ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΔΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Χωροχρονική ανάλυση ξηρασίας στη νήσο Κρήτη

ΒΡΟΧΙΔΟΥ Κ. ΑΓΓΕΛΙΚΗ-ΕΛΕΝΗ

Εξεταστική Επιτροπή:

Τσάνης Κ. Ιωάννης (επιβλέπων)
Παρανυχιανάκης Νικόλαος
Χριστόπουλος Διονύσιος

WATER RESOURCES MANAGEMENT & COASTAL ENG LAB

Στους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Χρύσα

και στον αδερφό μου Χρύσανθο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Τσάνη Ιωάννη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε παραχωρώντας μου την παρούσα πολύ ενδιαφέρουσα διπλωματική εργασία. Παράλληλα, τον ευχαριστώ για την επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε, με βάση την εμπειρία του και τις διαρκείς συμβουλές του σε όλη την πορεία της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, Δαλιακόπουλο Ιωάννη, Σειραδάκη Κώστα και Τσιτσιλώνη Σωτήρη, για την βοήθειά τους και την άψογη συνεργασία που είχα μαζί τους.

Επιπλέον, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες Κουτρούλη Αριστείδη και Γρυλλάκη Μανώλη, για την ανεκτίμητη βοήθεια που μου παρείχαν για τον σχεδιασμό της διπλωματικής, την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και για την προθυμία τους να ανταποκριθούν πάντα σε οποιαδήποτε απορία ή πρόβλημα προέκυπτε. Τους ευχαριστώ για την υπομονή που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς μάλιστα και για την ηθική τους συμπαράσταση και στήριξη. Με λίγα λόγια, χωρίς την καθοδήγησή τους, η πραγμάτωση της εργασίας θα ήταν πιθανόν αδύνατη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες i
Πίνακας περιεχομένων ii
Λίστα σχημάτων iv
Λίστα πινάκων v
Περίληψη vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 Ξηρασία – Τύποι ξηρασίας 1
1.2 Παράμετροι εκτίμησης μεγέθους ξηρασίας 4
1.3 Περίοδοι ξηρασίας στη Μεσόγειο 5
1.4 Επιπτώσεις της ξηρασίας και της ερημοποίησης 7
1.4.1 Ερημοποίηση ανά τον κόσμο 7
1.4.2 Ερημοποίηση στην Ελλάδα 9
1.5 Ξηρασία και κλιματική αλλαγή 11
1.6 Ξηρασία και ευρωπαϊκή νομοθεσία 11
1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση και δείκτες ξηρασίας 13
1.8 Σκοπός της εργασίας – Αντικείμενο της έρευνας 15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 16
2.1 Δείκτες ξηρασίας 16
2.2 Ο δείκτης ξηρασίας SPI 18
2.3 Ο δείκτης ξηρασίας SN-SPI 20
2.4 Ο δείκτης ξηρασίας PDSI 21
2.5 Ο δείκτης ξηρασίας RDI 23
2.6 Παρεμβολή βροχομετρικών δεδομένων 24
2.6.1 Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής IDW 26
2.7 Κλιματικά μοντέλα 27
2.7.1 Το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο ECHAM 27
2.7.2 Το περιοχικό κλιματικό μοντέλο REMO 29
2.7.3 Προσομοίωση βροχόπτωσης και προβλήματα κλιματικών μοντέλων 30
2.7.3.1 Διόρθωση σφάλματος πόλωσης βροχόπτωσης (bias correction) 30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 31
3.1 Γενικά στοιχεία 31
3.1.2 Κλίμα 32
3.1.3 Θερμοκρασία 33
3.1.4 Υγρασία 35
3.1.5 Βροχόπτωση 36
3.1.6 Άνεμοι 37
3.1.7 Νέφωση - Ηλιοφάνεια - Ομίχλη 37
3.1.8 Γεωλογικά χαρακτηριστικά 38
3.2 Βροχομετρικά δεδομένα 39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 43
4.1 Ανάλυση ξηρασίας με την εφαρμογή των δεικτών SPI και SN-SPI 43
4.1.1 Χαρακτηρισμός των υδρολογικών λεκανών σε ποσοστό του χρόνου 43
4.1.2 Ποσοστό επιφάνειας υπό συνθήκες ξηρασίας 44
4.1.3 Ανάλυση χρονοσειρών δεικτών SPI/ SN-SPI για πέντε υδρολογικές λεκάνες 46
4.2 Ανάλυση ξηρασίας με την εφαρμογή του δείκτη ξηρασίας RDI 52
4.2.1 Σύγκριση δεικτών RDI και SPI 53
4.3 Ανάλυση ξηρασίας με την εφαρμογή του δείκτη ξηρασίας PDSI 56
4.3.1 Σύγκριση δεικτών PDSI και SPI 56
4.4 Εφαρμογή δείκτη ξηρασίας SPI και SN-SPI για μελλοντικές περιόδους (2010-2100) σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης 58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 61
Βιβλιογραφία 63
Παράρτημα 71

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (Evans, USGS) 2

Σχήμα 1.2: Χάρτης Παγκόσμιου Κινδύνου Ερημοποίησης. Περιοχές: γκρίζες έρημοι, ερυθρές υψηλού κινδύνου ερημοποίησης, κίτρινες μετρίου κινδύνου ερημοποίησης, κυανές μη απειλούμενες περιοχές (USDA - Natural Resources Service).. 9

Σχήμα 1.3: Χάρτης δυνητικού κινδύνου ερημοποίησης της Ελλάδας (Γιάσογλου et al., 2001)…..... 10

Σχήμα 2.1: Παράδειγμα μετατροπής από προσαρμοσμένη γάμμα κατανομή σε κανονική για την περιοχή Fort Collins, Colorado. 18

Σχήμα 3.1: Θέσεις 57 βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν 40

Σχήμα 3.2: Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για 130 λεκάνες της Κρήτης 40

Σχήμα 3.3: Περιοχή μελέτης - λεκάνες Ταυρωνίτη, Βρυσών, Γεροποτάμου, Μύρτου και Πετρά 41

Σχήμα 3.4: Περιοχή μελέτης – σταθμοί Καλύβων, Πόμπιας και Παχιάς Άμμου 42

Σχήμα 4.1: Χρονική κατανομή των λεκανών με τάση προς ακραία ξηρασία 48 μηνών 43

Σχήμα 4.2: Χρονική κατανομή των λεκανών με ακραίες υγρές καιρικές συνθήκες 48 μηνών…… 44

Σχήμα 4.3: Ποσοστό της επιφάνειας της Κρήτης που υπόκειται σε συνθήκες ξηρασίας (SPI48≤0) για την περίοδο 1973-2004 45

Σχήμα 4.4: Ποσοστό της επιφάνειας της Κρήτης που υπόκειται σε κάθε υποσυνθήκη ξηρασίας (-1<SPI48≤0, -1,5<SPI48≤-1, -2<SPI48≤-1,5 και SPI48≤-2/ ελαφρώς ξηρές, μετρίως ξηρές, πολύ ξηρές και ακραίως ξηρές αντίστοιχα) για την περίοδο 1973-2004 45

Σχήμα 4.5: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη του Ταυρωνίτη για την περίοδο 1973-2004 47

Σχήμα 4.6: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη του Πετρά για την περίοδο 1973-2004 49

Σχήμα 4.7: Χρονοσειρές SPI και SN-SPI 48 μηνών για τις λεκάνες του Ταυρωνίτη και του Πετρά για την περίοδο 1973-2004 51

Σχήμα 4.8: Χρονοσειρές SPI και SN-SPI 48 μηνών αντίστοιχα για τις λεκάνες του Ταυρωνίτη και του Πετρά για την περίοδο 1973-2004 52

Σχήμα 4.9: Τιμές δεικτών RDIst των πέντε λεκανών για την περίοδο 1977 – 1997 53

Σχήμα 4.10: Μέση δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) για την περίοδο 1977-97 στις πέντε λεκάνες 54
Σχήμα 4.11: Τιμές δεικτών RDIst και SPI για την περίοδο 1977-97 στις πέντε λεκάνες.... 55
Σχήμα 4.12: Τιμές δείκτη PDSI τριών σταθμών για την περίοδο 1978 – 2004 56
Σχήμα 4.13: Δείκτες ξηρασίας PDSI, SC-PDSI και SPI12 για την περίοδο 1978-2004 (AWC=160 mm/m) για τους σταθμούς Καλυβών, Πόμπιας και Παχιάς Άμμου..... 57
Σχήμα 4.14: Χρονοσειρές για την διαμόρφωση μελλοντικών σεναρίων για τις λεκάνες Ταυρωνίτη, Γεροποτάμου και Πετρά με τη χρήση των δεικτών SPI και SN-SPI για την περίοδο 2010-2100 59
Σχήμα 4.15: Χρονοσειρές για την διαμόρφωση μελλοντικών σεναρίων για τις λεκάνες Ταυρωνίτη, Γεροποτάμου και Πετρά με τη χρήση του δείκτη SN-SPI για την περίοδο 2010-2100 60
Σχήμα 4.16: Ποσοστό της επιφάνειας της Κρήτης που υπόκειται σε κάθε υποσυνθήκη ξηρασίας (-1<SPI48≤0, -1,5<SPI48≤-1, -2<SPI48≤-1,5 και SPI48≤-2/ ελαφρώς ξηρές, μετρίως ξηρές, πολύ ξηρές και ακραίως ξηρές αντίστοιχα) για την περίοδο 2010-2100 60

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός συνθηκών ανάλογα με την τιμή του δείκτη SPI 20
Πίνακας 3.1: Θερμοκρασιακά δεδομένα τεσσάρων (4) σταθμών..... 34
Πίνακας 3.2: Τιμές μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης και μέσου υψομέτρου 5 λεκανών..... 41
Πίνακας 4.1: Παράδειγμα διαφοροποίησης δεικτών SPI και SN-SPI 52

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανά χείρας διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη τόσο της χωρικής και χρονικής κατανομής όσο και της έντασης του φαινομένου της ξηρασίας στη νήσο Κρήτη με τη χρήση τριών δεικτών ξηρασίας (SPI, RDI και PDSI). Η πρόταση ενός νέου δείκτη ξηρασίας, του SN-SPI (Spatially Normalized Standardized Precipitation Index), που βασίζεται στον SPI (Standardized Precipitation Index), καθιστά ικανή την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών υδρολογικών λεκανών και αποδίδει με αυτόν τον τρόπο την χωρική σχετικότητα που περικλείει η έννοια της ξηρασίας. Γενικότερα, ο νέος αυτός δείκτης φιλοδοξεί να καλύψει μέρος των υφιστάμενων κενών της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την χωρική σύγκριση με άξονα το πολύπλοκο φαινόμενο της ξηρασίας.

Η πραγματοποίηση της χωροχρονικής ανάλυσης των χρονοσειρών για περίοδο 30 παρελθόντων ετών (1973-2004) μαρτυρά συνθήκες ξηρασίας κυρίως την περίοδο 1985-1995 στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της Κρήτης. Αξιοσημείωτο είναι ότι η μέση τάση κατά τη διάρκεια των 30 ετών δείχνει ότι το 45,8% του χρόνου πάνω από το 50% της επιφάνειας της Κρήτης υπόκειται σε συνθήκες ξηρασίας.

Προκειμένου να τεκμηριωθούν τα αποτελέσματα του δείκτη SPI, γίνεται σύγκριση με τους RDI και PDSI προς αναζήτηση νέων πληροφοριών. Τελικά, η σύγκριση δίνει παρόμοια αποτελέσματα για τον RDI ενώ ο SPI «ακολουθεί» τον PDSI χρονικά περίπου μετά από ένα έτος και ξεκάθαρα ταυτίζονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές αμφοτέρων των δεικτών. Τέλος, η μελέτη μελλοντικών σεναρίων ξηρασίας για 90 επερχόμενα έτη (2010-2100) (με τη βοήθεια του περιοχικού κλιματικού μοντέλου REMO που παρείχε τα μελλοντικά δεδομένα βροχόπτωσης) δείχνει μια τάση προς μείωση των βροχοπτώσεων και αύξηση του ποσοστού του χρόνου κατά το οποίο πάνω από το 50% της επιφάνειας της Κρήτης εμφανίζει φαινόμενα ξηρασίας (54,1%).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

1.1 Ξηρασία – Τύποι ξηρασίας

Ο καθορισμός της έννοιας της ξηρασίας αποτελούσε ανέκαθεν τροχοπέδη στην παρακολούθηση και ανάλυση του φαινομένου, καθώς η ιδιαίτερη πολυπλοκότητά του σε σχέση με τις υπόλοιπες φυσικές καταστροφές, καθιστούν δύσκολη την πρόβλεψη της έναρξης και της λήξης του (McKee *et al*., 1993). Έχουν αποδοθεί περισσότεροι από 150 ορισμοί στη διεθνή βιβλιογραφία˙ «η ξηρασία αποτελεί μια κατάσταση σημαντικής μείωσης των διαθέσιμων αποθεμάτων νερού (σε σύγκριση με μια φυσιολογική τιμή) για μεγάλο χρονικό διάστημα σε μια μεγάλη περιοχή και χαρακτηρίζεται από τρεις διαστάσεις: την ένταση, την διάρκεια και την χωρική επέκταση» (Rossi, 2000; Rossi *et al*., 1992). Τα δυσμενή αποτελέσματα της ξηρασίας δρουν αθροιστικά ακόμα και μετά από την λήξη του φαινομένου και γι' αυτό χαρακτηρίζεται ως «υφέρπον φαινόμενο» (Tannehill, 1947).

Εντούτοις, κοινός παρονομαστής όλων των ορισμών είναι ότι η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή υγρασία, η οποία οφείλεται σε έλλειμμα βροχόπτωσης για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Αρχικά, το πρόβλημα σχετίζεται με την χρονική περίοδο κατά την οποία παρατηρείται η «συσσώρευση» των ελλειμμάτων και έπειτα με το πώς συνδέεται το έλλειμμα βροχόπτωσης με το έλλειμμα στη χρήση υδατικών πόρων.

Η εισροή του γλυκού νερού σε μια περιοχή γίνεται με τη διεργασία της κατακρήμνισης (βροχόπτωση, χιονόπτωση κ.λπ.), ενώ στη συνέχεια το νερό μετασχηματίζεται σε παροχή των ποταμών και πηγών, ή αποθηκεύεται προσωρινά ως εδαφική υγρασία ή απόθεμα στις φυσικές και τεχνητές λίμνες και τους υπόγειους υδροφορείς, μέχρι να εξατμιστεί ή να καταλήξει στη θάλασσα. Οι απαιτήσεις νερού περιλαμβάνουν την άρδευση καλλιεργειών, την ύδρευση ανθρώπων και ζώων, την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη λειτουργία της βιομηχανίας, την παροχή για τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος, την αναψυχή και την ναυσιπλοΐα σε ποτάμια και λίμνες.

Σχήμα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (Evans, USGS)

Είναι προφανές ότι η ξηρασία εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ενός φυσικού φαινομένου (λιγότερη βροχή από την αναμενόμενη και κατά συνέπεια μικρότερη παρουσία νερού) με τη λειτουργία των υδατικών συστημάτων από τον άνθρωπο, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε νερό (Μαμάσης *et al*., 2007).

Η ξηρασία, η ξηρότητα, η λειψυδρία και η ερημοποίηση είναι κοινές και επικαλυπτόμενες διεργασίες στις Μεσογειακές χώρες και συχνά παρερμηνεύονται, όταν χρησιμοποιούνται (Ameziane *et al*., 2005).

• **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.

• **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).

• Η **λειψυδρία**: 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 ζήτησης ύδατος, που σχετίζεται με πληθυσμιακή ανάπτυξη, επέκταση των ξηρικών καλλιεργειών, κ.λπ..

• **Ερημοποίηση**: η υποβάθμιση του εδάφους σε ξηρές, ημίξηρες και άλλες περιοχές σε μια ξηρή περίοδο. Η ερημοποίηση προκαλείται αρχικά από υπέρ-εκμετάλλευση και ακατάλληλη εδαφική χρήση σε συνδυασμό με την κλιματική διακύμανση.

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

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

Παρακάτω γίνεται αναφορά των τεσσάρων τύπων ξηρασίας (Μαμάσης *et al*., 2007).

Η μετεωρολογική - κλιματική ξηρασία ορίζεται με βάση την απόκλιση της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, αριθμός ημερών βροχής) από την αναμενόμενη, με βάση το κλίμα της περιοχής, δηλαδή όταν για μία ορισμένη περίοδο οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις είναι σημαντικά μικρότερες από τον μέσο όρο ή μικρότερες από ένα κρίσιμο όριο που προσδιορίζει την έναρξη περιόδου ξηρασίας.

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.

Η υδρολογική ξηρασία σχετίζεται με τα αποτελέσματα της μειωμένης βροχόπτωσης στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή του νερού και εκδηλώνεται με τη μείωση της

εδαφικής υγρασίας, της παροχής των ποταμών και πηγών, της στάθμης λιμνών και ταμιευτήρων και των αποθεμάτων των υπόγειων νερών.

Η 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 η υδροηλεκτρική ενέργεια. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία συμβαίνει όταν η ζήτηση για αυτά τα αγαθά ξεπερνά την προσφορά ως αποτέλεσμα της έλλειψης νερού, όμως η εμφάνισή της εξαρτάται σημαντικά και από τις κοινωνικές και οικονομικές διαδικασίες προσφοράς και ζήτησης των παραπάνω αγαθών. Ακόμη, μπορεί να προκληθεί και μέσα από πολιτικές διαδικασίες, όπως οι διαμάχες μεταξύ κρατών και κοινωνικών ομάδων για τη χρήση του νερού ή η μετακίνηση μεγάλων πληθυσμών σε άνυδρες περιοχές.

1.2 Παράμετροι εκτίμησης μεγέθους ξηρασίας

Προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος μιας ξηρασίας λαμβάνονται υπόψη οι παράγοντες της έντασης, της χρονικής διάρκειας, της γεωγραφικής έκτασης και της καταστροφικότητας.

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 στατιστικά, με την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των συγκεκριμένων τιμών των μετεωρολογικών μεταβλητών ή με τη χρήση δεικτών που ενσωματώνουν τις κλιματικές παραμέτρους.

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

Η γεωγραφική έκταση κάθε ξηρασίας συναρτάται άμεσα με τα μετεωρολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και τα υπάρχοντα έργα μεταφοράς νερού. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση υδατικών συστημάτων που τροφοδοτούνται με νερό από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές 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.

Η καταστροφικότητα 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 την 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 με την αποτελεσματικότητα της βροχής να καλύψει τις ανθρώπινες ανάγκες και κατά συνέπεια με την καταστροφικότητα 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 κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές παραμέτρους

1.3 Περίοδοι ξηρασίας στη Μεσόγειο

Η ξηρασία είναι ένα παροδικό φαινόμενο που επηρεάζει μεγάλες εκτάσεις και έχει μεγάλη διάρκεια. Το κλίμα στις περιοχές γύρω από την Ανατολική Μεσόγειο, έχει υποστεί κατά βάση τις ίδιες μεταβολές που έχει υποστεί το κλίμα σε ολόκληρο τον πλανήτη και κυρίως στο Βόρειο ημισφαίριο. Η περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και συνεπώς και ο ευρύτερος περιαιγαιακός χώρος, διαφοροποιείται από πολλές άλλες περιοχές, από το γεγονός ότι αυτές οι μεταβολές δεν είχαν την ένταση που είχαν σε άλλες περιοχές του πλανήτη και συνεπώς και οι επιπτώσεις στον άνθρωπο δεν ήταν ίσως καθοριστικές, όπως για παράδειγμα συνέβη κατά τις περιόδους παγετώνων στην Κεντρική Ευρώπη. Η περιοδικότητα των κλιματικών μεταβολών είναι καθοριστικής σημασίας που έχουν επηρεάσει, αλλού άμεσα και αλλού έμμεσα, τις ανθρώπινες κοινωνίες και την ιστορική και την πολιτιστική ανάπτυξη. Εκτός όμως της περιοδικής μεταβολής της θερμοκρασίας, περιοδικότητα παρουσιάζουν το φαινόμενο της ξηρασίας και οι βροχοπτώσεις. Έτσι είναι

γνωστές περίοδοι παρατεταμένων και έντονων ξηρασιών, αλλά και υγρών περιόδων με πλούσιες βροχοπτώσεις, κατά την διάρκεια της ιστορικής, προϊστορικής αλλά και μυθολογικής περιόδου της Ελλάδας. Καταγεγραμμένες περίοδοι ξηρασίας είναι η ξηρασία της Αγοράς, που έγινε κατά την διάρκεια του 8ου αιώνα π.Χ, η Ρωμαϊκή ξηρασία, που έγινε κατά τον 2ο μ.Χ. αιώνα, η ξηρασία της Νεμέας του 5ου μ.Χ. αιώνα, η ξηρασία Ακομινάτου του 12ου μ.Χ. αιώνα και η ξηρασία Sahel κατά την σημερινή περίοδο (Estrela *et al*., 2000).

Κοινό χαρακτηριστικό στις ανακατασκευασμένες χρονοσειρές θερμοκρασίας παγκόσμιας ή ημισφαιρικής κλίμακας είναι η άνοδός της κατά το τέλος του εικοστού αιώνα. Η άνοδος αυτή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το ημισφαίριο, ενώ σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται σε διαφορετικές περιοχές και εποχές. Κάποιες περιοχές εμφανίζονται πιο ευαίσθητες σε τέτοιου είδους αλλαγές, όπως η περιοχή της μεσογείου όπου τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα προβλέπουν σημαντική μείωση της βροχόπτωσης.

Επίσης, αναμένεται ακραία κλιματικά γεγονότα να γίνουν πιο συχνά και πιο έντονα σε αυτές τις περιοχές. Ως παράδειγμα, η πιθανότητα πολύ θερμών περιόδων όπως αυτή που καταγράφηκε το καλοκαίρι του 2003, έχει αυξηθεί. Η πολυπλοκότητα του μεσογειακού κλίματος μπορεί να επηρεαστεί από τη θέρμανση του πλανήτη με διαφορετική χωρική μεταβλητότητα, όπου μεγάλες διαφορές έχουν παρουσιαστεί μεταξύ ανατολικής και δυτικής μεσογείου στο ύψος των χειμερινών βροχοπτώσεων και των καλοκαιρινών θερμοκρασιών. Μελέτες για το κλίμα της μεσογείου έχουν διεξαχθεί για διάφορες περιοχές, όπως για την ιβηρική χερσόνησο (Barriendos and Rodrigo 2005), τη νότια Ισπανία (Rodrigo *et al*., 1999, 2001), Νοτιοανατολική μεσόγειο (Touchan *et al*., 2003, 2005) και άλλες. Τα τελευταία 40 χρόνια η ιβηρική χερσόνησος, και ιδιαιτέρα το νοτιοανατολικό μέρος της, δοκιμάστηκε από παρατεταμένες περιόδους κάτω του κανονικού ύψους βροχόπτωσης. Το επεισόδιο ξηρασίας αυτό που συνέβη στα νότια κατά το 1990, ήταν ένα από τα μεγαλύτερα και πιο έντονα των τελευταίων 65 ετών, κατά Merayo *et al*. (1997). Παρόλα αυτά, χρειάζεται προσοχή στην εξαγωγή συμπερασμάτων για το μεσογειακό κλίμα, καθώς ένα από τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του είναι η μεγάλη μεταβλητότητα του στα ετήσια και υπερετήσια ύψη βροχόπτωσης.

1.4 Επιπτώσεις της ξηρασίας και της ερημοποίησης

Η ξηρασία παράγει ένα δίκτυο επιπτώσεων που μπορούν να είναι είτε άμεσες είτε έμμεσες σε οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο (NDMC, 2008). Οι έμμεσες επιπτώσεις αποτελούν απόρροια των άμεσων επιπτώσεων. Υψίστης σημασίας θεωρούνται οι οικονομικές συνέπειες, οι οποίες περιλαμβάνουν απώλειες στη ζωική και γεωργική παραγωγή και ως εκ τούτου άνοδο στις τιμές των αγαθών και υπηρεσιών σχετικών με το νερό, απώλειες από επιχειρήσεις αναψυχής, καθώς επίσης και ζημίες στις οικολογικές υπηρεσίες των φυσικών οικοσυστημάτων.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αφορούν την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, την εισχώρηση αλμυρού νερού (υφαλμύρωση), με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού και των συστημάτων φυσικής προστασίας. Παράλληλα, δυσμενείς επιπτώσεις αποτελούν και η αύξηση των δασικών πυρκαγιών, η ξήρανση και η προσβολή πολλών δασικών ειδών από ασθένειες και έντομα, η υποβάθμιση των βιοτόπων της άγριας πανίδας, η μείωση του πληθυσμού της ιχθυοπανίδας στα υδατορεύματα, η ρύπανση της ατμόσφαιρας και η αισθητική υποβάθμιση των τοπίων.

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η αύξηση της ανεργίας, προβλήματα υγείας λόγω υποβάθμισης του περιβάλλοντος, μετακινήσεις πληθυσμών, αλλαγές χρήσεων γης και επιπτώσεις στον τρόπο ζωής.

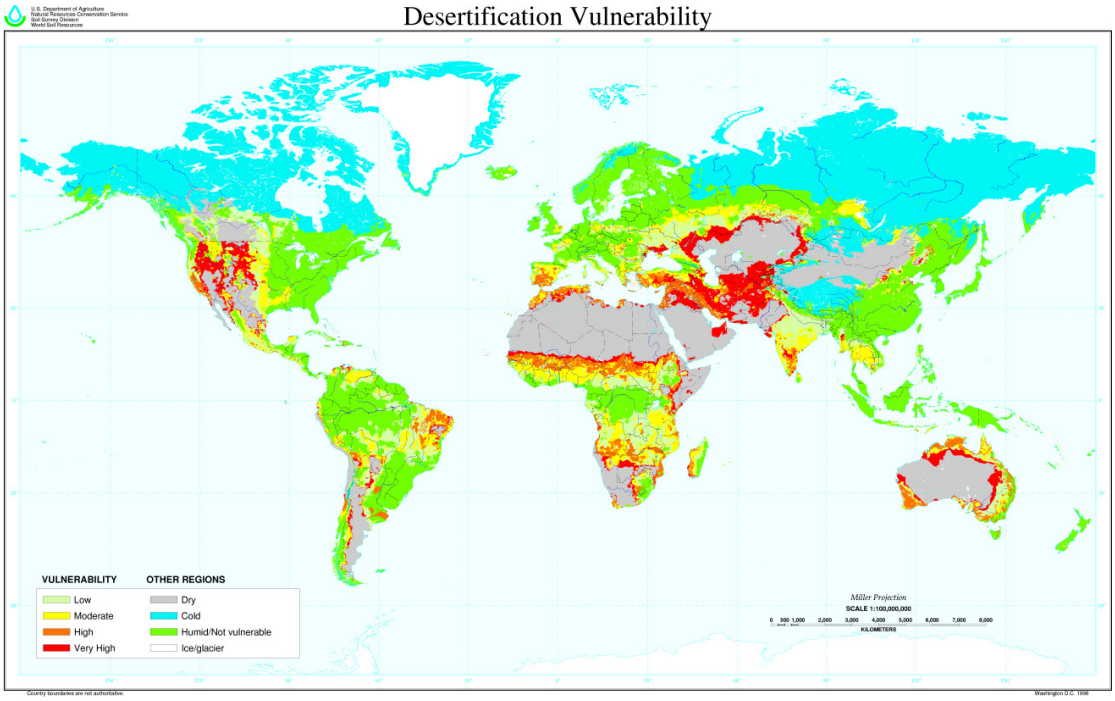
1.4.1 Ερημοποίηση ανά τον κόσμο

Σύμφωνα με τη σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών κατά της ερημοποίησης (UNCCD), το φαινόμενο ορίζεται ως «η υποβάθμιση των γαιών στις ξηρές, ημί-ξηρες και ξηρές ύφυγρες περιοχές, που προκαλείται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων και των κλιματικών αλλαγών και των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων». Σύμφωνα με τον ορισμό, ως «ξηρές, ημίξηρες και ξηρές ύφυγρες περιοχές» μπορούν να θεωρηθούν οι περιοχές, με εξαίρεση τις πολικές και τις υπο-πολικές, των οποίων ο λόγος των ετησίων κατακρημνισμάτων προς τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή έχει τιμές από 0.05 έως 0.65 (UNCCD).

Η ερημοποίηση αποτελεί έναν από τους κυριότερους μηχανισμούς καταστροφής παραγωγικών περιοχών εδώ και πολλούς αιώνες. Συνεπώς δεν είναι καινούριο φαινόμενο, ούτε η παρουσίαση του οφείλεται αποκλειστικά στην ανθρώπινη παρέμβαση. Από ίχνη

παλιών λιμνών, απολιθώματα φυτών και απολιθωμένα εδάφη μπορεί κανείς με ασφάλεια να συμπεράνει ότι, πριν αρκετές χιλιάδες χρόνια, στη σημερινή έρημο της Σαχάρας επικρατούσαν τροπικές συνθήκες και υπήρχε πλούσια βλάστηση. Απλώς, τα τελευταία 50 χρόνια, η ανθρώπινη παρέμβαση έχει αυξήσει την ένταση του φαινομένου αυτού, με αποτέλεσμα να εξελιχθεί σε απειλή για πολλές περιοχές του πλανήτη. Το 1/3 της παγκόσμιας έκτασης της γης πλήττεται από την ερημοποίηση.

Οι ευαίσθητες στην ερημοποίηση περιοχές καλύπτουν περίπου το 47% της στερεάς επιφάνειας του πλανήτη και απειλούνται από αυτή ένα δισεκατομμύριο άνθρωποι σε 100 περίπου χώρες. Στην Αφρική εκτιμάται ότι έχουν υποστεί το φαινόμενο δέκα δισεκατομμύρια στρέμματα περίπου. Υπολογίζεται ότι σήμερα η έρημος προχωρεί σε διάφορες περιοχές της Γης κατά αρκετά χιλιόμετρα ετησίως. Οι έρημοι και οι απειλούμενες από την ερημοποίηση περιοχές της Γης εμφανίζονται στο Σχήμα 1.2. Οι ευαίσθητες περιοχές της Ευρώπης βρίσκονται κυρίως στις χώρες της βόρειας Μεσογείου και συμπίπτουν σχεδόν με τη ζώνη της εξάπλωσης της ελαίας. Η ερημοποίηση απειλεί και ορισμένες περιοχές της Βαλκανικής, όπως και του ανατολικού τμήματος της Κεντρικής Ευρώπης. Για την ανατολική Μεσόγειο τα πράγματα είναι ιδιαίτερα δυσοίωνα για τα επόμενα χρόνια λόγω της ανόδου της μέσης θερμοκρασίας και της αύξησης των ξηρασιών, κυρίως λόγω του αναμενόμενου διπλασιασμού των κατοίκων της Μέσης Ανατολής, ο οποίος αναμένεται να ανέλθει στα 400 εκατομμύρια (Τσιραντωνάκης, 2007).



Σχήμα 1.2: Χάρτης Παγκόσμιου Κινδύνου Ερημοποίησης. Περιοχές: γκρίζες έρημοι, ερυθρές υψηλού κινδύνου ερημοποίησης, κίτρινες μετρίου κινδύνου ερημοποίησης, κυανές μη απειλούμενες περιοχές (USDA - Natural Resources Service).

