μήνα. Για παράδειγμα, όταν δεν υφίσταται ξηρή ή υγρή περίοδος σε εξέλιξη, πρέπει για κάθε μήνα να υπολογίζεται η "πιθανότητα" ότι μια υγρή περίοδος ή ξηρασία έχει αρχίσει. Μόλις αυτή η πιθανότητα φτάσει το 100 τοις εκατό, μία ξηρασία ή μια υγρή περίοδος είναι πραγματικά σε εξέλιξη, και πρέπει να εξεταστεί κάθε μήνας για να καθοριστεί η πιθανότητα ότι η περίοδος έχει λήξει και ταυτόχρονα να προσδιοριστεί η πιθανότητα ότι μία περίοδος με το αντίθετο πρόσημο έχει αρχίσει. Οι υπολογισμοί είναι πραγματικά πολύ απλοί. Η υπολογιστική ρουτίνα που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο και περιλαμβάνει την περιοχή του λίμνης Υλίκης.



5. Κεφάλαιο 5 Εφαρμογή της Μεθοδολογίας και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

5.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό φύλλο, «ανοιχτό» στους χρήστες, στο οποίο εισάγοντας τα δεδομένα εισόδου της μεθόδου Palmer (βροχόπτωση και θερμοκρασία³²) και με απλές προσαρμογές (λόγω διαφορετικού μεγέθους δείγματος χρονοσειράς δεδομένων) να υπολογίζεται ο δείκτης Palmer για κάθε μελετώμενη περιοχή. Επίσης πέρα από την επισκόπηση των πιο διαδεδομένων δεικτών ξηρασίας, γίνεται εφαρμογή, σε συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, της μεθοδολογίας που έχει αναπτύξει ο Palmer (Palmer 1965) και έχει μελετήσει ενδελεχώς και έχει αναθεωρήσει και σχολιάσει ο Alley (Alley 1984) και η οποία έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4.

5.2 Περιοχή Μελέτης - Λίμνη Υλίκη

Όπως έχει προαναφερθεί η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασία Palmer αφορούν στη Λίμνη Υλίκη

5.2.1 Μορφολογικά στοιχεία

Η περιοχή γύρω της Λίμνης Υλίκης είναι κυρίως ορεινή. Τα ορεινά τμήματα είναι συνήθως ασβεστολιθικά, με αρκετά ανώμαλες επιφάνειες, απότομες κλιτείς, στενές χαράδρες και διάφορα καρστικά φαινόμενα όπως καταβόθρες, δολίνες, πόλγες κ.λ.π. Στην περιοχή παρουσιάζονται δύο κύριες οροσειρές διεύθυνσης ΝΔ - ΒΑ, οι οποίες είναι:

- η οροσειρά του Πτώου βόρεια και
- η οροσειρά του Κτυπά νότια.

5.2.2 Προέλευση της Λίμνης Υλίκης

Σύμφωνα με τον Renz (Renz 1948), η λίμνη Υλίκη δημιουργήθηκε σε τεκτονικές τάφρους, οι οποίες προήλθαν από εγκατακρημνίσεις τεμαχών κατά μήκος ρηγμάτων. Ο Phillipson (Phillipson 1894) θεωρεί ότι οι δύο βοιωτικές λίμνες (Υλίκη

³² Όπως έχει προαναφερθεί η θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής



και Παραλίμνη), που, όπως υποστηρίζει, δημιουργήθηκαν από εγκατακρήμιση οροφής ασβεστολιθικών σπηλαίων, συνέπεια της διάλυσης των ασβεστόλιθων, συνδέονται υπόγεια μεταξύ τους με αγωγούς, οι οποίοι προέρχονται από διάλυση του ασβεστόλιθου και επικοινωνούν από τη μια μεριά με την Κωπαΐδα κι από την άλλη με τη θάλασσα. Υποστηρίζεται, δηλαδή, η ύπαρξη ενός υπόγειου ποταμού, που ρέει από την Κωπαΐδα προς τη θάλασσα και του οποίου η στάθμη αντιστοιχεί στη στάθμη των δύο λιμνών. Οι Dal Diaz και Γ. Γεωργαλάς θεωρούν τι δύο λίμνες τυπικές καρστικές κοιλότητες. Κατά τους καθηγητές Μητσόπουλο και Τρικαλινό οι λίμνες σχηματίστηκαν μέσα σε τεκτονικές τάφρους, οι οποίες είναι αποτέλεσμα τεκτονικών κινήσεων.

Η δημιουργία της λίμνης Υλίκης αποδίδεται αρχικά σε τεκτονικά αίτια (ρηγματογόνος τεκτονική), ενώ οι όχθες και των δύο βοιωτικών λιμνών συμπίπτουν με τις υπάρχουσες διαρρήξεις. Η όλη διαμόρφωση των λιμνών οφείλεται τελικά και στην καρστική διάβρωση εφόσον τα ασβεστολιθικά τοιχώματα είναι εκτεθειμένα στην καρστική επίδραση.

Η θέση των λιμνών σε χαμηλή περιοχή μεταξύ μεγάλων υψωμάτων, υποβάλλει την ιδέα ότι αυτές βρίσκονται στην κατεύθυνση του παλαιού βοιωτικού Κηφισού ποταμού, ο οποίος διέσχισε το ενιαίο Φωκικό - Βοιωτικό βύθισμα πριν το σχηματισμό της λεκάνης της Κωπαΐδας. Με την δημιουργία της λεκάνης της Κωπαΐδας συλλαμβάνεται ο Κηφισός ποταμός και σχηματίζεται η λίμνη της Κωπαΐδας, ενώ στη κατεύθυνση του παλαιού Βοιωτικού Κηφισού (ανατολικά της λίμνης της Κωπαΐδας), δημιουργούνται οι βοιωτικές λίμνες (Υλίκη και Παραλίμνη).

Η λίμνη Υλίκη συνδέεται με την Παραλίμνη με διώρυγα, που έχει μήκος 2,5 km. Η Υλίκη έχει απότομες όχθες και ο πυθμένας της είναι ασβεστολιθικός. Από το 1957 προσφέρει ανεκτίμητη συμβολή στην ύδρευση της Αθήνας μέσω της λίμνης του Μαραθώνα. Ωστόσο η στάθμη³³ της Υλίκης διαρκώς κατέρχεται, εξαιτίας διαρροής ύδατος προς την Παραλίμνη (ΕΜΠ-Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών,

³³ Μελετάται η δυνατότητα στεγανοποίησης του βυθού και των πλευρών της λίμνης Υλίκης. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται ότι το υδατικό δυναμικό της λίμνης θα δώσει περίπου 200 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, κάθε χρόνο περισσότερο από τη σημερινή συνεισφορά της.



2004). Σημειώνεται ότι η ιδέα για την στεγανοποίηση της Υλίκης, σήμερα έχει εγκαταλειφθεί.

5.2.3 Γεωλογικές συνθήκες

Οι γεωλογικές συνθήκες στη μεγαλύτερη περιοχή της λίμνης Υλίκης έχει ως εξής: Ολόκληρος ο χώρος, από την ανατολική πλευρά της Κωπαΐδας μέχρι την Αυλίδα και βόρεια του Θηβαϊκού πεδίου μέχρι τον Ευβοϊκό κόλπο αποτελείται από πετρώματα της Πελαγονικής ζώνης, τα οποία βρίσκονται ασύμφωνα πάνω σε μεταμορφωμένα ανωπερμικά πετρώματα

Η στρωματογραφική σειρά από τα παλαιότερα προς τα νεότερα είναι η εξής:

- Άνω Τριαδικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες «Ιουρασικοί ασβεστόλιθοι
- Σχιστοκερατολιθικό οφιολιθικό σύμπλεγμα
- Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι
- Φλύσχης Παλαιόκαινου – Ηώκαινου

5.2.4 Παραδοχές

5.2.4.1 Καθορισμός φέρουσας εδαφικής ικανότητας σε υγρασία

Η πρώτη παραδοχή, η οποία ωστόσο είναι αναπόσπαστο μέρος της μεθοδολογίας του Palmer είναι ο καθορισμός της φέρουσας ικανότητας του υποκείμενου εδαφικού στρώματος σε υγρασία. Σημειώνεται ότι η φέρουσα ικανότητα του ανώτερου εδαφικού στρώματος ορίζεται πάντα ως 25 mm (1 ίντσα). Με βάση τη γεωλογική ανάλυση της περιοχής μελέτης (ΕΜΠ-Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, 2004) και δεδομένου ότι το γεωλογικό υπόβαθρο της μελετώμενης περιοχής είναι κατά βάση ασβεστολιθικό, θεωρήθηκε ότι η αποθηκευτική ικανότητα του υποκείμενου εδαφικού στρώματος είναι 230 mm (9 ίντσες). Αυτή η παραδοχή αποτελεί μία λογική υπόθεση που θα χρησιμοποιηθεί για την περιοχή στο σύνολό της. Συνεπώς, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θεωρήθηκε ότι οι συνθήκες εδάφους και η αποθηκευτική ικανότητα αυτού είναι παρόμοιες με αυτές της Κεντρικής Αϊόβα, συνεπώς η διαθέσιμη φέρουσα ικανότητα του εδάφους σε νερό είναι περίπου 250 mm, δηλαδή $AWC=250 \text{ mm} = 10 \text{ ίντσες}$.

5.2.4.2 Δεδομένα εισόδου



Τα δεδομένα εισόδου στη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer είναι οι μηνιαίες τιμές επιφανειακής βροχόπτωσης στη λίμνη Υλίκη και οι μηνιαίες τιμές επιφανειακής εξάτμισης από την ίδια περιοχή. Τα στοιχεία και των δύο μεταβλητών εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν την χρονική περίοδο μεταξύ του υδρολογικού έτους 1977-78 έως και το υδρολογικό έτος 2001-2002, για τα οποία υπήρχαν συνεχή διαθέσιμα στοιχεία και για τις δύο μεταβλητές. Σημειώνεται ότι αν και η μέθοδος Palmer έχει σαν μεταβλητή εισόδου την θερμοκρασία, στην παρούσα εργασία δεδομένου ότι υπήρχαν διαθέσιμα τα στοιχεία της επιφανειακής εξάτμισης, δε χρειάστηκε να γίνει υπολογισμός αυτής μέσω της θερμοκρασίας για την εισαγωγή της στο υδρολογικό μοντέλο του Palmer. Δεδομένου λοιπόν ότι τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου ήταν η εξάτμιση αντί της εξατμισοδιαπνοής, η δεύτερη παραδοχή που ελήφθη στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι η χρήση ενός συντελεστή για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής ως ποσοστό της εξάτμισης για την επίλυση του υδρολογικού ισοζυγίου του Palmer. Ο συντελεστής ο οποίος επιλέχθηκε για να συνδέσει την μετρημένη εξάτμιση με την απαιτούμενη εξατμισοδιαπνοή είναι ο 0,7.

Δηλαδή,

$$\text{Εξατμισοδιαπνοή} = 70\% * \text{Εξάτμιση}$$

Σημειώνεται ότι αναλυτικοί πίνακες με τα δεδομένα εισόδου παρατίθενται στο Παράρτημα Ι της παρούσας εργασίας στους πίνακες 11, 12 και 13.

5.2.4.3 Προηγούμενο υδρολογικό έτος

Η τρίτη και τελευταία παραδοχή που ελήφθη κατά το στάδιο εφαρμογής της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του δείκτη Palmer είναι η θεώρηση ότι το προηγούμενο υδρολογικό έτος του μελετώμενου δείγματος ήταν ιδιαίτερα υγρό και πλήρωσε και τα δύο εδαφικά στρώματα με τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα τους σε αποθηκευμένη υγρασία. Σημειώνεται εκ των προτέρων ότι ακόμα και αν θεωρηθεί ότι το προηγούμενο υδρολογικό δεν ήταν αρκετά υγρό ώστε να φέρει και τα δύο εδαφικά στρώματα στην φέρουσα τους ικανότητα, τα αποτελέσματα εφαρμογής του δείκτη δεν επηρεάζονται. Δηλαδή η μέθοδος του Palmer, πετυχαίνει με την ίδια αξιοπιστία τις πραγματοποιημένες περιόδους ξηρασίας και την ένταση τους (Διάγραμμα 20).

