

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*« Χωρικά χαρακτηριστικά περιοχικής ξηρασίας με χρήση  
τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών στη  
λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού »*

**Νικόλαος Μ. Πισιμάχος**

**ΒΟΛΟΣ 2012**

**«Χωρικά χαρακτηριστικά περιοχικής ξηρασίας με χρήση τηλεπισκόπησης και  
Γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών στη λεκάνη απορροής του Πηνειού  
ποταμού»**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :**

- 1) **Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος**, Καθηγητής, Αγρομετεωρολογία – Δορυφορική Μετεωρολογία, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Επιβλέπων**,
- 2) **Ιφιγένεια Κάγκαλου**, Επίκουρος καθηγήτρια, Υδρολογία – Λιμνολογία και Ποταμολογία, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**,
- 3) **Άρης Ψιλοβίκος**, Επίκουρος Καθηγητής, Αειφορική Διαχείριση Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

*Στην οικογένειά μου και  
στα αγαπημένα μου ανίψια  
Μιλένα και Νικόλα*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη εκπονήθηκε από τον φοιτητή Νικόλαο Πισμίχο στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών της σχολής Γεωπονικών Επιστημών με τίτλο «Αειφορική Διαχείριση Υδατικού Περιβάλλοντος» του τμήματος Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011.

Τις θερμές μου ευχαριστίες οφείλω στον κ. Νικόλαο Ρ. Δαλέζιο για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον κ. Άρη Ψιλοβίκο και στην κα Ιφιγένεια Κάγκαλου για το αμείωτο ενδιαφέρον και την συμπαράστασή τους, καθώς και για το χρόνο που αφιέρωσαν για τη διόρθωση της μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο προσωπικό του εργαστηρίου Αγρομετεωρολογίας, για την τεχνική υποστήριξή του καθώς και την παραχώρηση των λογισμικών προγραμμάτων, Erdas Imagine 8.7 και ArcGIS ArcMap 9.1, απαραίτητων για την ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου και στην Εύη Μπουκουβάλα για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια ηθική και υλική, όπως και την κατανόηση αλλά και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο υπολογισμός της περιοχικής ξηρασίας και ορισμένων χαρακτηριστικών αυτής στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, στη Θεσσαλία. Η εκτίμηση της ξηρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική στη συγκεκριμένη περιοχή καθώς παρατηρείται αυξημένη ανάπτυξη του κλάδου της γεωργίας. Με την εμφάνιση ενός επεισοδίου ξηρασίας υπάρχουν άμεσες συνέπειες τόσο σε γεωργικές όσο και σε άλλες δραστηριότητες και παραμέτρους.

Αναπτύσσοντας μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία, εύκολη στη χρήση και με μειωμένο κόστος εφαρμογής, ήταν δυνατό να εκτιμηθεί η ξηρασία με πολύ αποτελεσματικό τρόπο και με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μελέτη της ξηρασίας στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (εικόνων) μιας εκτεταμένης χρονοσειράς 20 υδρολογικών ετών, από το 1981 έως το 2001. Οι εικόνες αναφέρονται στην περιοχή της Θεσσαλίας και η διακριτική τους ικανότητα είναι  $8 \times 8 \text{ km}^2$  για κάθε μήνα ολόκληρης της χρονοσειράς.

Ο δείκτης που επιλέχθηκε για την εκτίμηση της ξηρασίας στην παρούσα εργασία ήταν ο Αναγνωριστικός Δείκτης Ξηρασίας (Reconnaissance Drought Index – RDI), ένας αρκετά αξιόπιστος και εύχρηστος δείκτης με μικρές απαιτήσεις σε δεδομένα, είτε επίγεια είτε δορυφορικά, που εκτιμά ποσοτικά την ξηρασία. Εφαρμόζοντας τα δεδομένα σε ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων, το Erdas Imagine 8.7 και με τη βοήθεια των διαφόρων αλγορίθμων που διαθέτει, δημιουργήθηκε ο τελικός χάρτης του δείκτη RDI. Ο χάρτης αυτός ήταν συνδυασμός από μηνιαίους χάρτες θερμοκρασίας, φυτικών συντελεστών ( $K_c$ ), ηλιοφάνειας ( $p$ ), δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη χρήση της μεθόδου Blaney- Criddle και βροχόπτωσης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε μια σειρά από χωροχρονικά χαρακτηριστικά

της ξηρασίας όπως είναι η έναρξη, η λήξη, η διάρκεια, η δριμύτητα, η χωρική έκταση και η συχνότητα.

Πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση της ξηρασίας για κάθε ένα μεμονωμένο επεισόδιο, καθώς και συνολικά για τα οκτώ (8) επεισόδια που διαπιστώθηκαν στη διάρκεια της υδρολογικής 20ετίας που αναλύθηκε, από το 1981 έως το 2001. Έτσι προσδιορίστηκαν οι περιοχές που πλήττονται συχνότερα από το φαινόμενο της ξηρασίας και είναι πιο ευάλωτες σε καιρικές διακυμάνσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας των οκτώ επεισοδίων ξηρασίας, μέσα από τα οποία και σε συνδιασμό με τους χάρτες υπολογίστηκαν οι περιοχές που πλήττονται συχνότερα από ακραία ξηρασία ( $< -2$  στην κλίμακα του RDI). Επίσης προσδιορίστηκαν οι χρονικές περίοδοι εμφάνισής της στις περιοχές αυτές. Πιο συγκεκριμένα ορισμένα έτη ξηρασίας όπως το 1984, το 1989 και το 1991 παρουσίασαν ακραία ξηρασία.

Μια καινοτομία της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου εμπειρικού διαγράμματος σύμφωνα με το οποίο παρέχεται η δυνατότητα πρόδρομης εκτίμησης ενός επεισοδίου ξηρασίας για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Απομονώθηκαν στο διάγραμμα οι ακραίες τιμές όλων των επεισοδίων ξηρασίας και στη συνέχεια, σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, ξεχώρισαν δύο υποκατηγορίες ξηρασίας, η ισχυρή και η μέτρια ή ασθενής. Παρατηρώντας την εξέλιξη του φαινομένου τους πρώτους μήνες προσδιορίζεται η υποκατηγορία στην οποία ανήκει και στη συνέχεια η αντίστοιχη πρόδρομη εκτίμηση της εξέλιξης του επεισοδίου.

Μετά τον υπολογισμό της ξηρασίας και των χαρακτηριστικών της για τα 20 υδρολογικά έτη πραγματοποιήθηκε μια σειρά στατιστικών ελέγχων. Έτσι επαληθεύτηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Εφαρμόστηκαν πέντε δείκτες, ο

δείκτης αποτελεσματικότητας ( $E_{ff}$ ), ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ), το μεροληπτικό σφάλμα (BIAS) και τέλος δύο δείκτες του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), ένας για τα επίγεια και ένας για τα δορυφορικά δεδομένα. Οι πέντε αυτοί δείκτες υπολογίστηκαν για τρίμηνα, εξάμηνα, εννεάμηνα και ετήσια δεδομένα. Με αυτόν τον υπολογισμό των στατιστικών σφαλμάτων προσδιορίστηκε η εξέλιξη των επεισοδίων ξηρασίας μέσα σε ένα υδρολογικό έτος. Παρατηρήθηκε λοιπόν πως και στους πέντε δείκτες οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι μέσα στα όρια των αποδεκτών τιμών και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη τιμή όπως για το δείκτη αποτελεσματικότητας,  $E_{ff}$  η ετήσια τιμή του είναι 0.7 και για τον συντελεστή προσδιορισμού,  $R^2$  0.87 με βέλτιστη το 1 και για τους δύο δείκτες. Ομοίως για το μεροληπτικό σφάλμα, BIAS η ετήσια τιμή του είναι -0.15 με βέλτιστη το 0. Τέλος οι δύο δείκτες του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), ένας για τα επίγεια και ένας για τα δορυφορικά δεδομένα παρουσίασαν τιμές κοντά στο 1 (0.92 και 0.95 αντίστοιχα) με βέλτιστη το 0.

Η χρήση του δείκτη RDI σε συνδυασμό με την υπόλοιπη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αποδεικνύεται αρκετά καινοτόμα και δίνει τη δυνατότητα της ολοκληρωμένης παρακολούθησης της ξηρασίας για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, αλλά και γενικά για κάθε λεκάνη απορροής, παρακολουθώντας το φαινόμενο ολοκληρωμένα.

**Λέξεις κλειδιά:** Ξηρασία, RDI, Τηλεπισκόπηση, στατιστικοί δείκτες



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
1.1. Ξηρασία και χωρικά χαρακτηριστικά .....	1
1.2. Τύποι ξηρασίας.....	3
1.3. Χωρικά χαρακτηριστικά ξηρασίας .....	6
1.4. Τηλεπισκόπηση και Γ.Σ.Π. στην ξηρασία .....	10
<b>2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ</b> .....	12
2.1. Περιοχή μελέτης.....	12
2.2. Συστήματα Τηλεπισκόπησης .....	15
2.2.1. Εφαρμογές στην ξηρασία.....	19
2.3. Βάση δεδομένων.....	20
2.3.1. Δορυφορικά δεδομένα .....	21
2.3.1.1. Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων .....	23
2.3.1.2. Υπολογισμός θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους.....	24
2.3.1.3. Εκτίμηση δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση δορυφορικών δεδομένων.....	24
2.3.1.4. Εξαγωγή χαρτών βροχόπτωσης .....	26
2.3.1.5. Χωρική εκτίμηση του δείκτη ξηρασίας RDI.....	27
2.4. Μεθοδολογία.....	28
2.4.1. Εκτίμηση ξηρασίας με ΓΣΠ και Τηλεπισκόπηση.....	28
2.4.1.1. Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI).....	29
2.4.1.2. Στατιστικοί δείκτες.....	32
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	34

3.1. Υπολογισμός χαρτών RDI .....	35
3.2. Υπολογισμός επεισοδίων ξηρασίας .....	35
3.3. Περιοχική έκταση κάθε επεισοδίου ξηρασίας .....	51
3.4. Διαγράμματα περιόδων ξηρασίας.....	60
3.5. Στατιστικοί δείκτες .....	63
<b>4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>68</b>
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>75</b>
5.1. Συμπεράσματα .....	75
5.2. Προτάσεις .....	76
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>78</b>
<b>7. ABSTRACT .....</b>	<b>86</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....</b>	<b>1</b>
Παράρτημα Α: .....	2
Παράρτημα Β: .....	19
Παράρτημα Γ: .....	24
Παράρτημα Δ: .....	31

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Ξηρασία και χωρικά χαρακτηριστικά

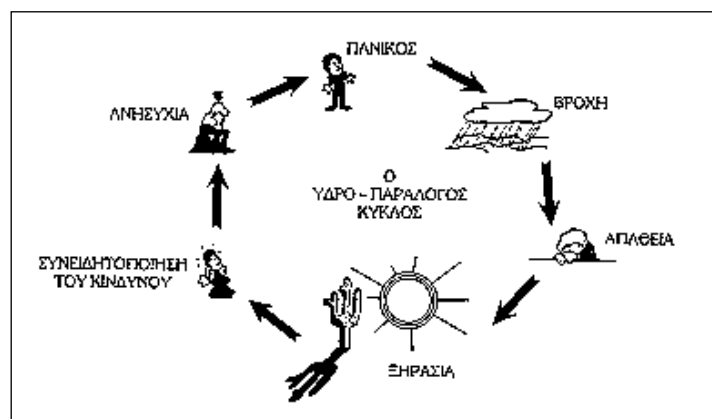
Οι ξηρασίες κατατάσσονται στα ακραία κλιματικά φαινόμενα ενός τόπου και μαζί με τις πλημμύρες σχετίζονται με τις διακυμάνσεις της βροχής σε διάφορες χρονικές περιόδους. Πολύ συχνά συναντάται σε μια περιοχή του πλανήτη έντονη ξηρασία και σε μια άλλη έντονη πλημμύρα. Αυτό εκφράζεται και ως «δίπολο» ξηρασιών – πλημμυρών σε διάφορες χρονικές περιόδους του χρόνου, κάτι που είναι αναμενόμενο και φυσιολογικό. Συνεπάγεται, επομένως πως κανένα έτος δεν μπορεί να είναι πολύ υγρό ή πολύ ξηρό, με αναφορά σε εκτεταμένες περιοχές, αφού η ποσότητα που περισσεύει σε κάποιες περιοχές σπανίζει σε κάποιες άλλες (Wen *et al.* 2011).

Η ξηρασία εμφανίζεται και επεκτείνεται βαθμιαία δίνοντας αρχικά την εντύπωση πως δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο συμβάν, κάτι που την χαρακτηρίζει ως ένα πολύ επικίνδυνο ακραίο κλιματικό φαινόμενο και ίσως την πιο δαπανηρή φυσική καταστροφή σε παγκόσμιο επίπεδο, αφού συνολικά επηρεάζει περισσότερους ανθρώπους από οποιαδήποτε άλλη μορφή φυσικών καταστροφών (Keyantash & Dracup 2002, Wooster *et al.* 2011).

Βασική αιτία εκδήλωσης ενός επεισοδίου ξηρασίας, καθώς και των υπολοίπων ακραίων καιρικών και κλιματικών φαινομένων, είναι η φυσική διακύμανση του κλίματος σε έναν τόπο, η οποία οφείλεται στη μείωση ή αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας (θερμότητα) που δέχεται. Είναι δυνατό να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε περιοχή και με οποιαδήποτε διάρκεια ή δριμύτητα χωρίς κάποιες συγκεκριμένες ενδείξεις πριν την εκδήλωσή της. Αυτό καθιστά αρκετά δύσκολο και τον προσδιορισμό

της έναρξης του φαινομένου μιας και παρουσιάζει μια χρονική υστέρηση από την έλλειψη βροχοπτώσης έως τις πρώτες ενδείξεις ξηρασίας.

Ένα επεισόδιο παρατεταμένης ξηρασίας δημιουργεί πολύ σημαντικά προβλήματα και στα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα της περιοχής στην οποία εμφανίζεται (Τσακίρης 1995). Πέρα από τις αρνητικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τους φυσικούς οικοτόπους, έχει και πολλές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, από τη γεωργία, την ενέργεια, τις μεταφορές, τον τουρισμό, μέχρι την παροχή ύδατος, και τη σύγχρονη βιομηχανία (Heim 2002, Vangelis *et al.* 2010). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διαρκής ανάπτυξη μηχανισμών πρόβλεψης και αντιμετώπισής της, σε εθνικό επίπεδο, αναπτύσσοντας διαχειριστικά σχέδια, ένα εκ των οποίων είναι ο περιορισμός της κατανάλωσης των υδάτων αλλά και η δημιουργία έργων για την ορθολογική αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων (Anuradha & Prabhavathy 2010, Tsakiris 2008). Με την εμφάνιση βροχοπτώσεων όμως, έστω και παροδικών, υπάρχει ένας εφησυχασμός και μια αναβλητικότητα στην εκτέλεση των διαχειριστικών μέτρων κάτι που αναφέρεται ως ο «υδρο-παράλογος» κύκλος της ξηρασίας και παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1:** Ο "υδρο-παράλογος" κύκλος της ξηρασίας (Τσακίρης 1995)

## 1.2. Τύποι ξηρασίας

Είναι αρκετά δύσκολο να υπάρξει ένας γενικός ορισμός της ξηρασίας, κοινά αποδεκτός, σε παγκόσμιο επίπεδο και αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της ποικιλομορφίας στον τρόπο εμφάνισής της, της πολύπλευρης διάστασής της, καθώς και στη γεωγραφική και χρονική κατανομή της (Heim 2002). Έχουν επικρατήσει τρεις βασικές κατηγορίες οι οποίες δεν παρουσιάζονται πάντα ευδιάκριτα και πολλές φορές μπορεί να συνδυάζονται ή να διαδέχονται η μια την άλλη. Οπότε οι κατηγορίες ξηρασίας διακρίνονται στη Μετεωρολογική ή Κλιματολογική, στη Γεωργική ή Αγρομετεωρολογική και στην Υδρολογική. Στις κατηγορίες αυτές έρχεται να προστεθεί μια επιπλέον, η παράμετρος των Κοινωνικο-οικονομικών επιπτώσεων (Σχ. 1.2) (WMO 1975, Alley 1984, Alley 1985, Wilhite & Glantz 1985, White 1990, Wilhite 2005).