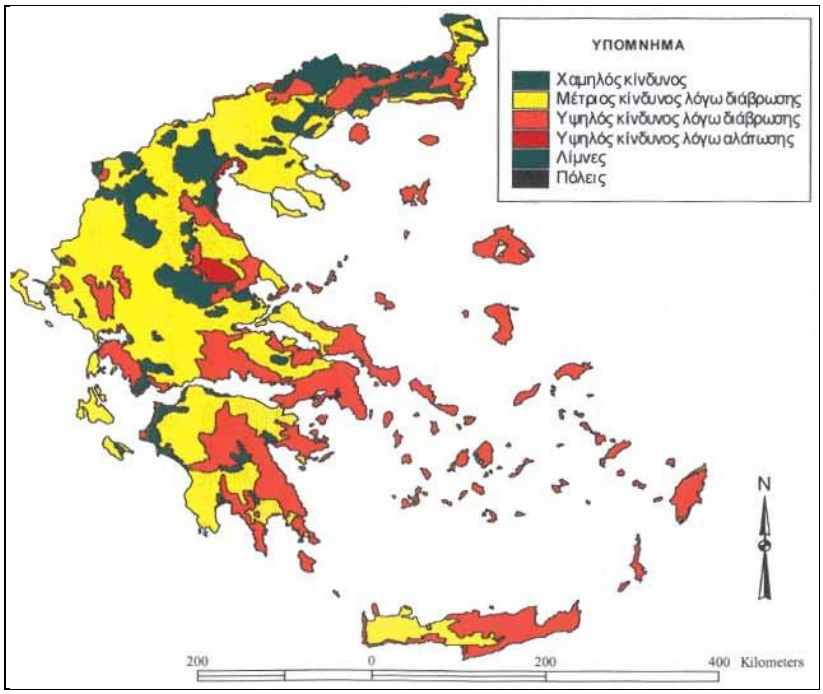
1.4.2 Ερημοποίηση στην Ελλάδα

Η ερημοποίηση σύμφωνα με τα προγράμματα CORINE και MEDALUS απειλεί πάνω από 30% της ελληνικής επικράτειας (Σχήμα 1.3). Είναι ο σημαντικότερος κίνδυνος υποβάθμισης γαιών στην Ελλάδα, αλλά και στην υπόλοιπη Μεσόγειο. Ο υψηλός κίνδυνος ερημοποίησης λόγω κλίματος βρίσκεται στη θερμο-μεσογειακή ζώνη και περιλαμβάνει τα νότια παράλια της κεντρικής και ανατολικής Κρήτης και άλλες περιοχές της Ελλάδας.

Τα πιο ευαίσθητα στη διάβρωση πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά που αποτελούνται από αβαθή εδάφη. Η Ελλάδα και ειδικά η Κρήτη είναι πλούσια σε ασβεστολιθικά πετρώματα με μεγάλη υδατοπερατότητα και ξηροθερμικό μικροκλίμα. Αν και η μάργα δίνει βαθύ έδαφος, στις περιόδους ξηρασίας έχουμε πολύ ξηροθερμικό περιβάλλον και γίνεται πολύ ευδιάβρωτη. Μάργα υπάρχει σε πολλές περιοχές της Ανατολικής Κρήτης. Αλλά και όσον αφορά στην υδρολογία μιας περιοχής, είναι απαραίτητο να έχουμε λεπτομερείς πληροφορίες για την εξατμισοδιαπνοή μιας περιοχής, τη βροχόπτωση, την επιφανειακή απορροή, τη διείσδυση και τα υπόγεια νερά.

Πολύ σημαντικούς δείκτες ερημοποίησης στην ημιξηρική ζώνη αποτελούν α) η ικανότητα βλάστησης του επιφανειακού εδάφους ώστε να έχει ικανή κάλυψη για να αποφευχθεί η διάβρωση και β) η διαβρωσιμότητα του εδάφους, δηλαδή το κατά πόσον το ίδιο το έδαφος είναι εύκολο να διαβρωθεί.

Στα πλαίσια των διεθνών συνθηκών για την προστασία του περιβάλλοντος (Ατζέντα 21), η Ελλάδα δημιούργησε το 1996 με νόμο την Εθνική Επιτροπή για την καταπολέμηση της ερημοποίησης το 1996, ενώ το 2001 κατετέθη το Σχέδιο Δράσης για την καταπολέμηση της ερημοποίησης. Με βάση τα ανωτέρω και σύμφωνα με τη Συνθήκη των Ηνωμένων Εθνών για την Απερήμωση, του 1994/21, η οποία ήταν επόμενο της Συνόδου του Ρίο, η Κρήτη κατατάσσεται στα πιο ευαίσθητα οικοσυστήματα μαζί με την Αττική και μερικά άλλα νησιά. Σύμφωνα με το Σχέδιο Δράσης του 2001 δεν μπορεί να γίνει αλλαγή χρήσης γης χωρίς περιβαλλοντικές μελέτες και χωρίς να υπάρχει κάποιο υπόβαθρο, αλλά ειδικά στις ζώνες υψηλού κινδύνου το σχέδιο δράσης προτείνει να νομοθετηθεί η απαγόρευση κάθε αλλαγής χρήσης γης αν δεν υπάρχει ευρεία κοινωνική αποδοχή, αλλά και πολιτική συναίνεση.



Σχήμα 1.3: Χάρτης δυνητικού κινδύνου ερημοποίησης της Ελλάδας (Γιάσογλου *et al.*, 2001)

1.5 Ξηρασία και κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή είναι η μεγαλύτερη ανθρωπιστική πρόκληση που αντιμετωπίζει ο κόσμος καθώς οι αρνητικές επιπτώσεις της, όπως οι πλημμύρες, οι καύσωνες, οι δασικές πυρκαγιές και οι ξηρασίες, έχουν αρχίσει και γίνονται σοβαρότερες. Η κλιματική αλλαγή είναι υπεύθυνη για 300.000 θανάτους ετησίως και έχει αρνητικές επιπτώσεις σε 300 εκατομμύρια ανθρώπους, αναφέρει η πρώτη αναλυτική μελέτη του αντίκτυπου που έχει στον άνθρωπο η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινόμενου του θερμοκηπίου (Hillel and Rosenzweig, 2002). Το κλίμα στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές τείνει να επηρεαστεί σε μεγαλύτερο βαθμό από τις ανθρώπινες δραστηριότητες εξαιτίας του φαινομένου της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Οι εκπομπές των θερμοκηπιακών αερίων μεταβάλλουν τη σύσταση της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η τάση προς αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας αποδίδεται στην απελευθέρωση ενεργών στην ακτινοβολία αερίων μικρής συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα, τα οποία έχουν την ιδιότητα να παγιδεύουν μέρος της θερμότητας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης (Hillel and Rosenzweig, 2002).

Η Διακυβερνητική επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (IPCC) κατέληξε στο ότι το κλίμα έχει αλλάξει, οι ανθρώπινες δραστηριότητες είχαν επίδραση σε αυτήν την αλλαγή και ότι το κλίμα αναμένεται να συνεχίζει να μεταβάλλεται στο μέλλον (Houghton *et al*., 1996). Αυτές οι προβλεπόμενες αλλαγές του κλίματος έχουν δημιουργήσει ανησυχίες για προκείμενες επιδράσεις στην παραγωγικότητα των οικοσυστημάτων, τον βιογεωχημικό κύκλο και την διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων (Kirschbaum and Fischlin, 1996). Το πραγματικό μέγεθος των αλλαγών στην βροχόπτωση είναι αβέβαιο και συγκεκριμένα σενάρια για τοπικές κλιματικές αλλαγές βρίσκονται σε προκαταρτικό στάδιο (Schneider, 1989). Παρόλη την αβεβαιότητα αυτή, οι Gregory *et al*. (1997) συμπέραναν ότι οι μελλοντικές κλιματικές προβλέψεις τείνουν σε αύξηση της έντασης φαινομένων ξηρασίας.

1.6 Ξηρασία και ευρωπαϊκή νομοθεσία

Σύμφωνα με τη διακυβερνητική επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος, οι κλιματικές μεταβολές θα έχουν ως αποτέλεσμα να πληγούν από λειψυδρία κάτοικοι των οποίων ο αριθμός κυμαίνεται μεταξύ 1,1 και 3,2 δισεκατομμύρια, εφόσον οι θερμοκρασίες

αυξηθούν κατά 2 έως 3 °C. Οι πληττόμενες από ξηρασία περιοχές αναμένεται να αυξηθούν σε έκταση. Υπό τις συνθήκες αυτές, η χάραξη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης του κινδύνου ξηρασίας έχει καταστεί ζήτημα προτεραιότητας (Δίκαιο Ε.Ε., 2007).

Στις 10 Ιανουαρίου 2007, η Επιτροπή ενέκρινε δέσμη μέτρων για την ενέργεια και το κλίμα, η οποία θα κατευθύνει την Ε.Ε. προς μια αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενεργειακή πολιτική. Ένας από τους κεντρικούς άξονές της είναι η αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος, αφού καταβληθούν προσπάθειες αποδοτικότερης χρήσης της ενέργειας προτού αναζητηθούν εναλλακτικές επιλογές. Η προσέγγιση αυτή ισχύει επίσης για τη λειψυδρία και τη ξηρασία. Πρώτη προτεραιότητα για να αντιμετωπιστεί η λειψυδρία και η ξηρασία, είναι η μετάβαση προς μια οικονομία που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά και ορθολογικά τους υδάτινους πόρους της. Η εξοικονόμηση υδάτινων πόρων συνεπάγεται και την εξοικονόμηση ενέργειας, δεδομένου ότι η άντληση, η μεταφορά και η επεξεργασία του νερού έχει υψηλό ενεργειακό κόστος. Στο πλαίσιο αυτό, είναι απαραίτητο να βελτιωθεί η διαχείριση της ζήτησης νερού. Όπως και η ενέργεια, το νερό είναι αναγκαίο για όλες τις ανθρώπινες, οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες και ως εκ τούτου, πρέπει να εξεταστεί ένα ευρύ φάσμα επιλογών πολιτικής.

Συγκεκριμένα κρίθηκε αναγκαία η επεξεργασία σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων ξηρασίας. Λόγω της αύξησης των κρουσμάτων ξηρασίας που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια, ορισμένα κράτη μέλη εγκατέλειψαν τη διαχείριση κρίσεων και στράφηκαν στη διαχείριση των κινδύνων ξηρασίας. Τα κατόπιν της εν λόγω στροφής μέτρα έχουν, συχνά, ως αποτέλεσμα την κατάρτιση συνολικών σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων ξηρασίας, με χαρτογράφηση των περιοχών που διαθέτουν ελάχιστους υδάτινους πόρους, καθορισμό των επιπέδων συναγερμού, των συστημάτων προειδοποίησης κ.τ.λ.. Η προώθηση της πλήρους εφαρμογής της Οδηγίας Πλαισίου για τα ύδατα διαθέτει την αναγκαία ευελιξία για την επεξεργασία ειδικών σχεδίων διαχείρισης της ξηρασίας σε συγκεκριμένες λεκάνες απορροής ποταμών.

Τα δέοντα μέτρα σε ευρωπαϊκό επίπεδο αποτελούν η ενθάρρυνση της ανταλλαγής πληροφοριών και βέλτιστων πρακτικών σχετικά με τη διαχείριση των κινδύνων ξηρασίας, ο καθορισμός μεθοδολογιών για τη θέσπιση των κατωφλίων ξηρασίας και η χαρτογράφηση των φαινομένων ξηρασίας. Σε εθνικό επίπεδο, είναι σημαντική η κατάρτιση, ειδικών σχεδίων διαχείρισης της ξηρασίας σε συμπληρωματική βάση έναντι των σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών, στις περιπτώσεις που αυτό κρίνεται αναγκαίο (Δίκαιο Ε.Ε., 2007).

Παράλληλα, η Επιτροπή διαμορφώνει ένα πλαίσιο που θα περιλαμβάνει αποτελεσματικά συστήματα συναγερμού, τα οποία αποτελούν μια βασική συνιστώσα της διαχείρισης των κινδύνων. Ως εκ τούτου, θα ακολουθήσει η σύσταση συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης για να βελτιωθεί η ετοιμότητα των αρμοδίων αρχών για την αντιμετώπιση των φαινομένων ξηρασίας. Το σύστημα αυτό θα ενσωματώσει τα σχετικά δεδομένα και ερευνητικά αποτελέσματα, την παρακολούθηση των φαινομένων ξηρασίας, τον εντοπισμό τους και τις προβλέψεις σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες (αρχίζοντας από τις τοπικές και περιφερειακές δραστηριότητες και τελειώνοντας σε συνολική ηπειρωτική ανασκόπηση σε επίπεδο Ε.Ε.) και θα επιτρέψει την εκτίμηση μελλοντικών συμβάντων.

Έτσι, έχει οριστεί σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο μέχρι το 2012 το αργότερο, η κατάρτιση πρωτοτύπων και θέσπιση διαδικασιών εφαρμογής για τη λειτουργία του ευρωπαϊκού παρατηρητηρίου ξηρασίας και του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης (Δίκαιο Ε.Ε., 2007).

1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση και δείκτες ξηρασίας

Στη διεθνή βιβλιογραφία καταγράφονται πολυάριθμες μελέτες που αφορούν την παρακολούθηση ξηρασιών με τη χρήση δεικτών ξηρασίας ανά τον κόσμο. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οκτώ εφαρμογές.

Οι Bacanli *et al*. (2008) εφάρμοσαν τον δείκτη SPI προκειμένου να διεξαχθεί μετεωρολογική ανάλυση ξηρασίας στην ηπειρωτική αιγαιακή περιοχή της Τουρκίας. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης 56 ετών από εννέα σταθμούς και εξάχθηκαν τιμές SPI για 3, 6, 9, 12 και 24 μήνες σύμφωνα με την κατάταξη του δείκτη σε κατηγορίες. Οι συγγραφείς συμπέραναν ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της διάρκειας και του μεγέθους της ξηρασίας: στην ανάλυση των χρονοσειρών παρατηρήθηκε ότι με τον υπολογισμό 3, 6 και 9 μηνών προκύπτει εποχιακή ξηρασία, η οποία χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις και μεγάλη συχνότητα, ενώ οι τιμές SPI για 12 και 24 μήνες παρέχουν πληροφορίες για μακροσκελείς ξηρασίες με μικρότερη συχνότητα.

Οι Tsakiris and Vangelis (2004) εκτίμησαν τον δείκτη SPI για 3, 6 και 12 μήνες για χρονική περίοδο 30 ετών, εφαρμόζοντας χωρική κατανομή της βροχόπτωσης σε ψηφιακό μοντέλο εδάφους (τετραγωνικά κελιά 2x2 km) της περιοχής της ανατολικής Κρήτης στην Ελλάδα. Αποτελεσματικά, λοιπόν, αποδίδεται μια εικόνα για το μέγεθος, τη διάρκεια και τον χωρικό χαρακτήρα της ξηρασίας και παράλληλα γίνεται σαφές ότι η συγκεκριμένη

διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί και να στηρίξει ένα σύστημα παρακολούθησης της ξηρασίας για μεσαίας κλίμακας έκταση.

Με τη χρήση του δείκτη ξηρασίας RDI και ενός απλοποιημένου Μοντέλου Υδατικού Ισοζυγίου, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια κλιματικών μεταβολών και η επίδρασή τους στην απορροή μίας συγκεκριμένης περιοχής της λεκάνης του Νέστου ανάντη του Δέλτα του ποταμού. Υπολογίζεται ότι η μείωση της απορροής φτάνει μέχρι και 70% σε περιπτώσεις έντονης ξηρασίας, γεγονός που μπορεί να επιφέρει σημαντικότατα προβλήματα στην οικολογική ισορροπία, καθώς και στις κοινωνικοοικονομικές δομές της περιοχής. Η προσομοίωση των σεναρίων ξηρασίας για την εκτίμηση της επίδρασης στην απορροή του ποταμού με την εφαρμογή του νέου δείκτη ξηρασίας RDI είναι μία μέθοδος που μπορεί να δώσει συγκρίσιμα και ρεαλιστικά αποτελέσματα, καθώς ο RDI συνδέεται άμεσα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνθήκες κλιματικής αστάθειας (Τίγκας *et al*., 2006).

Μεταγενέστερη μελέτη για ανάλυση ξηρασίας στις λεκάνες του Μόρνου και του Νέστου βασίστηκε στον υπολογισμό των δεικτών SPI και RDI και στην σύγκρισή τους, η οποία φανερώνει παρόμοια αποτελέσματα για αμφότερους τους δείκτες (Tsakiris *et al*., 2007a). Ο δείκτης RDI προσφέρει την δυνατότητα αποτελεσματικότερης κατανόησης σε περίπτωση σύγκρισης συνθηκών ξηρασίας μεταξύ διαφορετικών περιοχών ανά τον κόσμο, γεγονός που οφείλεται στην εισαγωγή του επιπρόσθετου παράγοντα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στους υπολογισμούς.

Επιπλέον, σύμφωνα με μια έρευνα για την εκτίμηση της χωρικής διαβάθμισης της ξηρασίας στην ανατολική Κρήτη, μέσω διαγραμμάτων που δείχνουν το ποσοστό της επιφάνειας των περιοχών σε σχέση με το επίπεδο της ξηρασίας, προκύπτει ότι οι δείκτες SPI και RDI παράγουν συγκρίσιμα αποτελέσματα (Tsakiris et al., 2007b). Εκφράστηκαν, έτσι, άμεσα τα ποσοστά της περιοχής που αντιστοιχούν στα διαφορετικά επίπεδα ξηρασίας, τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τις κρίσιμες τιμές ποσοστών που υιοθετούνται κάθε φορά για κάθε επίπεδο ξηρασίας.

Οι Van der Schrier *et al*. (2006) παρουσίασαν μέσω χαρτών την κατανομή των δεικτών ξηρασίας self-calibrating PDSI (SC-PDSI) και original PDSI (PDSI) τους καλοκαιρινούς μήνες της περιόδου 1901-2002. Η εκτίμηση των δεικτών πραγματοποιήθηκε με την χρήση δεδομένων βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και υδροχωρητικότητας εδάφους και από τη σύγκριση συνάχθηκε ότι ο SC-PDSI αντιπροσωπεύει ένα πιο κατάλληλο μέσο

σύγκρισης χωρικών σχέσεων ανάμεσα σε περιοχές με διαφορετική υγρασία και διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά.

1.8 Σκοπός της εργασίας – Αντικείμενο της έρευνας

Η παρούσα εργασία αποτελεί μελέτη τόσο της χωρικής και χρονικής κατανομής όσο και της έντασης του φαινομένου της ξηρασίας στη νήσο Κρήτη με τη χρήση τριών δεικτών ξηρασίας (SPI, RDI και PDSI). Εισάγεται ακόμη ένα παράγωγο του δείκτη SPI, ο SN-SPI (Spatially Normalized Standardized Precipitation Index), ο οποίος αποδίδει τον χωρικό χαρακτήρα της ξηρασίας. Πραγματοποιείται χωροχρονική ανάλυση των χρονοσειρών για περίοδο 30 παρελθόντων ετών (1973-2004) και έπειτα μελέτη μελλοντικών σεναρίων ξηρασίας για 100 επερχόμενα έτη (2010-2100) με τη βοήθεια χαρτών μέσω GIS. Στη συνέχεια, ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών δεικτών ξηρασίας και εξαγωγή συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Μεθοδολογία

2.1 Δείκτες ξηρασίας

Υπάρχουν διάφοροι δείκτες που περιγράφουν το φαινόμενο της ξηρασίας. Η επιλογή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, από τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και τον σκοπό μελέτης. Ενδεικτικά γίνεται αναφορά επτά (7) γνωστών δεικτών ξηρασίας και έπειτα θα αναπτυχθούν οι τρεις (3) βασικοί δείκτες, οι οποίοι θα εφαρμοστούν στην ανάλυση της ξηρασίας στην παρούσα εργασία.

α) Palmer Hydrological Drought Index (PHDI)

Ο δείκτης υδρολογικής ξηρασίας του Palmer (Karl, 1986) προέρχεται από τον δείκτη PDSI και αναπτύχθηκε για την ποσοτικοποίηση των υδρολογικών παραγόντων σε μακροχρόνια βάση, λαμβάνοντας ως δεδομένα τη βροχόπτωση, την εκροή και την αποθήκευση. Ο δείκτης αυτός ανταποκρίνεται πιο αργά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες από τον δείκτη του Palmer.

β) Palmer Crop Moisture Index (CMI)

Ο δείκτης Crop Moisture Index (CMI) (Palmer, 1968) είναι παράγωγος του PDSI και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των βραχυπρόθεσμων συνθηκών υγρασίας στο έδαφος (σε βάθος 1,5 μέτρου) σε εβδομαδιαία βάση κατά την περίοδο της ανάπτυξης των καλλιεργειών. Λαμβάνει ως δεδομένα τη μέση εβδομαδιαία θερμοκρασία και βροχόπτωση και ουσιαστικά βοηθάει στη σύγκριση της εδαφικής υγρασίας μεταξύ διαφορετικών περιοχών και έχει γρήγορη ανταπόκριση σε συνθήκες που μεταβάλλονται.

γ) Surface Water Supply Index (SWSI)

Ο δείκτης SWSI (Shafer and Dezman, 1982) βασίζεται στον υπολογισμό της απορροής, της βροχόπτωσης, της αποθήκευσης και της κατακράτησης χιονόπτωσης και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του αποθέματος νερού μέσω ενδείξεων των συνθηκών κατακράτησης χιονόπτωσης. Σκοπός της δημιουργίας του δείκτη αποτελεί η ενσωμάτωση υδρολογικών και κλιματολογικών χαρακτηριστικών σε μια τιμή του δείκτη για κάθε λεκάνη ποταμού στην πολιτεία του Colorado. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι οι

δείκτες των λεκανών δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους και ότι έχουν υπολογιστεί εποχικά.

δ) Reclamation Drought Index (RDI)

Ο δείκτης RDI (*http://drought.unl.edu*) λαμβάνει ως δεδομένα τη θερμοκρασία καθώς μάλιστα και τη βροχόπτωση, την κατακράτηση χιονόπτωσης, την απορροή και την αποθήκευση. Υπολογίζεται στο επίπεδο της λεκάνης του ποταμού και έχει την δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη κλιματικούς και υδρολογικούς παράγοντες, αλλά υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα για να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ λεκανών.

ε) Ποσοστό κανονικής βροχόπτωσης (Percent of normal precipitation)

Αποτελεί μια από τις πιο απλές μεθόδους μέτρησης βροχόπτωσης και είναι ακόμα πιο αποτελεσματική όταν πρόκειται για μια μεμονωμένη περιοχή ή για μια εποχή και δίνει επίσης διαφορετικές ενδείξεις των συνθηκών, ανάλογα με την αντίστοιχη περιοχή και την εποχή (http://drought.unl.edu). Υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική βροχόπτωση (η οποία ορίζεται τυπικά ως ο μέσος όρος 30ετίας) διά την κανονική βροχόπτωση.

$$PNP = \frac{actual\ precipitation}{normal\ precipitation} \cdot 100\% \qquad (2.1)$$

Μπορεί να υπολογιστεί για ποικίλες χρονικές κλίμακες. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ο μέσος όρος της βροχόπτωσης δεν είναι συχνά ίδιος με την διάμεσο, που είναι η τιμή της βροχόπτωσης από την οποία το 50% των συμβάντων είναι μεγαλύτερα σε ύψη βροχής. Αυτό συμβαίνει γιατί η βροχόπτωση σα φαινόμενο δεν περιγράφεται από κανονική κατανομή.

στ) Δεκατημόρια (Deciles)

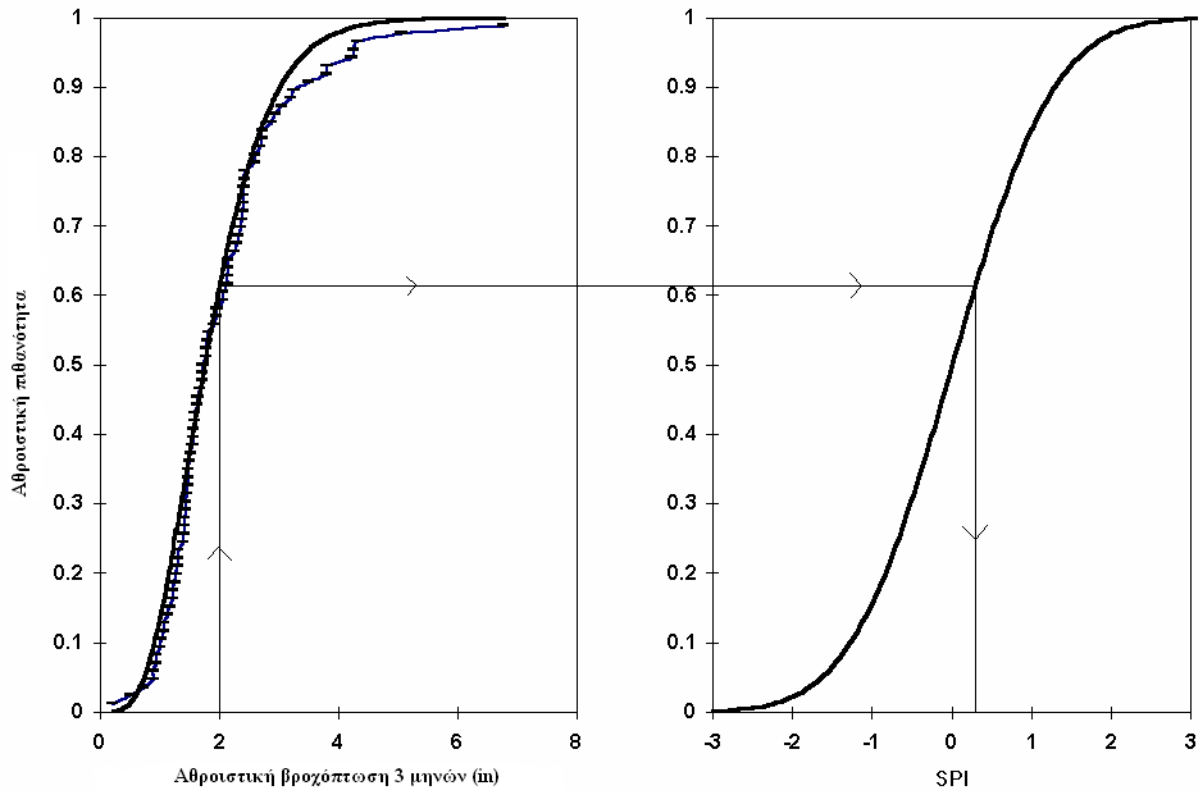
Οι Gibbs and Maher (1967) ομαδοποίησαν τα μηνιαία συμβάντα βροχόπτωσης σε δέκα κατηγορίες, τα δεκατημόρια. Με λίγα λόγια, η κατανομή των συμβάντων για μια μακρόχρονη καταγραφή βροχόπτωσης χωρίζεται σε δέκατα. Το πρώτο δεκατημόριο αντιστοιχεί στην ποσότητα βροχής που δεν ξεπερνιέται από το 10% των συμβάντων βροχόπτωσης και το δέκατο δεκατημόριο αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ποσότητα βροχόπτωσης που έχει καταγραφεί. Εξ' ορισμού, το πέμπτο δεκατημόριο είναι η λεγόμενη διάμεσος και αποτελεί την ποσότητα της βροχής που δεν ξεπερνιέται από το 50% των συμβάντων βροχόπτωσης στην περίοδο παρατηρήσεων. Πλεονέκτημα του δείκτη των δεκατημορίων είναι η παροχή ακριβών δεδομένων βροχόπτωσης, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το ότι απαιτείται μακροχρόνια καταγραφή των δεδομένων.

2.2 Ο δείκτης ξηρασίας SPI

Ο δείκτης SPI (McKee *et al*., 1993) εφαρμόζεται για την μελέτη μετεωρολογικής ξηρασίας και υπολογίζεται μόνο από την καταγραφή της βροχόπτωσης σε κάθε περιοχή (για τουλάχιστον 30 χρόνια). Τα δεδομένα προσαρμόζονται σε μια γ κατανομή, μετατρέπονται σε κανονική κατανομή, ώστε η μέση τιμή του δείκτη για κάθε περιοχή και για συγκεκριμένη περίοδο να είναι μηδέν (Σχήμα 2.1) και κανονικοποιούνται σε μια πολλαπλή χρονική κλίμακα (3, 6, 12, 24, 48 μήνες κτλ.). Η γ κατανομή ορίζεται από την εξίσωση πυκνότητας ή συχνότητας πιθανότητάς της:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{a-1} e^{-x/\beta} \qquad \text{για} \quad x>0 \qquad (2.2)$$

Όπου α είναι η παράμετρος σχήματος (shape parameter), β είναι η παράμετρος κλίμακας (scale parameter), x η τιμή της βροχόπτωσης και Γ(α) είναι το ολοκλήρωμα της γ κατανομής ($\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y}\, dy$).



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα μετατροπής από προσαρμοσμένη γάμμα κατανομή σε κανονική για την περιοχή Fort Collins, Colorado.

Σκοπός του SPI είναι να αναγνωριστεί η σπουδαιότητα των χρονικών βημάτων στην ανάλυση της διαθεσιμότητας και της χρήσης του νερού. Ο υπολογισμός σε πολλαπλά χρονικά βήματα διευκολύνει την μελέτη των επιπτώσεων της έλλειψης βροχόπτωσης σε διαφορετικές συνιστώσες υδάτινων πόρων (υπόγεια νερά, ταμιευτήρες, εδαφική υγρασία, επιφανειακή απορροή). Οι τιμές αυτές αποτελούν τις τυπικές αποκλίσεις των τροποποιημένων αθροισμάτων βροχόπτωσης από τις μέσες τιμές. Πλεονεκτεί ακόμα έναντι των υπολοίπων δεικτών στο ότι τα δεδομένα του προσαρμόζονται αποτελεσματικά σε τυχούσα ανάλυση επικινδυνότητας και παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση της ξηρασίας και της έντασής της. Είναι αξιοσημείωτη η δυνατότητα μελέτης της ξηρασίας ακόμα και όταν δεν είναι διαθέσιμα άλλα μετεωρολογικά-υδρολογικά δεδομένα (Bonaccorso *et al.*, 2003). Το μειονέκτημα του δείκτη έγκειται στο ότι τα δεδομένα μπορεί να μεταβληθούν από την καταγραφή της μακροπρόθεσμης βροχόπτωσης και επίσης τα αποτελέσματα που προκύπτουν για χρονικό διάστημα που υπερβαίνει τους 24 μήνες δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα.

Ο δείκτης SPI σε μικρότερες χρονικές κλίμακες (3, 6, 9 μήνες) περιγράφει γεγονότα ξηρασίας τα οποία επηρεάζουν τον τομέα της γεωργίας, ενώ σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες είναι χρήσιμος για σκοπούς διαχείρισης υδατικών πόρων. Η φυσική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης ως η μη προβλέψιμη μεταβλητότητα των μηναίων μέσων υψών βροχής, προκύπτει από τις στατιστικές μεταβολές των διαφορετικών δειγμάτων. Παράγοντες όπως η αλλαγή του καθεστώτος του κλίματος λόγω της σχεδόν τυχαίας ενδομετακινούμενης φύσης της ατμόσφαιρας, η συσχέτιση για χρονικές υστερήσεις ενός έτους ή περισσότερο, ή οι μεταβολές στις εξωτερικές συνθήκες είναι δυνατόν επίσης, να συνεισφέρουν στην ενδοετήσια μεταβλητότητα και άρα, να οδηγήσουν στη δυνητική προγνωστικότητα (Κατσούλης *et al*., 2008).

Οι θετικές τιμές του δείκτη μαρτυρούν βροχόπτωση άνω της μέσης κανονικής, ενώ αρνητικές τιμές δείχνουν βροχόπτωση κάτω της μέσης κανονικής. Τα όρια για τον χαρακτηρισμό των συνθηκών ξηρασίας ανάλογα με την τιμή του δείκτη SPI δίνονται από τον Πίνακα 2.1. Σύμφωνα με τους McKee *et al*. (1993), ένα γεγονός ξηρασίας λαμβάνει χώρα όταν ο δείκτης φτάσει στην τιμή -1 και λήγει όταν ο δείκτης γίνει θετικός. Οι υπολογισμοί γίνονται με την βοήθεια του προγράμματος SPI SL6.exe (National Drought Mitigation Center (University of Nebraska, Lincoln) (*http://drought.unl.edu*).