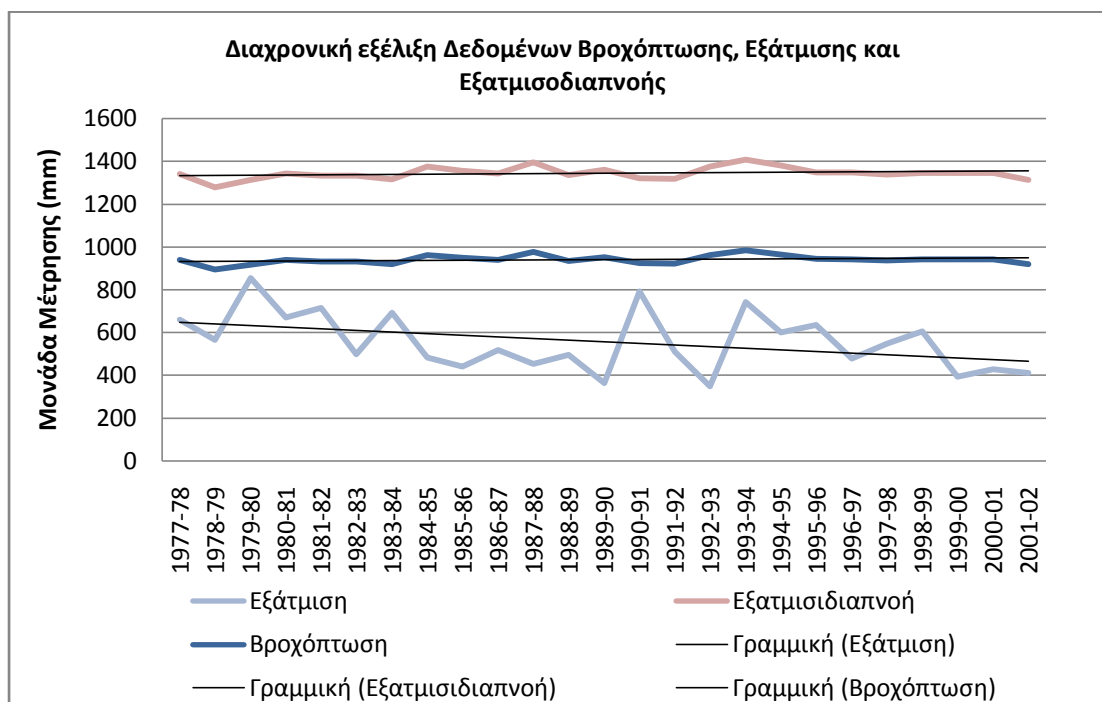


5.3 Ανάλυση δεδομένων εισόδου

Από την μελέτη των δεδομένων εισόδου παρατηρείται ότι ο ετήσιος μέσος όρος της εξάτμισης είναι κατά βάση σταθερός και κυμαίνεται περίπου στα 1350 mm. Ωστόσο, μελετώντας την εξάτμιση σε μηνιαίο βήμα για κάθε υδρολογικό έτος, προκύπτει ότι παρουσιάζει μία περιοδικότητα ως προς τις αιχμές της, οι οποίες παρατηρούνται τους καλοκαιρινούς μήνες, με τιμές μεγαλύτερες από 200 mm κατά τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο. Επίσης ως προς τις χαμηλές τιμές της, αυτές παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες και συγκεκριμένα κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ των 24-32 mm.

Αντίθετα, η τάση των δεδομένων βροχόπτωσης τείνει μειούμενη ξεκινώντας από το υδρολογικό έτος 1977-78 μέχρι και το έτος 2001-2002. Κατά την διάρκεια της περιόδου 1979-82 παρατηρείται μία αιχμή που αγγίζει περίπου τα 850 mm ετήσιας βροχόπτωσης, ενώ την περίοδο 1987-1990 παρουσιάζεται μία περίοδος όπου η ετήσια βροχόπτωση κατέρχεται στα περίπου 350 mm ετησίως. Με κάποιες ενδιάμεσες αυξομειώσεις στις ετήσιες τιμές βροχόπτωσης, τα τελευταία τρία έτη μελέτης η βροχόπτωση σταθεροποιείται στην τιμή των 400 mm, τιμή πολύ κάτω από τον μέσο όρο ετήσιας βροχόπτωσης του δείγματος, η οποία είναι περίπου 550 mm. Σημειώνεται ότι μελετώντας τη βροχόπτωση σε μηνιαίο βήμα, παρατηρείται ότι κατά μέσο όρο μεγαλύτερες βροχοπτώσεις καταγράφονται τον μήνα Δεκέμβριο (μέσο όρος Δεκεμβρίων περίπου 86 mm), ενώ οι μικρότερες τιμές καταγράφονται τον μήνα Ιούνιο με μέση τιμή περίπου τα 10 mm.

Στο διάγραμμα 7 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των ετήσιων δεδομένων βροχόπτωσης και εξάτμισης της μελετώμενης περιοχής.



Διάγραμμα 7 Διαχρονική εξέλιξη ετήσιων δεδομένων βροχόπτωσης, εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής

5.4 Κατάστρωση υπολογιστικού φύλλου για τον υπολογισμό του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και σχολιάστηκε στα κεφάλαια 3 και 4, δημιουργήθηκε ένα αναλυτικό φύλλο εργασίας στη μορφή excel, στο οποίο έγινε εισαγωγή των δεδομένων εισόδου, αφού προηγήθηκε η μετατροπή τους από χιλιοστά (mm) σε ίντσες (inch), λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες, στην παράγραφο 5.2.4, παραδοχές. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν παρουσιάζονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

5.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Το πρώτο μέρος των υπολογισμών αφορά στο υδρολογικό μοντέλο του Palmer για τη μελετώμενη περιοχή.

Υπολογίζεται η διαφορά εξάτμισης με τη βροχόπτωση, οι απώλειες του ανώτερου εδαφικού στρώματος L_s , οι απώλειες του κατώτερου εδαφικού στρώματος L_u και το σύνολο των απωλειών L , τα οποία συνεισφέρουν στον υπολογισμό της αποθηκευμένης υγρασίας στο ανώτερο εδαφικό στρώμα S_s , της αποθηκευμένης υγρασίας στο κατώτερο εδαφικό στρώμα S_u και της συνολικά αποθηκευμένης υγρασίας S και στα δύο εδαφικά στρώματα, για κάθε μήνα. Σημειώνεται ότι η



αποθηκευμένη υγρασία στο ανώτερο εδαφικό στρώμα, μεταβάλλεται έντονα στο μελετώμενο δείγμα φτάνοντας συχνά την μέγιστη (1 ίντσα) και ελάχιστη (0 ίντσες) τιμή της, δεδομένου ότι η μετακίνηση υγρασίας από αυτό το εδαφικό στρώμα πραγματοποιείται στον δυνητικό βαθμό. Σημειώνεται επίσης ότι το διάγραμμα της αποθηκευμένης υγρασία στο ανώτερο και κατώτερο εδαφικό στρώμα παρατίθεται στο Παράρτημα II της εργασίας (Διάγραμμα 15).

Στη συνέχεια υπολογίζεται η “υπολογισμένη” εξάτμιση η οποία όπως αναμένεται διαφέρει από τη δυνητική εξάτμιση δεδομένου ότι αποτελεί μέρος υπολογισμού ενός υδατικού ισοζυγίου και όχι μία δυνητική τιμή. Το διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η “υπολογισμένη” και η δυνητική εξάτμιση παρατίθεται επίσης στο Παράρτημα II (Διάγραμμα 16). Παρατηρείται ότι και οι δύο τιμές παρουσιάζουν τις ίδιες τάσεις, ωστόσο η τιμή της πραγματικής εξάτμισης είναι μεγαλύτερη από αυτήν της υπολογισμένης εξάτμισης.

Το δεύτερο μέρος των υπολογισμών αφορά στον υπολογισμό των δυνητικών τιμών επαναφόρτισης (PR), απωλειών (PL) και απορροής (PRO). Όπως και η δυνητική εξάτμιση έτσι και οι άνωθεν δυνητικές τιμές, το διάγραμμα των οποίων παρουσιάζεται στο Παράρτημα II (Διάγραμμα 17), παρουσιάζουν την μέγιστη ικανότητα της περιοχής με βάση τις επικρατούσες συνθήκες (βροχόπτωσης και εξάτμισης), σε επαναφόρτιση, απώλειες και απορροή. Παρατηρείται ότι όταν οι τιμές της δυνητικής επαναφόρτισης είναι ιδιαίτερα υψηλές (περίπου 10 ίντσες), οι αντίστοιχες τιμές των δυνητικών απωλειών, όπως θα αναμενόταν, είναι μηδενικές.

Στη συνέχεια από τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου του Palmer, υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές όλων των υδρολογικών ετών του μελετώμενου δείγματος για τις εξής παραμέτρους α) “Υπολογισμένη Εξάτμιση” (ET), β) δυνητική εξάτμιση (PE), γ) Επαναφόρτιση (R), δ) Αποθηκευμένη Υγρασία στην αρχή του μελετώμενου μήνα (S'), ε) δυνητική επαναφόρτιση (PR), στ) απορροή (RO), ζ) Απώλειες (L), η) Αποθηκευμένη Υγρασία στο ανώτερο εδαφικό στρώμα στην αρχή του μελετώμενου μήνα (S's), θ) Αποθηκευμένη Υγρασία στο υποκείμενο εδαφικό στρώμα στην αρχή του



μελετώμενου μήνα (S'υ), ια) Δυνητικές Απώλειες (PL), ιβ) βροχόπτωση (P) και ιγ) Δυνητική απορροή (PRO).

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 8 που ακολουθεί.

Πίνακας 8 Μέσες μηνιαίες τιμές όλων των υδρολογικών ετών του μελετώμενου δείγματος σε ίντσες

Μήνας	ET	PE	R	S'	PR	RO	L	S's	S'υ	PL	P	PRO
Οκτώβριος	1,59	2,03	0,81	1,43	9,33	0,00	0,04	0,34	1,09	0,13	2,35	0,67
Νοέμβριος	0,99	1,04	2,13	3,45	8,57	0,09	0,02	0,87	2,59	0,39	3,10	1,43
Δεκέμβριος	0,67	0,71	2,42	5,86	6,55	0,30	0,01	0,92	4,94	0,63	3,38	3,45
Ιανουάριος	0,78	0,81	1,91	7,20	4,14	0,81	0,05	0,91	6,28	0,75	2,93	5,86
Φεβρουάριος	1,20	1,20	1,15	8,15	2,80	0,74	0,08	0,88	7,27	1,07	2,90	7,20
Μάρτιος	2,10	2,17	0,54	8,13	1,85	0,50	0,44	0,61	7,53	1,81	2,58	8,15
Απρίλιος	2,75	3,21	0,02	6,81	1,87	0,18	1,34	0,21	6,60	2,51	1,60	8,13
Μάιος	3,54	4,65	0,00	4,43	3,19	0,00	2,37	0,00	4,43	3,10	1,17	6,81
Ιούνιος	2,87	5,98	0,00	1,94	5,57	0,00	2,49	0,00	1,94	2,65	0,38	4,43
Ιούλιος	1,58	6,38	0,00	0,76	8,06	0,00	1,18	0,00	0,76	1,23	0,40	1,94
Αύγουστος	0,93	5,35	0,00	0,40	9,24	0,00	0,36	0,00	0,40	0,41	0,57	0,76
Σεπτέμβριος	0,69	3,50	0,00	0,28	9,60	0,00	0,12	0,00	0,28	0,14	0,57	0,40

Έπειτα και με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές, υπολογίζονται οι συντελεστές εξατμισοδιαπνοής, επαναφόρτισης, απορροής και απωλειών. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα Υπολογισμών για τους συντελεστές εξατμισοδιαπνοής, επαναφόρτισης, απορροής και απωλειών.