1. Η **μετεωρολογική ή κλιματολογική** ξηρασία θεωρείται μία παρατεταμένη, μη κανονική έλλειψη υγρασίας, χαμηλότερη δηλαδή από το μέσο όρο ενός μεγάλου αριθμού παρατηρήσεων (Palmer 1965, Dalezios *et al.* 1991). Εκφράζεται με σύγκριση των βροχοπτώσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή με τις κανονικές ή μέσες τιμές βροχόπτωσης. Με βάση τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό σε κάθε χώρα ή περιοχή, η ξηρασία καθορίζεται ως το 60% ή λιγότερο της κανονικής ετήσιας βροχόπτωσης για περισσότερο από δύο διαδοχικά έτη σε έκταση περιοχής μεγαλύτερη του 50% της συνολικής έκτασης στην οποία εμφανίζεται (WMO 1986). Ο ορισμός της μετεωρολογικής ξηρασίας εμφανίζει τοπικό χαρακτήρα διότι η ατμοσφαιρική κυκλοφορία και οι κλιματικές συνθήκες, που καθορίζουν την βροχόπτωση μιας περιοχής, είναι και αυτές τοπικής ή περιοχικής κλίμακας (Koutroulis 2011, Zhou *et al.* 2011).

2. Η **γεωργική** ή αγρομετεωρολογική ξηρασία χαρακτηρίζεται από την έλλειψη υγρασίας στο έδαφος το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μη κανονική ανάπτυξη των καλλιεργειών. Όταν η διαθέσιμη ποσότητα νερού στο έδαφος, μέσω της διήθησης, πέσει κάτω από ένα κρίσιμο όριο, το σημείο μαρασμού (Wilting point), υπάρχει μείωση ανάπτυξης των φυτών. Τους χειμερινούς μήνες ο τύπος της ξηρασίας αυτής επιφέρει από ελάχιστες μέχρι και μηδενικές απώλειες, εάν όμως συνεχιστεί και κατά τους υπόλοιπους μήνες μπορεί να προκαλέσει τεράστιες επιπτώσεις στη γεωργία. Όταν κάνει την εμφάνισή της τους καλλιεργητικούς μήνες, που οι απαιτήσεις σε νερό είναι μεγάλες, η ξηρασία οδηγεί σε εξαιρετικά αρνητικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, συνδέει τη μετεωρολογική και την υδρολογική ξηρασία με τις επιπτώσεις στη γεωργία δίνοντας έμφαση κυρίως στη διαφορά μεταξύ πραγματικής και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στις καλλιέργειες, αλλά και στο έλλειμμα εδαφικής υγρασίας, κάτι που οδηγεί σε εξαιρετικά αρνητικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών.
3. Η **υδρολογική** ξηρασία χαρακτηρίζεται από μία περίοδο στην οποία υπάρχει έλλειψη υδάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε η παροχή νερού να μην επαρκεί για την ικανοποίηση των αναγκών μιας περιοχής. Αυτός ο τύπος ξηρασίας παρουσιάζει μια σχετική καθυστέρηση στην εμφάνισή του σε σχέση με την Μετεωρολογική ξηρασία και αυτό διότι επηρεάζεται από την εδαφική υγρασία. Επίσης εξαρτάται από τη ροή των ρευμάτων, τις υδατοσυλλογές και τα υπόγεια ύδατα, οπότε εμφανίζεται κυρίως όταν υπάρχει έλλειψη βροχοπτώσεων και χαμηλά αποθέματα σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα για μεγάλες χρονικές περιόδους (Τσακίρης και συν. 2007, Nalbantis 2008). Ένα έτος μπορεί να χαρακτηριστεί ως υδρολογικά ξηρό, όταν η συνολική ποσότητα νέων υδάτων σε μια λεκάνη απορροής είναι κάτω ενός ορίου (Whipple

1996). Το όριο αυτό διαφέρει από λεκάνη σε λεκάνη αφού επηρεάζεται άμεσα από την ποσότητα βροχόπτωσης και τη ζήτηση ύδατος κάθε εποχής στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Οι **κοινωνικο-οικονομικές** επιπτώσεις της ξηρασίας σχετίζονται με τις προαναφερόμενες μορφές ξηρασίας και αφορά κυρίως στην μη ορθολογική διαχείριση των ήδη διατιθέμενων υδατικών πόρων, όπως την υπερκατανάλωση και την ανεπαρκή υποδομή των κοινωνιών. Η αύξηση των αναγκών και η ζήτηση ύδατος σε πολλές περιοχές και η ταυτόχρονη μείωση των αποθεμάτων του, έχει σοβαρές επιπτώσεις στις κοινωνικο-οικονομικές δραστηριότητες της περιοχής αυτής, κάτι που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη βοήθεια κοινωνικών και οικονομικών δεικτών ανάπτυξης (McVicar & Jupp 1998).



Σχήμα 1.2: Τύποι ξηρασίας (Medroplan)

Οι επιπτώσεις που οφείλονται στην ξηρασία, διαφοροποιούνται με αυτές που προέρχονται από φυσικές καταστροφές ως προς τις υλικές ζημιές (Qi *et al.* 2011).

Συνεπώς η εκτίμηση του ποσοτικού προσδιορισμού αυτών των ζημιών είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία.

Οι διάφορες μορφές της ξηρασίας συνδέονται με μια πολύπλοκη σχέση και υπάρχει μια άμεση αλληλεξάρτηση της μιας με την άλλη. Όπως για παράδειγμα μια μειωμένη ποσότητα βροχόπτωσης, η οποία είναι παράμετρος της μετεωρολογικής ξηρασίας, θα οδηγούσε σε μειωμένη παροχή ύδατος στις λεκάνες απορροής με αποτέλεσμα την εμφάνιση γεωργικής ξηρασίας, στη συνέχεια υδρολογικής, οδηγώντας τελικά σε κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις. Η σειρά εμφάνισης των διαφόρων μορφών ξηρασίας δηλώνει και τις περαιτέρω διαφορές τους. Σε ένα επεισόδιο ο γεωργικός κλάδος είναι αυτός που πλήττεται πρώτος, εξαιτίας της άμεσης εξάρτησής του με τα εδαφικά ύδατα. Το ύψος της βροχόπτωσης που σημειώνεται κατά τη λήξη του επεισοδίου καθώς επίσης και η διάρκεια αλλά και η δριμύτητα της ξηρασίας καθορίζουν το χρόνο ανάκτησης μιας περιοχής (Byun & Wilhite 1990).

Παρά το γεγονός ότι ο βασικός παράγοντας εμφάνισης ξηρασίας είναι το κλίμα μιας περιοχής, οι ανθρώπινες δραστηριότητες και επεμβάσεις, όπως οι αλλαγές στο τοπίο και στις χρήσεις γης, η κατασκευή φραγμάτων, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο φαινόμενο.

### 1.3. Χωρικά χαρακτηριστικά ξηρασίας

Για τον καθορισμό και τη διαφοροποίηση του ενός επεισοδίου ξηρασίας από το άλλο υπάρχουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά, τα κυριότερα των οποίων είναι η έναρξη, η λήξη, η δριμύτητα ή ένταση, η συχνότητα, η διάρκεια, η χρονική και χωρική εξάπλωσή του, καθώς και η ανάπτυξη και εξέλιξή του (Δαλέζιος και συν. 1990, Dalezios *et al.* 2000, Piechota & Dracup 1996).



Η **έναρξη** της ξηρασίας καθορίζεται με την εμφάνιση ενός επεισοδίου αυτής. Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η έναρξη ενός επεισοδίου ξηρασίας σε μια περιοχή λόγω της χρονικής καθυστέρησης που παρουσιάζεται μεταξύ της απουσίας βροχόπτωσης και της εκδήλωσης του φαινομένου. Για την εκτίμηση ενός επεισοδίου εφαρμόζονται ορισμένοι δείκτες.

Η **λήξη** της ξηρασίας σηματοδοτείται με την εμφάνιση βροχοπτώσεων οπότε και τη λήξη του επεισοδίου. Αυτό συμβαίνει όταν οι βροχοπτώσεις επιμένουν για ορισμένο διάστημα και οι τιμές του δείκτη υπολογισμού της ξηρασίας ξεπεράσουν την κλίμακα της ξηρότητας.

Η **δριμύτητα ή ένταση** δείχνει τη διαβάθμιση της ξηρασίας από τη μέτρια φάση της έως και την ακραία μορφή που μπορεί να έχει ένα τέτοιο φαινόμενο. Υπολογίζεται με κλιματικούς δείκτες οι οποίοι συγκρίνουν το έλλειμμα της βροχόπτωσης σύμφωνα με τις κανονικές βροχοπτώσεις σε μια περιοχή.

Η **διάρκεια** ενός επεισοδίου ξηρασίας αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που διαρκεί αυτό. Μπορεί να παρουσιάζει ένα μικρό χρονικό διάστημα πλήρους απουσίας βροχοπτώσεων (1-3 μήνες) που χαρακτηρίζεται ως εποχική ξηρασία. Αυτή οφείλεται κυρίως στις ιδιαίτερες κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής την εποχή του έτους που εξετάζεται. Μπορεί όμως να παρουσιάζει εμμονή ορισμένων ετών σε μια συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. έρημος) οπότε και χαρακτηρίζεται ως μόνιμο φαινόμενο ξηρασίας.

Η **εξέλιξη ή ανάπτυξη** ενός επεισοδίου ξηρασίας ορίζεται το διάστημα από την έναρξη έως και τη λήξη αυτού. Συνήθως, όσον αφορά τη δριμύτητά της, περιλαμβάνει όλες τις κατηγορίες ξηρασίας, αρχικά με τη μέτρια μορφή, στη συνέχεια κλιμακώνεται στην ακραία μορφή και καταλήγει με τη μείωση του φαινομένου μέχρι να σταματήσει εντελώς. Η εξέλιξη καθορίζεται από τη διάρκεια του φαινομένου.

Η **συχνότητα** δείχνει την περίοδο επανεμφάνισης του φαινομένου της ξηρασίας σε μια περιοχή. Η περίοδος αυτή ποικίλει αρκετά διότι εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, τη γεωγραφική της θέση καθώς επίσης και από διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που εντάσσονται στους εξωγενείς παράγοντες.

Η **χωρική κατανομή** της ξηρασίας δείχνει την έκταση στην οποία συμβαίνει το επεισόδιο. Ανάλογα με τη χωρική αυτή εξάπλωση διακρίνεται η ξηρασία σε σημειακή και επιφανειακή. Η σημειακή μορφή αναφέρεται στην εξάπλωση του φαινομένου σε ένα και μόνο συγκεκριμένο σημείο (π.χ. σε ένα τμήμα μιας λεκάνης απορροής) ενώ η επιφανειακή μορφή της ξηρασίας αναφέρεται σε μεγάλες εκτάσεις (π.χ. μια ολόκληρη λεκάνη απορροής ή ακόμα και ένα κράτος). Σε αρκετές περιοχές, λόγω μετεωρολογικών συνθηκών, είναι πιθανόν να υπάρχει επεισόδιο ξηρασίας πολύ συχνά.

Με τη **χρονική κατανομή** υπολογίζεται η διαχρονική εξέλιξη της ξηρασίας σε μια περιοχή, κατά τη διάρκεια μιας εκτενέστερης χρονικής περιόδου. Αρκετές φορές το φαινόμενο παρουσιάζει εμμονή με μια συγκεκριμένη περιοχή ορισμένους μήνες του χρόνου ή σε ένα ευρύτερο χρονικό διάστημα οπότε χαρακτηρίζεται η περιοχή αυτή ως ξηρή και αναμένεται η εμφάνιση ενός επεισοδίου ξηρασίας τη συγκεκριμένη εποχή ή περίοδο του χρόνου. Για να προσδιορίζεται ορθά η χρονική κατανομή της ξηρασίας είναι απαραίτητη μια μεγάλη σειρά μετρήσεων ώστε να αποκλειστεί το ενδεχόμενο του τυχαίου επεισοδίου.

Αν και η **παρακολούθηση** του φαινομένου της ξηρασίας είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία, θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, διότι υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν μέτρα πρόληψης και προστασίας, καθώς επίσης και αντιμετώπισης του φαινομένου με τον περιορισμό των επιπτώσεών του. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μεθοδολογιών εκτίμησης και παρακολούθησης της ξηρασίας, που χωρίζονται

σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις Μετεωρολογικές ή Συνοπτικές μεθόδους και τις Στατιστικές ή Στοχαστικές (Τσακίρης 1995, Δαλέζιος 1999). Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τον υπολογισμό τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών χαρακτηριστικών της ξηρασίας για τις παραμέτρους της όπως για παράδειγμα την έναρξη, τη λήξη, τη διάρκεια, τη δριμύτητα και τη συχνότητα.

Για την ποσοτική εκτίμηση της ξηρασίας η τεχνική που χρησιμοποιείται δεν είναι ενιαία, οπότε δεν υπάρχει απόλυτα κάποιος δείκτης που να υπερέχει (Keyantash & Dracup 2002). Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα σύνολο έξι σταθμισμένων κριτηρίων τα οποία παίρνουν τιμές από 1 έως 5,5 έτσι ώστε να βοηθήσουν στην επιλογή του καταλληλότερου δείκτη κάθε φορά. Ο δείκτης αυτός θα πρέπει ιδανικά να διαθέτει: ανθεκτικότητα, πρακτικότητα, σαφήνεια, εξειδίκευση, γενικό και φυσικό χαρακτήρα (Keyantash & Dracup 2002, Redmond 1991).

Οι παραδοσιακές μέθοδοι εκτίμησης και παρακολούθησης της ξηρασίας, βασίζονται στις τιμές της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και των υπόλοιπων μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου. Για αρκετά χρόνια χρησιμοποιούνταν ευρέως και προσέφεραν σημαντικά αποτελέσματα στην προσπάθεια αντιμετώπισης της ξηρασίας. Οι πιο χαρακτηριστικοί από αυτούς είναι ο Δείκτης Δριμύτητας Ξηρασίας Palmer (Palmer Drought Severity Index- PDSI) και ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index- SPI) (Loukas *et al.* 2002). Εμφανίζουν όμως αρκετά μειονεκτήματα όπως το ότι εφαρμόζονται μόνο όπου υπάρχουν μετεωρολογικοί σταθμοί, σε συγκεκριμένες δηλαδή περιοχές, εμφανίζουν συχνά ανακρίβειες που οφείλονται σε βλάβες ή κακή συντήρηση των σταθμών, έχουν ελλιπή δεδομένα και με περιορισμένο μέγεθος και το σημαντικότερο, δεν μπορούν σχεδόν ποτέ να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο (Thenkabail *et al.* 2004).

Αντίστοιχα υπάρχουν τα δορυφορικά δεδομένα με μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι είναι συνεχώς διαθέσιμα, καλύπτουν πολύ μεγαλύτερη εδαφική έκταση, με άμεση δυνατότητα χωρικής εκτίμησης του φαινομένου και των βασικών χαρακτηριστικών της ξηρασίας (Thiruvengadachari & Gopalkrishna 1993). Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι δείκτες που χρησιμοποιούν δορυφορικά δεδομένα είναι ο Αναγνωριστικός Δείκτης Ξηρασίας- Reconnaissance Drought Index (RDI), ο Δείκτης Υγείου Βλάστησης - Vegetation Health Index (VHI), (Παρ. Α). Με τη χρήση της Τηλεπισκόπησης υπάρχει η δυνατότητα εκτίμησης των επιπτώσεων ενός επεισοδίου ξηρασίας στην απόδοση των καλλιεργειών 5 έως 13 εβδομάδες πριν τη συγκομιδή τους (Ungani & Kogan 1998, Domenikiotis *et al.* 2005). Στο διαδίκτυο υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και κατάστασης βλάστησης για οποιαδήποτε περιοχή ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα αυτά διατίθενται από Αμερικανικές και Ευρωπαϊκές Υπηρεσίες, εκ των οποίων η πιο διαδεδομένη πηγή δορυφορικών δεδομένων θεωρείται το ραδιόμετρο (αισθητήρας) των δορυφόρων της σειράς NOAA (NOAA/ AVHRR- Advance Very High Resolution Radiometer) (Kogan 2000).