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός συνθηκών ανάλογα με την τιμή του δείκτη SPI

ΤΙΜΕΣ ΔΕΙΚΤΗ SPI	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ
2.0+	**Υπερβολικά υγρές**
1.5 έως 1.99	**Πολύ υγρές**
1.0 έως 1.49	**Μέτρια υγρές**
0 έως 0.99	**Ελαφρώς υγρές**
0 έως - 0.99	**Ελαφρώς ξηρές**
- 1 έως 1.49	**Μετρίως ξηρές**
- 1.5 έως -1.99	**Πολύ ξηρές**
- 2 και κάτω	**Υπερβολικά ξηρές**

2.3 Ο δείκτης ξηρασίας SN-SPI

Με την χρήση του δείκτη SPI πραγματοποιείται η σύγκριση μεταξύ κοντινών υδρολογικών λεκανών στην κλίμακα του χρόνου ως προς τις συνθήκες ξηρασίας. Προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκριση μεταξύ υδρολογικών λεκανών χρονικά και χωρικά, δηλαδή να γίνει «ενσωμάτωση» της χωρικής σχετικότητας της ξηρασίας, αναπτύχθηκε ένας νέος δείκτης, παράγωγο του SPI, ο SN-SPI (Spatially Normalized Standardized Precipitation Index). Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η κανονικοποίηση των τιμών των δεικτών με τις τιμές της βροχόπτωσης με την εξής διαδικασία: έστω ότι μελετάται μια περιοχή με γειτονικές υδρολογικές λεκάνες και με βάση τη μέση βροχόπτωση της κάθε λεκάνης και τη μέση βροχόπτωση της περιοχής (όλων των λεκανών), υπολογίζεται ο SPI για κάθε λεκάνη. Οι θετικοί δείκτες SPI πολλαπλασιάζονται με την τιμή της μέσης βροχόπτωσης κάθε λεκάνης προς την τιμή της μέσης βροχόπτωσης όλων των λεκανών, ενώ οι αρνητικοί δείκτες SPI πολλαπλασιάζονται με την τιμή της μέσης βροχόπτωσης όλων των λεκανών προς την τιμή της μέσης βροχόπτωσης κάθε λεκάνης. Έπειτα, ο λόγος της μέγιστης τιμής των αρχικών δεικτών προς την μέγιστη τιμή των νεοεξαχθέντων πολλαπλασιάζεται με τους θετικούς νεοεξαχθέντες, ενώ ο λόγος της ελάχιστης τιμής των αρχικών δεικτών προς την ελάχιστη τιμή των νεοεξαχθέντων πολλαπλασιάζεται με τους αρνητικούς νεοεξαχθέντες (δηλαδή γίνεται αναγωγή στις αρχικές τιμές).

Είναι

$$\frac{\bar{P}_i}{\bar{P}_{all}} = a \tag{2.3}$$

Και

$$\frac{\bar{P}_{all}}{\bar{P}_i} = b \tag{2.4}$$

Οπότε $SPI'_{\alpha} = SPI \cdot \alpha$ αν $SPI>0$ και $SPI'_b = SPI \cdot b$ αν $SPI<0$.

Επίσης

$$\frac{SPI_{max}}{SPI'_{max}} = c \tag{2.5}$$

$$\frac{SPI_{min}}{SPI'_{min}} = d \tag{2.6}$$

Άρα

$$SNSPI_+ = SPI' \cdot c \quad \text{αν } SPI'>0 \tag{2.7}$$

$$SNSPI_- = SPI' \cdot d \quad \text{αν } SPI'<0 \tag{2.8}$$

Όπου

$\bar{P}_i$: μέση μηνιαία βροχόπτωση κάθε λεκάνης i

$\bar{P}_{all}$: μέση μηνιαία βροχόπτωση όλων των λεκανών

SPI'_{α}: διορθωμένη τιμή δείκτη ξηρασίας SPI βάσει βροχόπτωσης για SPI>0

SPI'_b: διορθωμένη τιμή δείκτη ξηρασίας SPI βάσει βροχόπτωσης για SPI<0

SPI_{max}: μέγιστη τιμή δείκτη ξηρασίας SPI όλων των λεκανών

SPI_{min}: ελάχιστη τιμή δείκτη ξηρασίας SPI όλων των λεκανών

SPI'_{max}: μέγιστη τιμή διορθωμένου δείκτη ξηρασίας SPI' όλων των λεκανών

SPI'_{min}: ελάχιστη τιμή διορθωμένου δείκτη ξηρασίας SPI' όλων των λεκανών

$SNSPI_+$: κανονικοποιημένος δείκτης ξηρασίας SPI βάσει βροχόπτωσης για SPI'>0

$SNSPI_-$: κανονικοποιημένος δείκτης ξηρασίας SPI βάσει βροχόπτωσης για SPI'<0

2.4 Ο δείκτης ξηρασίας PDSI

Ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας του Palmer (Palmer, 1965) χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τη διάρκεια και την ένταση της μακροχρόνιας ξηρασίας, λαμβάνοντας ως δεδομένα τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία, καθώς επίσης και την υδροχωρητικότητα του εδάφους (τύπος εδάφους). Το φαινόμενο της ξηρασίας λειτουργεί αθροιστικά, κι έτσι η

έντασή του κατά τη διάρκεια του τρέχοντος μήνα εξαρτάται από τις παρούσες καιρικές συνθήκες μαζί με αυτές των προηγούμενων μηνών (*www.ncdc.noaa.gov*). Είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας και συγκεκριμένα θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πρωταρχική ένδειξη του μεγέθους κάποιας ξηρασίας. Οι υπολογισμοί γίνονται με την βοήθεια του προγράμματος PDSI.exe (National Climatic Data Center) (*http://nadss.unl.edu*).

Ο δείκτης (PDSI) του Palmer για την μελέτη της μετεωρολογικής ξηρασίας είναι ευρέως διαδεδομένος, ειδικά στην περιοχή των Η.Π.Α. και βασίζεται ουσιαστικά στην ιδέα της «προσφοράς και ζήτησης» στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου. Παρόλο που χαρακτηρίζεται ως δείκτης μετεωρολογικής ξηρασίας, η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει δεδομένα βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και συνθηκών εδαφικής υγρασίας (υδροχωρητικότητα), τα οποία αποτελούν συνιστώσες υδρολογικής ξηρασίας. Ο δείκτης αυτός μετράει την εκκίνηση των αποθεμάτων υγρασίας από τις κανονικές συνθήκες. Το απόθεμα υγρασίας υπολογίζεται από το υδατικό ισοζύγιο ενός μοντέλου εδάφους δύο στρωμάτων με την χρήση της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και την ποσότητα της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας (Vasiliades and Loukas, 2009).

Οι τρεις βασικές παραδοχές που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι 1) η υδροχωρητικότητα του επιφανειακού στρώματος είναι κατά το μέγιστο 25 mm, 2) η υδροχωρητικότητα του υποκείμενου στρώματος έχει μέγιστη τιμή που εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους 3) η μεταφορά νερού από ή προς το κατώτερο στρώμα συμβαίνει μόνο όταν το επιφανειακό στρώμα είναι πλήρες ή κενό (Brázdil *et al*., 2008).

Η κλίμακά του κυμαίνεται από -6 έως 6, ορίζοντας στο 0 τις κανονικές συνθήκες. Είναι κανονικοποιημένος για διαφορετικές περιοχές και χρονικές περιόδους για την διευκόλυνση της σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών περιοχών. Τα μειονεκτήματα του δείκτη αποτελούν οι ελλείψεις στο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, η αργή ανταπόκριση σε συνθήκες ξηρασίας, η ακαθόριστη χρονική κλίμακα (9 μήνες) που μπορεί να είναι παραπλανητική και η ακαταλληλότητα για ορεινές περιοχές.

Τα χαρακτηριστικά που εμπλέκονται στον υπολογισμό είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή που υπολογίζεται με τη χρήση της μεθόδου Thornthwaite (1948), η ποσότητα της υγρασίας που απαιτείται για να επέλθει το έδαφος σε συνθήκες υδατοϊκανότητας, η ποσότητα υγρασίας που χάνεται από το έδαφος λόγω εξατμισοδιαπνοής και η απορροή. Ο Palmer (1965) όρισε την «κλιματικά κατάλληλη για τις υπάρχουσες συνθήκες» βροχόπτωση, βασιζόμενος σε αυτές τις 4 ποσότητες. Η έναρξη από την κανονική

βροχόπτωση πολλαπλασιάζεται έπειτα με έναν παράγοντα βάρους, τον λεγόμενο «κλιματικό παράγοντα», καταλήγοντας τελικά στον υπολογισμό του «δείκτη μη κανονικής υγρασίας». Ο σκοπός του παράγοντα βάρους είναι να προσαρμόσει τις εκκινήσεις από την κανονική βροχόπτωση έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμες μεταξύ διαφορετικών περιοχών και διαφορετικών μηνών. Ως αποτέλεσμα, ο Palmer συσχέτισε την δριμύτητα της ξηρασίας για έναν συγκεκριμένο μήνα με το άθροισμα των δεικτών μη κανονικής υγρασίας του μήνα αυτού με την δριμύτητα της ξηρασίας του προηγούμενου μήνα. Οι παράγοντες διάρκειας προσδιορίζουν την ισορροπία μεταξύ της ευαισθησίας των διακυμάνσεων της βραχυπρόθεσμης υγρασίας και του ενός πιο σταθερού χαρακτήρα. Ο κανονικοποιημένος PDSI (SC-PDSI) είναι πιο κατάλληλος για κλιματική γεωγραφική σύγκριση διαφορετικών περιοχών. Οι Wells *et al*. (2004) βελτίωσαν την απόδοση του PDSI αυτοματοποιώντας τους υπολογισμούς του Palmer απομονώνοντας τις εμπειρικές συνιστώσες του αλγορίθμου του PDSI: προσδιόρισε για κάθε περιοχή τον κλιματικό παράγοντα βάρους, χρησιμοποιώντας δεδομένα κάθε φορά μόνο από μια περιοχή. Τοποθετείται έτσι σε βαθμίδες η εκκίνηση από την κανονική βροχόπτωση με την χρήση του κατάλληλου κλιματικού παράγοντα για κάθε περιοχή, επηρεάζοντας το εύρος των τιμών του SC-PDSI. Παρομοίως, οι παράγοντες διάρκειας προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα από την κάθε περιοχή, που επηρεάζουν την ευαισθησία του δείκτη στις αλλαγές της εδαφικής υγρασίας.

2.5 Ο δείκτης ξηρασίας RDI

Ο δείκτης Reconnaissance Drought Index (RDI) που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Tsakiris, 2004) και εφαρμόζεται μέσω του προγράμματος DrinC (Drought Indices Calculator) (Tsakiris *et al*., 2007b), βασίζεται τόσο σε δεδομένα βροχόπτωσης, όσο και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και η βασική του μορφή (RDI_o) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$RDI_O = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_j}{\sum_{j=1}^{12} PET_j} \tag{2.9}$$

όπου

P_j: βροχόπτωση για τον μήνα j ανά έτος

PET_j: δυνητική εξατμισοδιαπνοή για τον μήνα j ανά έτος

Χρησιμοποιούνται, επίσης, δύο ακόμα μορφές του RDI, η κανονικοποιημένη (normalized - RDI_n) και η τυποποιημένη (standardized - RDI_{st}), οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$RDI_n = \frac{RDI_O}{\overline{RDI_O}} - 1 \tag{2.10}$$

$$RDI_{st} = \frac{y - \bar{\mu}}{\hat{\sigma}} \tag{2.11}$$

όπου

$\overline{RDI_O}$: μέσος όρος του RDI_o

y: $\ln(RDI_o)$

μ: ο αριθμητικός μέσος του y

$\hat{\sigma}$: τυπική απόκλιση του y

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω διατυπώσεις βασίζονται στην υπόθεση ότι οι τιμές του RDI_o ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο RDI_{st} έχει συμπεριφορά ανάλογη του SPI, έτσι τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουν παρόμοια ερμηνεία. Ο μέσος όρος του RDI (RDI_o) αντιπροσωπεύει τις κλιματικές συνθήκες μίας περιοχής και είναι ισοδύναμος με τον Δείκτη Ξηρασίας (Aridity Index) που έχει προταθεί από τον FAO για τον προσδιορισμό της ξηρασίας μιας περιοχής (Tsakiris *et al*., 2007a).

Τα κύρια πλεονεκτήματα του RDI σε σύγκριση με τον SPI είναι τα ακόλουθα:

• Έχει φυσική έννοια, καθώς υπολογίζει το συνολικό έλλειμμα από τις απαιτήσεις εξάτμισης της ατμόσφαιρας.

• Μπορεί να υπολογιστεί για κάθε χρονική περίοδο (π.χ. 1 μήνα, 2 μήνες κλπ.).

• Ο υπολογισμός του οδηγεί πάντα σε κάποιο κατανοητό νούμερο.

• Συνδέεται άμεσα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

•Μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό συνθήκες κλιματικής αστάθειας, για τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφόρων μεταβολών των κλιματικών παραμέτρων στην ξηρασία και την ερημοποίηση.

Τέλος, η κατηγοριοποίηση των καιρικών συνθηκών ανάλογα με την τιμή του δείκτη RDI_{st} είναι ίδια με αυτή του SPI (Πίνακας 2.1).

2.6 Παρεμβολή βροχομετρικών δεδομένων

Οι μέθοδοι γραμμικής παρεμβολής στηρίζονται στο ότι η συσχέτιση ανάμεσα στα μετρούμενα μεγέθη πρέπει να μεγαλώνει, όσο η απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης

μικραίνει. Η διαπίστωση αυτή έχει διατυπωθεί ως «ο πρώτος νόμος της Γεωγραφίας» από τον Tobler, σύμφωνα με τον οποίο: «όλα τα πράγματα σχετίζονται μεταξύ τους, αλλά τα πλησιέστερα σχετίζονται περισσότερο μεταξύ τους από τα πιο απομακρυσμένα». Η χωρική παρεμβολή μπορεί να ορισθεί ως η διαδικασία μέσω της οποίας διενεργείται μια εκτίμηση της τιμής ή των ιδιοτήτων μιας μεταβλητής σε σημεία άνευ μετρήσεων μέσα σε μια περιοχή, βάσει των υπαρχόντων παρατηρήσεων σε άλλα σημεία της περιοχής αυτής (Αποστολάκη, 2003). Με άλλα λόγια, η χωρική παρεμβολή αποτελεί μια διαδικασία «πληρώσεων των κενών», υπό τη βασική παραδοχή ότι η πληροφορία που διατίθεται σε ένα σημείο μιας περιοχής μπορεί να δώσει εκτιμήσεις για κοντινά σημεία της ίδιας περιοχής, όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη η αντίστοιχη πληροφορία.

Οι αλγόριθμοι χωρικής παρεμβολής διακρίνονται σε σημειακούς και επιφανειακούς, ανάλογα με τις «διαστάσεις» των πληροφοριών εισόδου και εξόδου, που μπορεί να είναι σημεία, γραμμές ή επιφάνειες. Οι σημειακοί αλγόριθμοι διακρίνονται περαιτέρω σε ακριβείς και προσεγγιστικούς, ανάλογα με το εάν διατηρούν τις τιμές του δείγματος εισόδου ή όχι. Οι επιφανειακοί αλγόριθμοι προϋποθέτουν ότι υπάρχει μια καθολική τάση μικρής μεταβλητότητας στη διακύμανση της υπό εξέταση παραμέτρου, στην οποία υπερτίθενται τοπικές ανομοιομορφίες μεγάλης μεταβλητότητας. Οι ανομοιομορφίες αυτές προκαλούν σφάλματα δειγματοληψίας και αβεβαιότητες στις σημειακές μετρήσεις και έτσι οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμεύουν για την αναγνώριση τάσεων και την αφαίρεση των σφαλμάτων, μέσω της εξομάλυνσης της παραμετρικής επιφάνειας (Αποστολάκη, 2003).

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, με τις οποίες μπορούν να δημιουργηθούν επιφάνειες σε κάνναβο από σημειακά δεδομένα, με τρισδιάστατη ανάλυση. Οι βασικότερες από αυτές τις μεθόδους είναι οι εξής:

- Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής Inverse Distance Weighted (IDW)
- Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής Natural Neighbors
- Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής Spline
- Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής Kriging
- Η μέθοδος Trend Surface Interpolation, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί μέσω προσαρμογής.

Η κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους χωρικής παρεμβολής κάνει υποθέσεις σχετικά με τον προσδιορισμό των τιμών που εκτιμώνται. Ανάλογα με το φαινόμενο που μελετάται κάθε φορά, αλλά και την κατανομή των δειγμάτων και των μετρήσεων, κάποιες μέθοδοι παρέχουν αποτελέσματα με μεγαλύτερη και καλύτερη ακρίβεια, ακόμα και από τις

πραγματικές επιφάνειες. Παρόλα αυτά και ανεξάρτητα από την μέθοδο παρεμβολής που χρησιμοποιείται κάθε φορά, τα αποτελέσματα είναι τόσο περισσότερο ακριβή και αξιόπιστα, όσο περισσότερα είναι τα στοιχεία που εισάγονται και όσο καλύτερη και ομαλότερη είναι η κατανομή τους στην εκάστοτε περιοχή μελέτης.

2.6.1 Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής IDW

Η μέθοδος IDW, είναι μία αιτιοκρατική μέθοδος παρεμβολής, επειδή είναι άμεσα βασισμένη στις περιβάλλουσες μετρημένες τιμές ή σε συγκεκριμένους μαθηματικούς τύπους που καθορίζουν την ομαλότητα της προκύπτουσας επιφάνειας. Είναι μία ακριβής μέθοδος κινούμενου μέσου όρου που εφαρμόζεται συνήθως σε στοιχεία υψηλής μεταβλητότητας. Η IDW υποθέτει ότι η μεταβλητή που μοντελοποιείται μειώνεται, όσο η απόσταση από την επιλεχθείσα μετρημένη θέση του σημείου αυξάνεται (Shepard, 1968). Αυτή η τεχνική, υπολογίζει μια τιμή για κάθε κόμβο πλέγματος εξετάζοντας και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των γύρω από αυτήν μετρημένων σημείων που βρίσκονται μέσα σε μια καθορισμένη ακτίνα. Όσο πιο κοντά στη ζητούμενη τιμή είναι ένα σημείο, τόσο μεγαλύτερη η επιρροή, ή το βάρος που αυτό έχει στον υπολογισμό της τιμής που αναζητείται.

Η παρεμβολή IDW, καθορίζει τις τιμές σε κάθε κελί, χρησιμοποιώντας έναν γραμμικά σταθμισμένο συνδυασμό ενός σετ δειγμάτων. Το «βάρος» είναι συνάρτηση της αντίστροφης απόστασης. Η παρεμβολή IDW (μέσω του λογισμικού ArcGIS9), δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να καθορίζει τη σημασία του κάθε σημείου επάνω στην περιοχή μελέτης, αλλάζοντας ποικίλες παραμέτρους με στόχο την όσο το δυνατόν πιο «ρεαλιστική» χάραξη των ισοϋψών καμπυλών. Για παράδειγμα, με τον καθορισμό μεγαλύτερης δύναμης, ακόμη περισσότερη έμφαση θα δοθεί στα κοντινότερα σημεία, τα οποία θα έχουν την μεγαλύτερη επιρροή και έτσι η επιφάνεια θα έχει περισσότερη λεπτομέρεια (θα είναι λιγότερο ομαλή).

Η βασική μορφή για την εύρεση μιας τιμής u μέσω παρεμβολής για ένα δεδομένο σημείο x εφαρμόζοντας την IDW, υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$u(x) = \frac{\sum_{k=0}^{N} w_k(x) u_k}{\sum_{k=0}^{N} w_k\,(x)} \qquad (2)$$

$$w_k(x) = \frac{1}{d(x, x_{k)})^p} \tag{3}$$

όπου x είναι το παρεμβαλλόμενο σημείο, x_k είναι γνωστό σημείο, d είναι η δεδομένη απόσταση από το γνωστό σημείο x_k έως το άγνωστο σημείο x, N είναι το σύνολο των γνωστών σημείων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρεμβολή και p είναι ένας πραγματικός θετικός αριθμός, ο παράγοντας βαρύτητας.

2.7 Κλιματικά μοντέλα

2.7.1 Το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο ECHAM

Στα σύγχρονα κλιματικά μοντέλα προσομοιώνονται οι ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ του εδάφους, των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και του Διαστήματος, η μεταφορά ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, η κυκλοφορία του αέρα στην ατμόσφαιρα, η κυκλοφορία του νερού στους ωκεανούς και η αλληλεπίδραση των ωκεανών με την ατμόσφαιρα, η δημιουργία νεφών και ο κύκλος του άνθρακα, δηλαδή οι ανταλλαγές του άνθρακα μεταξύ των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και του Διαστήματος. Το ECHAM είναι ένα παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο (Global Climate Model - GCM) που αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Μετεωρολογίας Max Planck (Max Planck Institute – MPI) που είναι ένας ερευνητικός οργανισμός της κοινότητας του Max Planck (Roeckner *et al*., 2003). Το κλιματικό μοντέλο ECHAM αρχικά αναπτύχθηκε από το ECWMF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Ευρωπαϊκό κέντρο μέση πρόγνωσης καιρού), από το οποίο προέρχεται το πρώτο τμήμα του ονόματος (EC) και από ένα εκτενές πακέτο παραμετροποίησης που αναπτύχθηκε στο Αμβούργο (Hamburg) από το οποίο παίρνει το δεύτερο μέρος του ονόματός του (HAM). Το ECWMF είναι ένας διεθνής οργανισμός που υποστηρίζεται από 31 χώρες και έχει βάση το Λονδίνο. Η δυναμική του μοντέλου περιγράφεται από τον ECWMF ο οποίος έχει αλλάξει την περιγραφή του μοντέλου ώστε να περιγράφει τα νεοεισαχθέντα χαρακτηριστικά και τις απαραίτητες αλλαγές που έχουν γίνει για τα κλιματικά πειράματα. Από την τελευταία έκδοση του μοντέλου, την ECHAM5 ολόκληρος ο πηγαίος κώδικας του μοντέλου έχει επανασχεδιαστεί και μεταφερθεί σε Fortran 95. Το ECHAM είναι πλέον πλήρως μεταφερόμενο και μπορεί να τρέξει σε όλες τις κύριες υψηλής απόδοσης πλατφόρμες. Το ECHAM μπορεί να λειτουργήσει επιλύοντας το ατμοσφαιρικό

μοντέλο μέχρι τα 10hPa για τροποσφαιρικές μελέτες ή μέχρι τα 0.01hPa για μέσης ατμόσφαιρας (middle atmosphere) μελέτες. Στην τελευταία του μορφή αποκαλείται συχνά ως MAECHAM.

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται σε έναν τρισδιάστατο κάνναβο που εκτείνεται από τα βάθη των ωκεανών ως το Διάστημα περικλείοντας ολόκληρη τη Γη. Η πρόβλεψη των κλιματικών αλλαγών γίνεται με τη χρήση διαφόρων σεναρίων. Διαφορετικοί τύποι κλιματικών σεναρίων έχουν προσομοιαστεί με το μοντέλο ECHAM5. Τα κλιματικά σενάρια χωρίζονται σε τέσσερις κύριες οικογένειες σεναρίων (Roeckner *et al*., 2003). Το A1 σενάριο περιγράφει ένα μελλοντικό κόσμο ραγδαίας οικονομικής ανάπτυξης και παγκόσμιου πληθυσμού που μεγιστοποιείται στα μέσα του 21ου αιώνα. Η οικογένεια αυτή σεναρίων αναπτύσσει τρείς ομάδες διαφορετικά αναπτυσσόμενων τεχνολογιών στον τομέα της ενέργειας, ένα που στηρίζεται στα ορυκτά καύσιμα A1FI, ένα μη στηριζόμενο στα ορυκτά καύσιμα σενάριο A1T, και ένα σταθμισμένο σε όλους τους πόρους σενάριο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, A1B (το χαμηλότερο). Το σενάριο A2 περιγράφει ένα πολύ ετερογενή κόσμο. Ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται συνεχώς, η οικονομική ανάπτυξη είναι περιφερική και το κατά κεφαλήν εισόδημα είναι κατακερματισμένο και αργότερο από άλλα σενάρια. Το B1 σενάριο περιγράφει ένα κόσμο που συγκλίνει με τον ίδιο παγκόσμιο πληθυσμό που καρφώνεται στα μέσα του 21ου αιώνα, και φθίνει έκτοτε όπως την A1 οικογένεια σεναρίων αλλά με ραγδαίες αλλαγές στις οικονομικές δομές σε μία τριτογενή οικονομία με μείωση στη ένταση παραγωγής υλικών και εισαγωγή καθαρών και αποτελεσματικών από πλευράς πόρων τεχνολογίες. Το B2 σενάριο περιγράφει ένα κόσμο που η έμφαση δίνεται στις τοπικά προσαρμοσμένες λύσεις στην οικονομία, κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού είναι σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτή των σεναρίων της A2 οικογένειας και μέτρια επίπεδα οικονομικής ανάπτυξης, όπως και λιγότερο απότομη και πιο διαφοροποιημένη τεχνολογική ανάπτυξη από το B1 και A1 οικογένεια σεναρίων. Μερικές επιλεγμένες δημοσιεύσεις που στηρίζονται στις προσομοιώσεις του μοντέλου είναι οι Roeckner *et al*., 2006; Roesch and Roeckner, 2005; Wild and Roeckner, 2005; Hagemann *et al*., 2006.

2.7.2 Το περιοχικό κλιματικό μοντέλο REMO

Υπάρχουν τρείς κύριες μέθοδοι για εξαγωγή λεπτομερών δεδομένων για μια περιοχή από τα αδρούς (coarse) ανάλυσης παγκόσμια μοντέλα (Houghton *et al*. 2001). Η πιο απλή μέθοδος είναι η απλή παρεμβολή, η στατιστική υποβίβαση κλίμακας (statistical downscaling), και η υψηλής ανάλυσης δυναμική μοντελοποίηση. Στην τελευταία κατηγορία υποβίβασης κλίμακας ανήκουν τα τοπικά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Model – RCM). Η υποβίβαση της κλίμακας πραγματοποιείται ενσωματώνοντας ένα RCM μέσα σε ένα GCM, με το πρώτο να λαμβάνει οριακές συνθήκες από το δεύτερο. Μερικά RCM είναι τα ARPEGE (Gibelin and Déqué, 2003), CHRM (Vidale *et al*., 2003), CLM (Steppeler *et al*., 2003), HadRM3H (Buonomo *et al*., 2006), HIRHAM (Christensen *et al*., 1996), RACMO (Lenderink *et al*., 2003), RCAO (Döscher *et al*., 2002), RegCM (Giorgi *et al*., 1994), PROMES (Castro *et al*., 1993) και REMO (Jacob, 2001) το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία.

Το κλιματικό μοντέλο REMO (REgional MOdel) αναπτύχθηκε ως το ατμοσφαιρικό μέρος ενός συνδυαστικού ατμοσφαιρικο-υδρολογικού μοντέλου. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή του συστήματος αυτού ήταν το κύριο έργο του BALTEX (BALTIC Sea Experiment) (Majewski, 1991) (Jacob *et al.*, 2001). Το BALTEX ξεκίνησε το 1992 ως ένα ηπειρωτικής κλίμακας πείραμα (Continental-scale Experiment - CSE) μέσα στο πρόγραμμα μελέτης του παγκόσμιου κλίματος (World Climate Research Program - WCRP). Ο ερευνητικός στόχος του BALTEX ήταν αρχικά ο υδρολογικός κύκλος και η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ατμόσφαιρας και γης, όμως επεκτάθηκε σε δεύτερη φάση στην περιοχική (regional) κλιματική μελέτη, διαχείριση υδάτων και ποιότητα νερού και αέρα. Η βαλτική θάλασσα και η λεκάνη της είχε επιλεχθεί ως περιοχή μελέτης του προγράμματος. Προσομοιώσεις μέχρι δέκα χρόνια με οριακές συνθήκες τα επανεπεξεργασμένα (reanalysis) δεδομένα του ECWMF (ERA40), έχουν επιτυχώς συγκριθεί με δεδομένα παρατηρήσεων (Jacob, 2001). Το REMO έχει την δυνατότητα να τρέξει σε πολλές πλατφόρμες, όπως επίσης χρησιμοποιείται και παράλληλη έκδοση (MPI). Οριζόντιες αναλύσεις μεταξύ 1/10° and 1° χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση περιόδων που ποικίλουν από μέρες μέχρι αιώνες. Οι παρακάτω περιοχές έχουν προσομοιωθεί με το REMO: Ευρώπη, Αρκτική, Ανταρκτική, Σιβηρία, Ινδονησία, Ινδία, Περού, Αφρική, Βόρεια Αμερική, Βαλτική, Βόρεια θάλασσα, Βόρειος ατλαντικός, Ειρηνικός. Το REMO χρησιμοποιείται από 15 ινστιτούτα

στην Γερμανία, Γαλλία, Ελβετία, Ελλάδα και Κίνα, ενώ ενδιαφέρον έχουν δείξει πολλά άλλα ινστιτούτα. Τα αποτελέσματά του έχουν αναλυθεί από πολλά άλλα ιδρύματα.

2.7.3 Προσομοίωση βροχόπτωσης και προβλήματα κλιματικών μοντέλων

2.7.3.1 Διόρθωση σφάλματος πόλωσης βροχόπτωσης (bias correction)

Τα τοπικά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate models - RCMs) τείνουν να προσομοιάζουν την βροχόπτωση με διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά σε σχέση με μετρημένες βροχοπτώσεις διαφορετικών σταθμών εντός του ίδιου κελιού. Η διόρθωση του αποτελέσματος ενός μοντέλου με τρόπο τέτοιο ώστε τα αποτελέσματα του να είναι στατιστικώς συναφή με τα πραγματικά δεδομένα, ονομάζεται διόρθωση σφάλματος πόλωσης. Η μέθοδος διόρθωσης ποικίλλει ανάλογα τον τύπο, τη χρονική και χωρική κλίμακα των δεδομένων. Κάποιες μέθοδοι διόρθωσης εμπλέκουν μεθόδους ανάκτησης στατιστικών χαρακτηριστικών από τα παρατηρηθέντα δεδομένα και εφαρμογή τους πάνω στα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ κάποιες άλλες είναι απλούστερες και περιορίζονται στην εφαρμογή κάποιου συντελεστή διόρθωσης πάνω στα αποτελέσματα του μοντέλου. Σε εργασίες τους οι Murphy (1999), Kidson και Thompson (1998), Wilby *et al*. (2000) και Christensen *et al*. (2008) καταδεικνύουν την ανάγκη για διόρθωση του σφάλματος πόλωσης με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρήσιμων σε εφαρμογές όπως την υδρολογία και την διαχείριση υδατικών πόρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιοχή μελέτης

3.1 Γενικά στοιχεία

3.1.1 Γεωγραφικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά

Η Κρήτη αποτελεί, σύμφωνα με τον Ν.1739/87 περί διαχείρισης υδατικών πόρων, ένα αυτόνομο υδατικό διαμέρισμα από τα συνολικά δεκατέσσερα (14), στα οποία χωρίζεται η χώρα. Το υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης περιλαμβάνει την ομώνυμη μεγαλόνησο μαζί με τα μικρά νησιά Γαύδος, Ντία, Κουφονήσι, Γαϊδουρονήσι ή Χρυσή, Διονυσάδες, Σπιναλόγκα και Παξιμάδι, εκ των οποίων τα περισσότερα είναι ακατοίκητα. Περιλαμβάνει τους νομούς Χανίων, Ρεθύμνου, Ηρακλείου και Λασιθίου. Βρέχεται βόρεια από το Κρητικό Πέλαγος και νότια από το Λιβυκό και Αιγύπτιο Πέλαγος. Έχει συνολική έκταση 8.335 km^2 και καλύπτει το 6,3% της συνολικής έκτασης της χώρας.