	Συντελεστής εξατμισοδιαπνοής (ET/PE)	Συντελεστής Επαναφόρτισης (R/PR)	Συντελεστής Απορροής (RO/PRO)	Συντελεστής Απωλειών
Μήνας	α	β	γ	δ
Οκτώβριος	0,7847	0,0863	0,0000	0,3475
Νοέμβριος	0,9549	0,2482	0,0611	0,0418
Δεκέμβριος	0,9467	0,3691	0,0874	0,0113
Ιανουάριος	0,9604	0,4605	0,1383	0,0610
Φεβρουάριος	0,9998	0,4091	0,1033	0,0750
Μάρτιος	0,9688	0,2894	0,0609	0,2411



	Συντελεστής εξατμισοδιαπνοής (ET/PE)	Συντελεστής Επαναφόρτισης (R/PR)	Συντελεστής Απορροής (RO/PRO)	Συντελεστής Απωλειών
Μήνας	α	β	γ	δ
Απρίλιος	0,8570	0,0090	0,0218	0,5356
Μάιος	0,7613	0,0000	0,0000	0,7672
Ιούνιος	0,4807	0,0000	0,0000	0,9419
Ιούλιος	0,2476	0,0000	0,0000	0,9555
Αύγουστος	0,1746	0,0000	0,0000	0,8910
Σεπτέμβριος	0,1970	0,0000	0,0000	0,8364

Οι συντελεστές αυτοί θα χρησιμεύσουν για τον υπολογισμό των τιμών των κλιματικά κατάλληλων τιμών (CAFEC) εξατμισοδιαπνοής, επαναφόρτισης, απορροής, απωλειών και βροχόπτωσης, με απώτερο στόχο τον υπολογισμό της απόκλισης υγρασίας (d) και του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας (z).

Οι κλιματικά κατάλληλες τιμές (CAFEC) παρουσιάζονται σε διάγραμμα το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα II της παρούσας εργασίας.

Επόμενο βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της απόκλισης υγρασίας d. Το διάγραμμα απόκλισης υγρασίας παρατίθεται επίσης στο Παράρτημα II (Διάγραμμα 18). Οι τιμές της απόκλισης υγρασίας κυμαίνονται από 6,5 έως - 5,5, ενώ η γραμμή τάσης του διαγράμματος υποδεικνύει μία ελαφρώς πτωτική τάση, η οποία στα μέσα του μελετώμενου δείγματος αποκτά αρνητικές τιμές, φανερώνοντας μία τάση μείωσης της πραγματικής βροχόπτωσης σε σύγκριση με αυτή που είναι αναγκαία για το κλίμα της περιοχής.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το κλιματικό χαρακτηριστικό K. Η σειρά υπολογισμών που ακολουθήθηκε για τον τελικό υπολογισμό του K παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.



Πίνακας 10 Σειρά υπολογισμών για το Κλιματικό Χαρακτηριστικό Κ.

Μήνας	Μέση Απόλυτη Μηνιαία Τιμή απόκλισης Υγρασίας (D)	Αρχικός υπολογισμός Κλιματικού Χαρακτηριστικό Κ'	D*Κ'	Κλιματικό Χαρακτηριστικό (Κ)
Οκτώβριος	1,30	1,23	1,60	1,16
Νοέμβριος	1,43	1,14	1,64	1,08
Δεκέμβριος	1,79	0,99	1,78	0,94
Ιανουάριος	2,16	0,90	1,94	0,85
Φεβρουάριος	1,40	1,16	1,62	1,10
Μάρτιος	1,55	1,09	1,70	1,04
Απρίλιος	1,21	1,27	1,54	1,20
Μάιος	0,95	1,46	1,38	1,38
Ιούνιος	0,87	1,62	1,41	1,54
Ιούλιος	0,64	2,04	1,31	1,94
Αύγουστος	0,63	2,20	1,39	2,08
Σεπτέμβριος	0,61	2,16	1,33	2,05
			Άθροισμα (D*Κ') = 18,63	

Αφού έχει υπολογιστεί η απόκλιση υγρασίας και το κλιματικό χαρακτηριστικό Κ, υπολογίζεται ο δείκτης ανωμαλίας υγρασίας (Z), διάγραμμα του οποίου παρατίθεται στο Παράρτημα II (Διάγραμμα 19). Οι μηνιαίες σταθερές τιμές Κ χρησιμοποιούνται ως συντελεστές βαρύτητας για κάθε μία από τις μηνιαίες αποκλίσεις υγρασίας κατά τη διάρκεια του μελετώμενου δείγματος. Οι αποκλίσεις πολλαπλασιάζονται με τους αντίστοιχους συντελεστές παρέχοντας τις τιμές του δείκτη z. Ο δείκτης αυτός είναι πρακτικά το συγκρίσιμο μέτρο της σχετικής κλιματικής ανωμαλίας. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές αυτές δεν είναι ποσότητα απόκλισης της προσφοράς από την κανονική υγρασία διότι έχουν σταθμιστεί, γι' αυτό και ορίζονται ως τιμές ενός δείκτη. Οι τιμές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας εκφράζουν σε μηνιαία βάση, την απόκλιση του καιρού του μήνα από το μέσο όρο κλιματικής υγρασίας του μήνα αυτού, με προσαρμοσμένο και σταθμισμένο τρόπο ώστε η ίδια κλίμακα να είναι εφαρμοστέα σε όλες τις τιμές. Παρατηρείται ότι οι τιμές του δείκτη ανωμαλίας

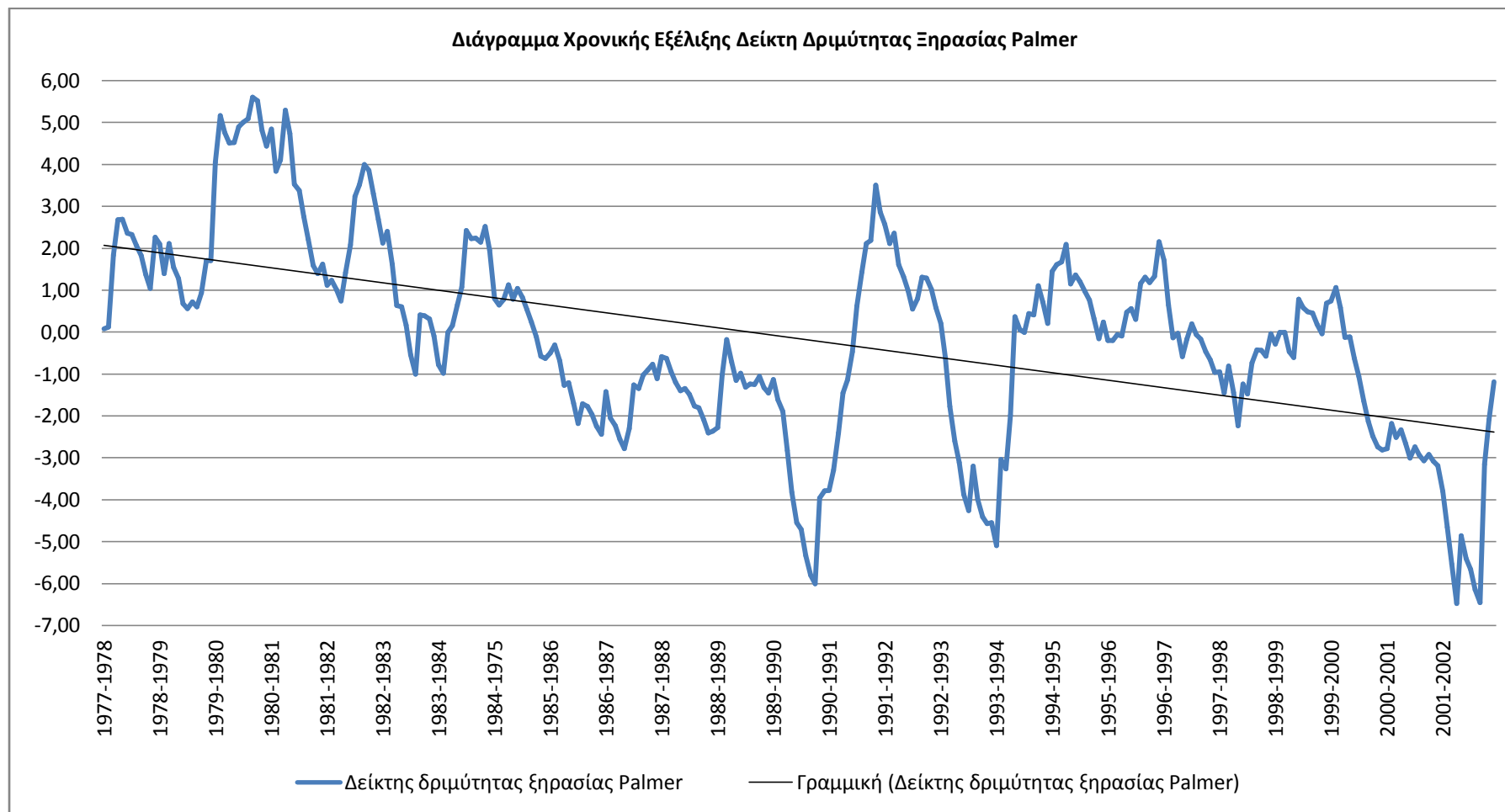


υγρασίας κυμαίνονται από 8 έως -4,5, ενώ έστω και μικρές ανωμαλίες υγρασίας συμβαίνουν καθ'όλη τη διάρκεια του μελετώμενου δείγματος. Το μεγαλύτερο μέρος των ανωμαλιών στην ψυχρή περίοδο είναι θετικές και παρατηρούνται λόγω του γεγονότος ότι οι μεγάλες μηνιαίες βροχοπτώσεις μπορεί μερικές φορές να εμφανίζονται κατά την ψυχρή περίοδο. Αντίθετα, ακόμη και μια πλήρης αποτυχία προφοράς υγρασίας κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε κρύου μήνα δεν θα οδηγήσει σε κάποια πολύ μεγάλη απόκλιση της προσφοράς υγρασίας από το κανονικό, επειδή η ζήτηση υγρασίας ή η CAFEC βροχόπτωση κατά την ψυχρή περίοδο είναι σχετικώς πάντα πιο μικρή από την αντίστοιχη της καλοκαιρινής περιόδου. Οι πραγματικά σημαντικές αρνητικές ανωμαλίες υγρασίας συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των ζεστών εποχών. Αυτό, είναι αναμενόμενο διότι η απαίτηση υγρασίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η προσφορά υγρασίας μπορεί να αποτύχει σχεδόν εντελώς. Επίσης ομοίως με την γραμμή τάσης του διαγράμματος απόκλισης υγρασίας, κατά τη διάρκεια του μελετώμενου δείγματος παρατηρείται μία πτωτική τάση προς τις αρνητικές τιμές, γεγονός που υποδεικνύει τάση προς αποτυχία στην προσφορά υγρασίας.

Μετά τον υπολογισμό και της απόκλισης υγρασίας αλλά και του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας υπολογίζεται τελικώς ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας, ο οποίος παρουσιάζεται στο διάγραμμα 13 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 13 Χρονική εξέλιξη Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer





Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η διαδοχική εξέλιξη του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης το οποίο περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη από το 1977-78 έως το 2001-02.