#### 1.4. Τηλεπισκόπηση και Γ.Σ.Π. στην ξηρασία

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της ξηρασίας, το οποίο καθορίζει την έκταση που επηρεάζει το φαινόμενο και τις κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις που αυτό επιφέρει, είναι η χωρική της εξάπλωση. Ο προσδιορισμός αυτής υπολογίζεται με τη χρήση δεικτών τηλεπισκόπησης, οι οποίοι βασίζονται κυρίως σε δορυφορικά δεδομένα, όπως οι δορυφορικές εικόνες. Για την καλύτερη ανάπτυξη και επεξεργασία των χωρικών δεδομένων χρησιμοποιούνται τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), το περιβάλλον των οποίων μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα.

Με τον όρο Τηλεπισκόπηση εκφράζεται η διαδικασία λήψης δεδομένων και πληροφοριών για την παρατήρηση μιας παραμέτρου, ενός φαινομένου, ενός αντικειμένου ή γενικότερα μιας ευρύτερης περιοχής, από απόσταση του δέκτη και του υπό μελέτη αντικειμένου (Δαλέζιος 2002). Τα βασικότερα “προϊόντα” της Τηλεπισκόπησης θεωρούνται οι εικόνες των radar, οι αεροφωτογραφίες και τα δεδομένα από αισθητήρες δορυφόρων, τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο. Η δορυφορική Τηλεπισκόπηση δίνει τη δυνατότητα μελέτης παραμέτρων της χωρικής κάλυψης, όπως θερμοκρασίας εδάφους, ηλιακής ακτινοβολίας, βροχόπτωσης, κατάστασης βλάστησης, εδαφικής υγρασίας, ανέμου καθώς επίσης και της ανάπτυξης και παραγωγής των καλλιεργειών, μετρώντας την ανακλώμενη και την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από την επιφάνεια και την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα της γης (Δαλέζιος 2007, Kanellou *et al.* 2008d).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσέγγιση και η παραμετροποίηση του φαινομένου της ξηρασίας υπολογίζοντας τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά αυτής. Με την περιοχική εκτίμηση του κάθε επεισοδίου ξηρασίας προσδιορίζονται οι ευπαθείς περιοχές που πλήττονται συχνότερα από το φαινόμενο αυτό. Έτσι παρέχονται σχέδια δράσης, πρόληψης και αντιμετώπισης στους αρμόδιους φορείς ώστε να βρίσκονται σε κατάσταση ετοιμότητας όποτε υπάρχει ένδειξη πιθανού επεισοδίου ξηρασίας στις περιοχές αυτές. Επίσης επιλύεται το πρόβλημα πολλών δεκαετιών το οποίο έγκειται στη χωρική και χρονική εκτίμηση μιας ευρύτερης περιοχής και όχι σε σημειακές εκτιμήσεις.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η χωρική εκτίμηση της ξηρασίας με χρήση δορυφορικών δεδομένων και του δείκτη RDI έχει τη δυνατότητα παρατήρησης και εκτίμησης της ξηρασίας σε μια ευρύτερη περιοχή μελέτης και χρησιμοποιώντας διαφορετικές χρονοσειρές δεδομένων. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού στη Θεσσαλία αξιοποιώντας τα δορυφορικά δεδομένα συγκεκριμένης χρονοσειράς.

### 2.1. Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι το σύνολο της υδρολογικής λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού, στη Θεσσαλία. Η Θεσσαλία είναι μια από τις δεκατέσσερις (14) υδρολογικές περιφέρειες της Ελλάδας και βρέχεται από το Αιγαίο πέλαγος. Είναι χωρισμένη σε τέσσερις (4) νομούς (Εικ. 2.1), (Λάρισα, Μαγνησία, Καρδίτσα και Τρίκαλα), με κυριότερες πόλεις τη Λάρισα, το Βόλο, την Καρδίτσα και τα Τρίκαλα, αντίστοιχα. Συνολικά η έκτασή της είναι 14.036 km<sup>2</sup>, αντιπροσωπεύοντας το 10,6% της έκτασης της Ελλάδας. Το 36% της γης είναι πεδιάδα, το 17,1% είναι ημιορεινή ενώ το υπόλοιπο 44,9% της γης είναι ορεινή (Dalezios *et al.* 2011).

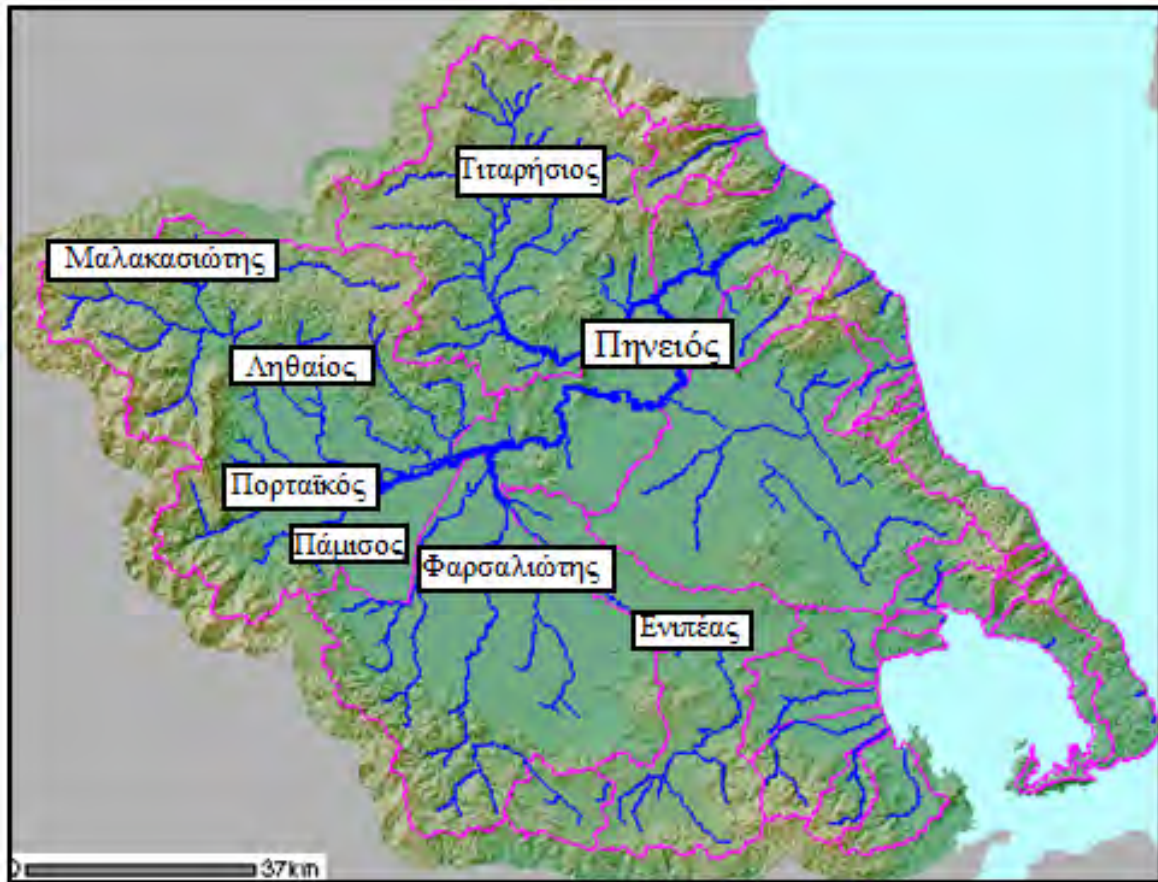
Η περιοχή της Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερα μεταβλητό τοπίο, με κύριο γνώρισμα τα ψηλά βουνά γύρω από την μεγαλύτερη πεδιάδα της χώρας. Αυτά είναι κυρίως η νότια πλευρά της οροσειράς της Πίνδου, ο Όλυμπος, με την υψηλότερη κορυφή της Ελλάδας, τον Μύτικα (2.917 μέτρα), ο Κίσσαβος ή Όσσα και το Πήλιο. Το κλίμα της Θεσσαλίας θεωρείται τυπικά μεσογειακό (Μαριολόπουλος 1938), κάτι που παρατηρείται έντονα στην ανατολική πλευρά.



**Εικόνα 2.1:** Θεσσαλία

Στη δυτική πλευρά το κλίμα είναι ηπειρωτικό με μεγάλες διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες παρατηρώντας κρύους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια. Η θερμοκρασία τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο μπορεί να φτάσει και τους 40° C, με έντονη ξηρότητα και σπάνια εμφάνιση βροχόπτωσης. Στην περιφέρεια της Θεσσαλίας η μέση ετήσια βροχόπτωση φτάνει περίπου τα 700 χιλιοστά και είναι άνισα κατανομημένη χωρικά και χρονικά (Κανέλλου 2010). Σε γενικές γραμμές κυμαίνεται από 400 χιλιοστά στην κεντρική πεδινή περιοχή και ξεπερνά τα 1850 χιλιοστά στις δυτικές βουνοκορφές.

Η πεδιάδα της Θεσσαλίας χωρίζεται σε τρεις συνολικά λεκάνες απορροής, με κυριότερη αυτή του Πηνειού ποταμού που καλύπτει συνολικά 9500 km<sup>2</sup>, στη συνέχεια της λίμνης Κάρλας με 1050 km<sup>2</sup>, και τέλος οι υπόλοιπες λεκάνες και υπολεκάνες απορροής που καλύπτουν μια έκταση 2827 km<sup>2</sup> (Εικ. 2.2).



Εικόνα 2.2: Υδρολογικός χάρτης Θεσσαλίας (Tsakiris 2008)

Ο Πηνειός ή Σαλαβριάς ποταμός έχει συνολικό μήκος 205 χιλιόμετρα και οι πηγές του βρίσκονται στην Πίνδο. Διασχίζει τα στενά της Καλαμπάκας και στη συνέχεια καθώς περνά την προσχωσιγενή λεκάνη του Θεσσαλικού κάμπου φτάνει στην κοιλάδα των Τεμπών, μεταξύ του Ολύμπου και της Όσσας. Εκβάλλει τελικά στον Θερμαϊκό κόλπο, κοντά στην κωμόπολη Στόμιο. Οι κύριοι παραπόταμοί του είναι ο Τιταρήσιος, ο Ενιπέας, ο Καλέντζης και ο Ληθαίος ποταμός. Το κύριο μέρος της λεκάνης περιλαμβάνει μια ορεινή έκταση με υψόμετρα που ξεπερνούν τα 2000 m (Πίνδος, Όλυπος). Η υπόλοιπη λεκάνη περιλαμβάνει γεωργικές, πεδινές εκτάσεις (το Θεσσαλικό κάμπο) και αστικές περιοχές με μέσο υψόμετρο τα 285 m.



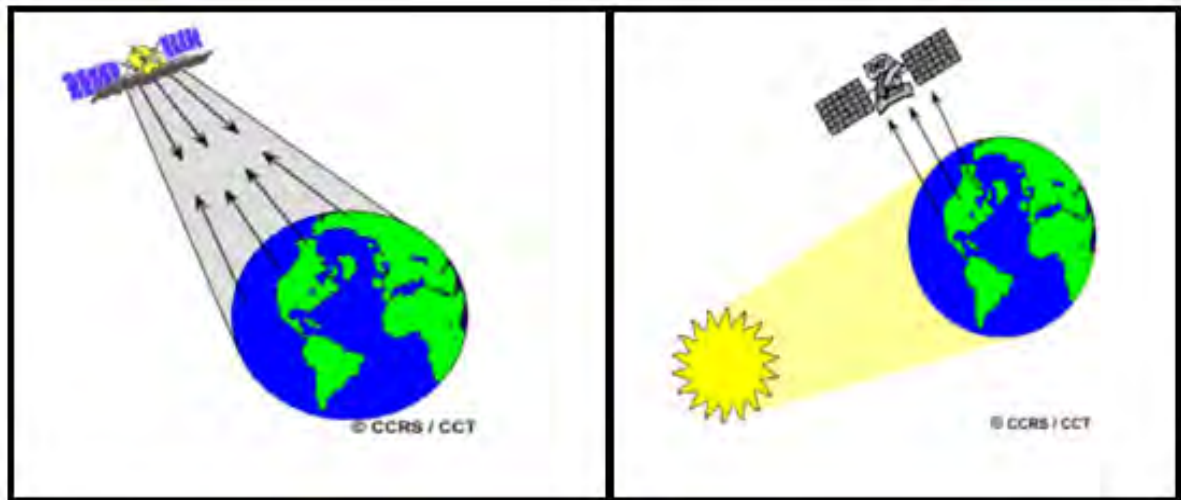
## 2.2. Συστήματα Τηλεπισκόπησης

Η Τηλεπισκόπηση βασίζεται στη μέτρηση των εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τη γη και την ατμόσφαιρα, τα οποία λαμβάνονται με τη βοήθεια σύγχρονων δορυφορικών καταγραφικών οργάνων (αισθητήρες). Η λήψη αυτή είναι εφικτή από ορισμένες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως το ορατό (VIS), το κοντινό υπέρυθρο (NIR), το μέσο υπέρυθρο (MIR), το θερμικό υπέρυθρο (TIR) και τα μικροκύματα (MV). Η λήψη εικόνων σε αυτές τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καθιστά δυνατή την ταξινόμησή τους με βάση τα φασματικά τους χαρακτηριστικά (καθορισμός χρήσεων γης). Επίσης η δυνατότητα λήψης δορυφορικών εικόνων στερεοσκοπικής κάλυψης μιας περιοχής παρέχει τη φυσιογραφική ανάλυσή της και τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) με το οποίο υπάρχει η δυνατότητα παρατήρησης κλίσεων, υψομετρικών διαφορών της περιοχής και την προβολή τρισδιάστατης απεικόνισης (Τσίρος 2009). Η πιο σημαντική παράμετρος της τηλεπισκόπησης είναι η απορρόφηση.

Ορισμένα βιοφυσικά χαρακτηριστικά που μπορούν επίσης να καταγραφούν με τηλεπισκοπικές μεθόδους είναι η χωρική θέση, το υψόμετρο, το ποσοστό υγρασίας της βλάστησης και του εδάφους και η θερμοκρασία.

Οι δύο μεγάλες κατηγορίες των δορυφορικών συστημάτων είναι τα ενεργητικά και τα παθητικά συστήματα.

Τα ενεργητικά συστήματα, (Εικ. 2.3 αριστερά) στα οποία ανήκουν τα μετεωρολογικά και δορυφορικά Radar (Radar Detection And Ranging), και ο περιβαλλοντικός δορυφόρος Radarsat, διαθέτουν δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία και εκπέμπουν στο προς εξέταση αντικείμενο και στη συνέχεια καταγράφουν την ανακλώμενη ακτινοβολία που κυμαίνεται από 1cm μέχρι 1m στη φασματική περιοχή.



**Εικόνα 2.3:** Ενεργητικά (αριστερά), Παθητικά (δεξιά) συστήματα καταγραφής (CCRS/CCT)

Αυτή είναι σε θέση να διαπεράσει τα σύννεφα, την έντονη βροχόπτωση και την ομίχλη γι' αυτό τα ενεργητικά συστήματα είναι ανεπηρέαστα από ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Καταγράφουν επίσης και τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους αφού είναι σε θέση να διαπεράσουν το ξηρό έδαφος. Μπορούν να χρησιμοποιούνται συχνά εφόσον ο δορυφόρος διέρχεται τακτικά πάνω από τις ίδιες περιοχές. Τα παθητικά συστήματα (Εικ. 2.3 δεξιά) της τηλεπισκόπησης (παγχρωματικοί, πολυφασματικοί ή θερμικοί απεικονιστές), γνωστά και ως ραδιόμετρα, χρησιμοποιούν ως πηγή το ηλιακό φως για την καταγραφή της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Έχουν τη δυνατότητα καταγραφής από το υπεριώδες έως το μακρινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (Φειδάς 1999). Τα συστήματα αυτά επηρεάζονται από τον ανεπαρκή φωτισμό (σκότος), την παρουσία νεφών, ομίχλης, καπνού (Δαλέζιος 2007).