Λόγω της γεωγραφικής της θέσης, της μεγάλης της έκτασης, των υψηλών ορεινών όγκων και της γεωλογικής της ιστορίας καταλαμβάνει ιδιάζουσα θέση στα όρια μεταξύ κεντρικής και ανατολικής λεκάνης της Μεσογείου. Το επίμηκες σχήμα της με προσανατολισμό από δυτικά προς τα ανατολικά έχει μήκος 254 km και πλάτος που κυμαίνεται μεταξύ 12 και 56 km.

Η μορφολογία της Κρήτης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη τριών βασικών ζωνών: την ζώνη με υψόμετρο 400 m και άνω (υψηλή ή ορεινή), τη ζώνη από 200-400 m (μέση) και την χαμηλή ζώνη, που αφορά τις περιοχές που εκτείνονται από την επιφάνεια της θάλασσας έως τα 200 m υψόμετρο. Οι δύο πρώτες ζώνες καταλαμβάνουν σχεδόν τα 3/5 της νήσου και αποτελούν μια συνεχή οροσειρά από τα δυτικά προς τα ανατολικά, διακοπτόμενη από μικρές κοιλάδες και φαράγγια. Η οροσειρά αυτή έχει έξι κορυφές που ξεπερνούν τα 2.000 m.

Το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού (3/4 της επιφάνειας περίπου) είναι ορεινό. Τα βασικά ορεινά συγκροτήματα του νησιού της Κρήτης είναι προς τα δυτικά τα Λευκά όρη (2.454 m), στο κεντρικό τμήμα ο Ψηλορείτης (ή Ίδη, 2.456 m) και προς τα ανατολικά το όρος Δίκτη (2.147 m) και τα όρη Σητείας (1.476 m). Προς τα δυτικά και νότια οι υπώρειες των ορέων είναι απότομες και φθάνουν με μεγάλη κλίση προς τη θάλασσα, ενώ προς τα βόρεια του νησιού το ανάγλυφο είναι πιο ήπιο και λοφώδες (πεδιάδες Χανίων, Ρεθύμνου και Μαλλίων). Η μεγαλύτερη πεδιάδα του νησιού βρίσκεται στο νοτιο-κεντρικό τμήμα του

(πεδιάδα Μεσσαράς), ενώ στο νοτιο- ανατολικό αναπτύσσεται η πεδιάδα της Ιεράπετρας. Υπάρχουν, τέλος, αρκετά οροπέδια, τα κυριότερα των οποίων είναι του Λασιθίου και του Ομαλού (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.2 Κλίμα

Ο τύπος κλίματος της Κρήτης, είναι ένας μεταβατικός ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η νοτιοανατολική Κρήτη. Το κύριο χαρακτηριστικό του κλίματος είναι η γλυκύτητα και η ηπιότητα. Η ψυχρή εποχή είναι ήπια και σε αυτό συντελεί η συχνή άφιξη στην περιοχή των θερμών και υγρών ΝΔ αερίων μαζών.

Σύμφωνα με τα συνοπτικά για τον Ελληνικό χώρο κλιματολογικά χαρακτηριστικά η περιοχή μελέτης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα βιοκλιματικών ορόφων με σημαντικές διακυμάνσεις από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα πεδινά προς τα ορεινά.

Ο νομός Λασιθίου υπάγεται κατά το μεγαλύτερο μέρος του στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Οι ημιορεινές περιοχές ανήκουν στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό, ενώ οι ορεινές περιοχές (οροπέδιο Λασιθίου) ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό.

Από τον Νομό Ηρακλείου, μόνο το βόρειο τμήμα του ανήκει στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό. Το υπόλοιπο του νομού ανήκει στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στην ανατολική Κρήτη ανέρχεται, σύμφωνα με τα διαλαμβανόμενα σε επόμενη παράγραφο σε λιγότερο από 500mm. Επομένως, παίρνοντας για κλιματικό στοιχείο το ετήσιο βροχομετρικό ύψος, η περιοχή της ανατολικής Κρήτης ανήκει στον ημίξηρο τύπο (ύψος βροχής 200-500 mm).

Ο νομός Ρεθύμνου ανήκει στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές του στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Οι ορεινές περιοχές του ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Ένα πολύ μικρό μέρος των πολύ ορεινών περιοχών του νομού ανήκει στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα δριμύ.

Ο νομός Χανίων ανήκει στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές του στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό ήπιο ή ψυχρό. Οι ορεινές περιοχές του ανήκουν στον

υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Ένα πολύ μικρό μέρος των πολύ ορεινών περιοχών του νομού ανήκει στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα δριμύ.

Από πλευράς χαρακτήρων μεσογειακού βιοκλίματος, ολόκληρη η παραλιακή ζώνη της βόρειας και της νότιας Κρήτης (με εξαίρεση τα νότια του νομού Χανίων) έχει έντονο θερμομεσοαγειακό χαρακτήρα με αριθμό βιολογικώς ξηρών ημερών κατά τη θερμή και ξηρά περίοδο 125<X<150. Στις ημιορεινές και ορεινές περιοχές ο χαρακτήρας μετατρέπεται σε έντονο μεσο-μεσογειακό (75<X<100), ασθενή μεσο-μεσογειακό (40<X<75), υπομεσογειακό (0<X<40) ενώ μόνο η κορυφή των Λευκών ορέων υπάγεται στον υπο-ξηρικό ψυχρό με περίοδο υπόξηρη χαρακτήρα (X=0).

Σύμφωνα με την κλιματική κατάταξη κατά Thornthwaite ο τύπος κλίματος της Ανατολικής Κρήτης είναι ο DdB2'a' όπου:

- το D χαρακτηρίζει το κλίμα ως ημίξηρο και καθορίζεται από τον δείκτη υγρασίας Im (-66,7 <Im< -33,3)
- το d είναι χαρακτηριστικό κλιμάτων με καθόλου η μηδαμινό πλεόνασμα νερού και καθορίζεται από τον δείκτη υγρότητας Ih (0-16,7%)
- το B3' είναι χαρακτηριστικό κλιμάτων που αναφέρονται ως μεγάθερμα και καθορίζεται από τον δείκτη θερμικής αποτελεσματικότητας Iθ (85,5-97,7 cm) και
- το α' αναφέρεται στον δείκτη θερινής συγκέντρωσης Cθ (<48%).

Σύμφωνα με το σύστημα Emberger η περιοχή ανήκει στα όρια του ύφυγρου και ημίξηρου μεσογειακού ορόφου με χειμώνα θερμό.

Από πλευράς βλαστήσεως ολόκληρη η παραλιακή ζώνη της Κρήτης και σε απόσταση μερικά χιλιόμετρα από την ακτή, περιλαμβάνει θερμομεσογειακές διαπλάσεις (Oleo Ceratonion) Ανατολικής Μεσογείου. Το εσωτερικό της περιλαμβάνει μεσομεσογειακές διαπλάσεις διαπλάσεις Αριάς (Quercion ilicis) τύπος βαλκανικός και Ανατολικής Μεσογείου. Στις ορεινές περιοχές εμφανίζεται η ορομεσογειακή διάπλαση του Κυπαρισσίου (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.3 Θερμοκρασία

Για τις ανάγκες περιγραφής του κλίματος της Κρήτης χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικοί κλιματολογικοί σταθμοί στη Σητεία (ανατολικός), τον Αλικιανό (δυτικός

σταθμός), το Ηράκλειο (βόρειος σταθμός) και την Ιεράπετρα (νότιος σταθμός). Από την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών δεδομένων των σταθμών αυτών, προέκυψε ότι:

- Η μέση θερμοκρασία εμφανίζεται μεγαλύτερη στα ανατολικά από ότι στα δυτικά (18,38 έναντι 16,96 ^{o}C) και μεγαλύτερη στα νότια από ότι στα βόρεια (19,55 έναντι 18,55 ^{o}C).
- Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ανέρχεται σε 17°C περίπου για τους τρεις σταθμούς (Σητεία, Αλικιανός και Ηράκλειο) ενώ στην Ιεράπετρα το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ανέρχεται σε 20°C.

Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3.1: Θερμοκρασιακά δεδομένα τεσσάρων (4) σταθμών.

Σταθμός	**Μέση Ετήσια Θερμοκρασία (^{o}C)**	**Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία (^{o}C)**	**Μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (^{o}C)**	**Ετήσιο θερμομετρικό εύρος (^{o}C)**
Σητεία	18,38	9,5	26,7	17,2
Αλικιανός	16,96	8	26,0	18,0
Ηράκλειο	18,55	9,8	27,6	17,8
Ιεράπετρα	19,55	10,1	30,0	19,9

Από την άποψη της ηπιότητας και των μεταβολών το κλίμα της Κρήτης θεωρείται προνομιούχο και οφείλεται στην κεντρική θέση που κατέχει η νήσος στην ανατολική Μεσόγειο. Ο χειμώνας αρχίζει συνήθως κατά τα μέσα Δεκεμβρίου και είναι ήπιος. Ο ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Φεβρουάριος που διαφέρει ελάχιστα θερμομετρικά από τον Ιανουάριο. Η διαφορά τους όμως τόσο με τον Δεκέμβριο όσο και με τον Μάρτιο είναι αισθητή.

Θερμότερος μήνας του έτους είναι ο Ιούλιος με μέση υπερετήσια θερμοκρασία περίπου 25 ^{o}C. Στην Ιεράπετρα η μέση υπερετήσια θερμοκρασία του Ιουλίου είναι ιδιαίτερα υψηλή ανερχόμενη στους 28 ^{o}C. Ο Ιούνιος εμφανίζει χαμηλότερη θερμοκρασία τόσο από τον Ιούλιο όσο και από τον Αύγουστο, παρουσιάζει όμως τα ίδια επίπεδα θερμοκρασίας με τον Σεπτέμβριο. Η μέση υπερετήσια θερμοκρασία του τελευταίου ανέρχεται σε 23 ^{o}C για τους σταθμούς Σητείας και Ηρακλείου ενώ είναι χαμηλότερη στον Αλικιανό (21,5 ^{o}C) και υψηλότερη στην Ιεράπετρα (25 ^{o}C). Οι θερμοκρασίες αυτές προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό

και τη χρονική διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, η οποία σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης καλύπτει 4 τουλάχιστον μήνες (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος).

Η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά στα ορεινά στα οποία οι μέσες θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις εντονότερες και οι θερμοκρασίες ιδιαίτερα των χειμερινών μηνών σημαντικά χαμηλότερες. Στο κλιματολογικό σταθμό των Ανωγείων (+740μ) η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται σε 15,2 ^{o}C, ο Φεβρουάριος είναι ο ψυχρότερος μήνας με μέση μηνιαία θερμοκρασία 7,3 ^{o}C, ο Ιούλιος είναι ο θερμότερος μήνας με μέση θερμοκρασία 23,7 ^{o}C ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ανέρχεται σε 22 ^{o}C.

Εκ των ανωτέρω και με βάση τα θερμοκρασιακά δεδομένα της Κρήτης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η πεδινή ζώνη της Κρήτης αποτελεί κλιματικά μια μετάβαση από το μεσογειακό προς το ημιερημικό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από μικρό ύψος βροχοπτώσεων, ήπιο χειμώνα και ξηρή περίοδο μεγάλης διάρκειας. Το θέρος, λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετησίων ανέμων είναι σχετικά δροσερό και διαρκεί από τον Ιούνιο μέχρι τον Σεπτέμβριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Στην περιοχή αυτή, δεν παρατηρείται ποτέ παγετός και η θερμοκρασία σπάνια πέφτει κάτω από 0 ^{o}C. Οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις είναι ήπιες.
- Η ορεινή ζώνη της Κρήτης εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις, μέση ετήσια θερμοκρασία 2-3 ^{o}C χαμηλότερη από την πεδινή ζώνη. Η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα (Ιούλιος) είναι στα επίπεδα της μέσης θερμοκρασίας του θερμότερου μήνα των πεδινών σταθμών, η μέση όμως θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα (Φεβρουάριος) είναι περί τους 3 ^{o}C χαμηλότερη (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.4 Υγρασία

Η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία είναι σε ολόκληρη την βόρεια Κρήτη, ελάχιστη τον Ιούνιο και μέγιστη τον Δεκέμβριο. Στη νότια Κρήτη η ελάχιστη μέση μηνιαία σχετική υγρασία εμφανίζεται τον Ιούλιο (σταθμοί Ιεράπετρας και Τυμπακίου). Μεταξύ των βορείων σταθμών η μέση ελάχιστη σχετική υγρασία μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά (Σητεία 59,88% Ηράκλειο 55,4% και Σούδα 48,90%) ενώ η μέγιστη σχετική υγρασία είναι παρόμοια στη Σητεία και τη Σούδα (περίπου 72%) και σημαντικά μικρότερη στο

Ηράκλειο (67%). Τη μεγαλύτερη διακύμανση παρουσιάζει η σχετική υγρασία των νοτίων σταθμών (27%) και την μικρότερη ο σταθμός του Ηρακλείου με μόλις 12%.

Οι χαμηλές μέσες σχετικές υγρασίες του καλοκαιρινούς μήνες, (ιδιαίτερα στη νότια Κρήτη), σε μια περίοδο όπου οι θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα υψηλές, καθιστούν το θέρος ευχάριστο και δεν δημιουργούν συνθήκες δυσφορίας γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό ιδιαιτέρως στις τουριστικές ζώνες (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.5 Βροχόπτωση

Η μέση ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζει αύξηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από νότια προς βόρεια. Στην πόλη της Σητείας η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 490 mm, στο Ηράκλειο σε 470mm ενώ στους δυτικούς σταθμούς του Αλικιανού και της Σούδας οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις ανέρχονται σε 824 και 600mm αντίστοιχα.

Η μικρότερη μέση υπερετήσια βροχόπτωση καταγράφεται στον σταθμό της Ιεράπετρας (440mm) ενώ στους ορεινούς σταθμούς οι τιμές της βροχόπτωσης διαφοροποιούνται σημαντικά. Στο σταθμό Τζερμιάδω η μέση υπερετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 1157mm.

Η Κρήτη γενικώς παρουσιάζει σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης τόσο γεωγραφικά (από ανατολικά προς δυτικά), όσο και φυσιογραφικά (πεδινές προ ορεινές περιοχές), εμφανίζοντας βροχοβαθμίδα (αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο) από τις μεγαλύτερες της Ελλάδας.

Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και τον Αύγουστο οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη. Το 25% περίπου της ετήσιας βροχόπτωσης συμβαίνει στους περισσότερους σταθμούς της Κρήτης στη διάρκεια του βροχερότερου μήνα. Αντίστοιχα, ο μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής κυμαίνεται μεταξύ 15 ημερών περίπου κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο και 0,3 ημέρες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Ο αριθμός των ημερών βροχής δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των ορεινών και των πεδινών σταθμών. Στους ορεινούς μάλιστα σταθμούς ο αριθμός ημερών βροχής εμφανίζεται ίσος ή και μικρότερος του αριθμού ημερών βροχής στους πεδινούς σταθμούς, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες. Ο μέσος αριθμός ημερών βροχής στην Κρήτη ανέρχεται σε 90 περίπου ημέρες (25% του έτους) (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.6 Άνεμοι

Από τα ανεμολογικά στοιχεία που επεξεργάστηκε η Περιφέρεια Κρήτης εκ της ΕΜΥ, είναι ετήσια σε Beaufort και τομείς 45° και από αυτά προκύπτει ότι:

- Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους επικρατούν κυρίως οι βόρειοι και οι βορειοδυτικοί άνεμοι. Η νηνεμία καλύπτει ετήσιο ποσοστό της τάξης του 20% στους πεδινούς σταθμούς της ανατολικής Κρήτης. Στους ορεινούς σταθμούς το ποσοστό είναι μεγαλύτερο και ανέρχεται σε 30% περίπου.
- Η ένταση των ανέμων παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση στους σταθμούς της ανατολικής Κρήτης από τους σταθμούς της δυτικής Κρήτης. Η μέγιστη μηνιαία ένταση ανέμων εμφανίζεται στην Σητεία και την Ιεράπετρα τον Ιούλιο (5,82 και 6,84m/s αντίστοιχα). Στους σταθμούς της δυτικής Κρήτης η μέγιστη (μέση μηνιαία) ένταση ανέμων εμφανίζεται κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, είναι δε σημαντικά χαμηλότερη ανερχόμενη σε 4m/s περίπου.
- Ο συνολικός (μέσος) αριθμός ημερών με ένταση μεγαλύτερη από 6Β (ισχυρός άνεμος) παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση κυμαινόμενος από 30 έως 80 ημέρες είναι δε μεγαλύτερος στους ορεινούς από ότι στους παραλιακούς σταθμούς.
- Αντίστοιχα, ο μέσος αριθμός ημερών με ένταση μεγαλύτερη από 8Β (ορμητικός άνεμος) είναι πολύ μικρός κυμαίνεται δε από λίγες ημέρες στους πεδινούς παραλιακούς σταθμούς (2,5 ημέρες στο Ηράκλειο) μέχρι λιγότερο από 1 ημέρα στους ορεινούς σταθμούς (0,9 ημέρες στον σταθμό Τζερμιάδο) (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.7 Νέφωση - Ηλιοφάνεια - Ομίχλη

Η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα υψηλή σε ολόκληρη την Κρήτη. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται σε 2700 περίπου ώρες στην βόρεια Κρήτη (2707 ώρες στο Ηράκλειο, 2699 ώρες στη Σητεία, 2765 ώρες στη Σούδα και 2592 ώρες στο Ρέθυμνο 9μέσος όρος 8 ετών μόνο)). Στη νότια Κρήτη ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας είναι κατά 10% τουλάχιστον υψηλότερος ανερχόμενος σε 3000 περίπου ώρες (3068 ώρες στην Ιεράπετρα και 2948 ώρες στο Τυμπάκι). Ο αριθμός ωρών ηλιοφάνειας της Ιεράπετρας είναι ο μεγαλύτερος της Ελλάδας.

Η μέση νέφωση κυμαίνεται μεταξύ περίπου 5 (όγδοα) τον Ιανουάριο και 0,6-1 όγδοο τον Ιούλιο. Ο μέσος αριθμός αιθρίων ημερών (νέφωση μεταξύ 0 και 1,5 όγδοα) κυμαίνεται μεταξύ 3,0 περίπου τον Ιανουάριο και 28 ημερών τον Ιούλιο στις πεδινές περιοχές. Στις ορεινές περιοχές ο αριθμός των αιθρίων ημερών κατά τους θερινούς μήνες είναι κατά 30% μικρότερος.

Η ομίχλη (όπως και η πάχνη) είναι επίσης εξαιρετικά σπάνια στην Κρήτη. Ο μέσος συνολικός αριθμός ημερών ομίχλης είναι ίσος με λιγότερο από 1 ημέρα (0,9 ημέρες στο Ηράκλειο και 0,4 ημέρες στη Σητεία) για τους πεδινούς σταθμούς και περίπου 15 ημέρες για τους ορεινούς (16 ημέρες στον σταθμό Τζερμιάδο).

Αντίθετα, συχνότερη είναι η εμφάνιση υδροσταγόνων πάνω στις επιφάνειες του εδάφους, δηλαδή η δρόσος (dew). Ο μέσος συνολικός αριθμός ημερών δρόσου ανέρχεται στο Ηράκλειο σε 45,2 ημέρες ενώ στους ορεινούς σταθμούς με μεγαλύτερο αριθμό ημερών ομίχλης, ο αριθμός ημερών δρόσου είναι μικρότερος ανερχόμενος στο σταθμό Τζερμιάδο σε 23,3 ημέρες (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

3.1.8 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Η Κρήτη βρίσκεται στο νοτιοανατολικό μέρος του Ελληνικού τόξου πίσω από το μέτωπο της αλπικής ορογένεσης, και σε μικρή απόσταση από αυτό. Η γεωλογική δομή της Κρήτης είναι πολύ πολύπλοκη. Στους γεωλογικούς σχηματισμούς εντοπίζονται πτυχώσεις που παρουσιάζουν δυτική-ανατολική διεύθυνση και χωρίζονται σε τρία κύρια τμήματα βάσει της προέλευσης τους. Ένα αυτόχθονο τμήμα, ένα αλλόχθονο τμήμα και ένα νεότερο σχηματισμό του Νεογενούς και Τεταρτογενούς που αποτελείται από ένα σύστημα ιζημάτων που έχουν αποτεθεί πάνω από τους παλαιότερους σχηματισμούς. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα οι παραπάνω σχηματισμοί.

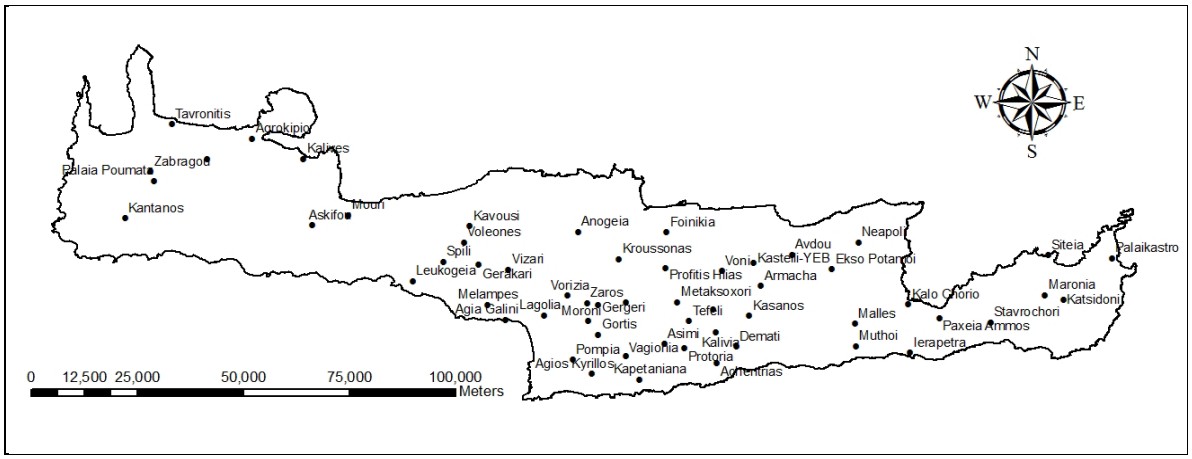
Ο πρώτος σχηματισμός, το αυτόχθονο σύστημα - Ιόνιος ζώνη - περιλαμβάνει την ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων, που χαρακτηρίζεται από τη λεπτοστρωματώδη ανάπτυξη ισχυρά ανακρυσταλλωμένων ασβεστόλιθων-μαρμάρων. Μέσα σε αυτούς παρεμβάλλονται πυριτόλιθοι με μορφή λεπτών στρώσεων, κονδύλων ή φακών, σχιστόλιθοι, κυρίως πυριτικοί που βρίσκονται με μορφή ένστρωσης στη βάση των πλακωδών κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι έως μάρμαρα και δολομίτες.

Ο δεύτερος σχηματισμός είναι το αλλόχθονο σύστημα που περιλαμβάνει μια ολόκληρη σειρά από ενότητες εντελώς διαφορετικών χώρων, προέλευσης και λιθοστρωματογραφίας, οι οποίες βρίσκονται η μια πάνω στην άλλη με τεκτονικές επαφές. Το τεκτονικό κάλυμμα Ομαλού-Τρυπαλίου αποτελεί το κατώτερο κάλυμμα του νησιού και βρίσκεται πάνω στην αυτόχθονη σειρά στων λεπτοπλακωδών κρυσταλλικών ασβεστόλιθων. Εμφανίζει μεγάλη εξάπλωση στη δυτική Κρήτη και αναπτύσσεται σε μεγάλο τμήμα των Λευκών Ορέων. Επάνω στην ενότητα Τρυπαλίου βρίσκεται εναποτιθέμενο το τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Ακολουθεί το τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης της Τρίπολης, το οποίο συναντάται εναποτιθέμενο είτε πάνω στους φυλλίτες – χαλαζίτες είτε απευθείας πάνω στους Πλακώδεις ασβεστόλιθους. Το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου συναντάται εναποτιθέμενο πάνω στο αντίστοιχο της Τρίπολης με μικρές γενικά ανθρακικές εμφανίσεις λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων με ενστρώσεις πυριτιολίθων, στρώματα κερατολίθων και μεγαλύτερα αναπτύγματα του φλύσχη. Ακολουθούν τα τεκτονικά καλύμματα των εσωτερικών ζωνών. Στην ενότητα αυτή ανήκουν οι οφιόλιθοι , τα μεταμορφωμένα πετρώματα, τα ανθρακικά πετρώματα, τα ιζήματα, οι γρανίτες κ.τ.λ..

Οι τελευταίοι και νεότεροι των προηγουμένων είναι οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμοί, βρίσκονται πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς. Οι νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, ποτάμιας και θαλάσσιας φάσης ενώ τα τεταρτογενή ιζήματα αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις άμμων, κροκάλων, αργίλων και χαλικών (Περιφέρεια Κρήτης, 2001).

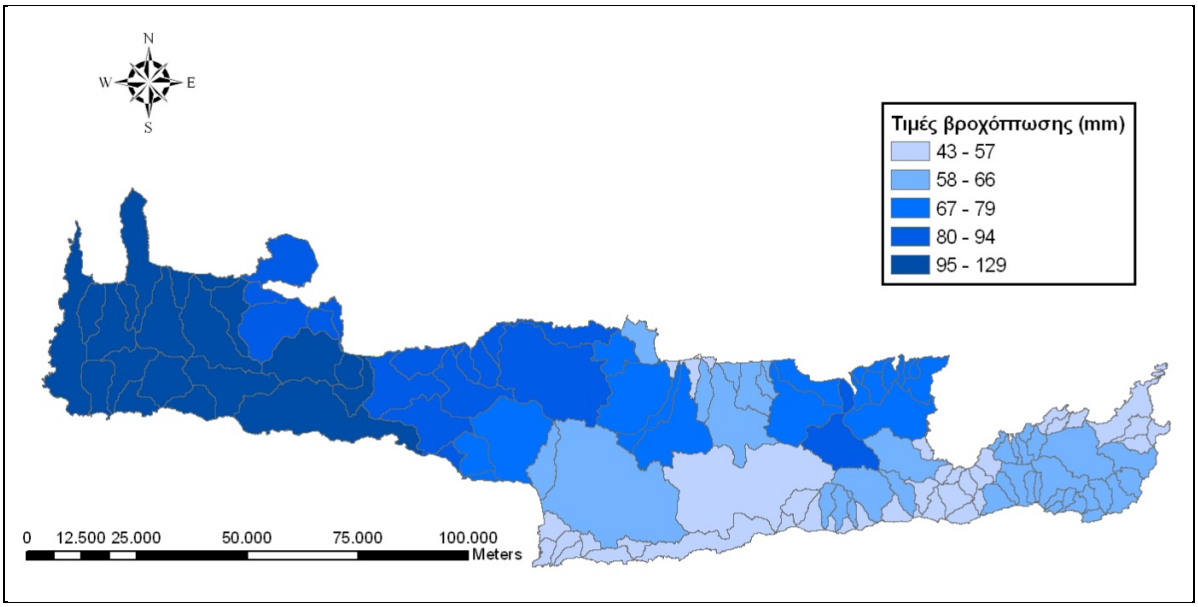
3.2 Βροχομετρικά δεδομένα

Στην Κρήτη υπάρχουν διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα για 70 βροχομετρικούς σταθμούς από τους οποίους ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο υπάρχει για τους 57 που παρουσιάζονται χωροθετημένοι στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Θέσεις 57 βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν.

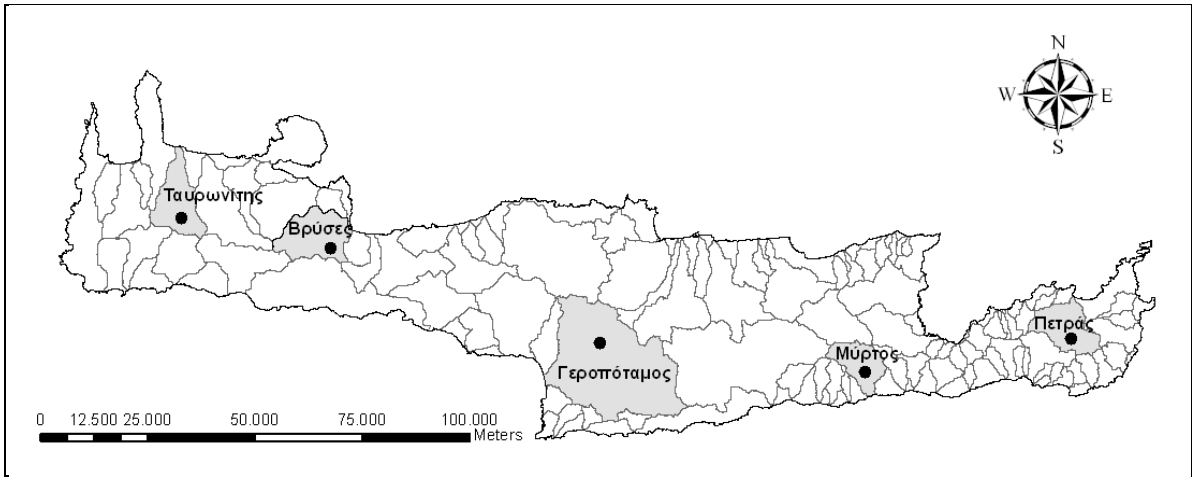
Τα δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν μετρήσεις βροχόπτωσης για την περίοδο 1/9/1973-1/8/2004. Μέσω της μεθόδου χωρικής παρεμβολής IDW, για την οποία έγινε αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα προκύψουν οι μέσες μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης για τις λεκάνες που έχουν εμβαδό πάνω από 5 km^2 (130 λεκάνες) (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για 130 λεκάνες της Κρήτης.

Ενδεικτικά πραγματοποιήθηκε παρουσίαση της ανάλυσης ξηρασίας μέσω των δεικτών SPI και RDI για πέντε (5) λεκάνες, του Ταυρωνίτη, των Βρυσών, του Γεροποτάμου, του Μύρτου και του Πετρά (Σχήμα 3.3) με σκοπό την χρονική μελέτη της εξέλιξης του φαινομένου της ξηρασίας από δυτικά προς τα ανατολικά. Παράλληλα, διεξάχθηκε σύγκριση

των δεικτών για τη μελέτη της μεταξύ τους συσχέτισης και της συμπεριφοράς τους σε κάθε λεκάνη.