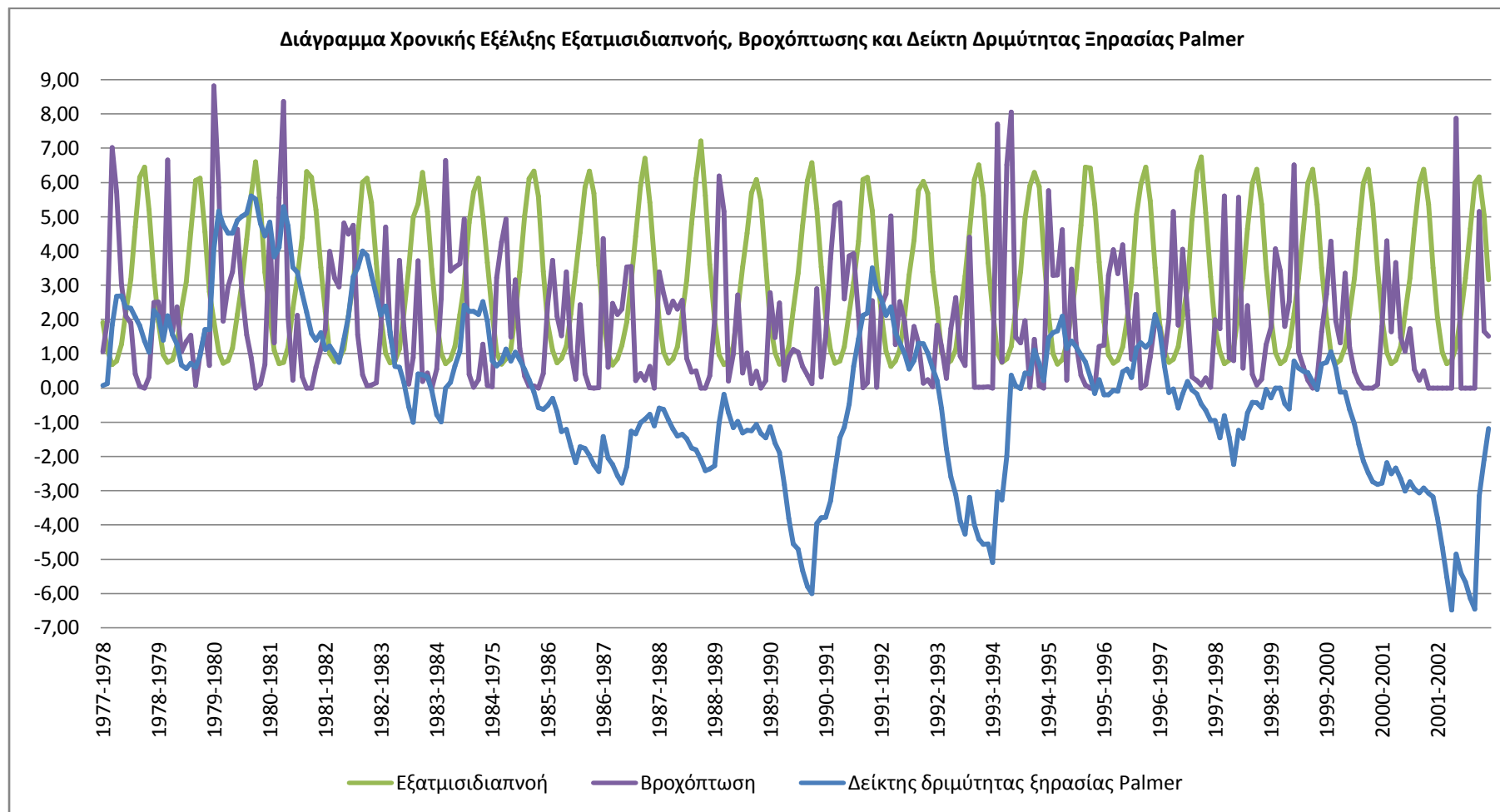
Η πιο ακραία μέγιστη τιμή έντασης του δείκτη που καταγράφεται είναι 5,6 και αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ποιοτική κλίμακα κατάταξης, όσον αφορά στην προσφορά υγρασίας, αντιπροσωπεύοντας ένα ιδιαίτερα υγρό κλίμα ($>4,0$). Αντίθετα, η χαμηλότερη τιμή που καταγράφεται είναι $-6,48$. Η τιμή αυτή κατατάσσεται στην χαμηλότερη ποιοτική κλίμακα κατάταξης και αντιπροσωπεύει ιδιαίτερα ξηρές συνθήκες ($<-4,0$).

Η πρώτη γενική εικόνα του διαγράμματος επιτρέπει την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων σε τέσσερις (4) κατηγορίες.

- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 1984-85. Αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται κυρίως από θετικές τιμές του δείκτη και αντιπροσωπεύει κατά κύριο λόγο ένα σχεδόν υγρό κλίμα με μέση τιμή που υπολογίζεται σε 1,96.
- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1985-86 έως 1993-94. Αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται κυρίως από αρνητικές τιμές του δείκτη και αντιπροσωπεύει κατά κύριο λόγο ένα σχεδόν ξηρό κλίμα με τη μέση του δείγματος να υπολογίζεται σε $-1,36$.
- Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1994-95 έως 1998-99. Αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται κυρίως από θετικές τιμές του δείκτη και αντιπροσωπεύει κατά κύριο λόγο ένα σχεδόν κανονικό κλίμα με τη μέση του δείγματος να υπολογίζεται σε 0,16.
- Η τέταρτη και τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1999-00 έως 2001-02. Αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται μόνο από αρνητικές τιμές του δείκτη και αντιπροσωπεύει κατά κύριο λόγο ένα μέτρια ξηρό κλίμα με τη μέση του δείγματος να υπολογίζεται σε $-2,78$.



Διάγραμμα 14. Χρονική Εξέλιξη Εξατμισοδιαπνοής (ίντσες), Βροχόπτωσης (ίντσες) και Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer





Στο διάγραμμα 14 που παρατίθεται παραπάνω, γίνεται μία εποπτική απεικόνιση του υπολογισθέντος δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer, μαζί με τα δεδομένα εισόδου, δηλαδή την εξάτμιση και την βροχόπτωση.

Αρχικά παρατηρείται ότι η εξάτμιση, όπως αναμενόταν, παρουσιάζει μία περιοδικότητα, τόσο ως προς τις ετήσιες μεταβολές της όσο και ως προς τις μηνιαίες, για όλο το μελετώμενο δείγμα, συνεπώς δεν θα ληφθεί υπόψη στην ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η σχέση της βροχόπτωσης με τα αποτελέσματα της έντασης δριμύτητας ξηρασίας του δείκτη Palmer.

Παρατηρείται ότι χαμηλές τιμές βροχόπτωσης, κατά κύριο λόγο, ακολουθούνται από χαμηλές τιμές (αρνητικές) του δείκτη. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των ετών 1988-1990, 1992-1993 και 1999-2002 όπου οι χαμηλές τιμές της βροχόπτωσης, οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο πολύ κοντά ή κάτω από 400 mm ετησίως, οδήγησαν σε πολύ χαμηλές τιμές του δείκτη Palmer και συγκεκριμένα σε τιμές -6, -5 και -6,5 αντίστοιχα.

Αντίστοιχα οι υψηλές τιμές βροχόπτωσης που παρατηρήθηκαν την περίοδο 1979-1982 καταγράφονται και στο διάγραμμα του υπολογισθέντος δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer, μιας και οι αντίστοιχες τιμές που καταγράφονται για αυτά τα έτη κυμαίνονται πάνω από $PDSI=2$, μία τιμή που αντιστοιχεί σε μέτρια υγρό κλίμα.



6. Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Συζήτηση

6.1 Ειδικά συμπεράσματα

Μετά τον καθορισμό της σειράς των υπολογισμών, και την εφαρμογή της υπολογιστικής διαδικασίας της μεθόδου για την εκτίμηση του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.

- Ο δείκτης φαίνεται να καταγράφει με επιτυχία τις διετείς ξηρασίες του 1988-89 και 1989-90 όπως και εκείνη του 2000-01 και 2001-02.
- Οι ξηρασίες που καταγράφηκαν, έχουν πραγματοποιηθεί ανά ακαθόριστα έτη και δεν φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια περιοδικότητα.
- Με βάση τις ξηρασίες που έχουν καταγραφεί ιστορικά κατά τα τελευταία 30 χρόνια, συμπεραίνεται ότι οι υπολογισθείσες τιμές του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας παρουσιάζουν λογικά αποτελέσματα μιας και κατατάσσουν τις ξηρασίες στην ποιοτική κλίμακα των ιδιαίτερα ξηρών περιόδων, με τιμές οι οποίες ξεπερνούν το ενδεικτικό όριο της ιδιαίτερα ξηρής περιόδου ($PDSI < -4$).
- Η χρονική περίοδος κατά την οποία επικρατεί ακραία ξηρασία με τιμές μεγαλύτερες από $PDSI = -4$ είναι:
 - Από τον Μάρτιο μέχρι και τον Αύγουστο του 1989.
 - Από τον Ιούνιο μέχρι και τον Οκτώβριο του 1993.
 - Από τον Νοέμβριο του 2001 μέχρι τον Ιούνιο του 2002.
- Στο μελετώμενο δείγμα, το οποίο αποτελείται από 300 διαδοχικούς μήνες, οι 18 από αυτούς παρουσιάζουν τιμές μικρότερες από -4, οι οποίες αντιστοιχούν σε κατάσταση ακραίας ξηρασίας και απαντώνται στις 3 περιόδους ξηρασίας που προαναφέρθηκαν.
- Ομοίως, 16 μήνες αντιστοιχίζονται σε κατάσταση ιδιαίτερα υγρού κλίματος, με τις τιμές του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας να είναι μεγαλύτερες από 4.
- Οι περιπτώσεις κατά τις οποίες καταγράφεται ακραία ξηρασία δεν αποτελούν μεμονωμένα γεγονότα τα οποία εμφανίζονται σποραδικά για ένα μήνα, αλλά αντιθέτως αποτελούν περιόδους οι οποίες διαρκούν τουλάχιστον 5 μήνες.



- Από τη γραμμή τάσης που εφαρμόστηκε στις παραχθείσες τιμές, παρουσιάζεται μία τάση προς συνεχώς μειούμενες τιμές του δείκτη, δηλαδή μία τάση προς πιο ξηρικές καταστάσεις.
- Ένας στατιστικός δείκτης ο οποίος δίνει μία γενική εικόνα, χωρίς ωστόσο να παρέχει ασφαλή συμπεράσματα, είναι ότι η μέση τιμή των υπολογισθέντων τιμών της έντασης του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας είναι $-0,16$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε σχεδόν κανονικές συνθήκες και όπως ευκόλως διαπιστώνεται είναι πολύ κοντά στις κανονικές συνθήκες ($PDSI=0,0$).
- Οι τέσσερις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer παρουσιάζονται κατά τους μήνες Ιανουάριο του 2002, Ιούνιο 2002, Μάιο 2002 και Ιούλιο 1990 με τιμές $-6,48$, $-6,45$, $-6,15$ και -6 , αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή του μελετώμενου δείγματος απαντάται τον μήνα Ιανουάριο του 2002, αποδεικνύοντας ότι η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται τόσο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όσο και κατά τους χειμερινούς.
- 50 στοιχεία (μήνες) του μελετώμενου δείγματος παρουσιάζουν τιμές οι οποίες αντιστοιχούνται ποιοτικά στην σχεδόν φυσιολογική κατάσταση ($-0,5 < PDSI < 0,5$).
- Ακόμα και αν θεωρηθεί ότι κατά τις αρχικές συνθήκες (initial values) και τα δύο εδαφικά στρώματα, το ανώτερο και το κατώτερο, ήταν εντελώς άδεια, τα αποτελέσματα εφαρμογής του δείκτη δεν επηρεάζονται ούτε ποιοτικά ούτε ποσοτικά. Δηλαδή, ο δείκτης πετυχαίνει με την ίδια αξιοπιστία τις καταγεγραμμένες περιόδους ξηρασίας και την έντασή τους. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο διάγραμμα 20 το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα II.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία:

- Ελάχιστη τιμή δείγματος = $-6,55$
- Μέγιστη τιμή δείγματος = $5,66$
- 56 στοιχεία του μελετώμενου δείγματος αντιστοιχίζονται ποιοτικά στη σχεδόν φυσιολογική κατάσταση ($-0,5 < PDSI < 0,5$).



- Οι τέσσερις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας Palmer παρουσιάζονται κατά τους μήνες Ιανουάριο του 2002, Ιούνιο 2002, Μάιο 2002 και Ιούλιο 1990 με τιμές -6,55, - 6,49, -6,19 και -5,97 αντίστοιχα. Οι τέσσερις αυτές ακραίες τιμές σημειώνονται ακριβώς τις ίδιες περιόδους με εκείνες όταν δεν είχε ληφθεί υπόψη η συγκεκριμένη παραδοχή. Επίσης οι τιμές είναι παρόμοιες και κατά κύριο λόγο ελάχιστα μικρότερες.
- Η μέση τιμή των υπολογισθέντων τιμών της έντασης του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας είναι -0,17.
- 19 στοιχεία (μήνες) του μελετώμενου δείγματος παρουσιάζουν τιμές μικρότερες από -4, οι οποίες αντιστοιχούν σε κατάσταση ακραίας ξηρασίας και 16 στοιχεία αντιστοιχούν σε κατάσταση ιδιαίτερα υγρού κλίματος $PDSI > 4$.

6.2 Γενικά συμπεράσματα

Τα ειδικά συμπεράσματα γενικεύονται και παρουσιάζονται συνοπτικά ως εξής:

- Η μέθοδος και τα βήματα υπολογισμών του δείκτη που έχουν αποτυπωθεί στο υπολογιστικό φύλλο, καταγράφουν με επιτυχία τις διετείς εξαιρετικές ξηρασίες του 1988-90 και 2000-02.
- Ο δείκτης Palmer με επιτυχία αποτυπώνει τις συνθήκες ξηρασίας στην περιοχή μελέτης.
- Οι ξηρασίες που καταγράφηκαν, έχουν πραγματοποιηθεί ανά ακαθόριστα έτη και δεν φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια περιοδικότητα.
- Οι υπολογισθείσες τιμές του δείκτη δριμύτητας ξηρασίας παρουσιάζουν λογικά αποτελέσματα κατατάσσοντας τις ξηρασίες στην ποιοτική κλίμακα των ιδιαίτερα ξηρών περιόδων, με τιμές οι οποίες ξεπερνούν το ενδεικτικό όριο της ιδιαίτερα ξηρής περιόδου ($PDSI < -4$).
- Παρατηρείται μία τάση προς συνεχώς μειούμενες τιμές του δείκτη, δηλαδή μία τάση προς πιο ξηρές καταστάσεις.