Ένα χαρακτηριστικό των δορυφόρων που τους καθιστά πολύ χρήσιμους είναι η διακριτική τους ικανότητα, που χωρίζεται στη χωρική, την φασματική, τη χρονική και τη ραδιομετρική διακριτική ικανότητα. Με τη χωρική ικανότητα, είναι δυνατή η ανίχνευση δύο διαφορετικών αντικειμένων, κάτι που πρακτικά ισούται με το μέγεθος

του εικονοστοιχείου (picture element: pixel) της δορυφορικής εικόνας. Η φασματική διακριτική ικανότητα μετρά τον αριθμό των καναλιών (bands), δηλαδή τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τις οποίες καταγράφει δεδομένα ο κάθε αισθητήρας. Η χρονική ικανότητα υπολογίζει τη συχνότητα με την οποία ο δορυφόρος παίρνει δεδομένα και τα παρέχει από ένα συγκεκριμένο σημείο, δηλαδή τη χρονική διάρκεια που χρειάζεται για να σαρώσει την ίδια περιοχή δεύτερη φορά. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα σχετίζεται με την ευαισθησία του δέκτη να ανιχνεύει διαφορές στην ισχύ του σήματος.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες των κυριότερων δορυφόρων που χρησιμοποιούνται σήμερα για τις περιβαλλοντικές εφαρμογές, οι μετεωρολογικοί και οι περιβαλλοντικοί. Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι λαμβάνουν δεδομένα συνεχώς για ολόκληρη την επιφάνεια της γης, της ατμόσφαιρας και των νεφών, τα οποία και αποστέλλουν σε επίγειους σταθμούς λήψης. Σ' αυτή την κατηγορία διακρίνονται οι γεωστάσιμοι δορυφόροι METEOSAT (Γαλάκου 2004) και οι δορυφόροι πολικής τροχιάς NOAA. Στη δεύτερη κατηγορία των περιβαλλοντικών δορυφόρων ανήκουν οι Landsat, SPOT και Ikonos. Οι περιβαλλοντικοί αυτοί δορυφόροι λαμβάνουν πληροφορίες και εικόνες που βρίσκουν εφαρμογή στην αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών και της ρύπανσης του περιβάλλοντος, την πρόληψη και τον εντοπισμό πυρκαγιών, την παρακολούθηση των καλλιεργειών, καθώς επίσης και για ερευνητικούς σκοπούς.

Οι εφαρμογές της τηλεπισκόπησης γίνονται όλο και περισσότερες λόγω της ραγδαίας εξέλιξης τόσο των συστημάτων και μεθόδων τηλεπισκόπησης, όσο και της τεχνολογίας σε επίπεδο ηλεκτρονικών υπολογιστών, αλλά και σε επίπεδο νέων δορυφόρων στο διάστημα οι οποίοι έχουν χωρική ικανότητα που ξεπερνά το 1 m. Συγκεκριμένα, οι τομείς εφαρμογής αφορούν στη μελέτη της ατμόσφαιρας, της λιθόσφαιρας (γεωλογία,

γεωμορφομετρία, υδρολογία, υδρογεωλογία, γεωγραφία), της βιόσφαιρας (βλάστηση, καλλιέργειες, εδάφη) (Κανέλλου 2006), της υδρόσφαιρας καθώς και της χαρτογράφησης των χρήσεων και κάλυψης γης (Δαλέζιος 2007). Επίσης εφαρμόζεται στην εδαφολογία, την πολεοδομία και χωροταξία, το κτηματολόγιο, στις μελέτες περιβάλλοντος και τα τεχνικά έργα.

Κάποιες ενδεικτικές εφαρμογές της τηλεπισκόπησης είναι οι ακόλουθες:

- Παρακολούθηση, εκτίμηση και αντιμετώπιση καταστροφών (φωτιές, πλημμύρες, ξηρασία, κλπ).
- Εντοπισμός αρχαιολογικών χώρων – κτισμάτων
- Παρακολούθηση θαλάσσιας ρύπανσης
- Χαρτογράφηση των χρήσεων γης και της κάλυψής της
- Προσδιορισμός εδαφικής υγρασίας, δεικτών συνθηκών βλάστησης και υδατικού ισοζυγίου
- Ταξινομήσεις καλλιεργειών, εκτίμηση παραγωγής
- Χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών, γεωμορφολογική - μορφομετρική ανάλυση ανάγλυφου

Σε συνδυασμό με τη χρήση των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (Geographical Information Systems: GIS), ενός ιδιαίτερα χρήσιμου εργαλείου σε διάφορους επιστημονικούς χώρους, μπορούν να δημιουργηθούν χάρτες κλίσεων, χάρτες χρήσεων γης και πίνακες. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα, όπως προαναφέρθηκε, επεξεργασίας και ανάλυσης υψομετρικών δεδομένων μιας περιοχής, με απεικόνιση τρισδιάστατων μοντέλων ανάγλυφου έτσι ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μελετών. Τα συστήματα αυτά διαχειρίζονται χωρικά και σημειακά δεδομένα καθώς επίσης και περιγραφικές πληροφορίες μεταβλητών. Συνεργάζονται με

αρκετά επιστημονικά πεδία, όπως τη χαρτογραφία, τη φωτογραμμετρία, τη στατιστική, τη γεωγραφία, αλλά και με την τηλεπισκόπηση συμβάλλοντας σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με βαρύτατη σημασία.

Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από αυτές τις εφαρμογές:

- Περιβαλλοντική διαχείριση φυσικών πόρων
- Πολεοδομικός και χωροταξικός σχεδιασμός
- Υγειονομικές εφαρμογές
- Διαχείριση δημοσίων υπηρεσιών
- Επίγειες και θαλάσσιες μεταφορές

Όσον αφορά το φαινόμενο της ξηρασίας, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, μπορούν να συμβάλουν άμεσα στην ψηφιακή χαρτογράφηση της χωρικής κατανομής της.

### 2.2.1. Εφαρμογές στην ξηρασία

Η έλλειψη νερού από το έδαφος σε συνδυασμό με διάφορους γεωγραφικούς παράγοντες οδηγεί στο φαινόμενο της ξηρασίας. Με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης και της εξέλιξης της τεχνολογίας των αισθητήρων, που παρέχουν πλέον μεγαλύτερη φασματική διακριτική ικανότητα, υπολογίζεται το υδατικό έλλειμμα. Ένας μεγάλος αριθμός δεικτών βλάστησης που χρησιμοποιούν το υπέρυθρο (R) και το κοντινό υπέρυθρο (NIR) έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και έχουν δώσει αρκετά συμπεράσματα που αφορούν στην παραγωγικότητα των φυτών (Thompson & Wehmane 1980, Walsh 1987, Justice & Townshend 2002, Habib *et al.* 2009). Η περιεκτικότητα του νερού στα φύλλα ελαττώνεται καθώς η ανάκλαση αυξάνει (Lillesand & Kiefer 1979, Carlson *et al.* 1971, Ripple 1986).

Ο προσδιορισμός της ξηρασίας στις διάφορες μορφές της μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό ποικίλων δεικτών οι οποίοι χρησιμοποιούν είτε επίγειες μετρήσεις, είτε δορυφορικά δεδομένα. Το μειονέκτημα των συμβατικών δεικτών είναι ότι κανένας δεν παρέχει πληροφορίες για τη χωρική εξάπλωση του φαινομένου. Αυτό παρέχουν τα δορυφορικά δεδομένα και σε συνδυασμό με τις πληροφορίες για την κατάσταση βλάστησης, την υγρασία και τα υδατικά αποθέματα μιας περιοχής, είναι σε θέση να προσδιορίζουν την δριμύτητα, τη διάρκεια και τη χωρική κατανομή της ξηρασίας μιας ευρύτερης περιοχής ολοκληρωμένα και αποτελεσματικά χωρίς περιθώριο σφάλματος.

Με τα δορυφορικά δεδομένα, συνοψίζοντας, μπορεί να γίνει παρακολούθηση των κλιματικών συνθηκών και χωρική κάλυψη μιας περιοχής ή και ολόκληρου του πλανήτη (Yating *et al.* 2010, You *et al.* 2010). Επίσης είναι σε θέση να παρέχουν δεδομένα από περιοχές που είναι απροσπέλαστες για διάφορους λόγους όπως πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ραδιενέργεια κ.α. Έτσι δίνουν αξιόπιστες μετρήσεις και πληροφορίες ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το χρόνο και το κόστος που θα απαιτούνταν για τις ίδιες πληροφορίες από τις συμβατικές μεθόδους (Kanellou *et al.* 2008a). Με τη βοήθεια και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών οδηγούν σε στρατηγικές λήψης αποφάσεων για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής που εμφανίζει το φαινόμενο ξηρασίας κυρίως για μακρές χρονικές περιόδους και στην αποφυγή περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων.

### 2.3. Βάση δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή αυτή για τον υπολογισμό του δείκτη RDI προέρχονται από δορυφορικά δεδομένα που ανακτήθηκαν από δορυφορικές εικόνες της περιοχής. Οι εικόνες αυτές καλύπτουν ολόκληρη τη Θεσσαλία, με χωρική

ανάλυση  $8 \times 8 \text{ km}^2$  και για μια σειρά 20 υδρολογικών ετών (Οκτώβριος 1981 – Σεπτέμβριος 2001).

### 2.3.1. Δορυφορικά δεδομένα

Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εφαρμογή προέρχονται από το δορυφόρο NOAA/ AVHRR με διακριτική χωρική ικανότητα  $8 \times 8 \text{ km}^2$ , που θεωρείται ικανοποιητική για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που ακολουθείται. Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (LST) (Παράρτημα Δ), της εξατμισοδιαπνοής και της κατάστασης της βλάστησης στην περιοχή συγκεντρώθηκαν ο δείκτης βλάστησης NDVI και οι μέσες τιμές δεκαήμερου θερμοκρασίας λαμπρότητας (BT) για μια σειρά ετών από το 1981 έως και το 2001 για όλη την Θεσσαλία. Οι τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI, προέκυψαν από το συνδυασμό των καναλιών 1 και 2 του δορυφόρου, ενώ η δορυφορική θερμοκρασία προήλθε από το συνδυασμό των θερμικών καναλιών 4 και 5 του ίδιου δορυφόρου. Αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν 717 εικόνες δεκαήμερου για κάθε θερμικό κανάλι (4 και 5) και επίσης 717 εικόνες του δείκτη βλάστησης, δηλαδή 2151 εικόνες δεκαήμερου για το σύνολο της χρονοσειράς των 20 ετών. Υπήρξαν ορισμένες ελλείψεις κυρίως για το 1994 οι οποίες παρουσιάστηκαν για το ίδιο χρονικό διάστημα και στα δύο θερμικά κανάλια του δορυφόρου και στα δεδομένα του NDVI.

Η χρονοσειρά αυτών των δορυφορικών δεδομένων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1:** Χρονοσειρά διαθέσιμων δορυφορικών δεδομένων (Κανέλλου 2010)

<b>Έτη</b>	<b>Κανάλι 4 και 5 /NOAA</b>	<b>NDVI</b>
1981	17 δεκαήμερα (2 <sup>ο</sup> Ιουλίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	17 δεκαήμερα (2 <sup>ο</sup> Ιουλίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1982	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1983	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1984	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1985	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1986	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1987	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1988	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1989	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1990	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1991	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1992	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1993	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1994	25 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-1 <sup>ο</sup> Σεπτεμβρίου)	25 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-1 <sup>ο</sup> Σεπτεμβρίου)
1995	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1996	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1997	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1998	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
1999	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
2000	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)	36 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Δεκεμβρίου)
2001	27 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Σεπτεμβρίου)	27 δεκαήμερα (1 <sup>ο</sup> Ιανουαρίου-3 <sup>ο</sup> Σεπτεμβρίου)



Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την εκτίμηση της ξηρασίας με χρήση δορυφορικών δεδομένων είναι τα ακόλουθα πέντε (5).

1<sup>ο</sup> Η προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων

2<sup>ο</sup> Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους

3<sup>ο</sup> Η εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση δορυφορικών δεδομένων

4<sup>ο</sup> Εξαγωγή χαρτών βροχόπτωσης

5<sup>ο</sup> Η χωρική εκτίμηση του δείκτη ξηρασίας RDI

Στη συνέχεια έγινε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω της σύγκρισης με τις τιμές των επίγειων δεδομένων. Συγκρίθηκαν δηλαδή τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας βάσει του δείκτη RDI με δορυφορικά και επίγεια δεδομένα.

#### 2.3.1.1. Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων

Τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της μεθόδου ανακτήθηκαν από το δορυφόρο NOAA/ AVHRR με χωρική διακριτική ικανότητα 8 x 8 km<sup>2</sup>, μια ανάλυση αρκετά ικανοποιητική για την εκτίμηση της χωρικής ξηρασίας, στη Θεσσαλία. Από τις εικόνες αυτές ανακτήθηκαν δύο μεταβλητές, η θερμοκρασία λαμπρότητας (Brightness Temperature - BT), καθώς και ο δείκτης βλάστησης (NDVI) σε μηνιαίες τιμές. Αρχικά μια δορυφορική εικόνα έδωσε τιμές δεκαημέρου για το σύνολο των είκοσι (20) υδρολογικών ετών, οι οποίες μετά από επεξεργασία έγιναν μηνιαίες τιμές και δημιουργήθηκαν δύο χρονοσειρές δεδομένων αντίστοιχα για την κάθε μεταβλητή. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα υπήρχαν κάποιες ελλείψεις δεδομένων, κυρίως για το έτος 1994, στην περίπτωση του οποίου οι τιμές συμπληρώθηκαν με τις κλιματικές τιμές της εκάστοτε περιοχής για τους αντίστοιχους μήνες. Οι δορυφορικές εικόνες των δύο μεταβλητών (BT και NDVI) προσαρμόστηκαν στο ελληνικό

γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων (EGSA'87) με τη βοήθεια του λειτουργικού προγράμματος Erdas Imagine (Erdas Imagine 8.7), αφού πρώτα έγινε γεωμετρική επεξεργασία της κάθε εικόνας. Έτσι πραγματοποιήθηκε η προβολή των δεδομένων σε ένα επίπεδο. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός πολυωνυμικού γεωμετρικού μοντέλου 2<sup>ης</sup> τάξης και με την εισαγωγή 16 σημείων ελέγχου (GCP: Ground Control Points). Τρία από αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία επαλήθευσης για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος.

#### 2.3.1.2. Υπολογισμός θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους

Οι τιμές της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (LST) είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της ξηρασίας. Προκύπτουν έπειτα από επεξεργασία των τιμών της θερμοκρασίας λαμπρότητας (BT), που υπολογίζουν τα θερμικά κανάλια 4 και 5, του δορυφόρου NOAA/AVHRR. Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή της μονάδας αρχικά σε Kelvin (°K) και έπειτα σε τιμές θερμοκρασίας °C. Έπειτα από μια σειρά επεξεργασιών προκύπτουν οι χάρτες μηνιαίας θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (LST) (Παρ. Δ), προσδιορισμένης με δορυφορικές μεθόδους.