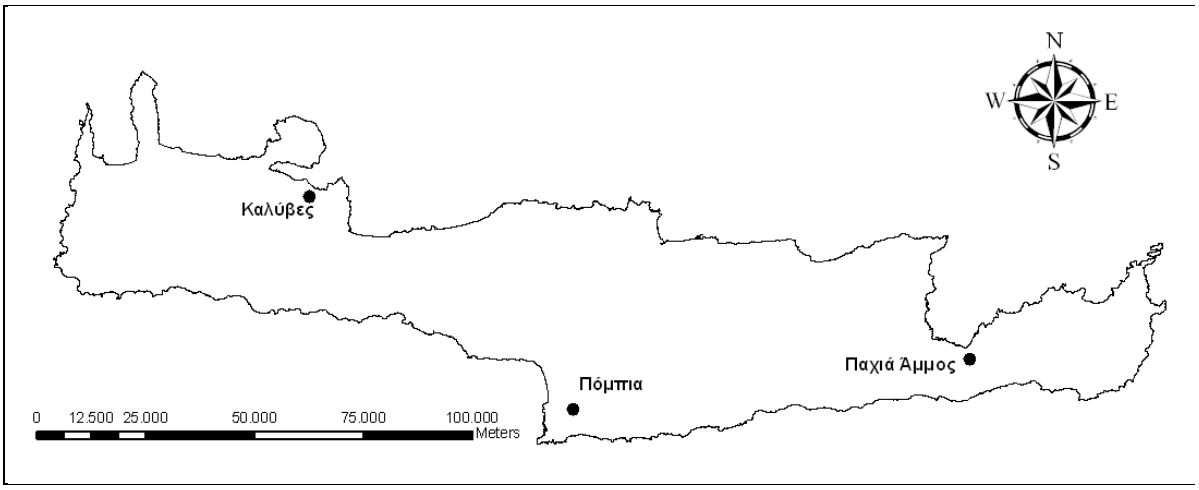
Σχήμα 3.3: Περιοχή μελέτης - λεκάνες Ταυρωνίτη, Βρυσών, Γεροποτάμου, Μύρτου και Πετρά.

Πίνακας 3.2: Τιμές μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης και μέσου υψομέτρου 5 λεκανών.

Λεκάνη	Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm)	Μέσο υψόμετρο (m)
Ταυρωνίτης	113,3	477
Βρύσες	129,1	659
Γεροπόταμος	62,0	478
Μύρτος	61,9	868
Πετράς	60,9	414

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται επίσης και τα μέσα υψόμετρα της κάθε λεκάνης.

Για τον υπολογισμό του δείκτη PDSI χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και υδροχωρητικότητας τριών (3) βροχομετρικών σταθμών, των Καλύβων, Πόμπιας και Παχιάς Άμμου. Άμεσος στόχος ήταν η σύγκριση με τον δείκτη SPI και ο εντοπισμός των σημείων στα οποία διαφοροποιούνται οι δύο δείκτες. Η εισαγωγή των παραγόντων της θερμοκρασίας και της υδροχωρητικότητας στον υπολογισμό του PDSI αποτελεί πρόκληση στην εξαγωγή αποτελεσμάτων ως προς τον βαθμό επιρροής του στις μεγάλες διακυμάνσεις των χρονοσειρών.



Σχήμα 3.4: Περιοχή μελέτης – σταθμοί Καλύβων, Πόμπιας και Παχιάς Άμμου.

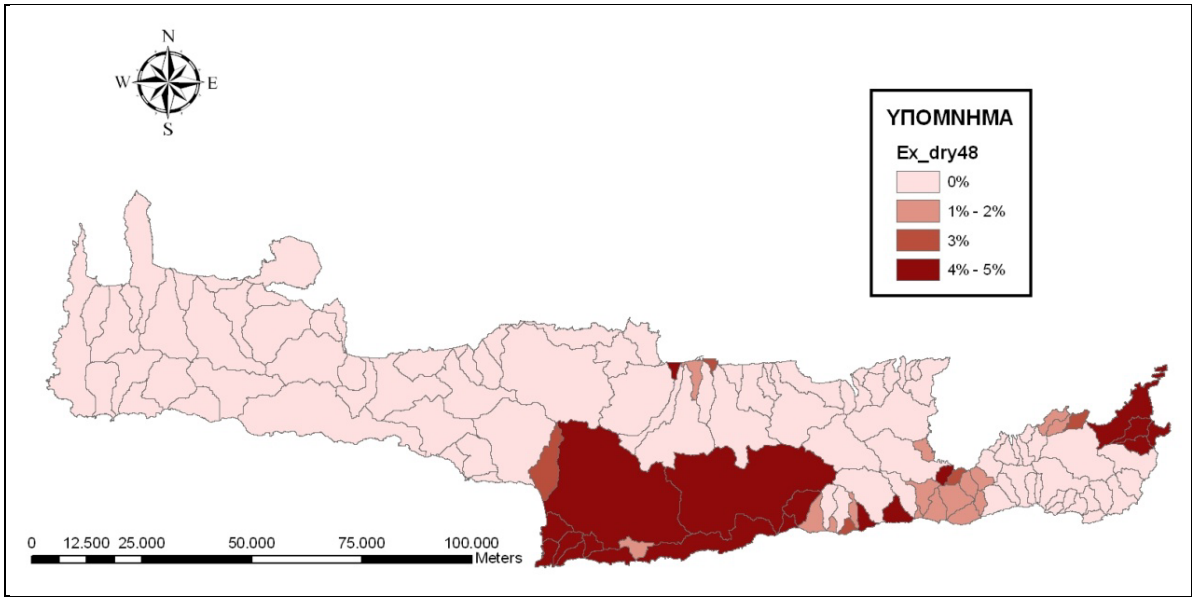
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αποτελέσματα

4.1 Ανάλυση ξηρασίας με την εφαρμογή των δεικτών SPI και SN-SPI

4.1.1 Χαρακτηρισμός των υδρολογικών λεκανών σε ποσοστό του χρόνου

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των συνθηκών ξηρασίας ανάλογα με την τιμή του δείκτη SN-SPI (Πίνακας 2.1), έγινε κατάταξη των λεκανών ως προς τον χαρακτηρισμό των συνθηκών ξηρασίας σε ποσοστό του συνολικού χρονικού διαστήματος (30 έτη). Συγκεκριμένα κατατάσσονται οι λεκάνες σε καθεμία κατηγορία (υπερβολικά ξηρή, πολύ ξηρή, μετρίως ξηρή κτλ.) ανάλογα με το ποσοστό εμφάνισης των συγκεκριμένων συνθηκών στο χρόνο.

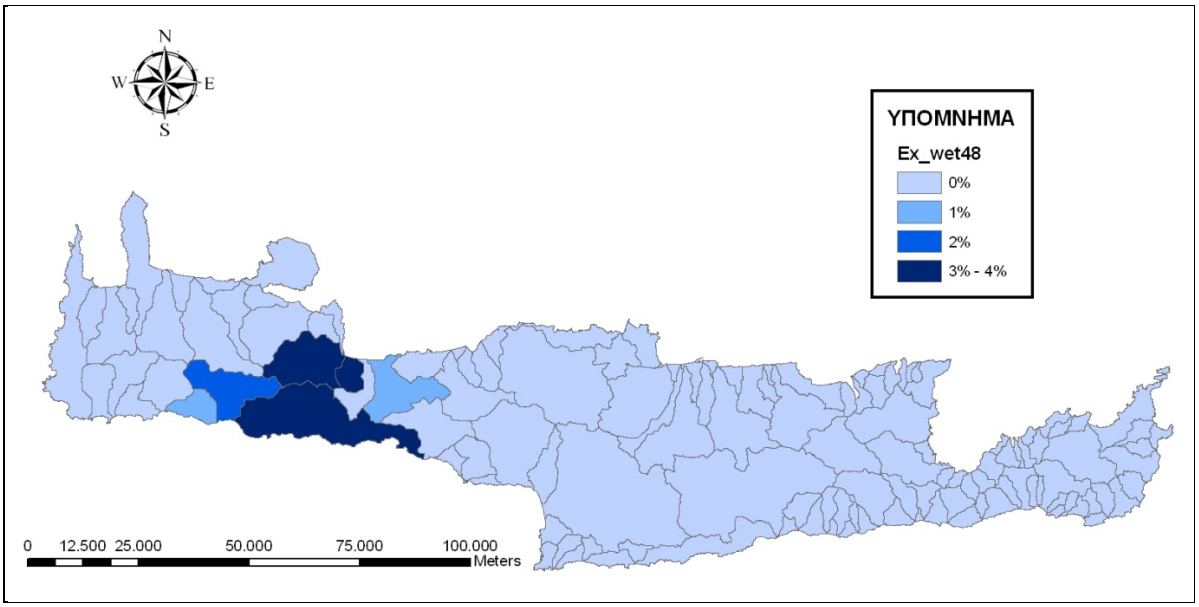
Στον ακόλουθο χάρτη παρουσιάζεται η χρονική κατανομή των λεκανών της Κρήτης με τάση προς ακραία ξηρασία 48 μηνών (Εικόνα 4.1). Παρατηρείται ότι επικρατεί ακραία παρατεταμένη ξηρασία 48 μηνών για ποσοστό χρόνου 5% κατά την περίοδο των 30 ετών στην κεντρική και ανατολική πλευρά της Κρήτης.



Εικόνα 4.1: Χρονική κατανομή των λεκανών με τάση προς ακραία ξηρασία 48 μηνών.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης της χρονικής κατανομής των λεκανών με ακραίες υγρές παρατεταμένες καιρικές συνθήκες 48 μηνών (Εικόνα 4.2). Είναι προφανές ότι το δυτικό τμήμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται από ακραίες υγρές συνθήκες, γεγονός

αναμενόμενο λόγω του πολύ εκτεταμένου ορεινού όγκου του Νομού Χανίων (Λευκά Όρη) που προκαλεί πιο συχνά ορογενή γεγονότα βροχής.



Εικόνα 4.2: Χρονική κατανομή των λεκανών με ακραίες υγρές καιρικές συνθήκες 48 μηνών.

4.1.2 Ποσοστό επιφάνειας υπό συνθήκες ξηρασίας

Από το Σχήμα 4.3 παρατηρείται ότι την χρονική περίοδο 1987-1992 όλη η επιφάνεια της Κρήτης υπόκειτο σε συνθήκες ξηρασίας ($SPI_{48} \leq 0$), ενώ είναι προφανές ότι με διαφορά 3 ετών αυξάνεται η επιφάνεια που υφίσταται τέτοιες συνθήκες. Γενικότερα, η μέση τάση δείχνει ότι κατά τη διάρκεια των 30 ετών το 45,8% του χρόνου πάνω από το 50% της επιφάνειας της Κρήτης δέχεται βροχόπτωση κάτω από τον μέσο όρο. Κατά την διάρκεια των ετών 1991-1994 ολόκληρη η επιφάνεια της Κρήτης βρισκόταν κάτω από συνθήκες ξηρασίας, με αποκορύφωμα τα έτη 1992-1993 κατά τα οποία οι συνθήκες ήταν ακραίως ξηρές (Σχήμα 4.4). Αν ληφθεί υπόψη ότι εξ' ορισμού ο μέσος όρος των τιμών SPI σε μια χρονοσειρά είναι μηδενικός, τότε προκύπτει επαληθευτικά ότι

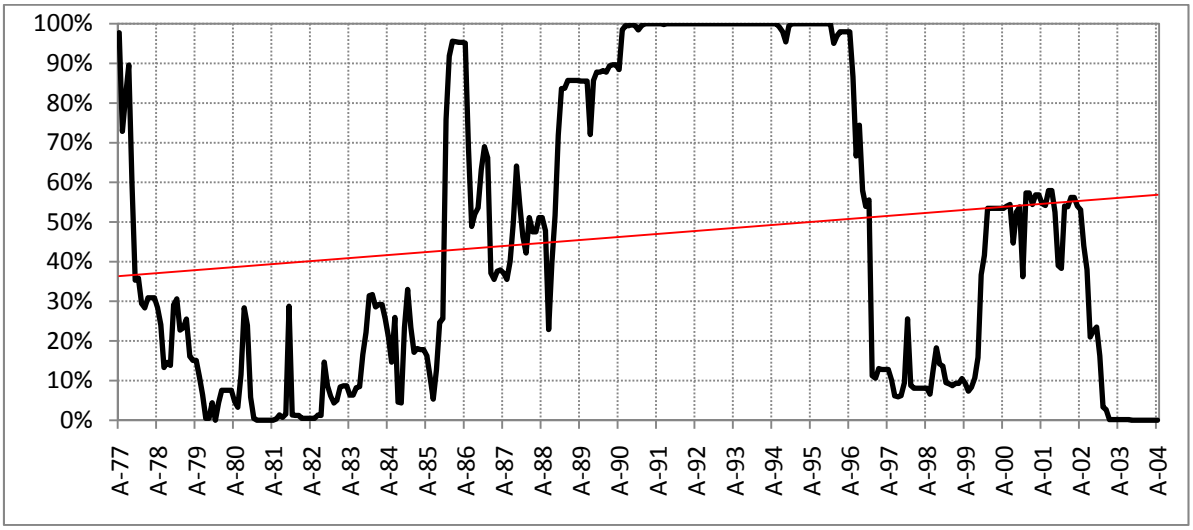
Μέσος όρος αρνητικών τιμών = - 0,88

Μέσος όρος θετικών τιμών = 0,77

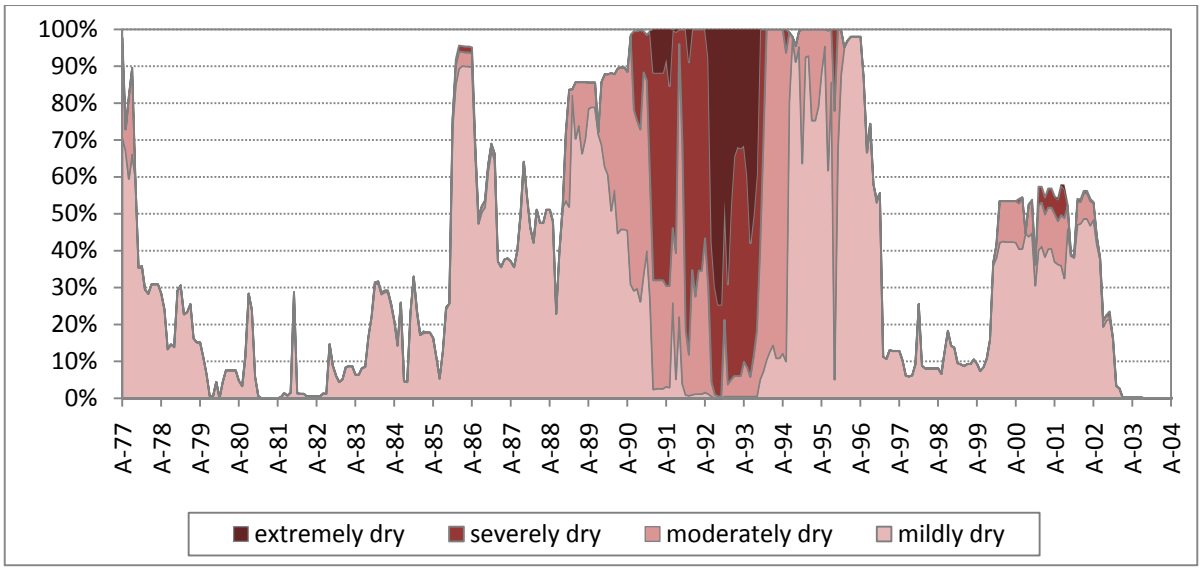
$$\mathbf{-0{,}88 \cdot 45{,}8 + 0{,}77 \cdot 54{,}2 \approx 0}$$

Οι μέσοι όροι λειτουργούν ως συντελεστές «δριμύτητας», πράγμα που σημαίνει πως εφόσον ο μέσος όρος των αρνητικών τιμών είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερος από αυτόν

των θετικών τιμών, οι ξηρές κατά SPI περίοδοι είναι πιο έντονες ως φαινόμενα από τις υγρές (οι ξηρές περίοδοι έχουν περισσότερα "extremes" από τις υγρές).



Σχήμα 4.3: Ποσοστό της επιφάνειας της Κρήτης που υπόκειται σε συνθήκες ξηρασίας ($SPI_{48} \leq 0$) για την περίοδο 1973-2004.



Σχήμα 4.4: Ποσοστό της επιφάνειας της Κρήτης που υπόκειται σε κάθε υποσυνθήκη ξηρασίας ($-1<SPI_{48} \leq 0$, $-1,5<SPI_{48} \leq -1$, $-2<SPI_{48} \leq -1,5$ και $SPI_{48} \leq -2$/ ελαφρώς ξηρές, μετρίως ξηρές, πολύ ξηρές και ακραίως ξηρές αντίστοιχα) για την περίοδο 1973-2004.

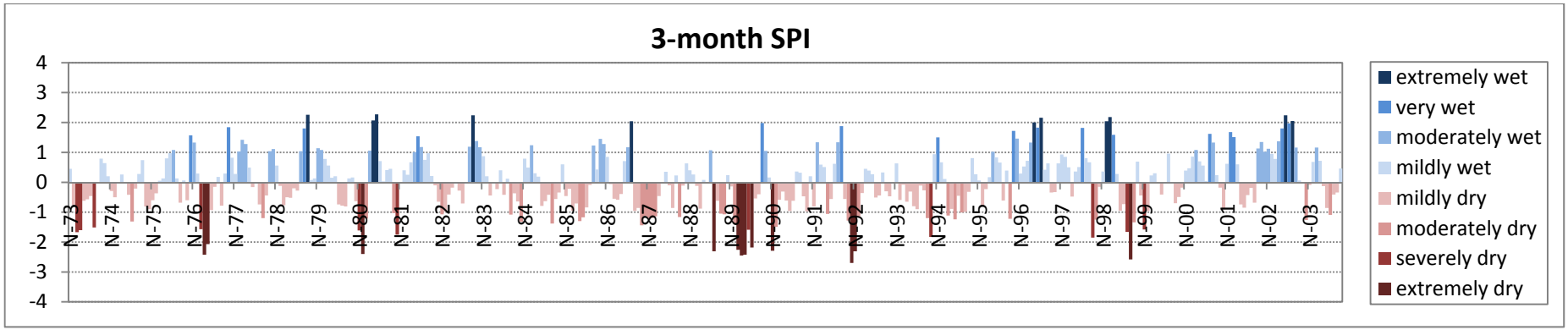
4.1.3 Ανάλυση χρονοσειρών δεικτών SPI/ SN-SPI για πέντε υδρολογικές λεκάνες

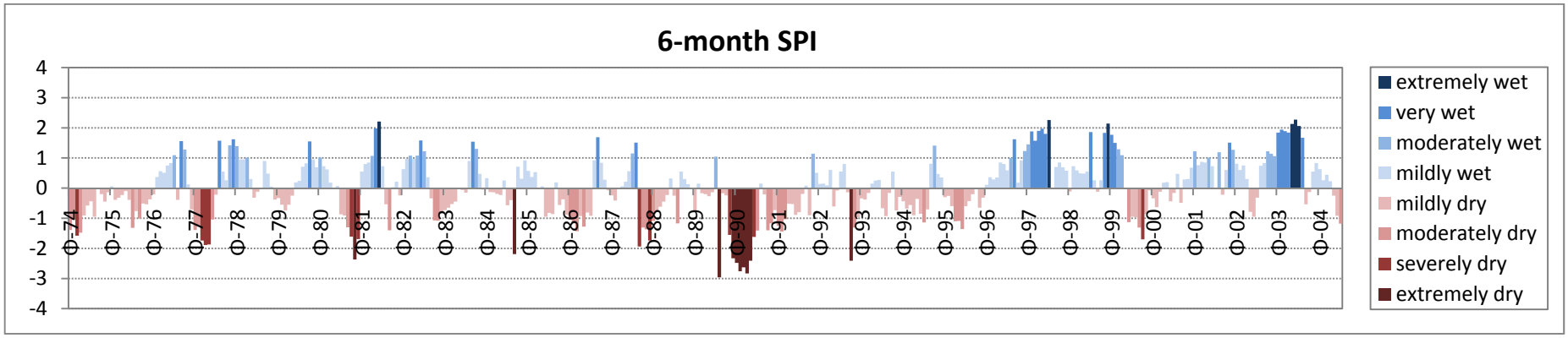
Είναι προφανές, σύμφωνα με τα Σχήματα 4.5, 4.6 αντίστοιχα, ότι η λεκάνη του Ταυρωνίτη (δυτική Κρήτη) χαρακτηρίζεται από μια περίοδο ξηρασίας (1986-1996), ενώ η λεκάνη του Πετρά (ανατολική Κρήτη) εμφανίζει μια παρατεταμένη περίοδο ξηρασίας (1990-2002).

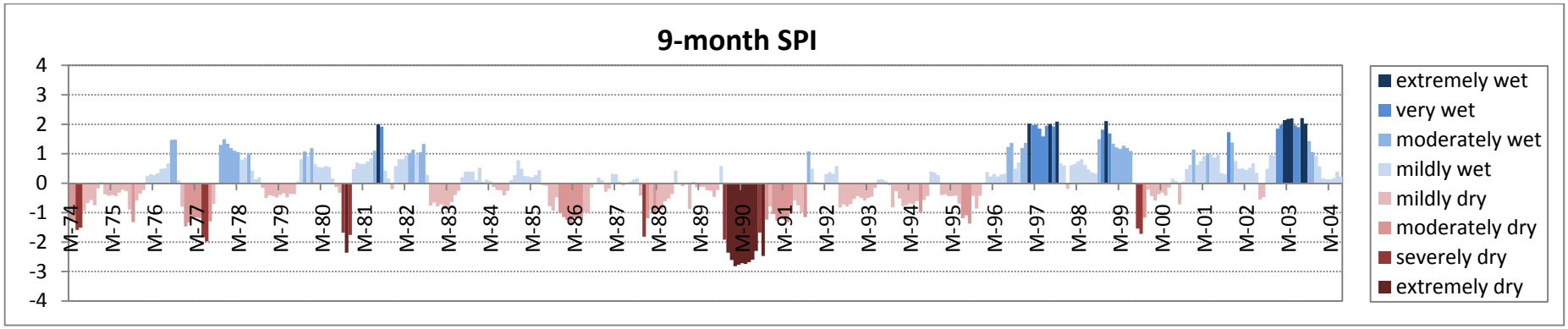
Μελετώντας λεπτομερώς τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων των δύο λεκανών από τα δυτικά προς τα ανατολικά φαίνεται ότι όσον αφορά τον Ταυρωνίτη κατά τη χρονική περίοδο 1978 – 1985 επικρατούν ελαφρώς και μέτρια υγρές συνθήκες, το διάστημα 1990 - 1994 οι λεκάνες χαρακτηρίζονται από ακραίες ξηρές συνθήκες (ειδικά τα έτη 1992 – 1993), ενώ μετά το 1996 επικρατούν υγρές συνθήκες. Συγκεκριμένα, μπορεί να διαπιστωθεί ότι τα έτη 2003 -2004 επικράτησαν ακραίες υγρές συνθήκες.

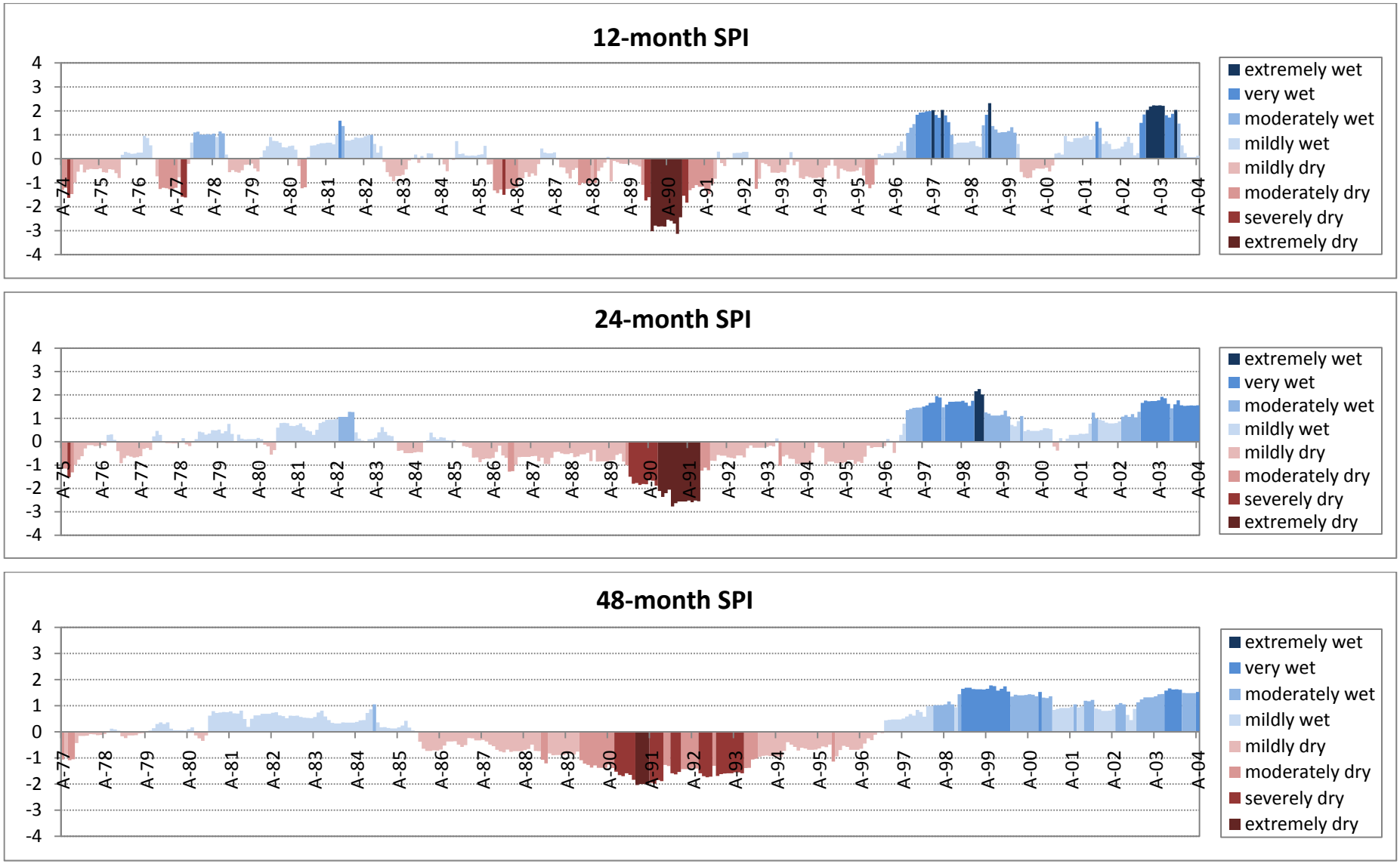
Παράλληλα, στη λεκάνη του Πετρά εντοπίζονται κάποια γεγονότα ακραίων υγρών συνθηκών (1980 – 1982) τα οποία διαδέχονται ακραίως ξηρές συνθήκες κατά το 1992-1993.

Η διαφοροποίηση μεταξύ των χρονοσειρών για τις δύο λεκάνες για τις βραχυπρόθεσμες περιόδους υπολογισμού του δείκτη SPI (3, 6, 9 μήνες) έγκειται στην εποχικότητα της βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, η χρονοσειρά του 3μηνου δείκτη SPI εκφράζει βραχυπρόθεσμες συνθήκες υγρασίας ή ξηρασίας και παρέχει εποχιακά μια εκτίμηση της βροχόπτωσης. Μια τρίμηνη περίοδος που χαρακτηρίζεται από φυσιολογικές συνθήκες υγρασίας θα μπορούσε να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια μιας μακροπρόθεσμης ξηρασίας σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, οπότε είναι πιθανό τα αποτελέσματα να είναι παραπλανητικά για περιοχές που ρεαλιστικά χαρακτηρίζονται διαφορετικά.