- Οι περιπτώσεις κατά τις οποίες καταγράφεται ακραία ξηρασία δεν αποτελούν μεμονωμένα γεγονότα τα οποία εμφανίζονται σποραδικά για ένα μήνα, αλλά αντιθέτως αποτελούν περιόδους οι οποίες διαρκούν τουλάχιστον 5 μήνες.
- Ακόμα και αν θεωρηθεί ότι κατά τις αρχικές συνθήκες (initial values) και τα δύο εδαφικά στρώματα, το ανώτερο και το κατώτερο, ήταν εντελώς άδεια, τα αποτελέσματα εφαρμογής του δείκτη δεν επηρεάζονται ούτε ποιοτικά ούτε ποσοτικά.



7. Βιβλιογραφία

7.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Abbe, C., 1894: Drought. *Mon. Wea. Rev.*, 22, 323–324.
- Abrams M. D., Ruffner M. C. and Morgan T. A. (1998). “Tree-ring responses to drought across species and contrasting sites in the ridge and valley of central Pennsylvania”. *Forest Science*, 44: 550–558.
- Alley, W. M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:1100-1109.
- Austin R. B., Cantero-Martinez C., Arrue J. L., Playan E. and Cano-Marcellan P. (1998). “Yield–rainfall relationships in cereal cropping systems in the Ebro river valley of Spain”. *Eur. J. Agron.* 8: 239–248.
- Bruins H. J. and Berliner P. R. (1998). “Bioclimatic aridity, climatic variability, drought and desertification: definitions and management options”. In: H. J. Bruins & H. Lithwick (eds), *The Arid Frontier-Interactive Management of Environment and Development*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Bryant EA, 1991: *Natural Hazards*. Cambridge University Press, 85-107.
- Byun H. R. and Wilhite D. A. (1999). “Objective Quantification of Drought Severity and Duration”. *Journal of Climate*, Vol. 12: 2747-2756, *Pukyong National University, Namku, Pusan, South Korea* September.
- Decker, W. L. and J. F. Gerber, "Comparison of Estimated Values of Evapotranspiration," *Final Report on Contract CWB-8807*, University of Missouri, Columbia, Mo., 1957, 51 pp.
- Dickerson, W. H., and B.E. Dethier, 1970: Drought frequency in the northeastern United States, West Virginia University Agr. Exp. Sta., Bull. No. 595, 20 pp.
- Doesken, N. J., T. B. McKee, and J. Kleist, 1991. Development of a surface water supply index for the western United States. *Climatology Report Number 91-3*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.



- Dracup, J. A., K. S. Lee, and E. G. Paulson Jr., 1980: On the statistical characteristics of drought events. *Water Resour. Res.*, 16, 289–296.
- Drexel Institute of Technology, "Summary of Climatic Observations, 1956," *Publications in Climatology*, vol. X, No.2, Laboratory of Climatology, Centerton. N.J., 1957. Also vol. V, No.7; vol. VI, No.6; vol. VIII, No.2; and vol. IX, No.4.
- Edwards, D. C. and T. B. McKee, 1997. Characteristics of 20th Century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Number 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Felch, R.E., 1978. Drought Characteristics and assessment. North American Droughts, N.J. Rosenberg, Ed., Amer. Assoc. Adv. Sci. Selected Symp., Vol 15, WestView Press, 25-42
- Frick, D. M., D. Bode, and J. D. Salas, 1990: Effect of drought on urban water supplies. I: Drought analysis. *J. Hydraul. Eng.*, 116, 733–753.
- Flora, S. D., The Climate of Kansas, *Report of the Kansas State Board of Agriculture*, vol. LXVII, No. 285, June 1948, pp. 29 and 183.
- Friedman, D. G., 1957: The prediction of long-continuing drought in south and southwest Texas. Occasional Papers in Meteorology, No. 1, The Travelers Weather Research Center, Hartford, CT, 182 pp.
- Garcia R. V. (1984). "Nature Pleads not Guilty". Pergamon Press, 300 pp.
- Geist H. J. and Lambin E. F. (2004). "Dynamic causal patterns of desertification". *Bioscience*, 54: 817–829.
- Gibbs, W. J. and J. V. Maher, 1967. Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin*, No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne.
- Glantz M. H. (1994). "Drought, desertification and food production". In: H. H. Glantz (ed.), *Drought Follows the Plow*, Cambridge: Cambridge University Press: pp. 6–22.



- Gommel, R. and F. Petrossi, 1994. Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960. Agrometeorology Series Working Paper No. 9, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Hayes J. Michael, 1999. Drought Indices, National Drought Mitigation Center
- Heddinghaus, T. R. and P. Sabol, 1991. A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here? In: *Proc. 7th Conf. on Applied Climatology*, September 10-13, 1991. American Meteorological Society, Boston, pp. 242-246.
- Heim, R. Richard 2002, A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States, American Meteorological Society, pp 1149-1165.
- Henry, A. J., 1906: Climatology of the United States, Bulletin Q. U.S. Weather Bureau Bull. 361, Washington, DC, 51–58.
- Kanti B. (1998). "Coping mechanisms practiced by drought victims (1994/1995) in north Bengal, Bangladesh". *Applied Geography*, 18: 355–373.
- Hildreth, R. J. and G. W. Thomas, "Farming and Ranching Risk as Influenced by Rainfall. 1. High and Rolling Plains," MP-154, Texas Agricultural Experiment Station, College Station, Tex., Jan. 1956, p.4.
- Holcombe, J. L. and F. H. Wiegmann, "Drought Intensity and Irrigation Needs for Cotton in the St. Joseph Area," *D.A.E. Circular* No. 185, Louisiana State University and A. and M. College, Department of Agricultural Economics, Dec. 1955, 47 pp.
- Karl T.R and R.G. Quayle, 1981: The 1980 summer heat wave and drought in historical perspective. *Mon. Rev.* 109. 2055-2073
- Karl T. R. and Koscielny A. J. (1982). "Drought in the United States: 1895–1981". *J. Climatol.* 2: 313–329.
- Karl, T. R. and R. W. Knight, 1985. Atlas of Monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931-1983) for the Contiguous United States. Historical Climatology Series 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- Kohler, M. A., "Meteorological Aspects of Evaporation Phenomena," International Union of Geodesy and Geophysics, Association of Scientific



Hydrology, *Publication* No. 45, General Assembly of Toronto, 1957, vol. 3, pp. 421-436.

- Kohler, M. A. and M. M. Richards, "Multi-Capacity Basin Accounting for Predicting Runoff from Storm Precipitation," *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, No. 13, Dec. 1962, pp. 5187-5197.
- Kohler, M. A. and R. K. Linsley, "Predicting the Runoff from Storm Rainfall," *Research Paper* No. 34, U.S. Weather Bureau, Sept. 1951, 10 pp.
- 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.
- Kogan F. N. (1997). "Global drought watch from space". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 621–636.
- Lawson, M. P., A. Reiss, R. Phillips and K. Livingston, 1971: Nebraska droughts: A study of their past chronological and spatial extent with implications for the future. *Occasional Papers* No. 1, Dept. Geogr., University of Nebraska, 147 pp.
- Le Houérou, H. N., G. F. Popov, and L. See, 1993. Agrobioclimatic classification of Africa. *Agrometeorology Series Working Paper* No. 6, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Le Houerou H. N. (1996). "Climate change, drought and desertification". *J. Arid Environ.*, 34: 133–185.
- Linsley, R. K., Jr., M. A. Kohler, and J. L. H. Paulhus, 1958: *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, 340 pp.
- Mabbutt J. A. (1985). "Desertification of the world's rangelands". *Desertification Control Bull.*, 12: 1–11.
- Marlatt, W. E., A. V. Havens, N. A. Willets, and G. D. Brill, "A Comparison of Computed and Measured Soil Moisture under Snap Beans," *Journal of Geophysical Research*, vol. 66, No.2, Feb. 1961, pp. 535-541.



- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, TX, pp. 233-236.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, pp. 179-184.
- Morales A., Olcina J. and Rico A. M. (2000). "Diferentes persepciones de la sequia en Espana: Adaptacion, catastrofismo e intentos de correccion". *Investigaciones Geograficas*, 23: 5–46.
- Munger, T. T., 1916: Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Mon. Wea. Rev.*, 44, 642–643.
- Nicholson S. E., Tucker C. J. and Ba M. B. (1998). "Desertification, drought and surface vegetation: An example from the west African Sahel". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 815–829.
- Orwing D. A. and Abrams M. D. (1997). "Variation in radial growth responses to drought among species, site and canopy strata". *Trees*, 11: 474–484.
- Palmer, W. C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21:156-161.
- Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Palmer, W. C., "Weather Service to Agriculture in the Western Great Plains," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 37, No.9, Nov. 1956, pp. 458-461.
- Palmer, W. C. and A. V. Havens, "A Graphical Technique for Determining Evapotranspiration by the Thornthwaite Method," *Monthly Weather Review*, vol. 86, No.4, Apr. 1958, pp. 123-128.
- Palmer, W. C. and A. V. Havens, "Palmer-Havens Diagram for Computing Potential Evapotranspiration by the Thornthwaite Method," U.S. Department of of Agriculture, Soil Conservation Service, Portland, Oreg., 1960.



- Pausas J. G. (2004). "Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin)". *Climatic Change*, 63: 337–350.
- Penman, H. L., "Evaporation: An Introductory Survey," *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol. 4, 1956, pp. 9-29.
- Pickup G. (1998). "Desertification and climate change – the Australian perspective". *Climate Research*, 11: 51–63.
- Pierre, W. H. and F. F. Riecken, "The Midland Feed Region," *Yearbook of Agriculture*, 1957, *Soil*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1958, pp. 535-546.
- Puckett, L.J., 1981: Dendroclimatic estimates of a drought index for northern Virginia. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2080, 39 pp.
- Richards, L. A. and C. H. Wadleigh, "Soil Water and Plant Growth," Chapt. 3 in *Soil Physical Conditions and Plant Growth*, B. T. Shaw, editor, American Society of Agronomy, Monograph II, Academic Press, New York, 1952, pp. 73-251.
- Schlesinger W. H., Reynolds J. F., Cunningham G. L., Huenneke L. F., Jarrell W. M., Virginia R. A. and Whitford W. G. (1990). "Biological feedbacks in global desertification". *Science*, 247: 1043–1048.
- Quiring S. M. and Papakyriakou T. N. (2003). "An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies". *Agr. Forest Meteorol.*, 118: 49–62.
- Shafer, B. A. and L. E. Dezman, 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*, pp. 164-175.
- Smith, D. I., M. F. Hutchinson, and R. J. McArthur, 1993. Australian climatic and agricultural drought: payments and policy. *Drought Network News*, 5(3): 11-12.
- Steila, D., 1987: Drought. *The Encyclopedia of Climatology*, J. E. Oliver and R. W. Fairbridge, Eds., Van Nostrand Reinhold, 388–395.
- Svoboda M., LeCompte D., Hayes M., Heim R., Gleason K., Angel J., Rippey B., Tinker R., Palecki M., Stooksbury D., Miskus D. and Stephens S. (2002). "The



drought monitor". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1181–1190.