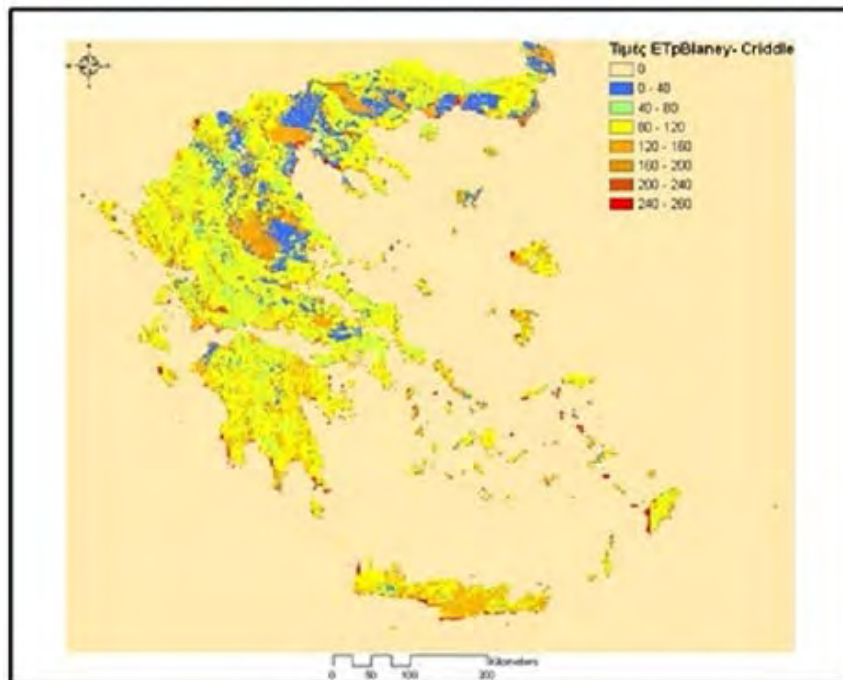
#### 2.3.1.3. Εκτίμηση δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση δορυφορικών δεδομένων

Τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο, ο υπολογισμός της εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση δορυφορικών δεδομένων γίνεται με τη μέθοδο Blaney - Criddle (Blaney & Criddle 1950). Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στις Μεσογειακές περιοχές, όπου τους καλοκαιρινούς μήνες επικρατούν ξηρές συνθήκες. Σύμφωνα με μια εμπειρική σχέση που διατύπωσαν οι Blaney- Criddle, εκτιμάται μια παράμετρος για την εποχική δυνητική εξατμισοδιαπνοή (από το φύτρωμα των

καλλιιεργειών έως τη συγκομιδή τους), χρησιμοποιώντας τις μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, το ποσοστό ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της ημέρας ( $p$ ) και ένα φυτικό συντελεστή, διαφορετικού για κάθε καλλιέργεια (Παπαζαφειρίου 1984). Τα βήματα που ακολουθούνται για τον υπολογισμό της παραμέτρου είναι τα παρακάτω:

1. Εξαγωγή χαρτών των μηνιαίων φυτικών συντελεστών  $k$  για όλη την περιοχή της Θεσσαλίας.
2. Υπολογισμός των ποσοστών ηλιοφάνειας  $p$  όλης της περιοχής για κάθε γεωγραφικό πλάτος.
3. Αναγωγή εικόνων θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους για κάθε μήνα των 20 υδρολογικών ετών.

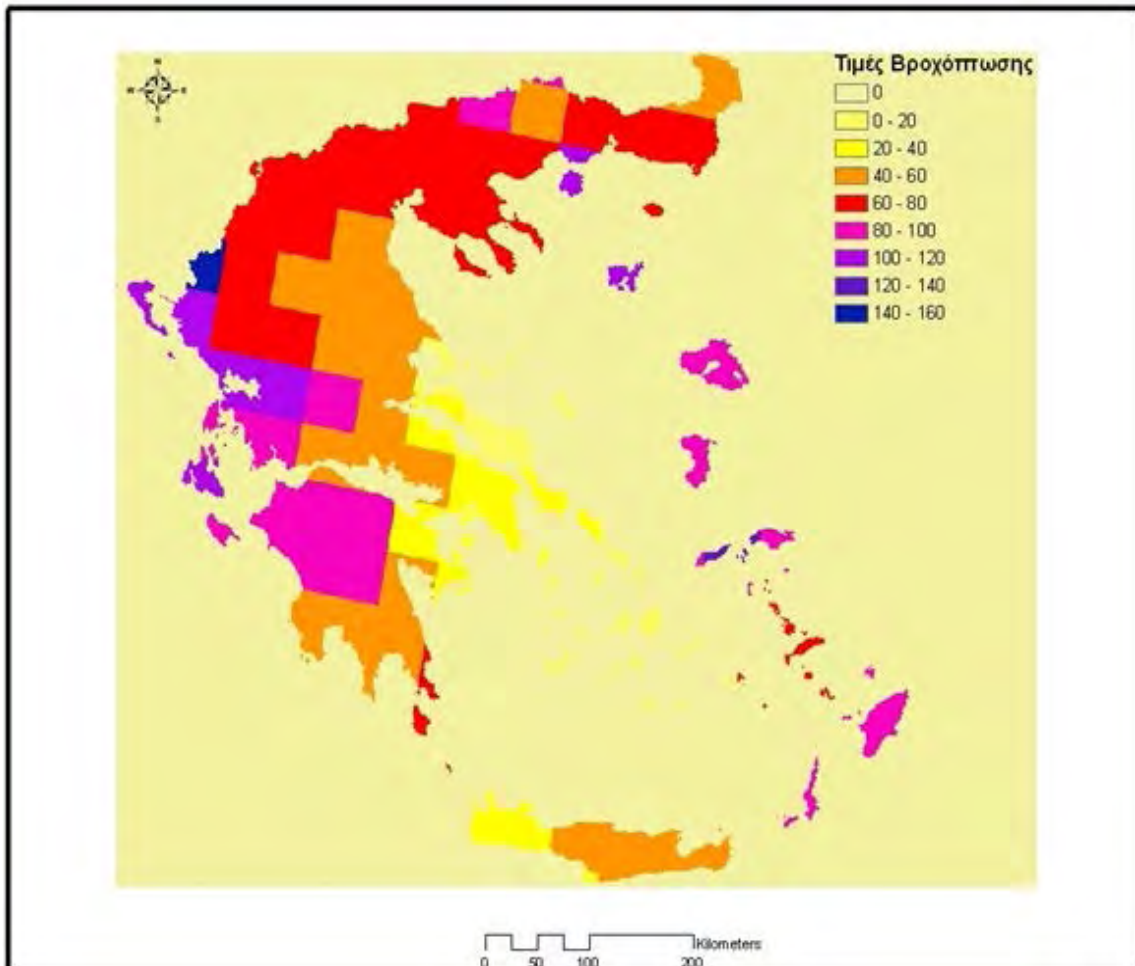
Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ενδεικτικά χάρτης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Blaney - Criddle του Αυγούστου 1981 για ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο.



**Εικόνα 2.3:** Χάρτης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Blaney-Criddle σε mm για τον Αύγουστο του 1981 (Κανέλλου 2010)

#### 2.3.1.4. Εξαγωγή χαρτών βροχόπτωσης

Οι τιμές της μηνιαίας βροχόπτωσης μιας περιοχής (Θεσσαλία) αποτυπώνονται με θερμικό χάρτη σε περιβάλλον GIS, για κάθε μήνα των 20 υδρολογικών ετών (Οκτώβριος 1981 – Σεπτέμβριος 2001). Η βάση δεδομένων εκτίμησης βροχόπτωσης έχει αναπτυχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο και διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός χάρτης μηνιαίας βροχόπτωσης της Ελλάδας για τον Απρίλιο 2001.



**Εικόνα 2.4:** Χάρτης μηνιαίας αθροιστικής βροχόπτωσης σε mm μηνός Απριλίου 2001 (Κανέλλου 2010)

### 2.3.1.5. Χωρική εκτίμηση του δείκτη ξηρασίας RDI

Με το συνδυασμό όλων των μεταβλητών που προέκυψαν στα προηγούμενα στάδια, υπολογίζεται ο δείκτης RDI, οπότε και εκτιμάται χωρικά η ξηρασία σε μια περιοχή. Οι εικόνες για την περιοχή της Θεσσαλίας, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα είναι  $8 \times 8 \text{ km}^2$  για κάθε μήνα ολόκληρης της χρονοσειράς των 20 υδρολογικών ετών. Με τη χρήση του εξειδικευμένου προγράμματος επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων Erdas Imagine 8.7 και τα διάφορα μοντέλα που διαθέτει δημιουργείται ο τελικός χάρτης του δείκτη RDI. Ο χάρτης είναι συνδυασμός από μηνιαίους χάρτες θερμοκρασίας, φυτικών συντελεστών ( $K_c$ ), ηλιοφάνειας ( $p$ ), δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Blaney - Criddle (Kanellou *et al.* 2008c, Jamshidi *et al.* 2011, Dalezios *et al.* 2011) και βροχόπτωσης.

Στην Εικόνα 2.5 εμφανίζεται ένας ενδεικτικός χάρτης της Θεσσαλίας σε περίοδο ακραίας ξηρασίας (κόκκινο χρώμα), συγκεκριμένα για τον Ιούνιο του 1985.



**Εικόνα 2.5:** Ενδεικτικός χάρτης του δείκτη RDI για τον Ιούνιο του 1985

## 2.4. Μεθοδολογία

### 2.4.1. Εκτίμηση ξηρασίας με ΓΣΠ και Τηλεπισκόπηση

Για την παρακολούθηση της ξηρασίας, με χρήση τηλεπισκόπησης, έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός δεικτών, κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες. Η υπεροχή των δεικτών αυτών έναντι των συμβατικών είναι πολύ μεγάλη, καθώς έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν μεγάλες περιοχές και να εκτιμήσουν ένα φαινόμενο ξηρασίας, που βρίσκεται σε εξέλιξη, χωρικά και χρονικά (Feng *et al.* 2011).

Ο υπολογισμός τους γίνεται με την ανάκλαση της ακτινοβολίας σε διάφορα δορυφορικά κανάλια μέσω των οποίων παρέχονται πληροφορίες για τις τιμές των μεταβλητών που μετρούν σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της δορυφορικής εικόνας. Όλα αυτά τα δεδομένα που παρέχονται από τους δορυφόρους βασίζονται σε ραδιομετρικές μετρήσεις τόσο της κατάστασης βλάστησης όσο και της ποιότητάς της σύμφωνα με τον τύπο βλάστησης και το στάδιο ανάπτυξης, χρησιμοποιώντας τις φασματικές υπογραφές των φυτών, κυρίως στο υπέρυθρο (R) και στο κοντινό υπέρυθρο (NIR), (Huete *et al.* 1997, Huete *et al.* 2002, Clevers & Verhoef 1993, Thenkabail 2003, Thenkabail *et al.* 2004). Ορισμένοι χαρακτηριστικοί δείκτες της ξηρασίας παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2:** Δείκτες ξηρασίας δορυφορικών δεδομένων

1. Αναγνωριστικής δείκτης ξηρασίας (Reconnaissance Drought Index - RDI)	8. Δείκτης θερμοκρασίας κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Temperature Index- NDTI)
2. Δείκτης απόκλισης του NDVI (Deviation NDVI index- DEV <sub>NDVI</sub> )	9. Δείκτης υδατικού στρες καλλιέργειας (Crop Water Stress Index- CWSI)
3. Δείκτης ενισχυμένης βλάστησης (Enhanced Vegetation Index- EVI)	10. Δείκτης δριμύτητας ξηρασίας (Drought Severity Index- DSI)
4. Δείκτης κατάστασης βλάστησης (Vegetation Condition Index- VCI)	11. Δείκτης ξήρανσης θερμοκρασίας-βλάστησης (Temperature- Vegetation Dryness Index TVDI)
5. Μηνιαίος δείκτης κατάστασης βλάστησης (Monthly Vegetation Condition Index- MVCI)	12. Δείκτης νερού κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Water Index- NDWI)
6. Δείκτης κατάστασης θερμοκρασίας (Temperature Condition Index- TCI)	13. Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index- NDVI)
7. Δείκτης υγιούς βλάστησης (Vegetation Health Index)	

#### 2.4.1.1. Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI)

Ο δείκτης που χρησιμοποιείται για τη χωρική εκτίμηση του φαινομένου της ξηρασίας στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, για την εργασία αυτή, είναι ο Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI - Reconnaissance Drought Index). Ο δείκτης αυτός βασίζεται σε επίγεια και δορυφορικά στοιχεία και παρέχει πληροφορίες για

αρκετά χαρακτηριστικά της ξηρασίας όπως είναι η έναρξη, η λήξη, η διάρκεια, η δριμύτητα και η συχνότητα. Στην παρούσα έρευνα τα χαρακτηριστικά αυτά υπολογίστηκαν Τηλεπισκοπικά με χρήση δορυφορικών στοιχείων για μια χρονοσειρά 20 υδρολογικών ετών (1981 έως 2001) (Kanellou *et al.* 2008b). Είναι αρκετά εύχρηστος και ευέλικτος δείκτης με αποτέλεσμα να προσδιορίζει την χωρική εξάπλωση και εξέλιξη του φαινομένου σε οποιαδήποτε περιοχή εφαρμογής. Στη συγκεκριμένη έρευνα η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού στο Θεσσαλικό κάμπο.

Ο αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (Reconnaissance Drought Index - RDI) είναι ένας αρκετά νέος δείκτης ξηρασίας που εφαρμόζεται σε αρκετές περιοχές και δίνει πληροφορίες τόσο για τη μετεωρολογική ξηρασία, στην οποία αναφέρεται, όσο και για την υδρολογική (Kanellou *et al.* 2009, Δαλέζιος και συν. 2011). Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ανάπτυξη του χρησιμοποιεί συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Για τον υπολογισμό του απαιτούνται η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα και η μηνιαία αθροιστική βροχόπτωση. Η αρχική τιμή  $a_k$ , που παίρνει ο δείκτης RDI υπολογίζεται από το λόγο της συνολικής βροχόπτωσης σε μια περιοχή προς τη συνολική δυνητική εξατμισοδιαπνοή με το  $k$  να υποδηλώνει τη συνεχόμενη περίοδο μηνών του έτους (π.χ.  $a_{12}$ ) (εξ. 2.1).

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (2.1)$$

όπου  $P_j$  και  $PET_j$  είναι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, αντίστοιχα, για κάθε μήνα  $j$ . Στην περίπτωση που υπολογίζεται το  $a$  ενός και μόνο μηνός το  $k=1$ , για δύο συνεχείς μήνες  $k=2$  κ.ο.κ. Αν ο  $a_{12}$  εμφανίζει μικρότερες τιμές του δείκτη



ξηρασίας AI (Aridity index) για ένα συγκεκριμένο έτος, τότε θεωρείται πως η περιοχή υποφέρει από ξηρασία (UNEP 1992).

Ο δείκτης RDI εμφανίζεται με δύο μορφές, ως κανονικοποιημένος (Normalised) RDI ( $RDI_n$ ), και ως τυποποιημένος (Standardised) RDI ( $RDI_{st}$ ) και υπολογίζεται ως εξής:

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (2.2)$$

και

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (2.3)$$

αντίστοιχα, όπου,  $a_k$  είναι η αρχική τιμή του δείκτη για κάθε διάρκεια,  $\bar{a}_k$  είναι ο μέσος όρος των  $a_k$ ,  $y_k$  είναι ο νεπέριος λογάριθμος (ln) του  $a_k$ ,  $\bar{y}_k$  και  $\hat{\sigma}_k$  είναι ο αριθμητικός μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, των  $y_k$ . Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε ο τυποποιημένος RDI. Οι τιμές που παίρνει ο RDI είναι από -2 έως 2 όπως φαίνονται στον Πίνακα 2.3.

**Πίνακας 2.3:** Κατηγορίες ξηρασίας σύμφωνα με το δείκτη ξηρασίας RDI (Tsakiris & Vangelis 2005)

Κατηγορίες ξηρασίας	Τιμές δείκτη RDI
Εξαιρετικά υγρές	>2.00
Πολύ υγρές	1.50 έως 1.99
Μέτρια υγρές	1.00 έως 1.49
Κανονικές συνθήκες	-0.99 έως 0.99
Μέτρια ξηρές	-1.00 έως -1.49
Έντονα ξηρές	-1.50 έως -1.99
Ακραία ξηρές	<-2.00

Ο δείκτης αυτός είναι από τους πλέον διαδεδομένους τόσο στον Ελλαδικό χώρο, όσο και σε άλλες περιοχές της Μεσογείου και συγκρίνεται με άλλους δείκτες όπως ο SPI και ο PDSI του Palmer ( Guttman *et al.* 1992, Mavromatis 2010).

#### 2.4.1.2. Στατιστικοί δείκτες

Μετά την ανάπτυξη του δείκτη RDI χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους των δορυφορικών δεδομένων και τον υπολογισμό των διαφόρων χαρακτηριστικών της ξηρασίας, αλλά και τη σύγκρισή των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του RDI που χρησιμοποιεί επίγεια δεδομένα, πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλύσεων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση των τιμών του δείκτη RDI που προσδιορίστηκαν. Οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι:

1. Ο δείκτης αποτελεσματικότητας (Efficiency Coefficient –  $E_{ff}$ ) (Nash & Sutcliffe 1970, Krause *et al.* 2005):

$$E_{ff} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RDI_{con} - RDI_{sat})^2}{\sum_{i=1}^n (RDI_{con} - \overline{RDI_{con}})^2} \quad (2.4)$$

όπου,  $RDI_{con}$ : επίγειος δείκτης RDI του μήνα  $i$ ,  $RDI_{sat}$ : δορυφορικός δείκτης RDI του μήνα  $i$ ,  $\overline{RDI_{con}}$ : μέσες μηνιαίες τιμές επίγειου δείκτη RDI. Βέλτιστη τιμή του  $E_{ff} = 1$ .

2. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error – RMSE) (Dalezios 1988, Hondronikou *et al.* 2005):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RDI_{con} - \overline{RDI_{con}})^2}{N}} \quad (2.5)$$

όπου,  $RDI_{con}$ : επίγειος δείκτης RDI του μήνα  $i$ ,  $\overline{RDI_{con}}$ : μέσες μηνιαίες τιμές επίγειου δείκτη RDI,  $N$ : συνολικός αριθμός ετών. Βέλτιστη τιμή του  $RMSE = 0$ .

3. Το μεροληπτικό σφάλμα (BIAS) (Dalezios 1988):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (RDI_{con} - RDI_{sat}) \quad (2.6)$$

όπου,  $RDI_{con}$ : επίγειος δείκτης RDI του μήνα  $i$ ,  $RDI_{sat}$ : δορυφορικός δείκτης RDI του μήνα  $i$  και  $N$ : συνολικός αριθμός ετών. Βέλτιστη τιμή του  $BIAS = 0$ .

4. Ο συντελεστής προσδιορισμού (Coefficient of Determination –  $r^2$ ) (Dalezios 1988, Vasiliades & Loukas 2009):

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (RDI_{con} - \overline{RDI_{con}})(RDI_{sat} - \overline{RDI_{sat}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (RDI_{con} - \overline{RDI_{con}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (RDI_{sat} - \overline{RDI_{sat}})^2}} \right)^2 \quad (2.7)$$

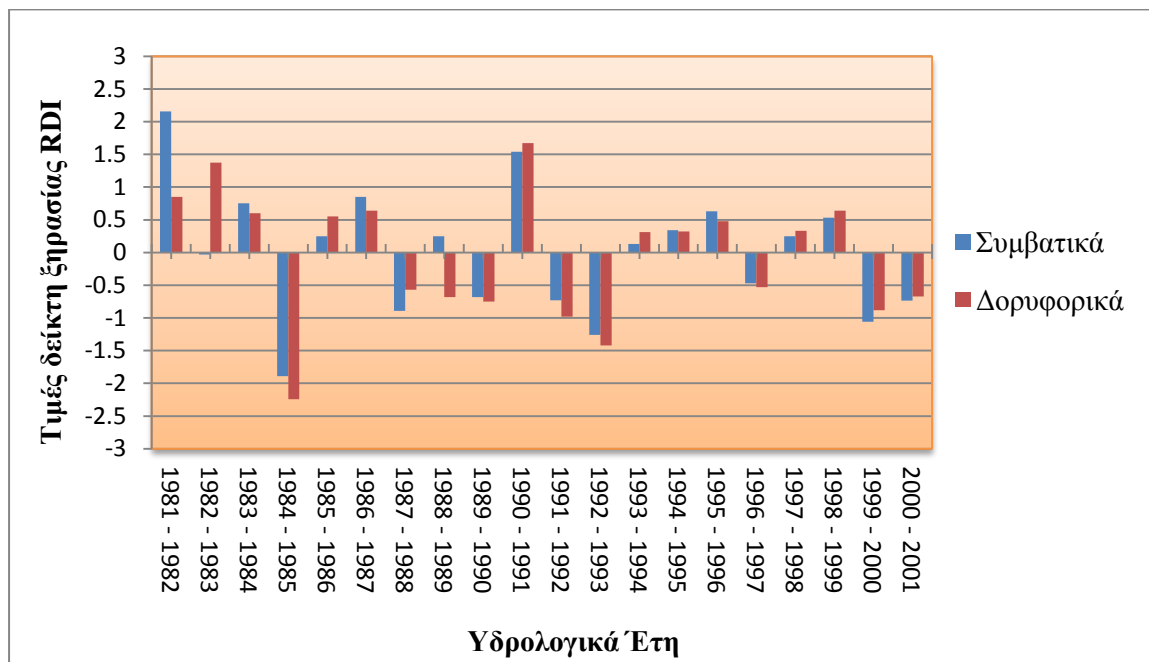
όπου,  $RDI_{con}$  επίγειες τιμές και  $RDI_{sat}$  δορυφορικές τιμές RDI. Βέλτιστη τιμή του  $R^2 = 1$ .

Οι τιμές υπολογίστηκαν για τρεις, έξι, εννέα και δώδεκα μήνες.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας που προέκυψαν από τη μελέτη του φαινομένου της ξηρασίας στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, παρουσιάζονται και αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό. Χρησιμοποιήθηκε η εκτίμηση του φαινομένου της ξηρασίας από απόσταση (Τηλεπισκοπικά) εφαρμόζοντας τον αναγνωριστικό δείκτη ξηρασίας RDI με τον οποίο υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά του κάθε επεισοδίου ξηρασίας.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση των τιμών του δείκτη RDI σύμφωνα με τα δεδομένα των επίγειων μετρήσεων από τους μετεωρολογικούς σταθμούς και των δορυφορικών δεδομένων για τη χρονοσειρά των 20 υδρολογικών ετών που μελετήθηκαν (1981-2001). Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγράμματος (Σχ. 3.1).



**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα σύγκρισης δείκτη RDI με επίγεια και δορυφορικά δεδομένα υπολογισμένου σε ετήσια βάση (ένα υδρολογικό έτος) για το σταθμό της Λάρισας.

Από το διάγραμμα φάνηκε η πολύ καλή προσαρμογή μεταξύ των δύο δεικτών RDI (δορυφορικού και επίγειου) στο σύνολο των αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την επιτυχή χωρική εκτίμηση της ξηρασίας με τη χρήση των δορυφορικών δεδομένων και τονίζει την αξιοπιστία του συγκεκριμένου δείκτη, καθώς και τη δυνατή ανάπτυξη του σε εφαρμογές ευρύτερης κλίμακας (Κανέλλου 2010).

Αυτό φάνηκε και από το ότι ο δείκτης RDI με δορυφορικά δεδομένα λαμβάνει υπόψη ένα πολύ μεγαλύτερο πλήθος τιμών και υπολογίζεται χωρικά για μια περιοχή σε σχέση με τον δείκτη RDI με επίγεια δεδομένα που υπολογίζεται σημειακά και έχει αρκετές ελλείψεις δεδομένων. Επίσης ο τελευταίος παρουσίασε ορισμένες διαφοροποιήσεις στις υπολογιζόμενες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν από δορυφορικά δεδομένα και αυτό οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό επίγειων σταθμών λήψης δεδομένων.

### 3.1. Υπολογισμός χαρτών RDI

Ο υπολογισμός του RDI πραγματοποιήθηκε ανά μήνα για τα 20 υδρολογικά έτη (1981 – 2001), οπότε δημιουργήθηκαν 240 συνολικά χάρτες του δείκτη αυτού που αποτυπώνουν με ακρίβια τις περιοχές που εμφανίζουν ξηρασίας.

### 3.2. Υπολογισμός επεισοδίων ξηρασίας

Συνολικά υπολογίστηκαν οκτώ (8) επεισόδια ξηρασίας τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 μαζί με τη διάρκεια του κάθε επεισοδίου. Παρατηρήθηκε πως σχεδόν σε όλα τα υπολογισμένα επεισόδια ξηρασίας οι δύο δείκτες συμπίπτουν έχοντας μικρές αποκλίσεις στις τιμές τους, εκτός από μια χρονιά, το 1989, όπου οι τιμές δεν εμφανίζουν αντιστοιχία.

**Πίνακας 3.1:** Επεισόδια ξηρασίας και χρονική διάρκεια του κάθε επεισοδίου

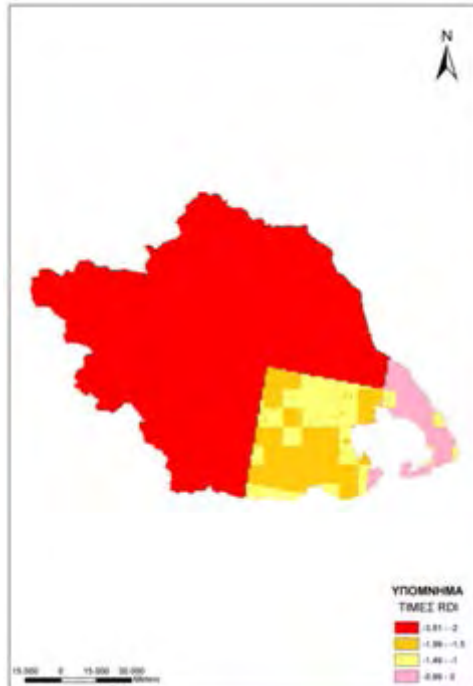
Διάρκεια ξηρασίας για τη Θεσσαλία			
Χρόνια ξηρασίας	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
Οκτ 1984 - Οκτ 1985	Οκτ 1984	Οκτ 1985	13
Οκτ 1987 - Οκτ 1988	Οκτ 1987	Οκτ 1988	13
Σεπ 1989 - Οκτ 1990	Σεπ 1989	Οκτ 1990	13
Οκτ 1991 - Σεπ 1992	Οκτ 1991	Σεπ 1992	12
Οκτ 1992 - Οκτ 1993	Οκτ 1992	Οκτ 1993	13
Οκτ 1996 - Σεπ 1997	Οκτ 1996	Σεπ 1997	12
Οκτ 1999 - Σεπ 2000	Οκτ 1999	Σεπ 2000	12
Οκτ 2000 - Σεπ 2001	Οκτ 2000	Σεπ 2001	12

Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίσθηκαν διαδοχικά υδρολογικά έτη ξηρασίας. Οι μήνες που συνήθως εμφανίστηκε η έναρξη ενός επεισοδίου ξηρασίας ήταν οι πρώτοι φθινοπωρινοί και συνέπιπταν με τους μήνες της λήξης, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στον Πίνακα 3.1. Τα οκτώ (8) επεισόδια ξηρασίας απομονώθηκαν σε ετήσιους χάρτες ξηρασίας RDI οι οποίοι εμφανίζονται παρακάτω στις Εικόνες 3.1 έως Εικόνα 3.8. Στους χάρτες αυτούς εμφανίζονται οι περιοχές που παρουσιάζουν επεισόδιο ξηρασίας και επίσης η τιμή της ξηρασίας αυτής για το κάθε σημείο ξεχωριστά. Έτσι αποτυπώνεται η ένταση του κάθε επεισοδίου ξηρασίας και διακρίνονται οι περιοχές που πλήττονται συχνότερα από ξηρασία.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται όλες οι τιμές που υπολογίστηκαν από τους μηνιαίους χάρτες RDI για τα 20 υδρολογικά έτη (1981-2001). Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν την ύπαρξη ξηρασίας για τον αντίστοιχο μήνα.

**Πίνακας 3.2:** Συνολικές τιμές δείκτη RDI για την περιοχή της Λάρισας ανά μήνα για τη χρονοσειρά των 20 υδρολογικών ετών (1981-2001)

	<b>Οκτ</b>	<b>Νοε</b>	<b>Δεκ</b>	<b>Ιαν</b>	<b>Φεβ</b>	<b>Μαρ</b>	<b>Απρ</b>	<b>Μαϊ</b>	<b>Ιουν</b>	<b>Ιουλ</b>	<b>Αυγ</b>	<b>Σεπ</b>	<b>Σύνολο</b>
1981-1982	0.22	0.14	0.44	0.12	0.64	0.86	0.75	-0.74	-0.17	0.81	0.92	-0.93	<b>3.06</b>
1982-1983	0.01	0.31	0.53	-0.23	-0.45	-1.34	-0.79	0.05	1.35	0.59	0.82	0.53	<b>1.38</b>
1983-1984	-0.42	0.43	0.71	0.95	0.99	1.33	0.13	-1.43	0.17	0.11	0.27	0.85	<b>4.09</b>
1984-1985	-3.56	-0.61	-0.66	-0.28	0.17	0.67	-0.54	-0.16	-0.65	-0.35	0.21	0.38	<b>-5.38</b>
1985-1986	-0.89	0.91	-1.57	0.22	1.48	-0.65	-1.11	0.47	1.04	0.69	0.43	-0.08	<b>0.94</b>
1986-1987	0.01	-1.49	-0.84	1.21	0.69	0.46	1.22	0.26	0.81	0.48	0.84	0.53	<b>4.18</b>
1987-1988	0.95	0.76	0.25	-0.94	-0.11	-0.09	-0.16	-0.21	-0.89	-0.03	-0.62	-0.08	<b>-1.17</b>
1988-1989	-0.31	1.14	0.62	1.19	-1.73	0.26	-0.99	-0.03	0.63	0.61	0.56	-0.57	<b>1.38</b>
1989-1990	0.11	-0.31	0.81	-2.61	-1.38	-1.62	-0.61	0.71	-0.41	0.83	0.95	0.09	<b>-3.44</b>
1990-1991	0.35	0.41	0.77	0.34	-0.45	0.83	1.54	0.84	0.43	0.76	0.89	1.03	<b>7.74</b>
1991-1992	0.21	-0.16	-2.61	0.55	-1.37	-1.47	1.56	0.88	0.93	0.31	-2.37	-2.16	<b>-5.7</b>
1992-1993	0.37	0.14	-0.25	-0.63	0.35	-0.18	-0.78	1.15	-0.32	-0.82	-0.62	0.09	<b>-1.5</b>
1993-1994	-0.49	1.66	-0.71	1.05	0.43	-0.31	0.96	-0.16	-1.47	0.46	-0.18	-0.64	<b>0.6</b>
1994-1995	1.07	-0.16	0.49	1.01	-1.73	0.08	-0.47	0.05	0.62	0.62	0.13	0.87	<b>2.58</b>
1995-1996	-0.58	-1.28	1.01	0.92	0.78	1.12	0.21	-1.31	-2.83	0.14	0.59	1.27	<b>0.04</b>
1996-1997	0.91	-0.99	0.81	0.31	-0.45	-0.51	1.02	-1.19	0.54	-1.18	0.74	-0.93	<b>-0.92</b>
1997-1998	0.66	-1.57	0.58	0.39	0.91	-0.82	-0.19	2.06	-1.06	-0.37	-0.37	0.77	<b>0.99</b>
1998-1999	0.01	1.43	0.49	0.61	0.58	1.71	0.13	-1.91	-0.65	-2.37	-0.18	1.03	<b>0.88</b>
1999-2000	0.83	0.83	0.53	-0.28	0.43	-0.31	-0.61	-0.53	0.17	-0.61	-1.19	0.38	<b>-0.36</b>
2000-2001	0.54	-1.57	-0.41	0.42	-1.01	-1.22	0.72	1.18	-0.05	1.02	0.17	-0.93	<b>-1.14</b>



**Εικόνα 3.1:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1984-1985



**Εικόνα 3.2:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1987-1988





**Εικόνα 3.3:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1989-1990



**Εικόνα 3.4:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1991-1992



**Εικόνα 3.5:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1992-1993



**Εικόνα 3.6:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1996-1997



**Εικόνα 3.7:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 1999-2000

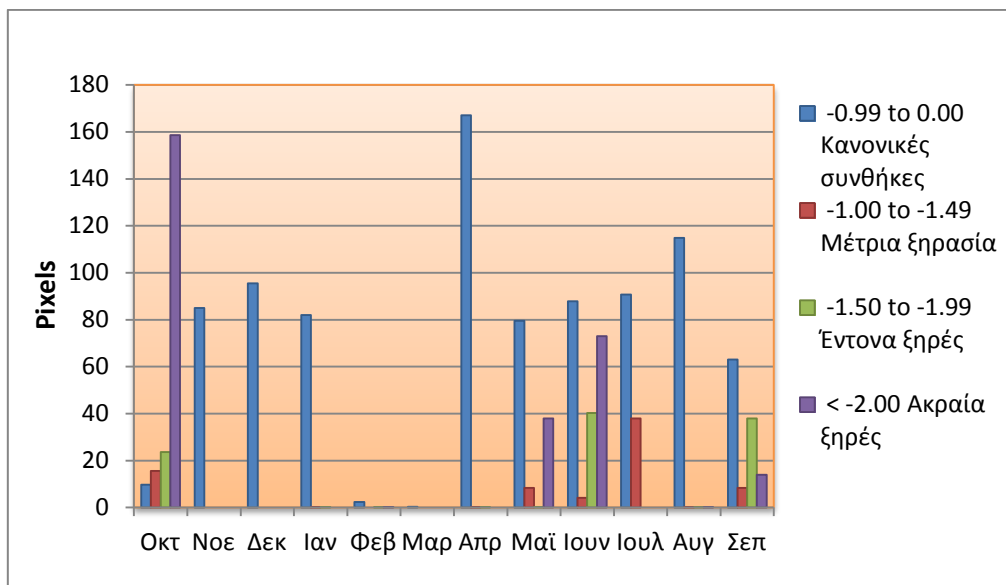


**Εικόνα 3.8:** Ετήσιος χάρτης ξηρασίας RDI για το υδρολογικό έτος 2000-2001

Δημιουργήθηκαν πίνακες τιμών του δείκτη RDI για κάθε μήνα και για κάθε κλίμακα του δείκτη, από κανονικές συνθήκες έως ακραία ξηρές. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι κατηγορίες ξηρασίας σύμφωνα με τον δείκτη RDI. Στους Πίνακες 3.4 έως 3.11 παρουσιάζονται οι Πίνακες τιμών του δείκτη RDI όπως υπολογίστηκαν από τις μηνιαίες εικόνες της χρονοσειράς των 20 υδρολογικών ετών (1981-2001). Από τις τιμές του κάθε επεισοδίου ξηρασίας δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα (Σχ. 3.2 έως Σχ. 3.9).