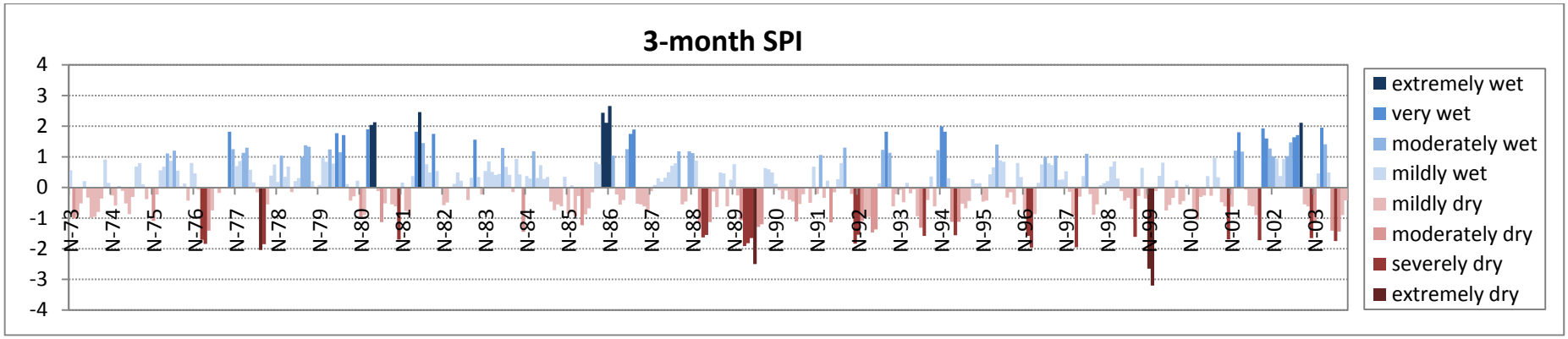

3-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
N-73
N-74
N-75
N-76
N-77
N-78
N-79
N-80
N-81
N-82
N-83
N-84
N-85
N-86
N-87
N-88
N-89
N-90
N-91
N-92
N-93
N-94
N-95
N-96
N-97
N-98
N-99
N-00
N-01
N-02
N-03
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

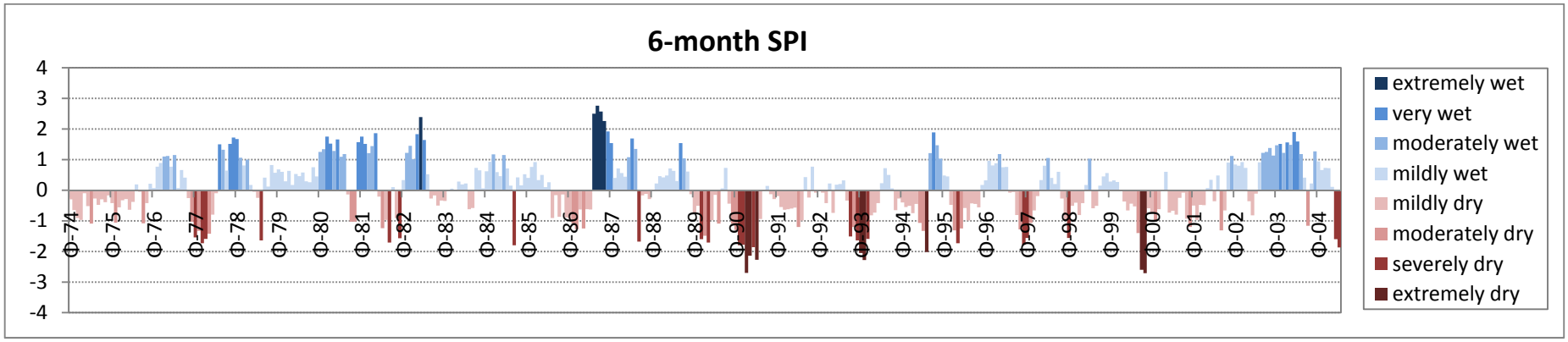

6-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Φ-74
Φ-75
Φ-76
Φ-77
Φ-78
Φ-79
Φ-80
Φ-81
Φ-82
Φ-83
Φ-84
Φ-85
Φ-86
Φ-87
Φ-88
Φ-89
Φ-90
Φ-91
Φ-92
Φ-93
Φ-94
Φ-95
Φ-96
Φ-97
Φ-98
Φ-99
Φ-00
Φ-01
Φ-02
Φ-03
Φ-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

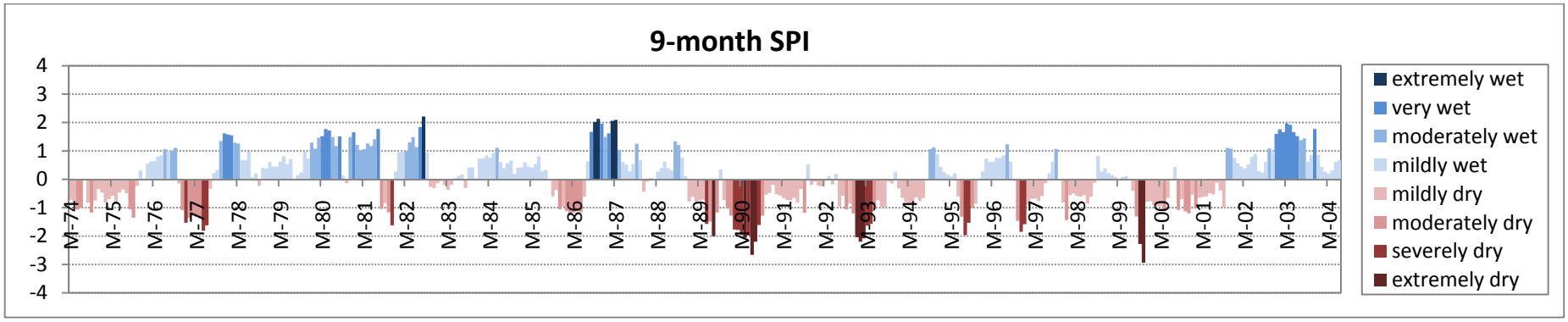

9-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
M-74
M-75
M-76
M-77
M-78
M-79
M-80
M-81
M-82
M-83
M-84
M-85
M-86
M-87
M-88
M-89
M-90
M-91
M-92
M-93
M-94
M-95
M-96
M-97
M-98
M-99
M-00
M-01
M-02
M-03
M-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

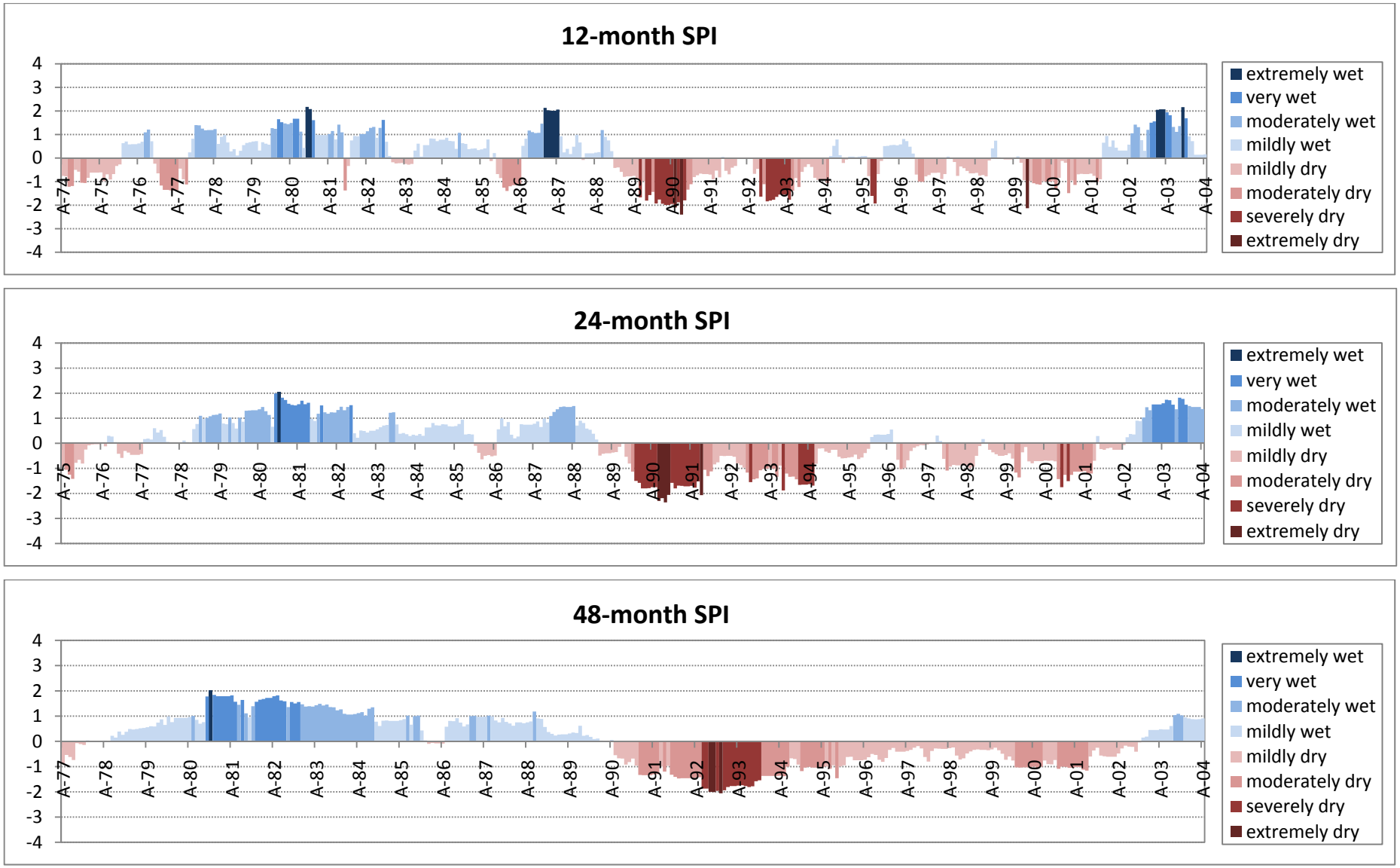


Σχήμα 4.5: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη του Ταυρωνίτη για την περίοδο 1973-2004.


3-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
N-73
N-74
N-75
N-76
N-77
N-78
N-79
N-80
N-81
N-82
N-83
N-84
N-85
N-86
N-87
N-88
N-89
N-90
N-91
N-92
N-93
N-94
N-95
N-96
N-97
N-98
N-99
N-00
N-01
N-02
N-03
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

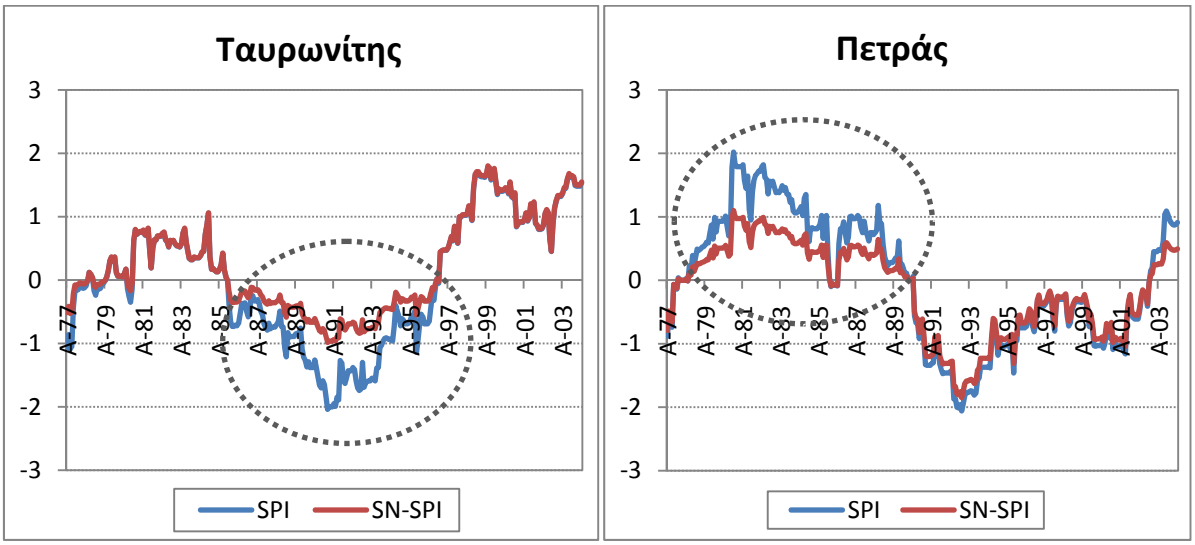

6-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Φ-74
Φ-75
Φ-76
Φ-77
Φ-78
Φ-79
Φ-80
Φ-81
Φ-82
Φ-83
Φ-84
Φ-85
Φ-86
Φ-87
Φ-88
Φ-89
Φ-90
Φ-91
Φ-92
Φ-93
Φ-94
Φ-95
Φ-96
Φ-97
Φ-98
Φ-99
Φ-00
Φ-01
Φ-02
Φ-03
Φ-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry


9-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
M-74
M-75
M-76
M-77
M-78
M-79
M-80
M-81
M-82
M-83
M-84
M-85
M-86
M-87
M-88
M-89
M-90
M-91
M-92
M-93
M-94
M-95
M-96
M-97
M-98
M-99
M-00
M-01
M-02
M-03
M-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry



Σχήμα 4.6: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη του Πετρά για την περίοδο 1973-2004.

Για λόγους σύγκρισης έγινε επιλογή μιας υγρής (Ταυρωνίτης) και μιας ξηρής (Πετράς) λεκάνης και εξαγωγή των αντίστοιχων χρονοσειρών (Σχήμα 4.7). Μπορεί να διαπιστώσει κανείς για την λεκάνη του Ταυρωνίτη ότι η κανονικοποίηση λαμβάνει χώρα την περίοδο 1986-1996, κατά την οποία επικρατούν ξηρές συνθήκες – η κλίμακα του SN-SPI αποκτά ελάχιστο στο -1 – ώστε να πραγματοποιηθεί μια «εξομάλυνση των ξηρών συνθηκών». Παρομοίως, για την λεκάνη του Πετρά, η κανονικοποίηση γίνεται την περίοδο 1978-1989, όπου επικρατούν υγρές συνθήκες (μέγιστη τιμή SPI= 2). Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται σαφές ότι η συγκεκριμένη λεκάνη κατά την συγκεκριμένη περίοδο θεωρείται υγρή, ενώ για να γίνει σύγκριση σε σχέση με τις υπόλοιπες λεκάνες, ο δείκτης SN-SPI λαμβάνοντας υπόψη τον χωρικό χαρακτήρα των συνθηκών βροχόπτωσης, «χαμηλώνει» την κλίμακά του.



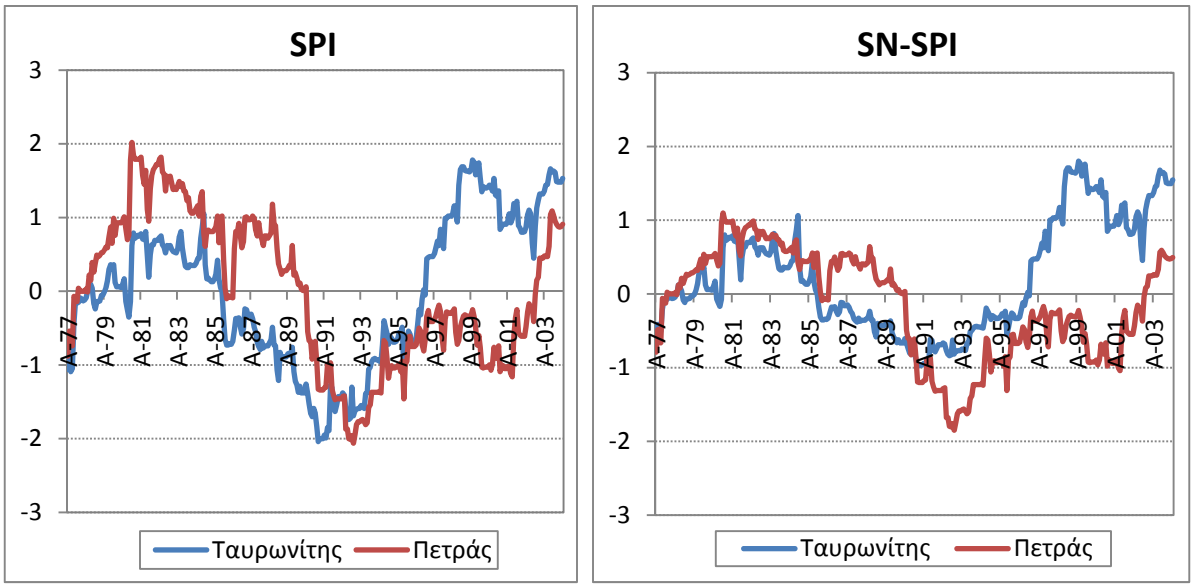
Σχήμα 4.7: Χρονοσειρές SPI και SN-SPI 48 μηνών για τις λεκάνες του Ταυρωνίτη και του Πετρά για την περίοδο 1973-2004.

Ακόμα πιο λεπτομερώς, η λεκάνη του Ταυρωνίτη έχει σχεδόν διπλάσιο μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης από του Πετρά (Πίνακας 4.1). Παρόλα αυτά, στο Σχήμα 4.8 η χρονοσειρά του SPI μαρτυρά υψηλότερες τιμές για τον Πετρά από τον Ταυρωνίτη. Με λίγα λόγια, προκύπτει ίδια τιμή SPI για διαφορετικά ύψη βροχόπτωσης, οπότε δεν μπορούν να συγκριθούν οι δύο λεκάνες. Από την άλλη μεριά, όσον αφορά τον SN-SPI προκύπτουν διαφορετικές τιμές για διαφορετικά ύψη βροχόπτωσης, πράγμα που αναδεικνύει την χωρική σχετικότητα της ξηρασίας: Το διάστημα του Απριλίου 1991, ο Ταυρωνίτης με SPI=-2 χαρακτηρίζεται ως λεκάνη σε κατάσταση ακραίας ξηρασίας, ενώ με SN-SPI=-1

χαρακτηρίζεται ως λεκάνη σε κατάσταση μέτριας ξηρασίας σε σχέση με όλες τις λεκάνες (130).

Πίνακας 4.1: Παράδειγμα διαφοροποίησης δεικτών SPI και SN-SPI.

Μέση ετήσια βροχόπτωση	Λεκάνη	Περίοδος	Μέση βροχόπτωση 48 μηνών	SPI	SN-SPI
723 mm	Πετράς	Ιανουάριος 1993	45 mm	-2	-2
1347 mm	Ταυρωνίτης	Απρίλιος 1991	84 mm	-2	-1

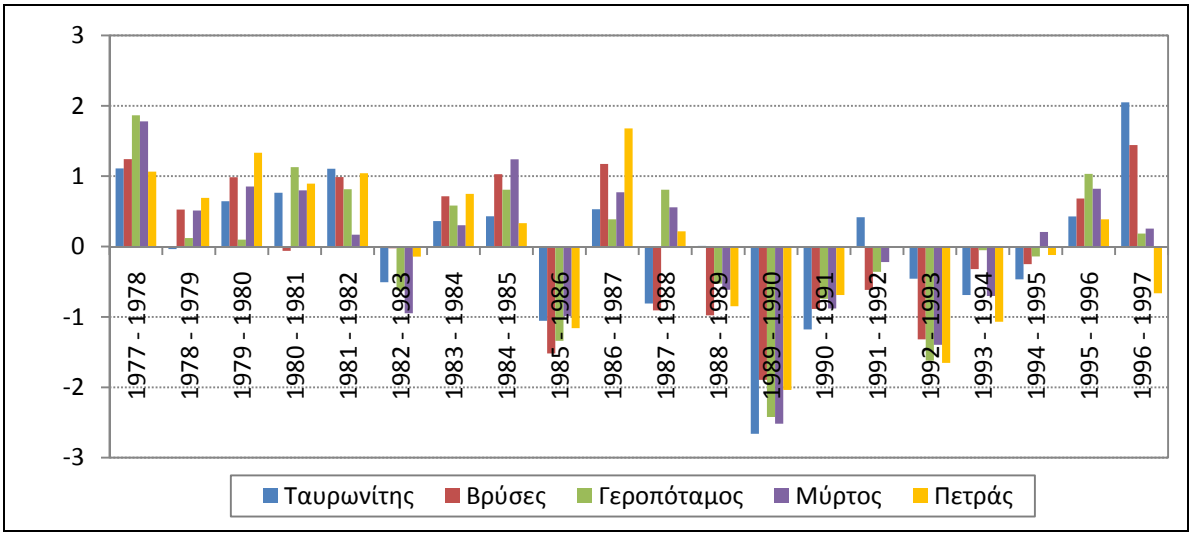


Σχήμα 4.8: Χρονοσειρές SPI και SN-SPI 48 μηνών αντίστοιχα για τις λεκάνες του Ταυρωνίτη και του Πετρά για την περίοδο 1973-2004.

4.2 Ανάλυση ξηρασίας με την εφαρμογή του δείκτη ξηρασίας RDI

Από τη διαθέσιμη χρονοσειρά (βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή) για την περίοδο 1977-1997 προσδιορίστηκε ο δείκτης ξηρασίας RDI (με χρονικό βήμα 12 μηνών) στην τυποποιημένη του μορφή (RDI_{st}) για τις πέντε εξεταζόμενες λεκάνες της Κρήτης (Ταυρωνίτης, Βρύσες, Γεροπόταμος, Μύρτος και Πετράς). Είναι προφανές ότι τα υδρολογικά έτη 1985-86, 1988-94 στις πέντε λεκάνες επικράτησαν ξηρές συνθήκες με αποκορύφωμα του φαινομένου κατά το υδρολογικό έτος 1989-90 (Σχήμα 4.9). Ιδιαίτερα

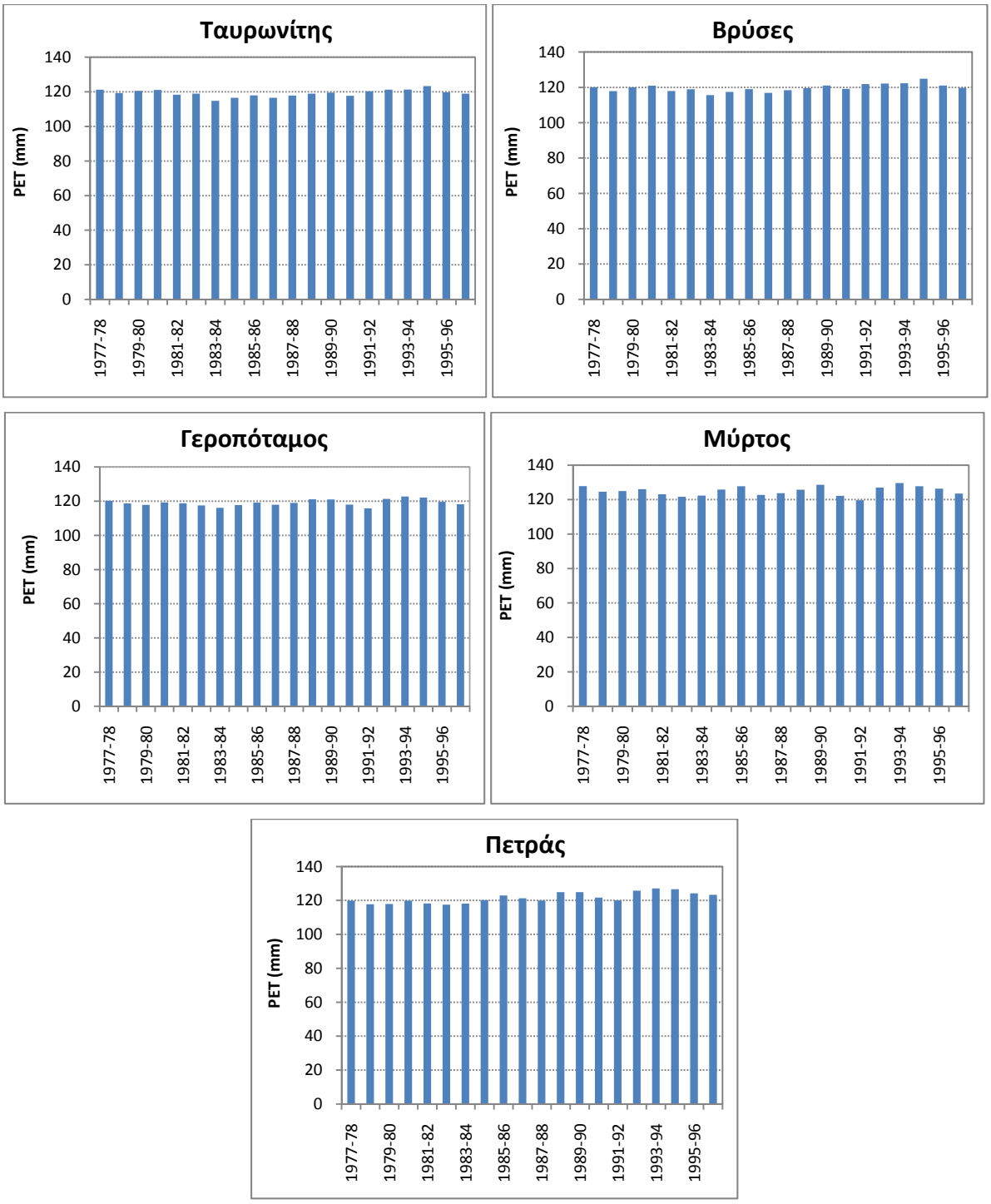
φυσιολογικές συνθήκες παρατηρήθηκαν κατά το έτος 1994-95 για όλες τις λεκάνες, ενώ το 1977-78 οι λεκάνες χαρακτηρίζονται από υγρές συνθήκες.



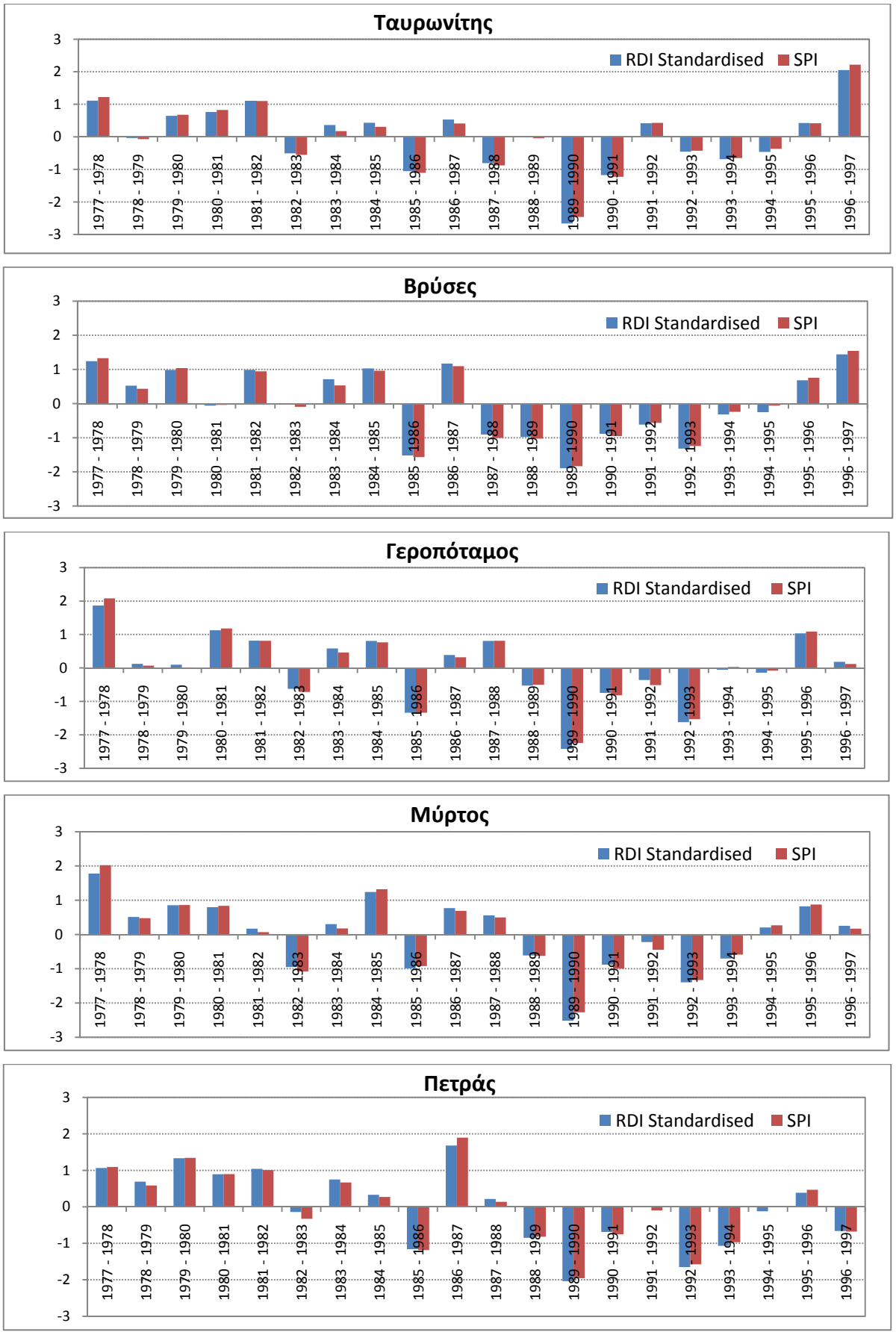
Σχήμα 4.9: Τιμές δεικτών RDI_{st} των πέντε λεκανών για την περίοδο 1977 – 1997.

4.2.1 Σύγκριση δεικτών RDI και SPI

Για την τεκμηρίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του δείκτη RDI_{st}, υπολογίστηκε και ο δείκτης SPI με την εφαρμογή του DrinC, προκειμένου να γίνει μεταξύ τους σύγκριση (Σχήμα 4.11). Μπορεί να διαπιστωθεί, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι ο υπολογισμός αμφοτέρων των δεικτών δίνει παρόμοια αποτελέσματα και για τις πέντε λεκάνες και οποιεσδήποτε διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι για την εξαγωγή του δείκτη RDI_{st} γίνεται χρήση του επιπρόσθετου μετεωρολογικού παράγοντα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Περιφέρεια Κρήτης, 2001). Από τα διαγράμματα (Σχήμα 4.10) παρατηρείται ότι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (για την οποία διαθέσιμα δεδομένα υπήρχαν για την περίοδο 1977-1997) δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το χρόνο για όλες τις λεκάνες και γι' αυτό δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο δεικτών.



Σχήμα 4.10: Μέση δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) για την περίοδο 1977-97 στις πέντε λεκάνες.

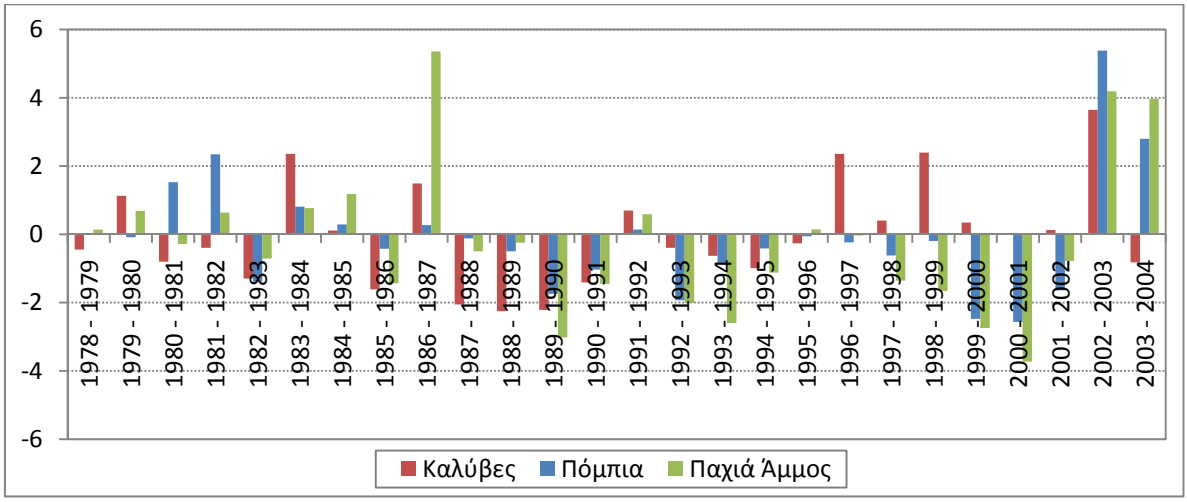


Σχήμα 4.11: Τιμές δεικτών RDI_{st} και SPI για την περίοδο 1977-97 στις πέντε λεκάνες.

4.3 Ανάλυση ξηρασίας με την εφαρμογή του δείκτη ξηρασίας PDSI

Για τον υπολογισμό του δείκτη PDSI (με χρονικό βήμα 12 μηνών) με την εφαρμογή του προγράμματος DrinC ελήφθησαν δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας από συγκεκριμένους σταθμούς και ενδεικτικά παρουσιάζονται αποτελέσματα για τους σταθμούς των Καλυβών, της Πόμπιας και της Παχιάς Άμμου. Λόγω της έλλειψης δεδομένων υδροχωρητικότητας, έγιναν δοκιμές στις τιμές ώστε να υπάρχει συσχέτιση και με τον δείκτη SPI. Από την βιβλιογραφία λήφθηκε υπόψη ότι στην Κρήτη οι τιμές της υδροχωρητικότητας κυμαίνονται από 140-190 mm/m (*www.usgs.gov*), οπότε η βέλτιστη τιμή βρέθηκε να είναι 160 mm/m και αυτή χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό του δείκτη PDSI.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.12 στις εν λόγω περιοχές κατά τα υδρολογικά έτη 1985-86, 1987-1991, 1992-1995 και 1997-2002 επικράτησαν ξηρές συνθήκες, ενώ φαίνεται ότι στον σταθμό της Παχιάς Άμμου παρατηρούνται τιμές μικρότερες από -2, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη φαινομένων ξηρασίας στο ανατολικό τμήμα της Κρήτης.



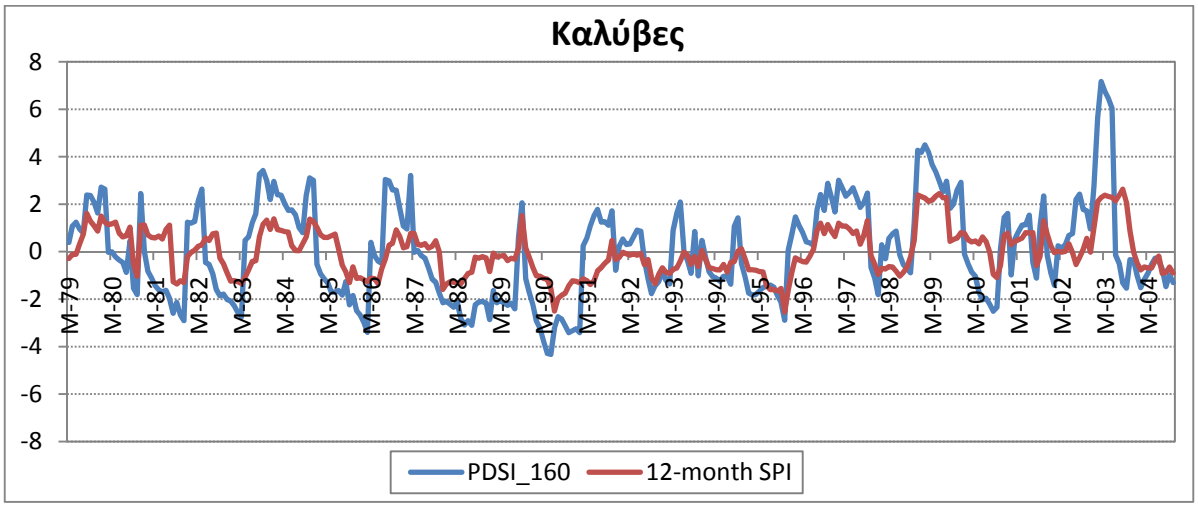
Σχήμα 4.12: Τιμές δείκτη PDSI τριών σταθμών για την περίοδο 1978 – 2004.