- Tallaksen, L. M. & Lanen, H.A.J. van (2004) (Eds) *Hydrological Drought – Process and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. *Development in Water Sciences 48*, Elsevier Science BV, The Netherlands.
- Tannehill, I. R., 1947: *Drought: Its Causes and Effects*. Princeton University Press, 264 pp.
- Thom, H. C. S., with the assistance of the Working Group on Statistical Requirements and Methods in Climatology, WMO-CCI, "Three Chapters on Climatological Analysis," U.S. Weather Bureau manuscript, Aug. 1960, 62 pp.
- Thom, H. C. S., "The Analytical Foundations of Climatology," U.S. Weather Bureau manuscript, Jan. 1954, pp. 24-25.
- Thornthwaite, C. W., "An Approach toward a Rational Classification of Climate," *Geographical Review*, vol. 38, 1948, p. 55-94.
- Thornthwaite, C. W. and B. Holzman, "Measurement of Evaporation from Land and Water Surfaces," *Technical Bulletin No. 817*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, May 1942, 143 pp.
- Turton, A.R. and L. Ohlsson, *Water scarcity and social stability: towards a deeper understanding of the key concepts needed to manage water scarcity in developing countries*, in *Proceedings of the ninth Stockholm water conference*, 24 pp, Stockholm, Sweden, 1999
- Tsakiris G. and Pangalou D. (2009). "Drought Characterisation in the Mediterranean". Springer Science and Business Media B.V.
- U.S. Agricultural Research Administration, "Soil Survey Manual," U.S. Department of Agriculture *Handbook No. 18*, Aug. 1951, p. 185.
- U.S. Weather Bureau, "Climates of the States, Kansas," *Climatology of the United States*, No. 60-14, Nov. 1959.
- U.S. Weather Bureau, "Climates of the States, Iowa," *Climatology of the United States*, No. 60-13, May 1959.



- Van Bavel, C. H. M. and F. J. Verlinden, "Agricultural Drought in North Carolina," North Carolina Agricultural Experiment Station, *Technical Bulletin* No. 122, 1956, 60 pp.
- Veihmeyer, F. J. and A. H. Hendrickson, "Does Transpiration Decrease as Soil Moisture Decreases?" *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 36, June 1955, pp. 425-448.
- Wallen CC, 1967: Aridity definition and their applicability. *Geographiska Annaler*, Stockholm, 49A, 367-384.
- West, E. S. and O. Perkman, "Effects of Soil Moisture on Transpiration," *Australian Journal of Agricultural Research*, vol. 4, No.3, 1953, pp. 326-332.
- White, D. H. and B. O'Meagher, 1995. Coping with exceptional droughts in Australia. *Drought Network News*, 7(2):13-17.
- 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., 1995. Developing a precipitation-based index to assess climatic conditions across Nebraska. Final report submitted to the Natural Resources Commission, Lincoln, Nebraska.
- Wilhite D. A. (1997). "Improving Drought Management in the West - The Role of Mitigation and Preparedness". Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission, National Drought Mitigation Center University of Nebraska.
- Wilhite, D.A., Hayes M.J. and Svoboda M.D. (2000). Drought monitoring assessment: Status and Trends in the United States. In: Drought and drought mitigation in Europe. J. Vogt and F. Somma (eds), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht: 149-160.
- Wilhite, D.A. (2005). Planning for drought: Moving from crisis response to Risk Management. Invited presentation at EWRA 2005, Sep 6-10, Menton, France.



- Willeke, G., J. R. M. Hosking, J. R. Wallis, and N. B. Guttman, 1994. The National Drought Atlas. Institute for Water Resources Report 94-NDS-4, U.S. Army Corps of Engineers.
- World Meteorological Organization, 1975: Drought and agriculture. WMO Note 138, Publ. WMO-392, Geneva, Switzerland, 127 pp.
- Yevjevich, V., 1967: An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Paper 23, Colorado State University, Fort Collins, CO, 18 pp.

7.2 Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2004). Φυσικοί Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών (2004). Σημειώσεις Εκπαιδευτική Εκδρομής Διαδρομής Αθήνας – Θερμοπυλών στο Μάθημα της Γεωλογίας. Αθήνα, σελίδες 10 και 11.
- Ελληνική Μετεωρολογική Εταιρία, 1998: Ερμηνευτικό λεξικό Μετεωρολογικών και Κλιματολογικών όρων, Αθήνα, σελ 161.
- Ευρωπαϊκή Ένωση, 2007. Λειψυδρία και ξηρασία στην Ευρώπη: η Επιτροπή αντιμετωπίζει μια καθοριστικής σημασίας πρόκληση, Βρυξέλλες, 18 Ιουλίου 2007 (COM(2007)414)
- Ευρωπαϊκή Ένωση, Ευρω-Μεσογειακό Περιφερειακό Πρόγραμμα για Τοπική Διαχείριση Υδάτων (MEDAWater), Μεσογειακή Ετοιμότητα και Σχεδιασμός Περιορισμού της Ξηρασίας (MEDROPLAN). (2006). Οδηγίες Διαχείρισης της Ξηρασίας.
- Επιτροπή των Περιφερειών, 2008. Γνωμοδότηση της Επιτροπής των Περιφερειών Η αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας και της ξηρασίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, Επίσημη Εφημερίδα αριθ. C 172 της 05/07/2008 σ. 0049 – 0054.



- Ν. Κωτσοβίνος, Π. Αγγελίδης, 2005. Η Περιβαλλοντική Σημασία του Δείκτη Ξηρασίας SPI. Προτάσεις Εναλλακτικού Στατιστικού Υπολογισμού του. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ.
- Αποστόλου Κ., 2010. Χρήση δεικτών ξηρασίας για την εκτίμηση και πρόβλεψη της ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2010.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Χ. Καρόπουλος, Α. Νασίκας, Ε. Νεστορίδου, και Α. Νικολόπουλος, *Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας – Έτος 2002–2003*, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 14, 215 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2002.
- *Μαμάσης Ν. και Κουτσογιάννης Δ., 2007. Ξηρασία: φυσικές, κοινωνικές και τεχνολογικές πτυχές – το παράδειγμα της Αθήνας. Εθνικό και Μετσόβιο Πολυτεχνείο*
- Μιμίκου Μ.Α. και Φωτόπουλος Φ.Σ. 2004 Σημειώσεις στο Μεταπτυχιακό Μάθημα υδατικό περιβάλλον και ανάπτυξη, Εθνικό και Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΔΠΜΣ περιβάλλον και ανάπτυξη, Αθήνα
- Μπαλούτσος Γ., Μπουρλέτσικας Α. και Γκούμα Β., 2006. Η Ξηρασία ένα ακραίο κλιματικό φαινόμενο με ιδιαιτερότητες στη διαχείριση του Ινστιτούτο μεσογειακών Δασικών οικοσυστημάτων & Τεχνολογίας Δασικών προϊόντων.
- Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί πόροι: Ι Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.



8. Παραρτήματα

8.1 Παράρτημα Ι

Πίνακας 11 – Επιφανειακή Βροχόπτωση (mm) στη λίμνη Υλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2001-02

Υδρολογικό έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1977-78	27,0	49,1	178,4	145,3	76,5	53,3	48,2	10,5	1,2	0,0	8,1	63,5	661,1
1978-79	63,7	46,1	168,9	42,1	60,1	26,7	34,3	38,9	1,7	25,3	41,9	16,8	566,5
1979-80	224,1	148,7	49,4	75,1	86,2	117,8	71,9	39,5	22,6	0,0	2,9	17,3	855,5
1980-81	118,4	33,6	141,1	212,4	53,5	5,7	53,7	8,4	0,0	0,0	15,2	28,7	670,7
1981-82	43,4	101,4	81,5	74,8	122,4	114,1	120,7	39,3	9,6	1,5	2,3	3,7	714,7
1982-83	43,3	119,5	39,4	21,1	94,6	45,0	2,9	22,6	94,4	4,8	11,2	0,0	498,8
1983-84	14,0	66,0	168,6	86,8	89,7	92,1	125,2	10,0	0,5	6,0	32,4	1,9	693,2
1984-85	0,8	81,7	108,2	125,3	37,6	80,3	29,5	8,6	1,1	1,4	0,0	10,7	485,2
1985-86	62,5	94,5	53,2	38,6	86,2	26,9	6,3	61,7	10,4	0,2	0,0	0,3	440,8
1986-87	110,9	15,3	62,8	54,6	58,4	89,7	89,9	5,3	10,8	5,8	15,9	0,0	519,4
1987-88	86,2	70,1	55,7	64,4	58,4	65,0	21,8	11,7	12,6	0,0	0,0	9,2	455,1
1988-89	50,5	157,1	130,7	5,0	25,3	69,1	11,0	25,9	3,3	12,5	0,0	5,3	495,7



Υδρολογικό έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1989-90	70,6	37,5	63,2	5,9	23,0	28,6	26,4	15,9	9,5	3,3	73,7	8,0	365,6
1990-91	38,4	96,0	135,5	137,4	65,9	97,8	99,7	53,5	0,1	3,7	64,8	0,4	793,2
1991-92	61,4	69,5	127,7	32,1	64,0	48,9	17,9	45,6	33,4	3,4	6,2	0,8	510,9
1992-93	46,6	30,9	7,0	44,0	66,9	23,6	16,6	111,7	0,4	0,6	0,4	0,9	349,6
1993-94	0,0	195,7	19,4	165,3	204,5	37,8	33,3	49,8	0,5	36,2	1,5	0,0	744,0
1994-95	146,3	83,6	83,9	117,5	5,8	88,2	33,4	9,4	2,3	0,0	0,0	30,7	601,1
1995-96	31,9	83,5	102,4	84,8	106,2	62,6	21,3	69,4	0,0	2,5	22,9	49,6	637,1
1996-97	44,6	23,4	50,9	130,9	46,7	102,8	57,4	8,0	5,5	2,2	7,4	0,6	480,4
1997-98	50,5	44,1	142,4	22,7	20,4	141,3	14,7	61,2	10,1	2,2	6,6	32,2	548,4
1998-99	44,8	103,4	86,6	45,5	64,1	165,3	26,9	15,7	5,9	0,0	7,5	41,8	607,5
1999-00	69,7	108,9	49,7	33,4	85,1	30,3	11,9	4,0	0,0	0,0	0,0	2,6	395,6
2000-01	45,6	109,0	41,8	93,1	37,5	27,1	43,9	13,8	5,9	12,6	0,0	0,0	430,3
2001-02	0,0	0,0	0,0	0,0	200,0	0,0	0,0	0,0	0,0	131,0	42,0	38,5	411,5



Πίνακας 12 – Επιφανειακή Εξάτμιση (mm) από τη λίμνη Γλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2001-02

Υδρολογικό έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1977-78	69,3	40,3	24,5	28,3	46,5	81,2	115,2	170,7	223,0	233,9	188,6	119,2	1340,7
1978-79	70,4	35,3	27,1	29,8	45,2	83,5	112,5	164,7	219,9	222,0	165,2	102,0	1277,6
1979-80	71,2	38,4	26,2	28,8	42,0	77,8	109,9	157,5	204,0	239,7	193,8	122,3	1311,6
1980-81	76,3	39,9	25,9	27,3	43,1	83,8	116,6	159,6	229,4	223,1	188,6	127,6	1341,2
1981-82	80,6	35,8	28,2	30,2	41,0	76,2	112,2	158,5	217,9	222,0	196,5	131,8	1330,9
1982-83	76,0	36,6	26,4	28,6	41,1	78,6	127,1	180,7	194,8	228,4	187,0	125,6	1330,9
1983-84	71,5	36,9	25,7	30,4	44,1	77,4	109,0	175,2	207,5	222,0	182,2	132,8	1314,7
1984-85	79,5	37,6	25,3	30,8	41,7	77,4	123,0	182,1	221,9	229,5	203,0	123,7	1375,5
1985-86	67,8	39,8	26,4	31,3	44,7	78,2	123,0	164,7	213,0	229,5	206,0	130,2	1354,6
1986-87	72,1	35,9	24,3	31,0	44,8	70,0	113,2	160,7	214,0	243,4	196,5	136,2	1342,1
1987-88	70,8	38,0	26,0	30,9	43,5	79,0	114,2	173,9	221,9	261,9	204,0	130,7	1394,8
1988-89	71,5	34,9	24,8	28,3	44,3	82,8	128,0	164,1	206,6	221,0	198,3	131,2	1335,8
1989-90	69,1	37,3	25,1	28,5	44,4	83,1	121,8	172,0	219,9	238,6	190,3	128,1	1358,2
1990-91	75,5	40,0	26,2	28,7	43,4	79,9	111,9	155,4	220,9	223,1	187,8	127,1	1319,9