**Πίνακας 3.3:** Κατηγορίες ξηρασίας σύμφωνα με το δείκτη ξηρασίας RDI (Tsakiris & Vangelis 2005)

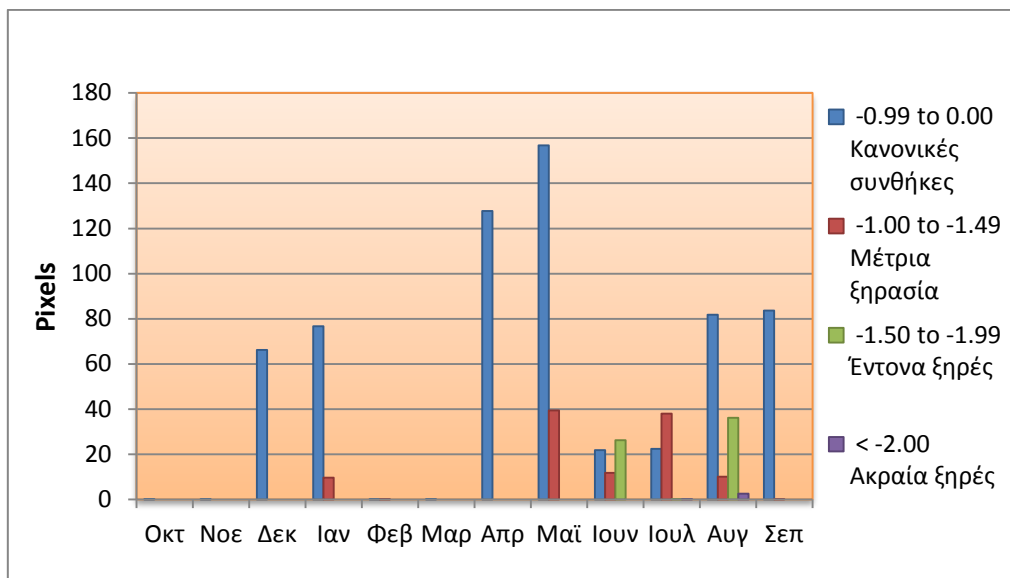
<b>Κατηγορίες ξηρασίας</b>	<b>Τιμές δείκτη RDI</b>
Εξαιρετικά υγρές	>2.00
Πολύ υγρές	1.50 έως 1.99
Μέτρια υγρές	1.00 έως 1.49
Κανονικές συνθήκες Ασθενής ξηρές	-0.99 έως 0.99
Μέτρια ξηρές	-1.00 έως -1.49
Έντονα ξηρές	-1.50 έως -1.99
Ακραία ξηρές	<-2.00



**Σχήμα 3.2:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1984-1985

**Πίνακας 3.4:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1984-1985

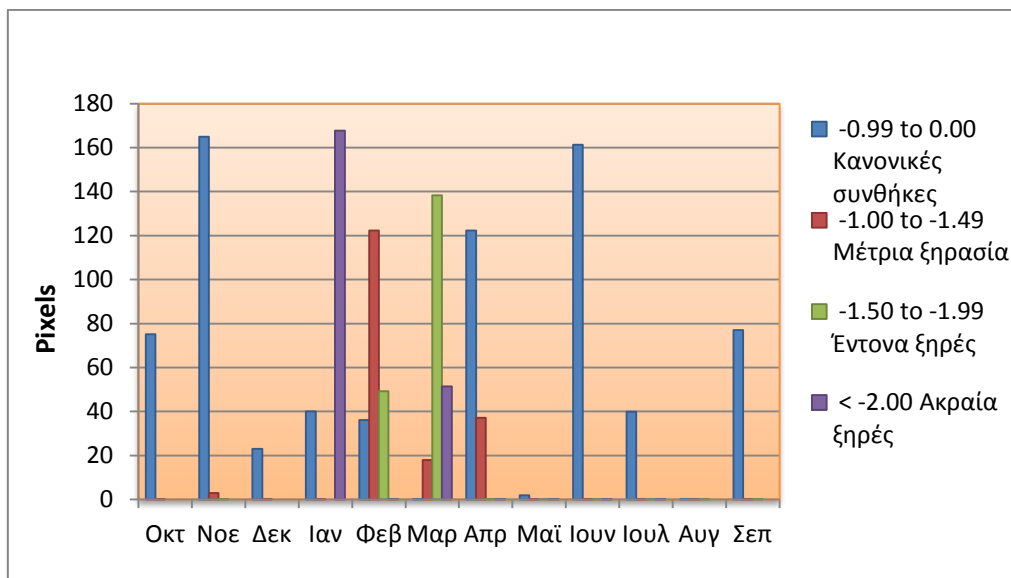
Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1984	Οκτ	9.765625	15.6188	23.67578	158.6445	<b>207.704705</b>
1984	Νοε	84.98438	0	0	0	<b>84.98438</b>
1984	Δεκ	95.52734	0	0	0	<b>95.52734</b>
1985	Ιαν	82.01172	0.074219	0.007813	0	<b>82.093752</b>
1985	Φεβ	2.410156	0	0.015625	0.015625	<b>2.441406</b>
1985	Μαρ	0.265625	0	0	0	<b>0.265625</b>
1985	Απρ	167.0703	0.070313	0.007813	0	<b>167.148426</b>
1985	Μαϊ	79.550078	8.382813	0.003906	37.98438	<b>125.921177</b>
1985	Ιουν	87.82031	4.125	40.25781	72.94141	<b>205.14453</b>
1985	Ιουλ	90.73828	37.97656	0	0	<b>128.71484</b>
1985	Αυγ	114.9023	0.015625	0.027344	0.046875	<b>114.992144</b>
1985	Σεπ	62.99609	8.382813	37.96094	13.99219	<b>123.332033</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>878.042204</b>	<b>74.646143</b>	<b>101.957031</b>	<b>283.62498</b>	<b>1338.270358</b>



**Σχήμα 3.3:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1987-1988

**Πίνακας 3.5:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1987-1988

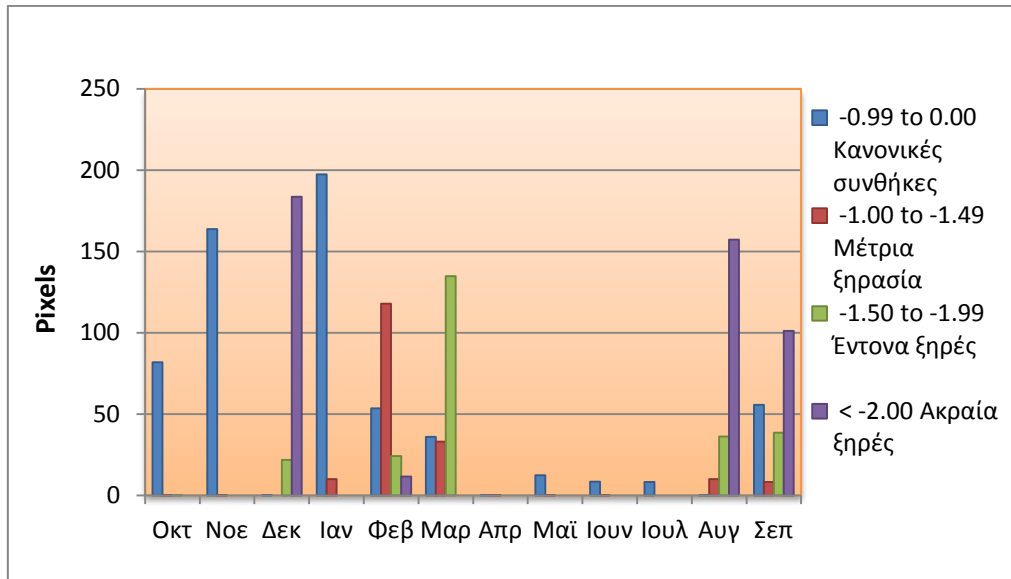
Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1987	Οκτ	0.039063	0	0	0	<b>0.039063</b>
1987	Νοε	0.234375	0	0	0	<b>0.234375</b>
1987	Δεκ	66.21094	0	0	0	<b>66.21094</b>
1988	Ιαν	76.69922	9.613281	0	0	<b>86.312501</b>
1988	Φεβ	0.214844	0.023438	0	0	<b>0.238282</b>
1988	Μαρ	0.21875	0	0	0	<b>0.21875</b>
1988	Απρ	127.707	0	0	0	<b>127.707</b>
1988	Μαϊ	156.75	39.40234	0	0	<b>196.15234</b>
1988	Ιουν	21.82813	11.74609	26.21875	0	<b>59.79297</b>
1988	Ιουλ	22.45703	37.97656	0.007813	0.027344	<b>60.468747</b>
1988	Αυγ	81.88672	10.17578	36.14063	2.542969	<b>130.746099</b>
1988	Σεπ	83.66016	0.019531	0	0	<b>83.679691</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>637.906232</b>	<b>108.95702</b>	<b>62.367193</b>	<b>2.570313</b>	<b>811.800758</b>



**Σχήμα 3.4:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1989-1990

**Πίνακας 3.6:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1989-1990

Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1989	Οκτ	75.19922	0.015625	0	0	<b>75.214845</b>
1989	Νοε	164.9375	2.96875	0.003906	0	<b>167.910156</b>
1989	Δεκ	23.01172	0.007813	0	0	<b>23.019533</b>
1990	Ιαν	40.07813	0.003906	0	167.6328	<b>207.714836</b>
1990	Φεβ	36.13281	122.3516	49.28906	0.015625	<b>207.789095</b>
1990	Μαρ	0.023438	17.96875	138.3203	51.47656	<b>207.789048</b>
1990	Απρ	122.3047	37.1875	0.046875	0.050781	<b>159.589856</b>
1990	Μαϊ	1.902344	0.074219	0.085938	0.027344	<b>2.089845</b>
1990	Ιουν	161.2539	0.089844	0.054688	0.085938	<b>161.48437</b>
1990	Ιουλ	39.93359	0.058594	0.078125	0.0625	<b>40.132809</b>
1990	Αυγ	0.125	0.09375	0.03125	0	<b>0.25</b>
1990	Σεπ	77.00781	0.007813	0.007813	0	<b>77.023436</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>741.910162</b>	<b>180.828164</b>	<b>187.917955</b>	<b>219.351548</b>	<b>1330.007829</b>

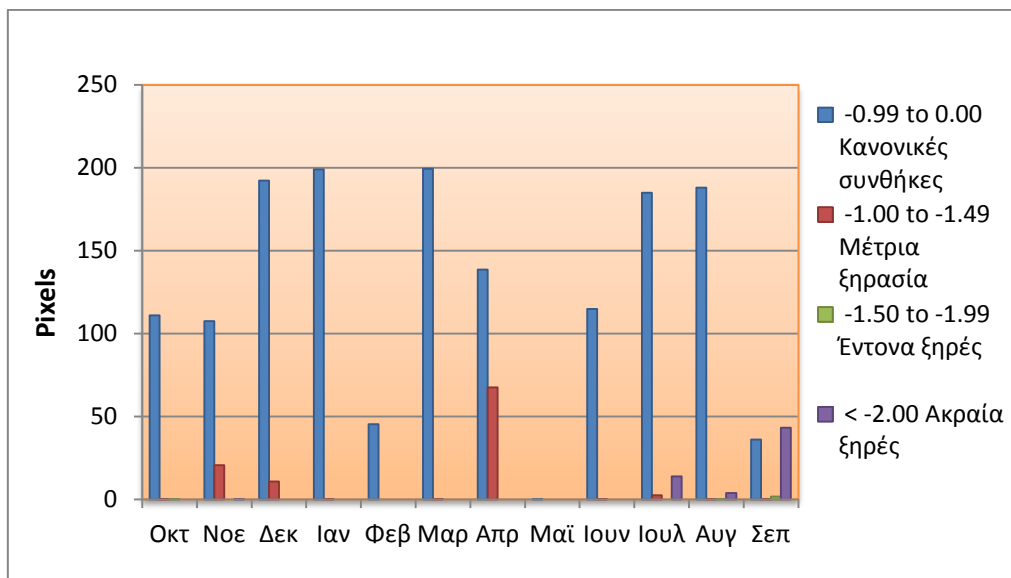


**Σχήμα 3.5:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1991-1992

**Πίνακας 3.7:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1991-1992

Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1991	Οκτ	81.84766	0.050781	0.007813	0	<b>81.906254</b>
1991	Νοε	163.8047	0.007813	0	0	<b>163.812513</b>
1991	Δεκ	0.121094	0	21.98047	183.6641	<b>205.765664</b>
1992	Ιαν	197.4688	10.17969	0	0	<b>207.64849</b>
1992	Φεβ	53.53125	117.9922	24.30859	11.66406	<b>207.4961</b>
1992	Μαρ	36.08984	33.03516	134.8008	0	<b>203.9258</b>
1992	Απρ	0.21875	0.003906	0	0	<b>0.222656</b>
1992	Μαϊ	12.46484	0.007813	0	0	<b>12.472653</b>
1992	Ιουν	8.46875	0.011719	0	0	<b>8.480469</b>
1992	Ιουλ	8.386719	0	0	0	<b>8.386719</b>
1992	Αυγ	0.222656	10.17578	36.19922	157.2422	<b>203.839856</b>
1992	Σεπ	55.75781	8.34375	38.68359	101.2813	<b>204.06645</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>618.382869</b>	<b>179.808612</b>	<b>255.980483</b>	<b>453.85166</b>	<b>1508.023624</b>