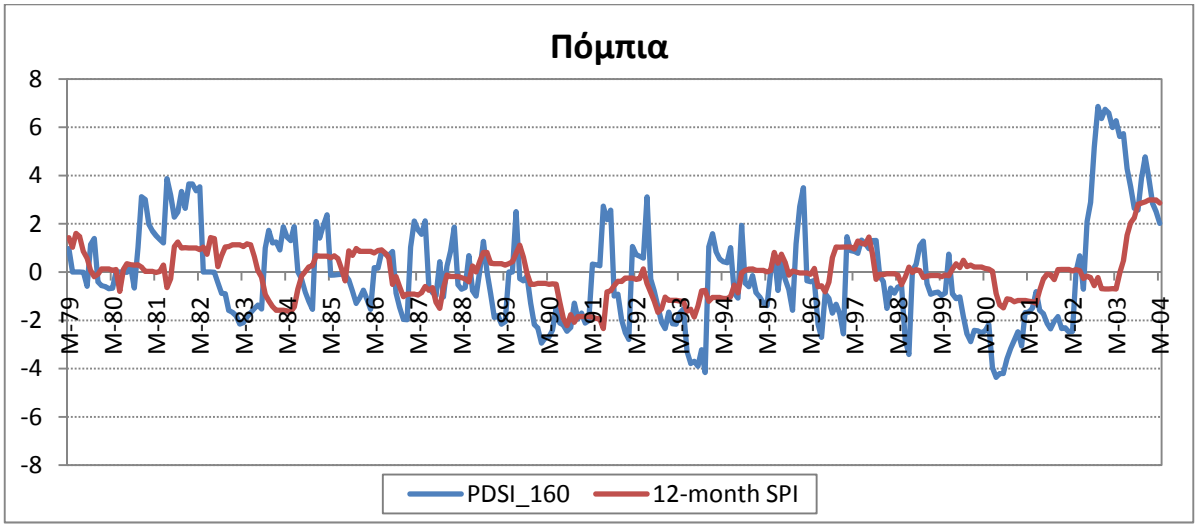
4.3.1 Σύγκριση δεικτών PDSI και SPI

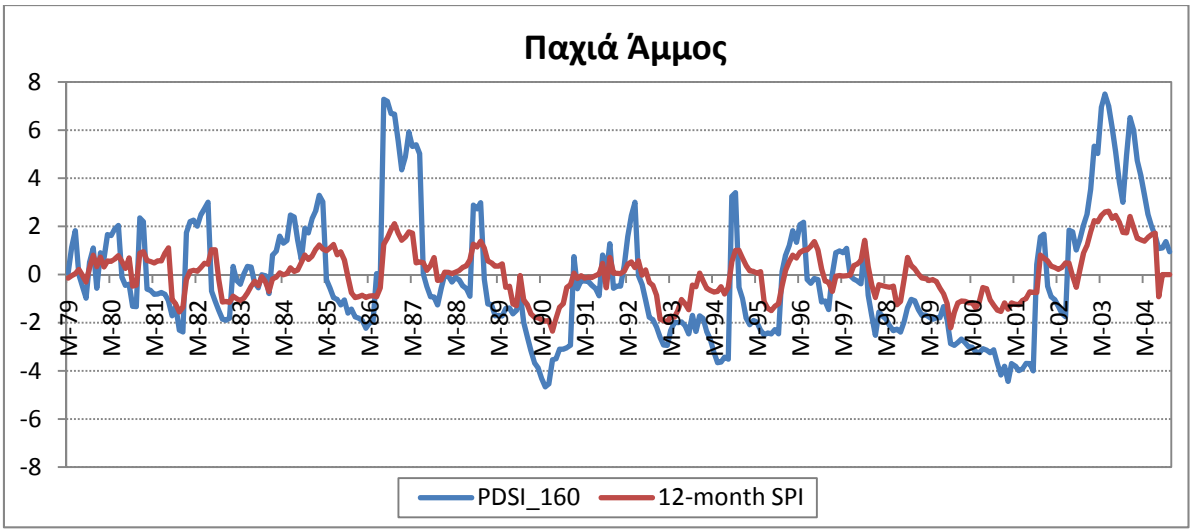
Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 4.13) παρουσιάζονται παράλληλα οι δείκτες PDSI και SPI_{12}. Είναι προφανές ότι υπάρχει διαφοροποίηση στη συσχέτιση μεταξύ των δεικτών σε όλους τους σταθμούς, με διαφορά στο σταθμό της Παχιάς Άμμου όπου σημειώνεται μια μείωση των διακυμάνσεων καθώς επίσης και η μέγιστη συσχέτιση (R^2=0,66). Μπορεί κανείς να πει ότι ο SPI «ακολουθεί» τον PDSI χρονικά περίπου μετά από

ένα έτος, ενώ ξεκάθαρα ταυτίζονται χρονικά οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές αμφοτέρων των δεικτών. Οι τιμές στους σταθμούς των Καλυβών και της Πόμπιας που έχουν τη μικρότερη συσχέτιση (R^2=0,47 και 0,49 αντίστοιχα) κάνουν το γεγονός αυτό εμφανές κατά την περίοδο 1981-1983.

Σε αντίθεση με τον PDSI που βασίζεται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο που περιλαμβάνει βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή και εδαφική υγρασία, ο SPI αναπτύχθηκε για να ποσοτικοποιήσει το έλλειμμα βροχόπτωσης για διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Στην πραγματικότητα, ο SPI αποτελεί μια «κανονικοποιημένη μετατροπή» της πιθανότητας της παρατηρηθείσας βροχόπτωσης και ταυτόχρονα μια διαδικασία κινητών μέσων όρων. Περιγράφει, λοιπόν, την συμπεριφορά μίας μόνο μεταβλητής, οπότε η ξηρασία μεταφράζεται με μια πιο στοχαστική έννοια.







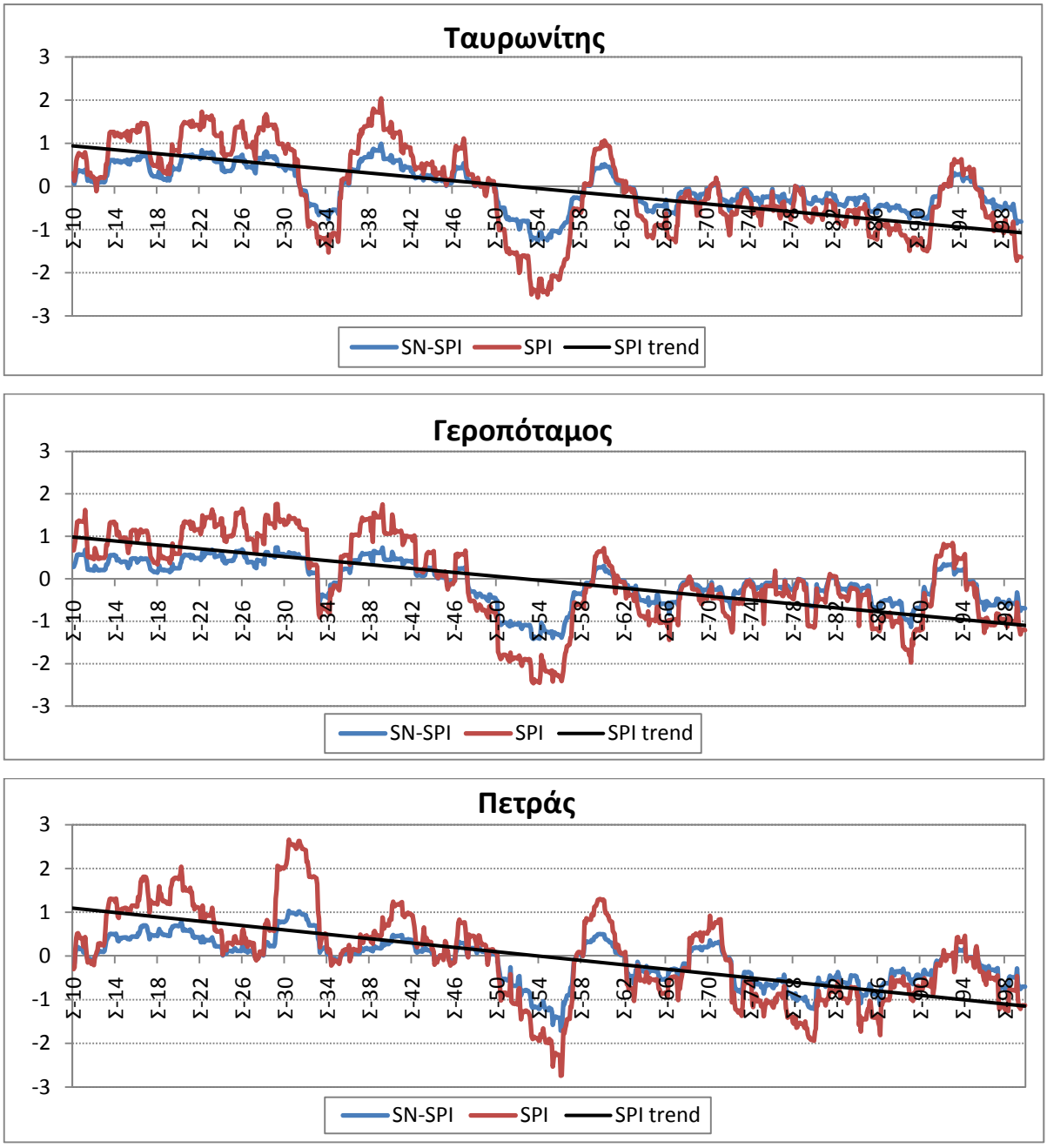
Σχήμα 4.13: Δείκτες ξηρασίας PDSI, SC-PDSI και SPI_{12} για την περίοδο 1978-2004 (AWC=160 mm/m) για τους σταθμούς Καλυβών, Πόμπιας και Παχιάς Άμμου.

4.4 Εφαρμογή δείκτη ξηρασίας SPI και SN-SPI για μελλοντικές περιόδους (2010-2100) σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης

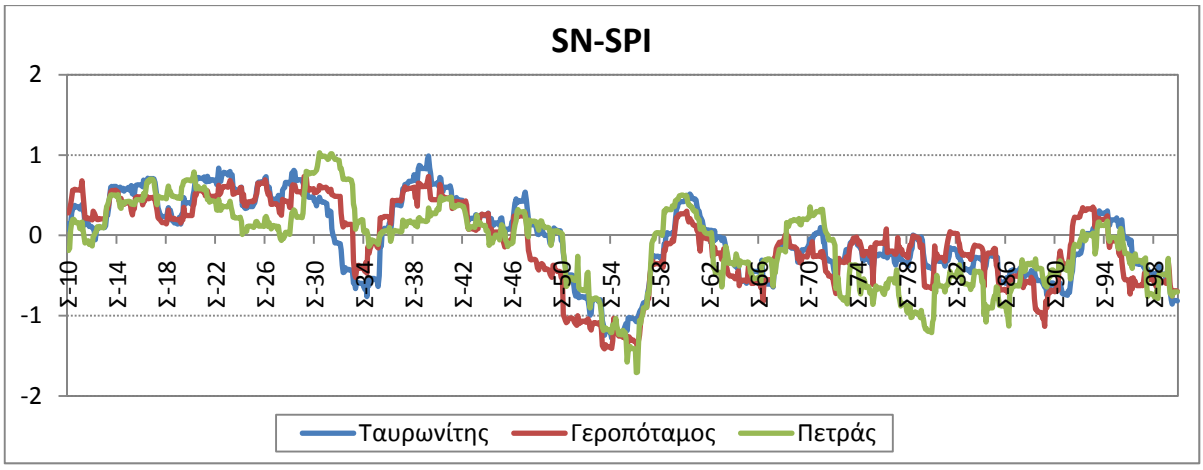
Με τη χρήση των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου REMO ελήφθησαν οι τιμές της βροχόπτωσης για την περίοδο 2010-2100, υπολογίστηκαν οι δείκτες ξηρασίας SPI και SN-SPI διαμορφώνοντας έτσι το ανάλογο σενάριο που αντικατοπτρίζει τις πιθανές μελλοντικές συνθήκες ξηρασίας για τρεις (3) ενδεικτικές λεκάνες (Σχήματα 4.14, 4.15). Είναι προφανές ότι την περίοδο 2010-2046 οι λεκάνες του Ταυρωνίτη και του Γεροποτάμου πλήττονται από υγρές συνθήκες με εξαίρεση την περίοδο 2032-2035, η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αρνητικά ως μια μεμονωμένη ξηρή περίοδος αν δεν ληφθεί υπόψη ότι αποτελεί «ωφέλιμη διακοπή» σε μία ασυνήθιστα μακροχρόνια υγρή περίοδο. Ωστόσο, το έτος 2070 σηματοδοτεί την απαρχή μιας ελαφρώς ξηρής περιόδου. Στην λεκάνη του Πετρά θα επικρατήσουν υγρές συνθήκες κατά την περίοδο 2010-2050 με την αποκορύφωση του φαινομένου το διάστημα 2028-2034, ενώ το 2050 θα ακολουθήσει μια μετρίως ξηρή περίοδος που θα διακοπεί από 2 διαστήματα υγρών συνθηκών (2058-2062, 2068-2072).

Η σύγκριση μεταξύ των δεικτών αποδεικνύει εμφανώς την προσαρμογή του χωρικού χαρακτήρα της ξηρασίας στον δείκτη SN-SPI, αφού παρατηρείται ότι στην λεκάνη του Ταυρωνίτη η κανονικοποίηση γίνεται κυρίως τα «ξηρά» διαστήματα λόγω του ότι η συγκεκριμένη λεκάνη θεωρείται υγρή. Παρέχεται με αυτόν τον τρόπο μια αντικειμενική

θεώρηση της κατάστασης της κάθε λεκάνης, εφόσον μεμονωμένα ύψη βροχόπτωσης ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές δεν μπορούν να αποτελούν κριτήριο για την σύγκριση.



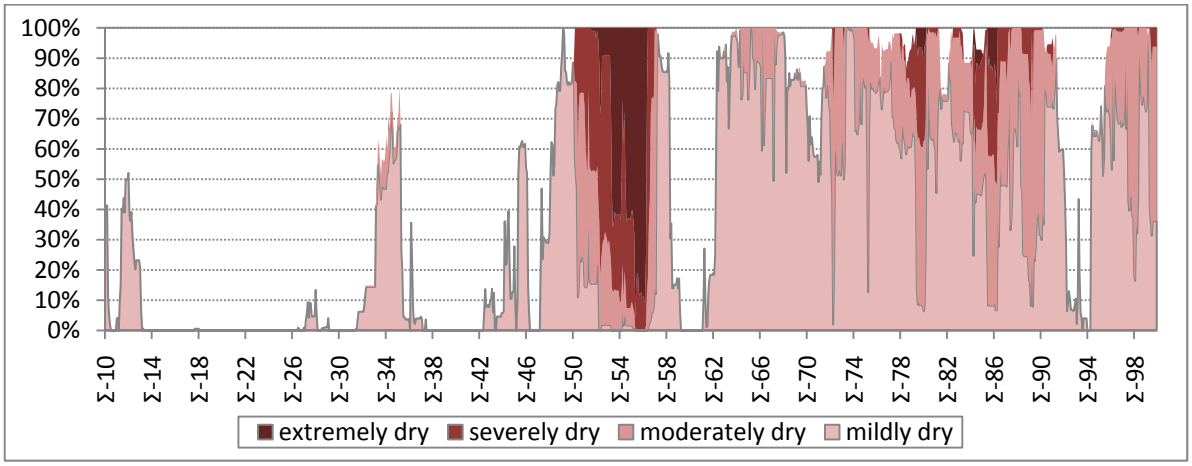
Σχήμα 4.14: Χρονοσειρές για την διαμόρφωση μελλοντικών σεναρίων για τις λεκάνες Ταυρωνίτη, Γεροποτάμου και Πετρά με τη χρήση των δεικτών SPI και SN-SPI για την περίοδο 2010-2100.



Σχήμα 4.15: Χρονοσειρές για την διαμόρφωση μελλοντικών σεναρίων για τις λεκάνες Ταυρωνίτη, Γεροποτάμου και Πετρά με τη χρήση του δείκτη SN-SPI για την περίοδο 2010-2100.

Γενικότερα, η μέση τάση δείχνει ότι κατά τη διάρκεια των 90 ετών το 54,1% του χρόνου πάνω από το 50% της επιφάνειας της Κρήτης δέχεται βροχόπτωση κάτω από τον μέσο όρο. Κατά την διάρκεια των ετών 2047-2057 ολόκληρη η επιφάνεια της Κρήτης φαίνεται ότι πρόκειται να εμφανίσει συνθήκες ξηρασίας, με αποκορύφωμα τα έτη 2051-2056 κατά τα οποία οι συνθήκες «προμηνύονται» ακραίως ξηρές (Σχήμα 4.16).

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου αποδίδουν στατιστική σημασία στο γεγονός της συχνότητας των ξηρασιών· η μέση τάση του δείκτη SPI δείχνει σταδιακή μείωση των βροχοπτώσεων.



Σχήμα 4.16: Ποσοστό της επιφάνειας της Κρήτης που υπόκειται σε κάθε υποσυνθήκη ξηρασίας ($-1<SPI_{48}\leq 0$, $-1,5<SPI_{48}\leq -1$, $-2<SPI_{48}\leq -1,5$ και $SPI_{48}\leq -2$/ ελαφρώς ξηρές, μετρίως ξηρές, πολύ ξηρές και ακραίως ξηρές αντίστοιχα) για την περίοδο 2010-2100.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της ξηρασίας με τη χρήση των δεικτών SPI, RDI, PDSI και ενός νέου δείκτη, του SN-SPI. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στηρίζονται στην επεξεργασία μετεωρολογικών και υδρολογικών δεδομένων με τη χρήση του προγράμματος SPI SL6.exe για τον SPI και του προγράμματος DrinC για την εξαγωγή των δεικτών PDSI και RDI. Από την χωροχρονική ανάλυση της ξηρασίας στην Κρήτη προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Έχοντας ως περίοδο μελέτης το διάστημα 1973-2004, το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της Κρήτης φαίνεται να δέχεται βροχόπτωση κάτω από τον μέσο όρο. Συγκεκριμένα επικρατεί ακραία παρατεταμένη ξηρασία 48 μηνών για ποσοστό χρόνου 5% κατά την περίοδο των 30 ετών (SPI < -2).
- Αξιοσημείωτο είναι ότι η μέση τάση κατά τη διάρκεια των 30 ετών δείχνει ότι το 45,8% του χρόνου πάνω από το 50% της επιφάνειας της Κρήτης υπόκειται σε συνθήκες ξηρασίας.
- Ο δείκτης SPI, σαν μια διαδικασία κινητών μέσων όρων, ερμηνεύει την ξηρασία σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και αποδίδει αποτελεσματικά το φαινόμενο ως συνάρτηση του ύψους βροχόπτωσης. Ο SPI μικρών περιόδων (3, 6 και 9 μηνών) δίνει μια εποχιακή εκτίμηση του φαινομένου της ξηρασίας και ως εκ τούτου χρησιμεύει στον τομέα της γεωργίας όσον αφορά τις καλλιέργειες. Από την άλλη πλευρά, ο SPI μεγάλων περιόδων (12, 24 και 48 μηνών) δίνει πληροφορίες για την υπερετήσια εξέλιξη της ξηρασίας.
- Προτάθηκε ένας νέος δείκτης, που έχει ως βάση τον SPI, ο SN-SPI, σε μια προσπάθεια ανάδειξης του χωρικού χαρακτήρα της ξηρασίας. Διαπιστώθηκε ότι ο SN-SPI συντελεί στην αποτελεσματική σύγκριση μεταξύ των περιοχών, αφού η κανονικοποίηση (που έγινε βάσει του ύψους βροχόπτωσης όλων των λεκανών) οδηγεί σε εξομάλυνση των ξηρών συνθηκών σε υγρές λεκάνες και σε εξομάλυνση των υγρών συνθηκών σε ξηρές λεκάνες, δίνοντας έτσι συγκρίσιμα αποτελέσματα.
- Ο υπολογισμός των δεικτών SPI και RDI δίνει παρόμοια αποτελέσματα και για τις πέντε υπό μελέτη λεκάνες και οποιεσδήποτε διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι για την εξαγωγή του δείκτη RDI_{st} γίνεται χρήση του μετεωρολογικού παράγοντα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

- Ο SPI «ακολουθεί» τον PDSI χρονικά περίπου μετά από ένα έτος, ενώ ξεκάθαρα ταυτίζονται χρονικά οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές αμφοτέρων των δεικτών. Ωστόσο, υψηλότερη συσχέτιση σημειώνεται στο σταθμό της Παχιάς Άμμου.
- Τα μελλοντικά σενάρια που διαμορφώθηκαν με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων του περιοχικού κλιματικού μοντέλου REMO για την περίοδο 2010-2100 μαρτυρούν παρατεταμένες υγρές συνθήκες έως το 2050 και στη συνέχεια μια μετρίως ξηρή περίοδο - είναι σαφές ότι υπάρχει μια τάση προς μείωση των βροχοπτώσεων. Τέλος, το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο πάνω από το 50% της επιφάνειας της Κρήτης δέχεται βροχόπτωση κάτω από τον μέσο όρο τείνει να αυξηθεί στο 54,1%. Ουσιαστικά τα αποτελέσματα έχουν στατιστική σημασία στην διαχρονική εξέλιξη των τιμών των δεικτών και δεν αποτελούν πρόβλεψη για συγκεκριμένες μικρής διάρκειας περιόδους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

(1) Αποστολάκη, Μ., (2003). *Χωροχρονική κατανομή των περιβαλλοντικών μεταβλητών στη νήσο Κρήτη με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

(2) Γιάσογλου, Κ., Κοσμάς, Κ., Μελιάδου, Α., Γαβριήλ, Π., (2001). Εθνική Επιτροπή κατά της Ερημοποίησης, Χάρτης δυνητικού κινδύνου ερημοποίησης της Ελλάδας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (http://www.gnccd.com).

(3) Δίκαιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2007). *Η αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας και της ξηρασίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση* (http://europa.eu).

(4) Κατσούλης, Β., Πνευματικός, Ι., Ματζαράκης, Α., (2008). *Δυνητική προγνωστικότητα της βροχοπτώσεως στον ελληνικό χώρο*. 9^{ο} COMECAP, Πρακτικά Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.

(5) Μαμάσης, Ν., Κουτσογιάννης, Δ., (2007). *Διαχείριση υδατικών πόρων – Ξηρασία*. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

(6) Περιφέρεια Κρήτης (2001). Διεύθυνση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης, Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων. *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων Κρήτης*.

(7) Τίγκας, Δ., Παγκάλου, Δ., Βαγγέλης, Χ., Τσακίρης, Γ., (2006). *Προσδιορισμός σεναρίων ξηρασίας στη λεκάνη του Νέστου με εφαρμογή του νέου δείκτη ξηρασίας RDI*. Οικονομικοί, κοινωνικοί και πολιτικοί παράγοντες στη διαχείριση των υδατικών πόρων.

(8) Τσιραντωνάκης, Γ., (2007). *Ερημοποίηση: αίτια και αντιμετώπιση*. Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Έλεγχος ποιότητας και διαχείριση περιβάλλοντος», Πολυτεχνείο Κρήτης.

(9) Ameziane, T., Belghiti, M., Benbeniste, S., Bergaoui, M., Bonaccorso, B., Cancelliere, A., Christofides, T., Confederación Hidrográfica del Tajo, Cubillo, F., Euchi, L., Gabiña, D., Garrido, A., Garrote, L., Hajispyrou, S., Ibáñez, J.C., Iglesias, A., Keravnou-Papailiou, E., Lapeña, A., Lebdi, F., López-Francos, A., Louati, M.H., Mathlouthi, M., Mellouli, H.J., Moneo, M., Ouassou, A., Pangalou, D., Pashardes, P., Quiroga, S., Rossi, G., Rostandi, N., Saraçoglu, D., Sibou, T., Tigkas, D., Tsakiris, G., Tsiourtis, N., Vangelis, C., Ziyad, A., (2005). *Οδηγίες Διαχείρισης της Ξηρασίας.* Ευρωπαϊκή Ένωση - Γραφείο Συνεργασίας Ευρωπαϊκής Βοήθειας, Ευρω-Μεσογειακό Περιφερειακό Πρόγραμμα για Τοπική Διαχείριση Υδάτων (MEDAWater) - Μεσογειακή Ετοιμότητα και Σχεδιασμός Περιορισμού της Ξηρασίας (MEDROPLAN).

(10) Bacanli, U., Dikbas, F., Baran, T., (2008). *Drought analysis and a sample study of Aegean Region*. Sixth International Conference on Ethics and Environmental Policies, Ethics and Climate Change, Scenarios for Justice and Sustainability. Padova.

(11) Barriendos, M. and Rodrigo, F.S., (2005). *Seasonal rainfall variability in the Iberian Peninsula from the 16th century: preliminary results from historical documentary sources*. Geophys. Res. Abstracts 7.

(12) Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A., (2003). *Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily*. Water Resources Management, 17: 273–296.

(13) Brázdil, R., Trnka, M., Dobrovolný, P., Chromá, K., Hlavinka, P., Žalud, Z., (2008). *Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006.* Theor. Appl. Climatol., DOI 10.1007/s00704-008-0065-x.

(14) Buonomo, E, Jones, R., Huntingford, C., Hannaford, J., (2006). *The robustness of high resolution predictions of changes in extreme rainfall for Europe*. Quart J. R. Meteor. Soc. (in press).

(15) Castro, M., Fernandez, C., Gaertner, M.A., (1993). *Description of a mesoscale atmospheric numerical model*. In: Dıaz, J.I., Lions, J.L. (Eds.), Mathematics, Climate and Environment. Rech. Math. Appl. Ser. Mason, 230– 253.

(16) Christensen, J.H., Christensen, O.B., Lopez, P., Van Meijgaard, E., Botzet, M., (1996). *The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model*. DMI Scientific Report 96-4, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark.

(17) Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P., (2008). *On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation*. Geophys. Res. Lett., 35, L20709, DOI:10.1029/2008GL035694.

(18) Döscher, R., Willén, U., Jones, C., Rutgersson, A., Meier, H.E.M., Hansson, U., (2002). *The development of the coupled ocean–atmosphere model RCAO*. Boreal Env. Res., 7: 183–192.

(19) Estrela, M. J., Penarrocha, D, Millan, M., (2000). *Multi-annual drought episodes in the Mediterranean (Valencia region) from 1950-1996. A spatio-temporal analysis*. Int. J. Climatol., 20: 1599–1618.

(20) Gibbs, W.J., and Maher, J.V., (1967). *Rainfall deciles as drought indicators*. In: Bulletin No. 48, Bureau of Meteorology, Melbourne.

(21) Gibelin, A.L., Déqué, M., (2003). *Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model*. Clim. Dyn., 20: 327–339.

(22) Giorgi, F., Shields Brodeur, C. and Bates, G.T., (1994). *Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model: Spatial and seasonal characteristics*. J. Climate, 7: 375-399.

(23) Gregory, J., Mitchell, J., Brady, A., (1997). *Summer drought in northern mid-latitudes in a time-dependent CO_2 climate experiment*. J. Climate, 10: 662-686.

(24) Hagemann, S., Arpe, K. Roeckner, E., (2006). *Evaluation of the hydrological cycle simulated by the GCM ECHAM5*. J. Climate, 19 (16): 3810-3827.

(25) Hillel, D. and Rosenzweig, C., (2002). *Desertification in relation to climate variability and change*. Advances in Agronomy, 77.

(26) Houghton, J., Meira-Filho, L., Callander, B., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K., (1996). *Climate change 1995: the science of climate change*. New York: Cambridge University Press.

(27) Jacob, D., (2001). *A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin.* Meteorology and Atmospheric Physics, 77: 1-4, 61-73.

(28) Jacob, D., Andrae, U., Elgered, G., Fortelius, C., Graham, L.P., Jackson, S.D., Karstens, U., Koepken, C., Lindau, R., Podzun, R., Rockel, B., Rubel, F., Sass, H.B., Smith, R.N., Van den Hurk, B.J.J.M., Yang, X., (2001). *A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period*. Meteorology and Atmospheric Physics, 77 (1-4): 19-43.

(29) Karl, T.R., (1986). *The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration*. J. Climate and Applied Meteorology, 25: 77–86.

(30) Kidson, J.W., and Thompson, C.S., (1998). *A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate Variations*. J. Climate, 11: 735–753.

(31) Kirschbaum, M. and Fischlin, A., (1996). *Climate change impacts on forests*. In: Watson, R., Zinyowera, M., Moss, R., editors. Climate change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analysis. New York: Cambridge University Press, 95-129.

(32) Lenderink, G., van den Hurk, B.J.J.M., van Meijgaard, E., van Ulden, A.P., Cuijpers, H., (2003). *Simulation of present-day climate in RACMO2: first results and model developments*. Technical Report TR-252, Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt.

(33) Majewski, D., (1991). The *Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst*. ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models, 2: 147-191.

(34) McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales.* Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, USA, 179-184.

(35) Merayo, G.JL, Mestre, A, Peral, C., (1997). *La sequıa meteorologica del periodo 1991–95 en Espana*. 3rd Conferencia Intemacional Gestion de las Sequias, IBERDROLA Instituto Tecnologico; 41–47.

(36) Murphy, J., (1999). *An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate*. J. Climate, 12: 2256–2284.

(37) National Drought Mitigation Center (2008). Understanding Your Risk and Impacts: Impacts of Drought (http://www.drought.unl.edu/risk/impacts.htm).

(38) Palmer, W.C., (1965). *Meteorological Drought*. Res. Pap. No. 45. U.S. Weather Bureau, 58 pp.

(39) Palmer, W.C., (1968). *Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index*. Weatherwise, 21 (4): 156–161.

(40) Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., Tompkins, A., (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part 1*. Report No 349, Max Planck Institute for Meteorology.

(41) Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U., (2006). *Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model*. J. Climate., **19:** 3771-3791.

(42) Roesch, A., and Roeckner, E., (2005). *Assessment of snow cover and surface albedo in ECHAM4 and ECHAM5*. J. Climate. 19 (16): 3828-3843.

(43) Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Vazquez, D., Castro-Dıez, Y., (1999). *A 500-year precipitation record in Southern Spain*. Int. J. Climatol., 19: 1233–1253.

(44) Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M..J., Pozo-Vazquez, D., Castro-Dıez, Y., (2000). *Rainfall variability in Southern Spain on decadal to centennial time scales*. Int. J. Climatol., 20: 721.

(45) Rossi, G., (2000). *Drought mitigation measures: a comprehensive framework. In drought and drought mitigation in Europe*. J. Voght and F. Somma (Eds). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

(46) Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., Giakoumakis, S., (1992). *On regional drought estimation and analysis*. Water resources management, 6: 249-277.

(47) Schneider, S., (1989). *The greenhouse effect: science and policy*. Science, 243: 771-781.

(48) Shafer, B.A., and Dezman, L.E., (1982). *Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff Areas*. Proceedings of the Western Snow Conference, Reno, NV, 164-175.

(49) Shepard, D., (1968). *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. Proceedings of the 1968 ACM National Conference, 517–524, DOI:10.1145/800186.810616.

(50) Steppeler, J., Doms, G., Schättler, U., Bitzer, H.W., Gassmann, A., Damrath, U., Gregoric, G., (2003). *Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM*. Meteorology and Atmospheric Physics, 82: 75-96.

(51) Tannehill, I., (1947). *Drought: Its causes and effects*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, U.S.A.

(52) Touchan, R., Garfin, G.M., Meko, D.M., Funkhouser, G., Erkan, N., Hughes, M.K., Wallin, B.S., (2003). *Preliminary reconstructions of spring precipitation in southwestern Turkey from tree-ring width*. Int. J. Climatol., 23: 157.

(53) Touchan, R., Xoplaki, E., Funkhouser, G., Luterbacher, J., Hughes, M.K., Erkan, N., Akkemik, U., Stephan, J., (2005). *Reconstructions of spring/summer precipitation for the Eastern Mediterranean from tree-ring widths and its connection to large-scale atmospheric circulation*. Clim. Dyn., 25: 75–98.