Υδρολογικό έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1991-92	76,5	38,6	22,9	28,3	40,7	77,4	119,6	156,4	209,3	219,0	206,0	122,8	1317,5
1992-93	84,8	38,3	25,0	29,0	40,9	78,6	118,4	165,3	220,9	236,2	204,0	132,3	1373,7
1993-94	82,0	36,9	27,1	31,0	43,9	82,4	123,0	179,3	214,0	228,4	213,2	145,3	1406,5
1994-95	77,6	36,5	25,1	30,1	46,9	79,7	115,6	172,6	233,9	232,8	194,5	133,4	1378,7
1995-96	69,9	34,9	26,2	29,3	43,6	73,1	112,2	183,5	215,9	233,9	198,3	127,1	1347,9
1996-97	69,1	39,0	27,1	30,4	43,4	75,8	106,0	177,9	229,4	244,6	185,4	117,9	1346,0
1997-98	64,9	38,5	25,6	29,6	43,5	78,8	116,6	168,8	216,9	231,7	194,5	127,4	1336,8
1998-99	74,1	37,5	25,8	29,6	43,5	78,8	116,6	168,8	216,9	231,7	194,5	127,4	1345,2
1999-00	74,1	37,5	25,8	29,6	43,5	78,8	116,6	168,8	216,9	231,7	194,5	127,4	1345,2
2000-01	74,1	37,5	25,8	29,6	43,5	78,8	116,6	168,8	216,9	231,7	194,5	127,4	1345,2
2001-02	74,1	37,5	25,8	29,6	43,5	78,8	116,6	168,8	216,9	223,4	183,1	114,5	1312,6



Πίνακας 13 – Εξατμισοδιαπνοή³⁴ (mm) από τη λίμνη Υλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2001-02

Υδρολογικό έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1977-78	48,5	28,2	17,2	19,8	32,6	56,8	80,6	119,5	156,1	163,7	132,0	83,4	938,5
1978-79	49,3	24,7	19,0	20,9	31,6	58,5	78,8	115,3	153,9	155,4	115,6	71,4	894,3
1979-80	49,8	26,9	18,3	20,2	29,4	54,5	76,9	110,3	142,8	167,8	135,7	85,6	918,1
1980-81	53,4	27,9	18,1	19,1	30,2	58,7	81,6	111,7	160,6	156,2	132,0	89,3	938,8
1981-82	56,4	25,1	19,7	21,1	28,7	53,3	78,5	111,0	152,5	155,4	137,6	92,3	931,6
1982-83	53,2	25,6	18,5	20,0	28,8	55,0	89,0	126,5	136,4	159,9	130,9	87,9	931,6
1983-84	50,1	25,8	18,0	21,3	30,9	54,2	76,3	122,6	145,3	155,4	127,5	93,0	920,3
1984-85	55,7	26,3	17,7	21,6	29,2	54,2	86,1	127,5	155,3	160,7	142,1	86,6	962,9
1985-86	47,5	27,9	18,5	21,9	31,3	54,7	86,1	115,3	149,1	160,7	144,2	91,1	948,2
1986-87	50,5	25,1	17,0	21,7	31,4	49,0	79,2	112,5	149,8	170,4	137,6	95,3	939,5
1987-88	49,6	26,6	18,2	21,6	30,5	55,3	79,9	121,7	155,3	183,3	142,8	91,5	976,4
1988-89	50,1	24,4	17,4	19,8	31,0	58,0	89,6	114,9	144,6	154,7	138,8	91,8	935,1
1989-90	48,4	26,1	17,6	20,0	31,1	58,2	85,3	120,4	153,9	167,0	133,2	89,7	950,7

³⁴ Υπό την παραδοχή ότι Εξατμισοδιαπνοή = 0,7 * Επιφανειακή Εξάτμιση

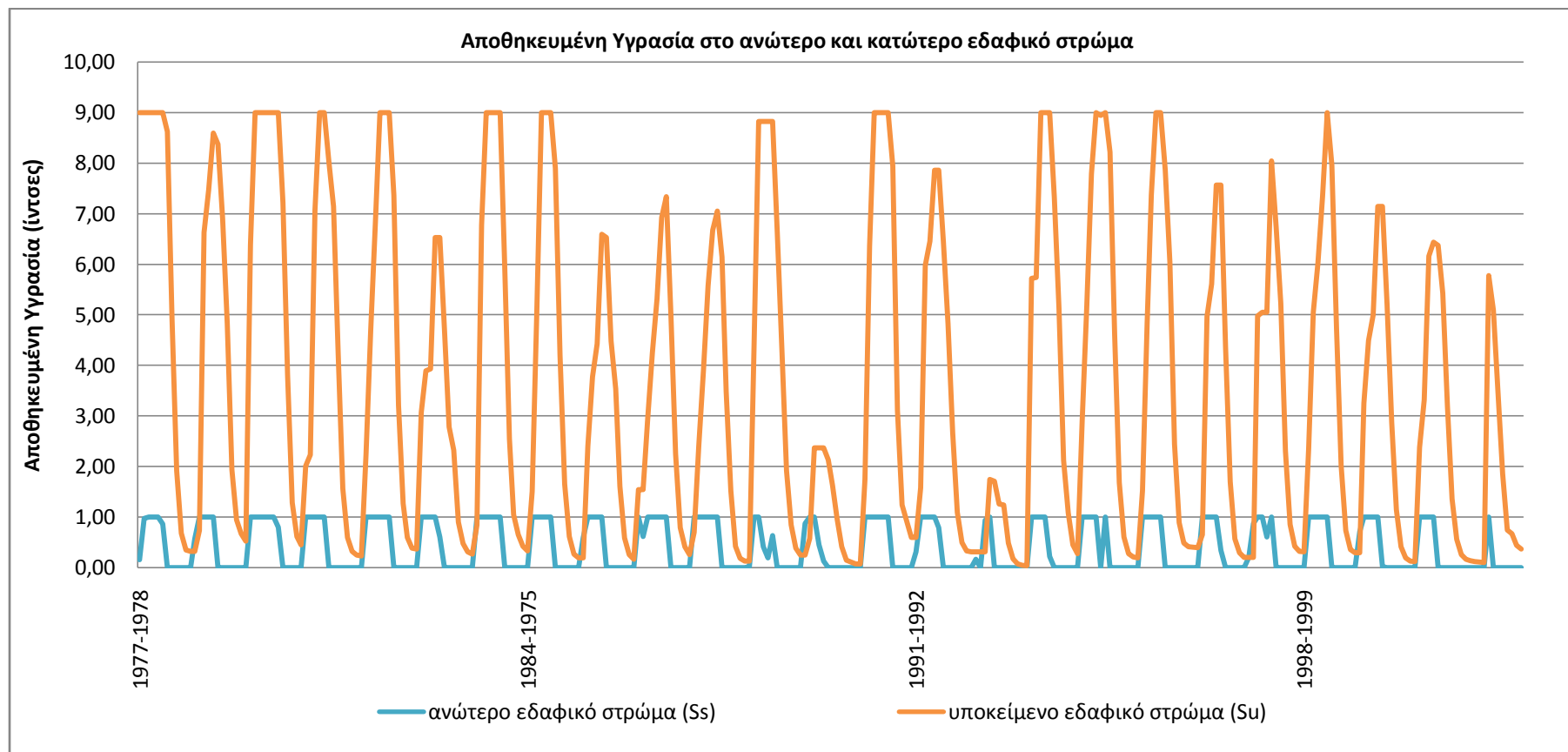


Υδρολογικό έτος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1990-91	52,9	28,0	18,3	20,1	30,4	55,9	78,3	108,8	154,6	156,2	131,5	89,0	923,9
1991-92	53,6	27,0	16,0	19,8	28,5	54,2	83,7	109,5	146,5	153,3	144,2	86,0	922,3
1992-93	59,4	26,8	17,5	20,3	28,6	55,0	82,9	115,7	154,6	165,3	142,8	92,6	961,6
1993-94	57,4	25,8	19,0	21,7	30,7	57,7	86,1	125,5	149,8	159,9	149,2	101,7	984,6
1994-95	54,3	25,6	17,6	21,1	32,8	55,8	80,9	120,8	163,7	163,0	136,2	93,4	965,1
1995-96	48,9	24,4	18,3	20,5	30,5	51,2	78,5	128,5	151,1	163,7	138,8	89,0	943,5
1996-97	48,4	27,3	19,0	21,3	30,4	53,1	74,2	124,5	160,6	171,2	129,8	82,5	942,2
1997-98	45,4	27,0	17,9	20,7	30,5	55,2	81,6	118,2	151,8	162,2	136,2	89,2	935,8
1998-99	51,9	26,3	18,1	20,7	30,5	55,2	81,6	118,2	151,8	162,2	136,2	89,2	941,6
1999-00	51,9	26,3	18,1	20,7	30,5	55,2	81,6	118,2	151,8	162,2	136,2	89,2	941,6
2000-01	51,9	26,3	18,1	20,7	30,5	55,2	81,6	118,2	151,8	162,2	136,2	89,2	941,6
2001-02	51,9	26,3	18,1	20,7	30,5	55,2	81,6	118,2	151,8	156,4	128,2	80,1	918,8