(54) Tsakiris, G., (2004). *Guidelines for using annual RDI*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.

(55) Tsakiris, G. and Vangelis, H., (2004). *Towards a Drought Watch System based on spatial SPI.* Water Resources Management, 18: 1–12.

(56) Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., (2007a). *Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index*. Water Resources Management, 21: 821-833.

(57) Tsakiris, G., Pangalou, D., Tigkas, D., Vangelis, H., (2007b). *Assessing the areal extent of drought*. Water Resources Management, New Approaches and Technologies, European Water Resources Association, Chania, Crete-Greece.

(58) Tsakiris, G., Tigkas, D., Vangelis, H., Pangalou, D., (2007c). Regional drought identification and assessment – Case study in Crete. In: *Methods and tools for drought analysis and management*, Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B., 169-191.

(59) United States Department of Agriculture, Natural Resources Service. *Χάρτης παγκόσμιου κινδύνου ερημοποίησης.*

(60) United States Geological Survey (2009). Evans J., Science for a changing world, εικονογράφηση υδρολογικού κύκλου, (http://ga.water.usgs.gov).

(61) Van der Schrier, G., Briffa, K., Jones, P., Osborne, T., (2006). *Summer moisture variability across Europe*. J. Climate, 19: 2818-2834.

(62) Vasiliades, L., and Loukas, A., (2009). Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece. Desalination, 237: 3–21.

(63) Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Seneviratne, S.I., Schär, C., (2003). *Predictability and uncertainty in a regional climate model*. J. Geophys. Res., [Atmos.] 108 (D18), 4586, DOI:10.1029/2002JD002810.

(64) Wells, N., Goddard, S., Hayes, M., (2004). *A self-calibrating Palmer drought severity index*. J. Climate, 17: 2335–2351.

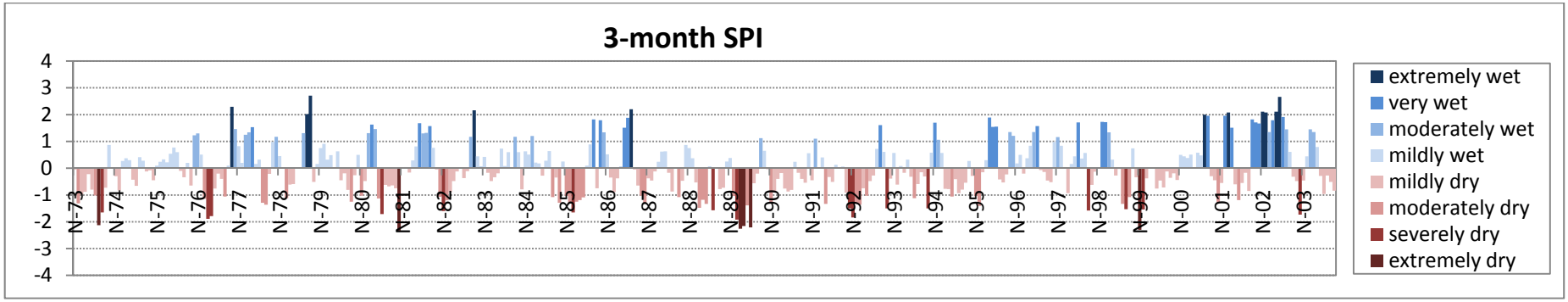
(65) Wilby, R. L., Hay, L. E., Gutowski, W. J. Jr., Arritt, R. W., Takle, E. S., Pan, Z., Leavesley, G. H., and Clark, M.P., (2000). *Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output.* Geophys. Res. Lett., 27: 1199–1202.

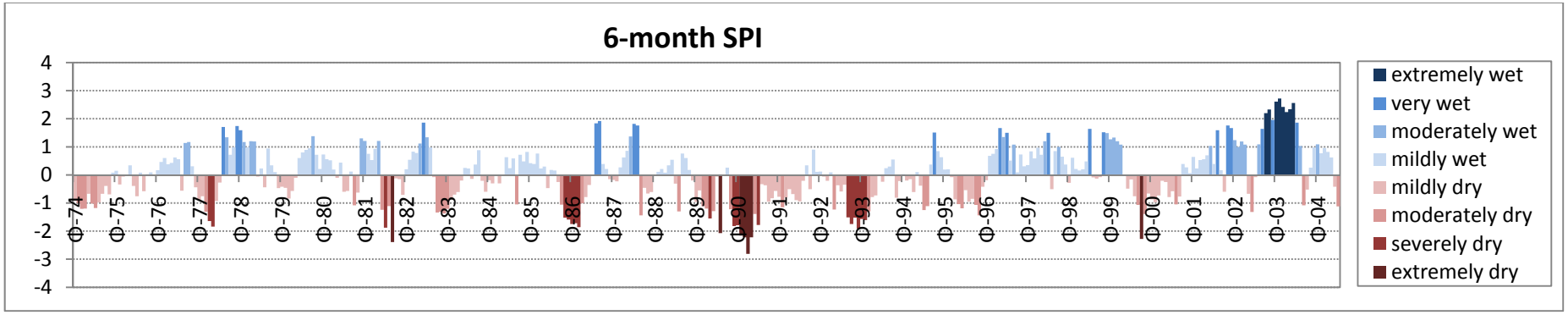
(66) Wild, M., and Roeckner, E., (2005). *Radiative fluxes in ECHAM5*. J. Climate., 19: 3792–3809.

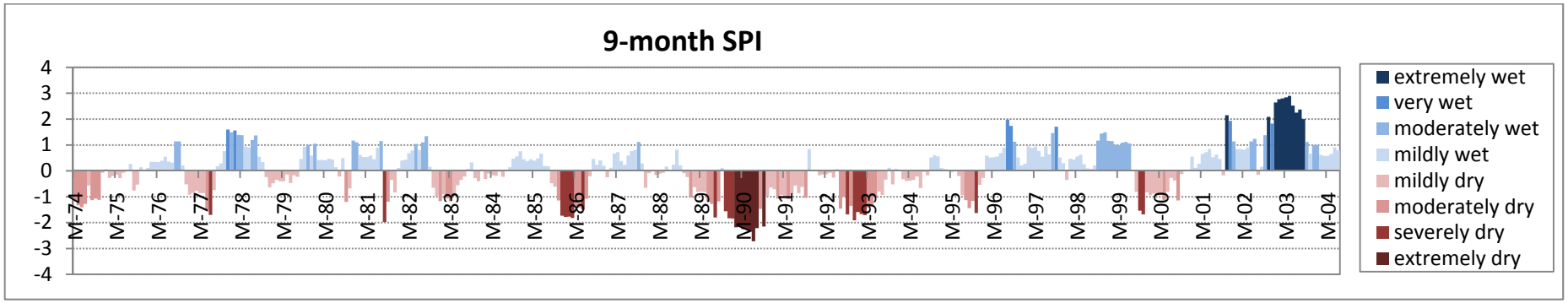
Πηγές διαδικτύου:

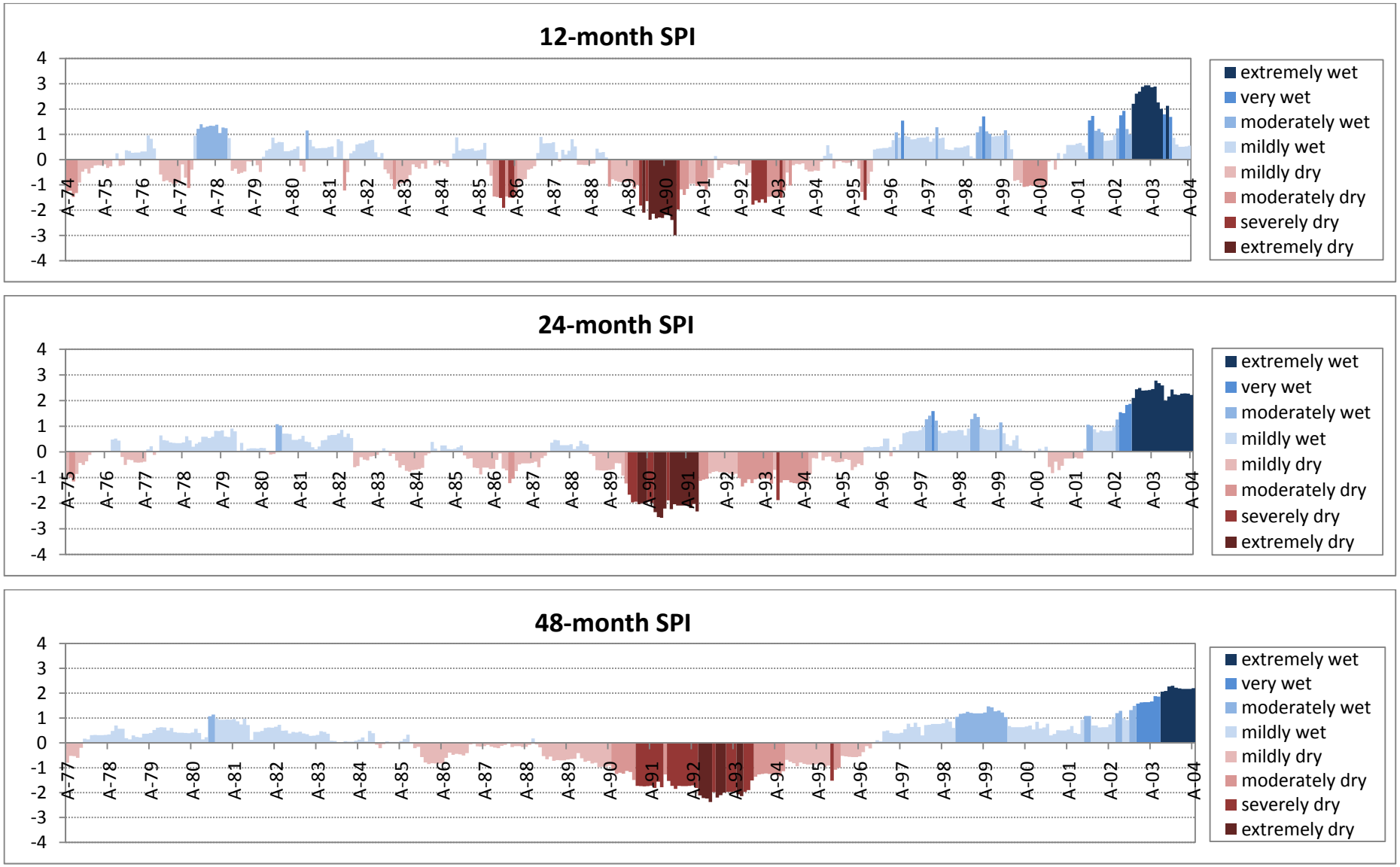
http://drought.unl.edu
http://nadss.unl.edu
www.ncdc.noaa.gov

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

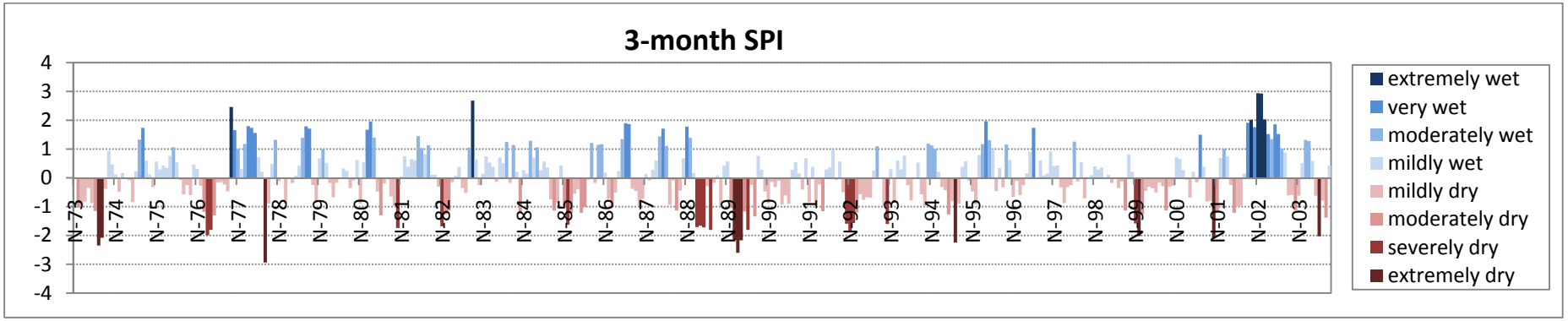

3-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
N-73
N-74
N-75
N-76
N-77
N-78
N-79
N-80
N-81
N-82
N-83
N-84
N-85
N-86
N-87
N-88
N-89
N-90
N-91
N-92
N-93
N-94
N-95
N-96
N-97
N-98
N-99
N-00
N-01
N-02
N-03
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

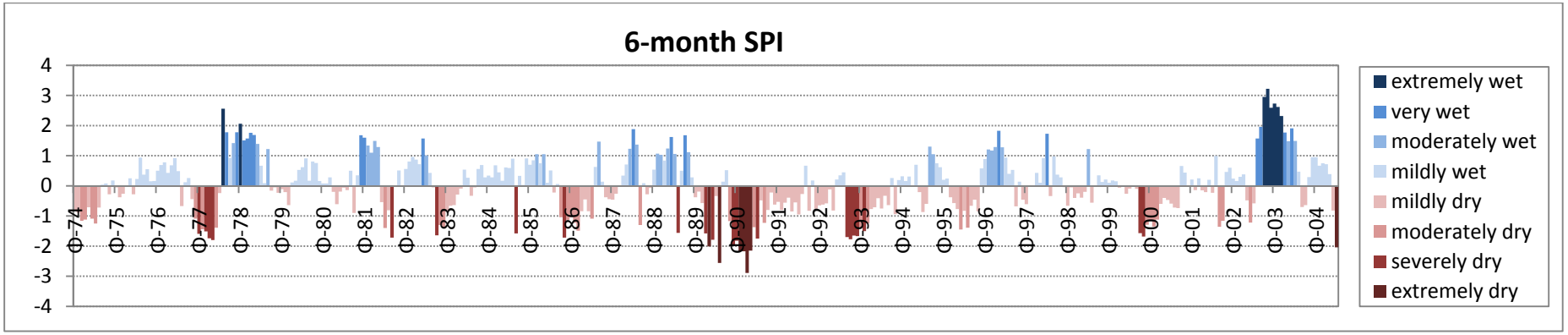

6-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Φ-74
Φ-75
Φ-76
Φ-77
Φ-78
Φ-79
Φ-80
Φ-81
Φ-82
Φ-83
Φ-84
Φ-85
Φ-86
Φ-87
Φ-88
Φ-89
Φ-90
Φ-91
Φ-92
Φ-93
Φ-94
Φ-95
Φ-96
Φ-97
Φ-98
Φ-99
Φ-00
Φ-01
Φ-02
Φ-03
Φ-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

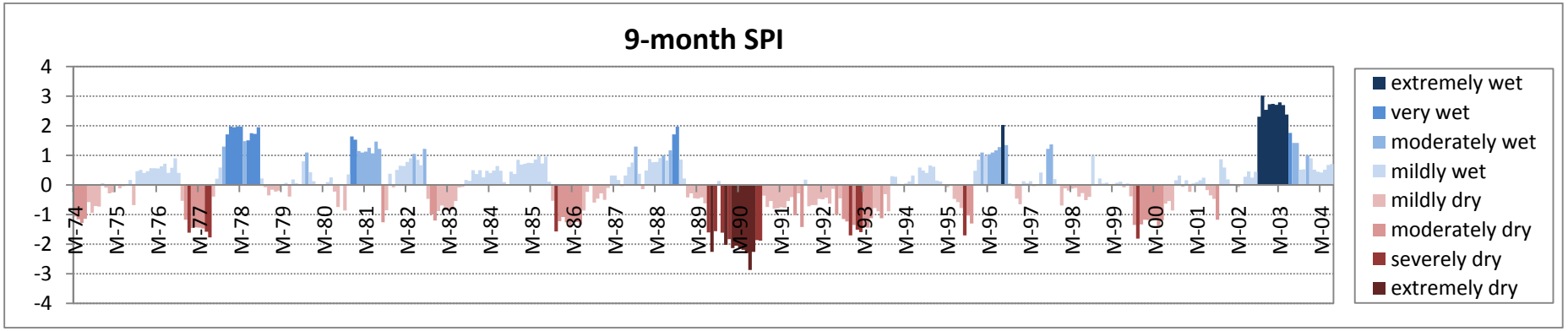

9-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Μ-74
Μ-75
Μ-76
Μ-77
Μ-78
Μ-79
Μ-80
Μ-81
Μ-82
Μ-83
Μ-84
Μ-85
Μ-86
Μ-87
Μ-88
Μ-89
Μ-90
Μ-91
Μ-92
Μ-93
Μ-94
Μ-95
Μ-96
Μ-97
Μ-98
Μ-99
Μ-00
Μ-01
Μ-02
Μ-03
Μ-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

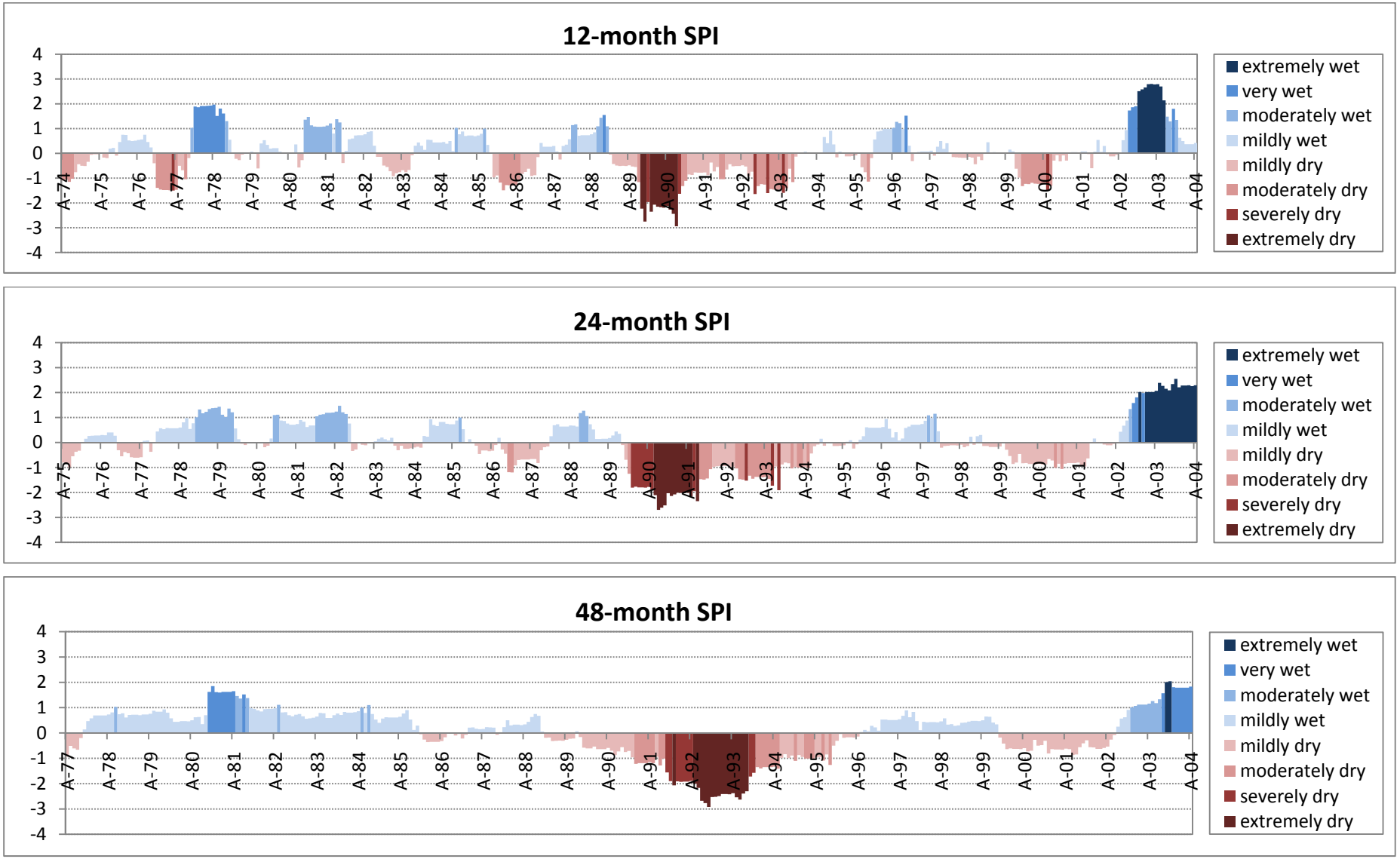


Σχήμα 1: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη των Βρυσών για την περίοδο 1973-2004.

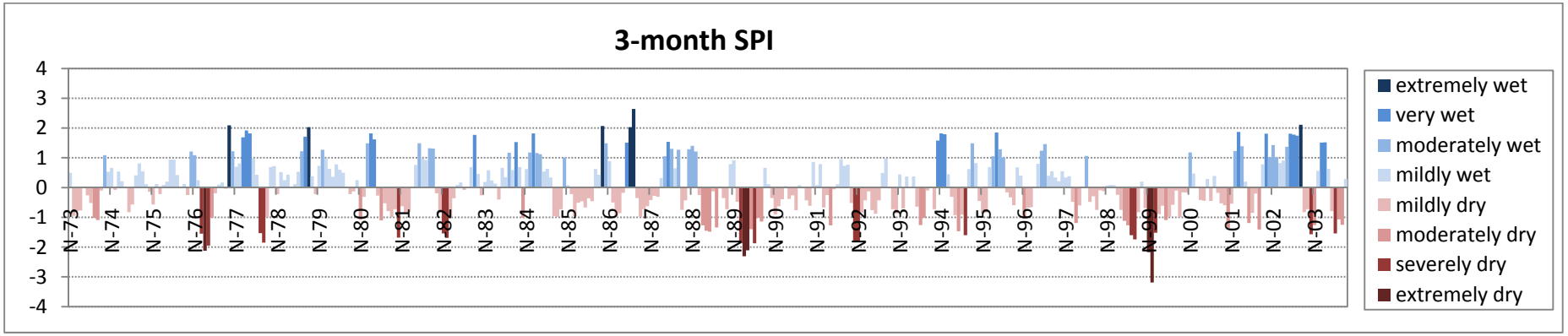

3-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
N-73
N-74
N-75
N-76
N-77
N-78
N-79
N-80
N-81
N-82
N-83
N-84
N-85
N-86
N-87
N-88
N-89
N-90
N-91
N-92
N-93
N-94
N-95
N-96
N-97
N-98
N-99
N-00
N-01
N-02
N-03
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

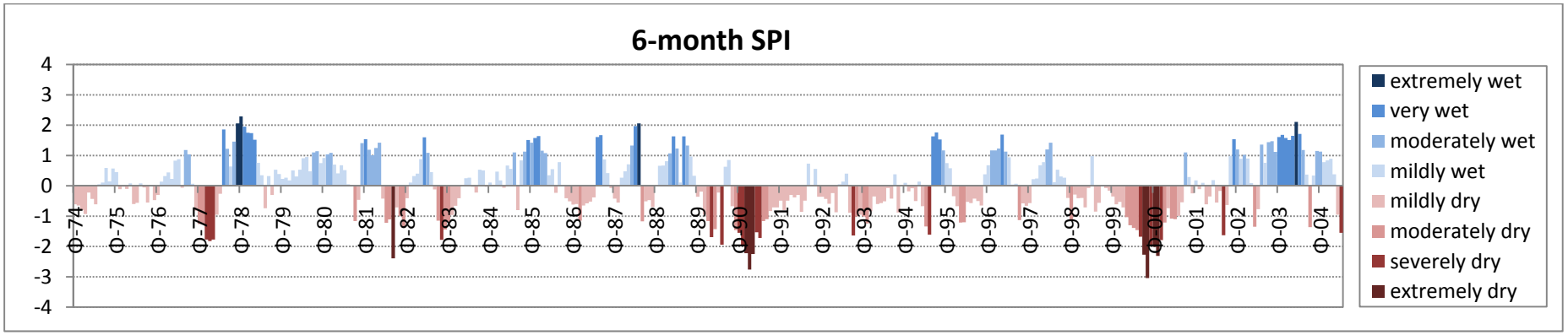

6-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Φ-74
Φ-75
Φ-76
Φ-77
Φ-78
Φ-79
Φ-80
Φ-81
Φ-82
Φ-83
Φ-84
Φ-85
Φ-86
Φ-87
Φ-88
Φ-89
Φ-90
Φ-91
Φ-92
Φ-93
Φ-94
Φ-95
Φ-96
Φ-97
Φ-98
Φ-99
Φ-00
Φ-01
Φ-02
Φ-03
Φ-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

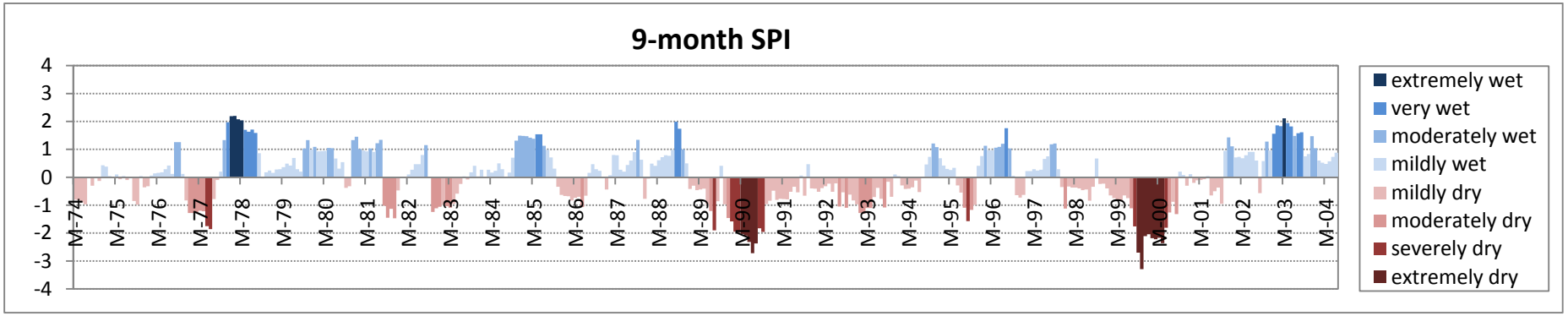

9-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
M-74
M-75
M-76
M-77
M-78
M-79
M-80
M-81
M-82
M-83
M-84
M-85
M-86
M-87
M-88
M-89
M-90
M-91
M-92
M-93
M-94
M-95
M-96
M-97
M-98
M-99
M-00
M-01
M-02
M-03
M-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry

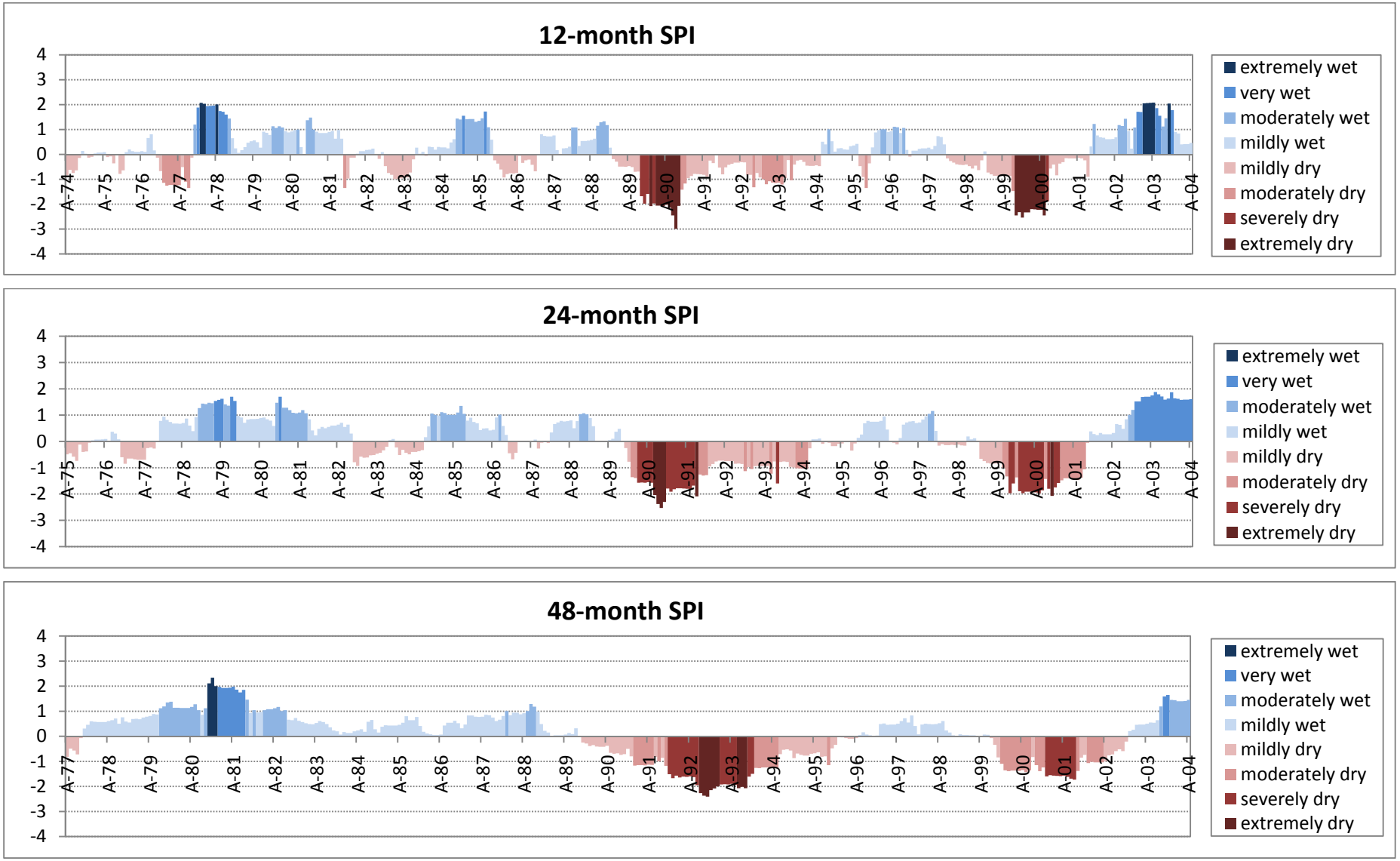


Σχήμα 2: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη του Γεροποτάμου για την περίοδο 1973-2004


3-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
N-73
N-74
N-75
N-76
N-77
N-78
N-79
N-80
N-81
N-82
N-83
N-84
N-85
N-86
N-87
N-88
N-89
N-90
N-91
N-92
N-93
N-94
N-95
N-96
N-97
N-98
N-99
N-00
N-01
N-02
N-03
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry


6-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
Φ-74
Φ-75
Φ-76
Φ-77
Φ-78
Φ-79
Φ-80
Φ-81
Φ-82
Φ-83
Φ-84
Φ-85
Φ-86
Φ-87
Φ-88
Φ-89
Φ-90
Φ-91
Φ-92
Φ-93
Φ-94
Φ-95
Φ-96
Φ-97
Φ-98
Φ-99
Φ-00
Φ-01
Φ-02
Φ-03
Φ-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry


9-month SPI
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
M-74
M-75
M-76
M-77
M-78
M-79
M-80
M-81
M-82
M-83
M-84
M-85
M-86
M-87
M-88
M-89
M-90
M-91
M-92
M-93
M-94
M-95
M-96
M-97
M-98
M-99
M-00
M-01
M-02
M-03
M-04
extremely wet
very wet
moderately wet
mildly wet
mildly dry
moderately dry
severely dry
extremely dry



Σχήμα 3: Χρονοσειρά του δείκτη SPI των περιόδων 3, 6, 9, 12, 24 και 48 μηνών για τη λεκάνη του Μύρτου για την περίοδο 1973-2004