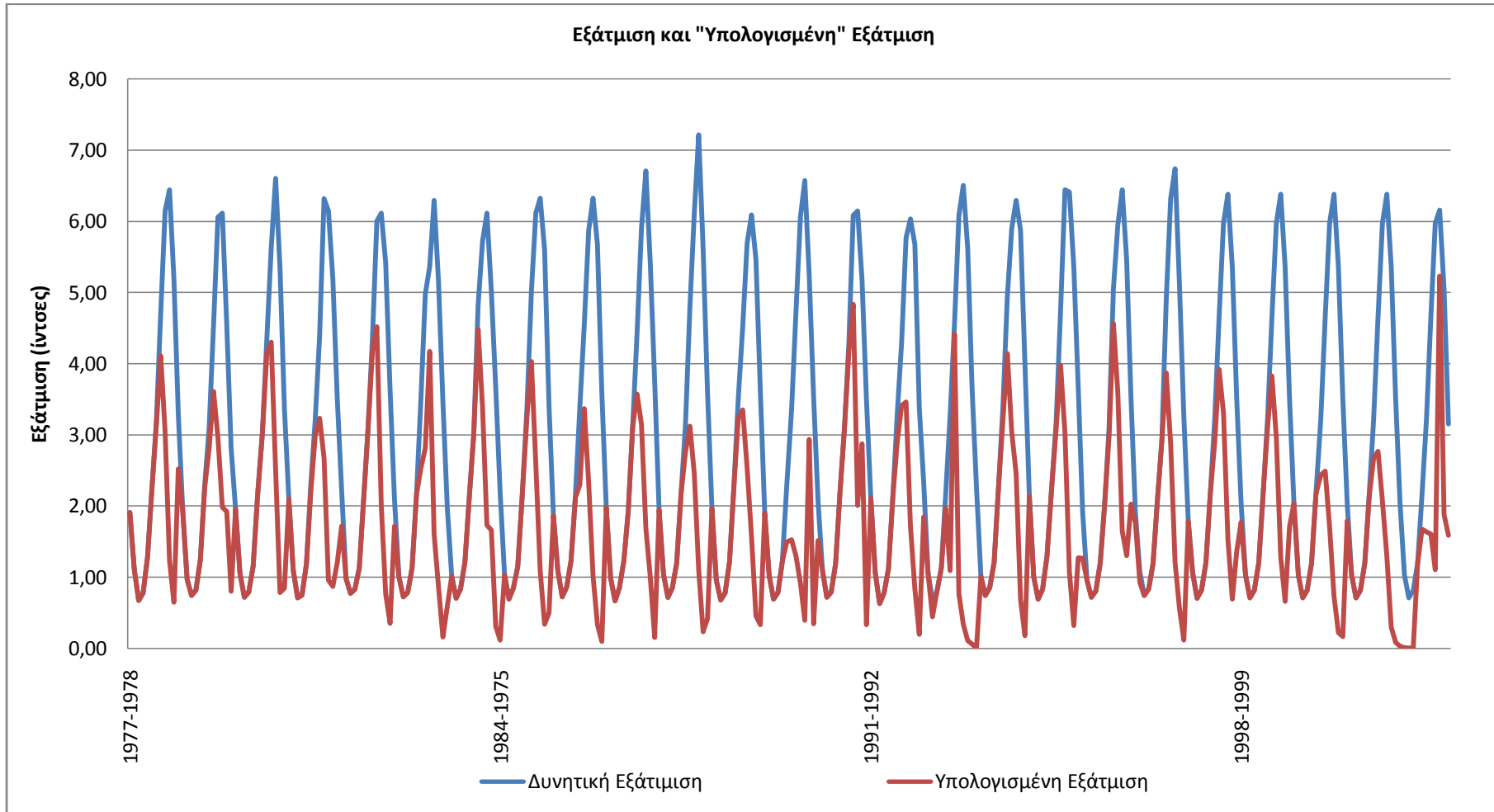
8.2 Παράρτημα II

Διάγραμμα 15 Αποθηκευμένη Υγρασία στο ανώτερο και κατώτερο εδαφικό στρώμα



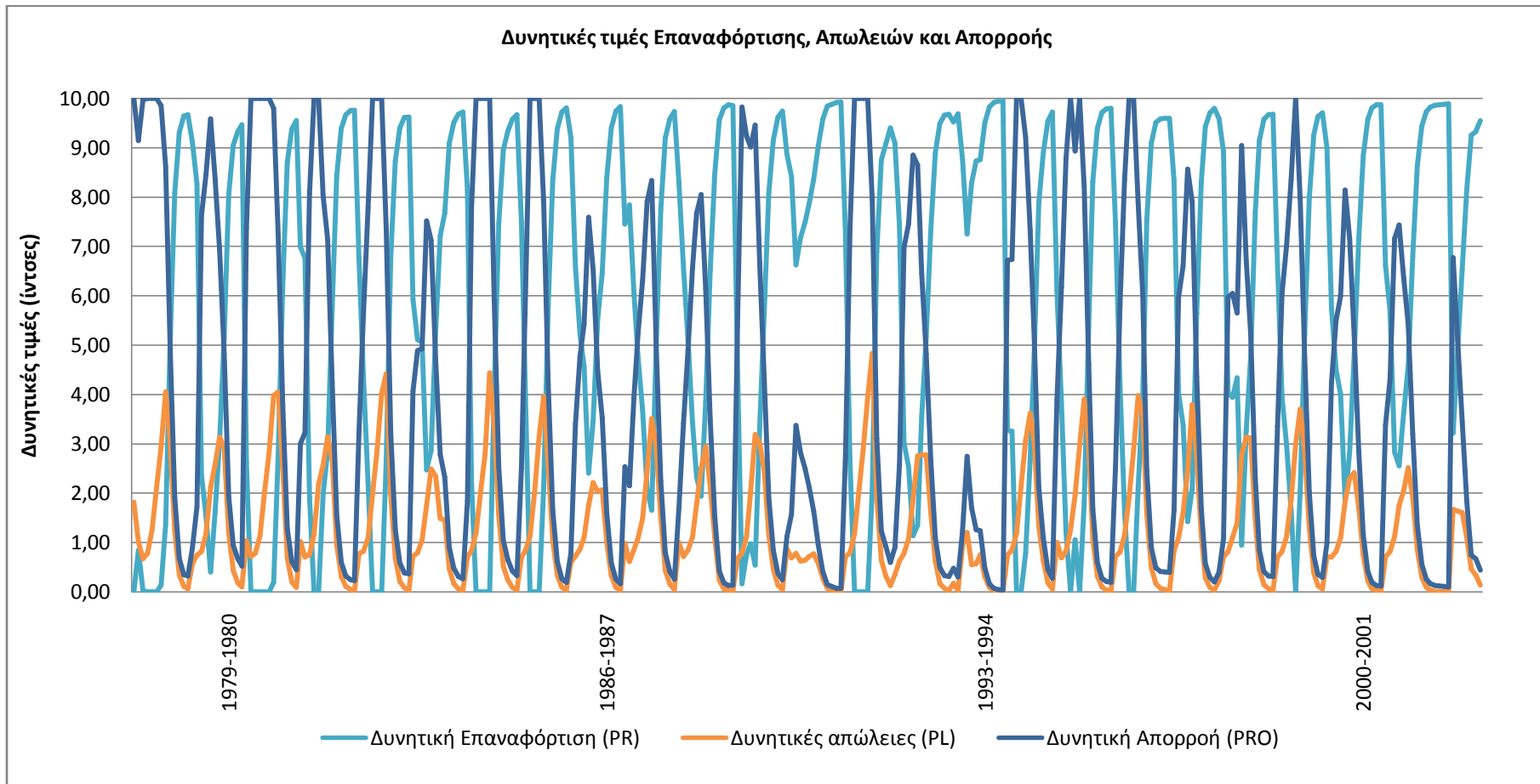


Διάγραμμα 16 Δυνητική εξάτμιση και “Υπολογισμένη” Εξάτμιση



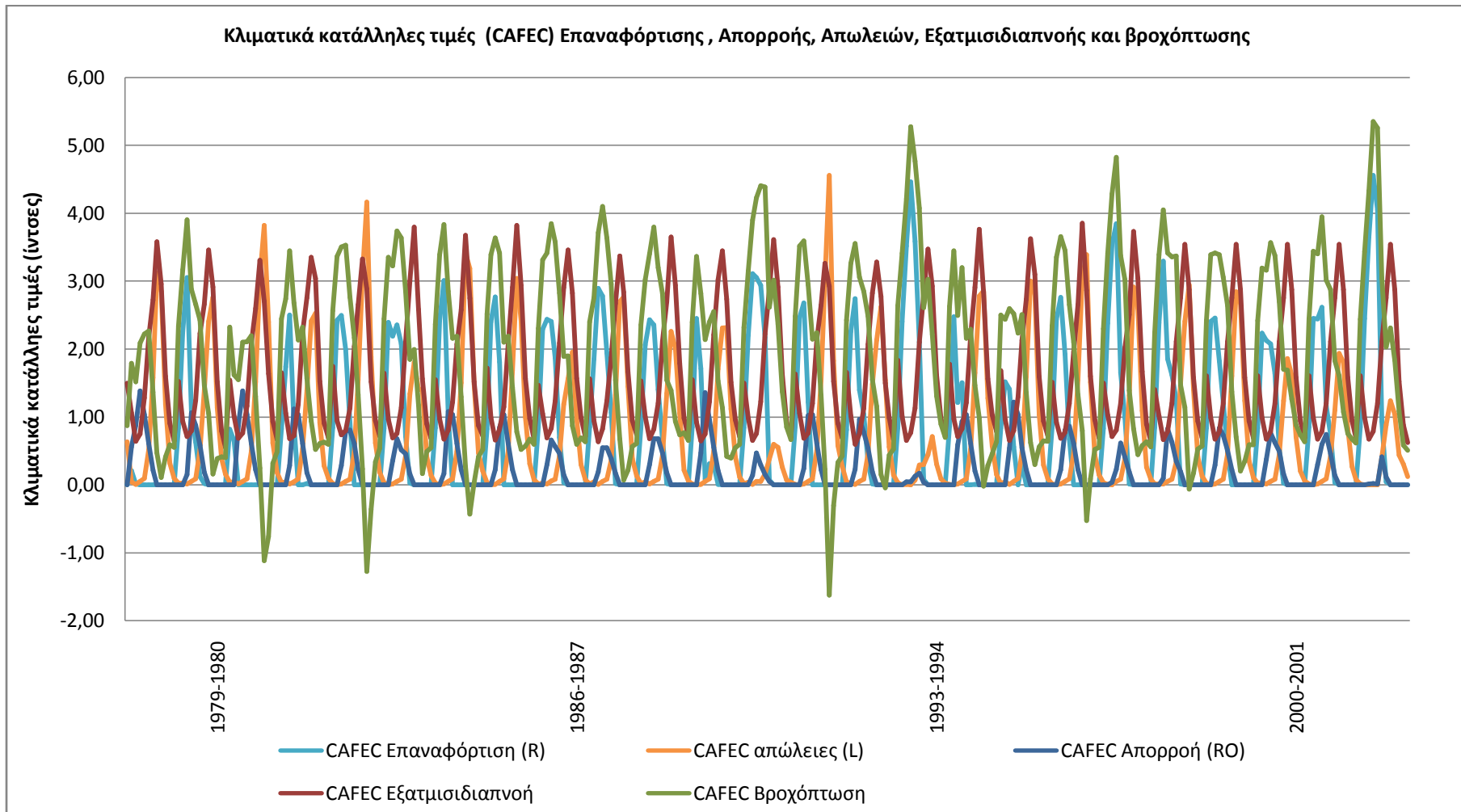


Διάγραμμα 17 Δυνητικές τιμές Επαναφόρτισης, Απωλειών και Απορροής



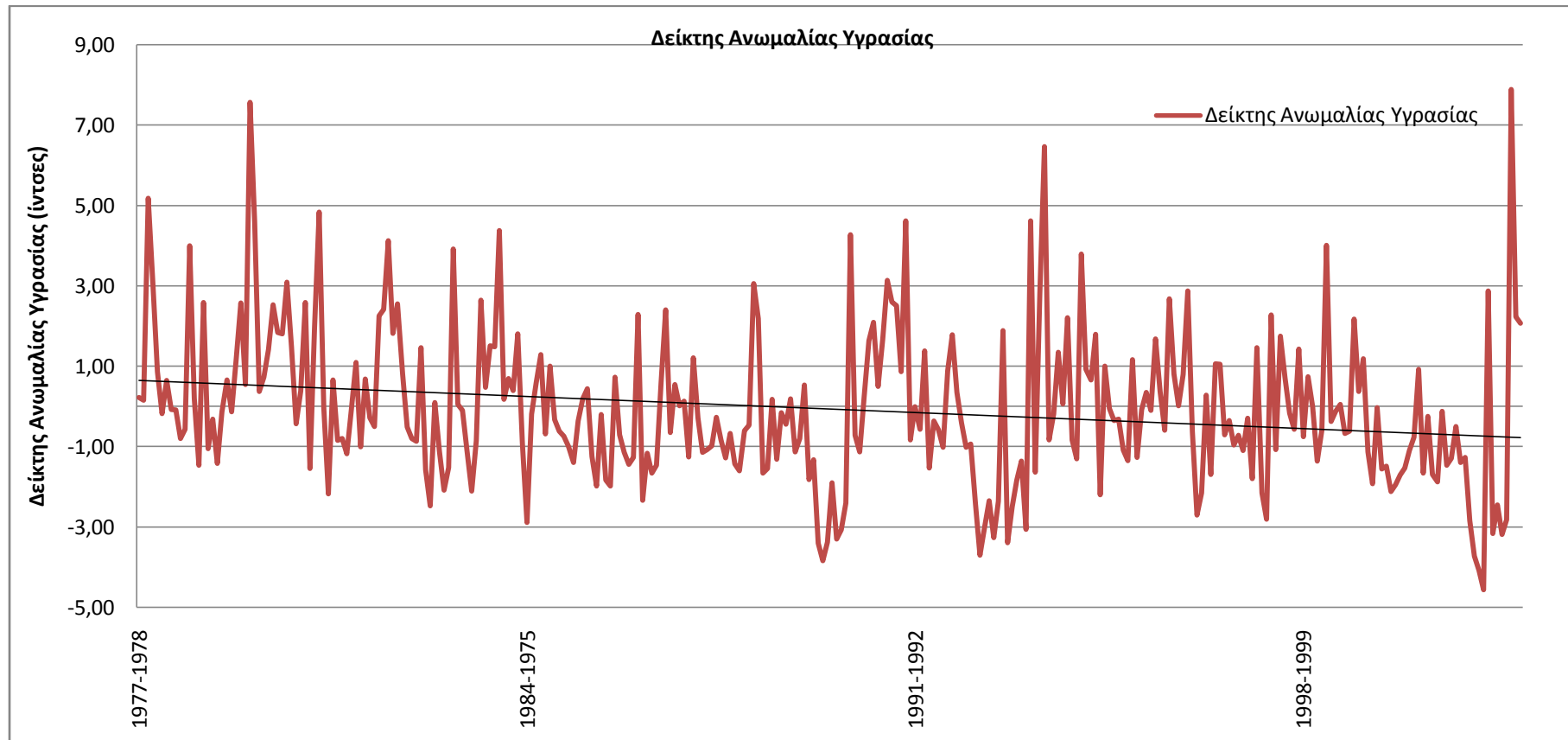


Διάγραμμα 18 Κλιματικά κατάλληλες τιμές (CAFEC) επαναφόρτισης, Απορροής, Απωλειών, Εξατμισοδιαπνοής και Βροχόπτωσης





Διάγραμμα 19 Δείκτης Ανωμαλίας Υγρασίας (Z)





Διάγραμμα 20 Χρονική εξέλιξη Δείκτη Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer υπό την παραδοχή ότι και τα δύο εδαφικά στρώματα κατά τις αρχικές συνθήκες ήταν άδεια