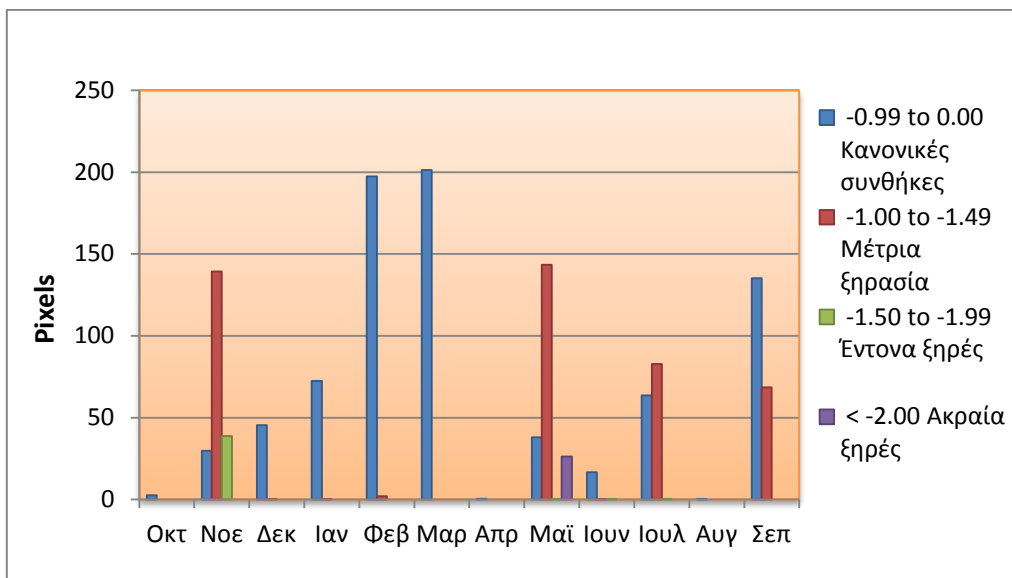




**Σχήμα 3.6:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1992-1993

**Πίνακας 3.8:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1992-1993

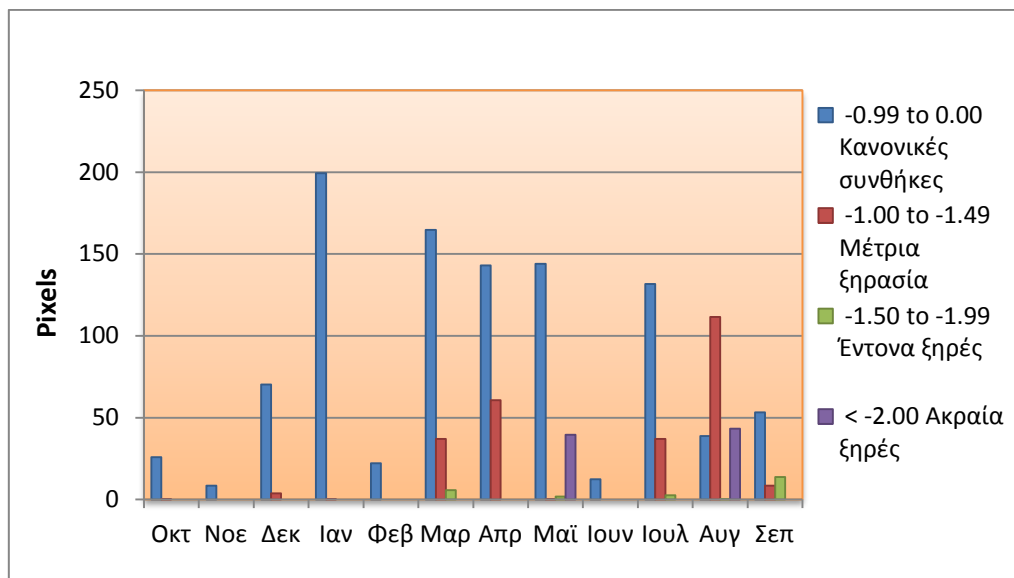
Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1992	Οκτ	111.1367	0.03125	0.007813	0	<b>111.175763</b>
1992	Νοε	107.6406	20.69922	0	0.003906	<b>128.343726</b>
1992	Δεκ	192.3281	10.85547	0	0	<b>203.18357</b>
1993	Ιαν	199.0234	0.015625	0	0	<b>199.039025</b>
1993	Φεβ	45.34766	0	0	0	<b>45.34766</b>
1993	Μαρ	199.4453	0.27344	0	0	<b>199.71874</b>
1993	Απρ	138.7305	67.70703	0	0	<b>206.43753</b>
1993	Μαϊ	0.105469	0	0	0	<b>0.105469</b>
1993	Ιουν	114.8633	0.011719	0	0	<b>114.875019</b>
1993	Ιουλ	185.0234	2.519531	0	13.99219	<b>201.535121</b>
1993	Αυγ	188.0859	0.003906	0.011719	3.859375	<b>191.9609</b>
1993	Σεπ	36.12109	0.023438	1.796875	43.34375	<b>81.285153</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>1517.851419</b>	<b>102.140629</b>	<b>1.816407</b>	<b>61.199221</b>	<b>1683.007676</b>



**Σχήμα 3.7:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1996-1997

**Πίνακας 3.9:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1996-1997

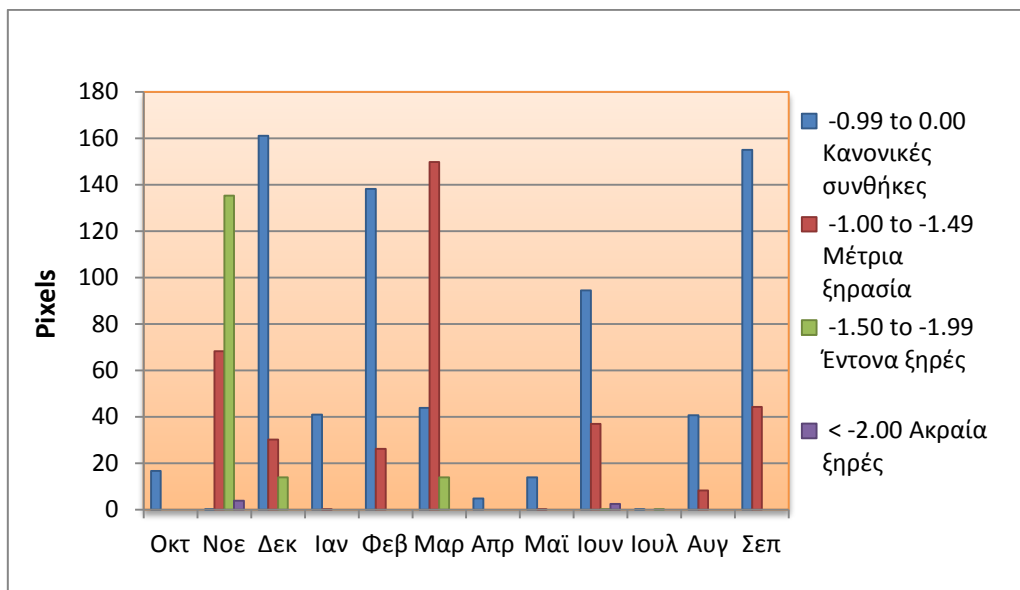
Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1996	Οκτ	2.589844	0	0	0	<b>2.589844</b>
1996	Νοε	29.77344	139.1992	38.79688	0	<b>207.76952</b>
1996	Δεκ	45.33594	0.015625	0	0	<b>45.351565</b>
1997	Ιαν	72.375	0.050781	0	0	<b>72.425781</b>
1997	Φεβ	197.3438	2.015625	0	0	<b>199.359425</b>
1997	Μαρ	201.3633	0	0	0	<b>201.3633</b>
1997	Απρ	0.410156	0	0	0	<b>0.410156</b>
1997	Μαΐ	38.08594	143.4648	0.007813	26.19531	<b>207.753863</b>
1997	Ιουν	16.6875	0.035156	0.007813	0	<b>16.730469</b>
1997	Ιουλ	63.6875	82.85547	0.011719	0	<b>146.554689</b>
1997	Αυγ	0.128906	0	0	0	<b>0.128906</b>
1997	Σεπ	135.2344	68.58984	0	0	<b>203.82424</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>803.015726</b>	<b>436.226497</b>	<b>38.824225</b>	<b>26.19531</b>	<b>1304.261758</b>



**Σχήμα 3.8:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 1999-2000

**Πίνακας 3.10:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 1999-2000

Έτος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
1999	Οκτ	25.95313	0.03125	0	0	<b>25.98438</b>
1999	Νοε	8.398438	0	0	0	<b>8.398438</b>
1999	Δεκ	70.29688	3.859375	0	0	<b>74.156255</b>
2000	Ιαν	199.2773	0.023438	0	0	<b>199.300738</b>
2000	Φεβ	22.14844	0	0	0	<b>22.14844</b>
2000	Μαρ	164.7695	36.96875	5.679688	0	<b>207.417938</b>
2000	Απρ	142.9609	60.76953	0	0	<b>203.73043</b>
2000	Μαϊ	143.957	0.007813	1.820313	39.48438	<b>185.269506</b>
2000	Ιουν	12.28906	0	0	0	<b>12.28906</b>
2000	Ιουλ	131.72266	37	2.535156	0	<b>171.257816</b>
2000	Αυγ	38.72266	111.4805	0.027344	43.34375	<b>193.574254</b>
2000	Σεπ	53.23047	8.554688	13.78125	0	<b>75.566408</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>1013.726438</b>	<b>258.695344</b>	<b>23.843751</b>	<b>82.82813</b>	<b>1379.093663</b>



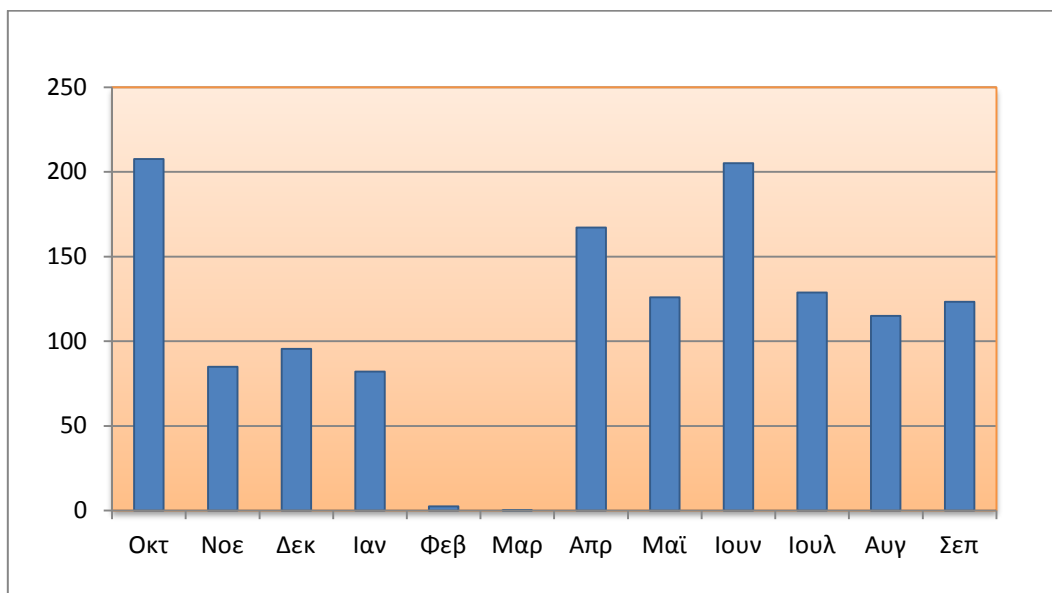
**Σχήμα 3.9:** Διάγραμμα τιμών όλων των κατηγοριών ξηρασίας για το υδρολογικό έτος 2000-2001

**Πίνακας 3.11:** Τιμές περιοχικής έκτασης ξηρασίας (σε αριθμό pixels) για το υδρολογικό έτος 2000-2001

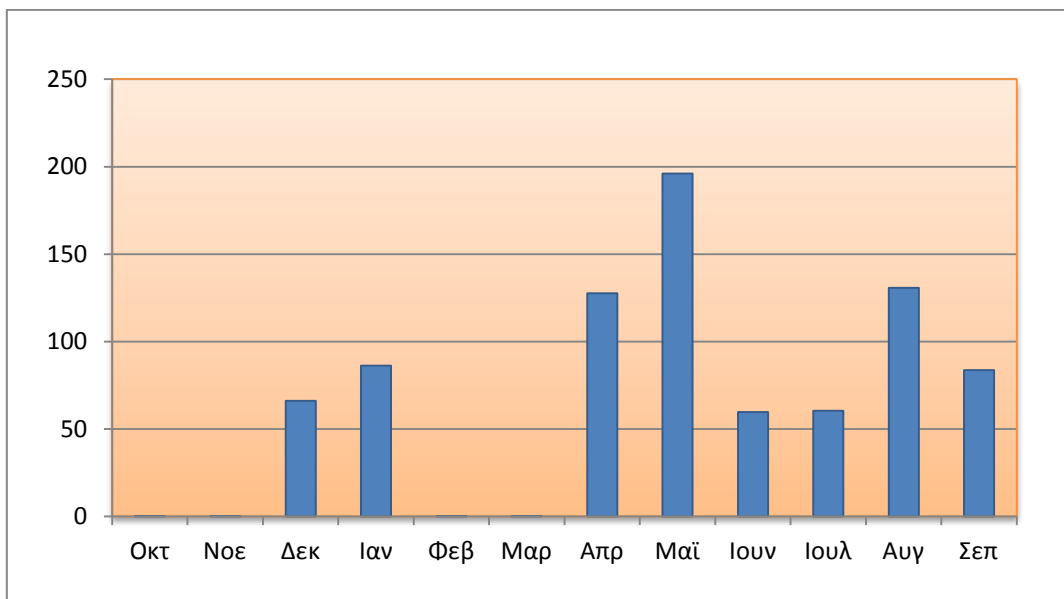
τος	Μήνας	Κανονικές συνθήκες	Μέτρια ξηρασία	Έντονα ξηρές	Ακραία ξηρές	Σύνολο αρνητικών τιμών
2000	Οκτ	16.67578	0	0	0	<b>16.67578</b>
2000	Νοε	0.164063	68.32422	135.3438	3.859375	<b>207.691458</b>
2000	Δεκ	161.0703	30.21094	13.99219	0	<b>205.27343</b>
2001	Ιαν	40.95313	0.003906	0	0	<b>40.957036</b>
2001	Φεβ	138.2344	26.22656	0	0	<b>164.46096</b>
2001	Μαρ	43.82813	149.7969	13.99219	0	<b>207.61722</b>
2001	Απρ	4.847656	0	0	0	<b>4.847656</b>
2001	Μαΐ	14.01563	0.023438	0	0	<b>14.039068</b>
2001	Ιουν	94.47656	36.96875	0.023438	2.515625	<b>133.984373</b>
2001	Ιουλ	0.082031	0	0.007813	0	<b>0.089844</b>
2001	Αυγ	40.72266	8.34375	0	0	<b>49.06641</b>
2001	Σεπ	154.9883	44.31641	0	0	<b>199.30471</b>
	<b>Σύνολο</b>	<b>710.05864</b>	<b>364.214874</b>	<b>163.359431</b>	<b>6.375</b>	<b>1244.007945</b>

### 3.3. Περιοχική έκταση κάθε επεισοδίου ξηρασίας

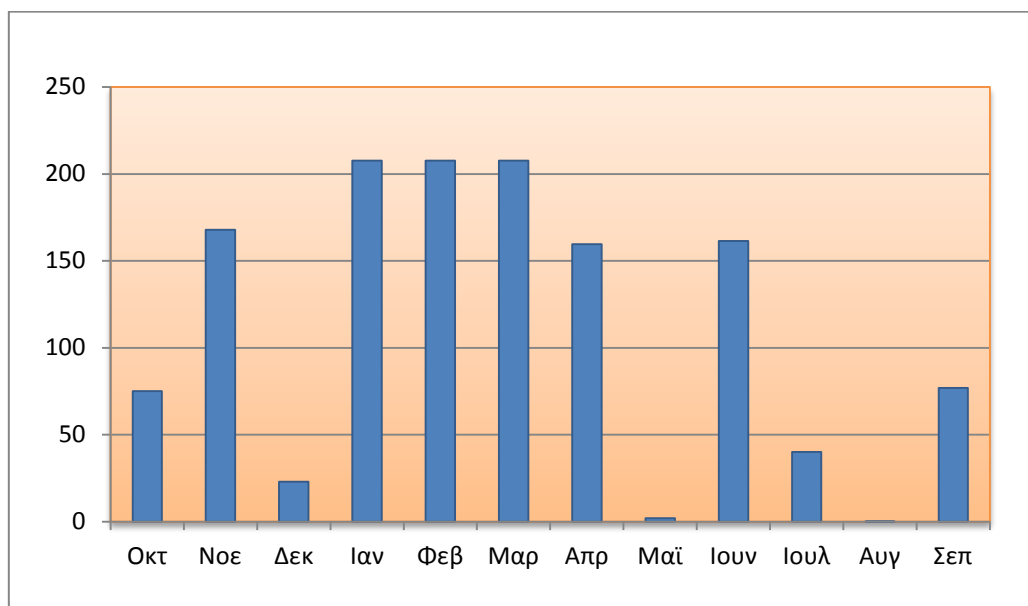
Αφού προστέθηκαν τις τιμές των τεσσάρων κατηγοριών ξηρασίας του κάθε υδρολογικού έτους προέκυψαν οκτώ νέα διαγράμματα (Σχ. 3.10 έως Σχ. 3.17) που μας δείχνουν την περιοχική έκταση σε pixel  $8 \times 8 \text{ km}^2$  (picture element). Αποτυπώνουν με ακρίβεια την χωρική έκταση που καταλαμβάνει συνολικά το επεισόδιο ξηρασίας, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις κατηγορίες, του αντίστοιχου μήνα. Έτσι εκτιμάται ποιους μήνες παρουσιάζεται μεγαλύτερη χωρική εξάπλωση της ξηρασίας.



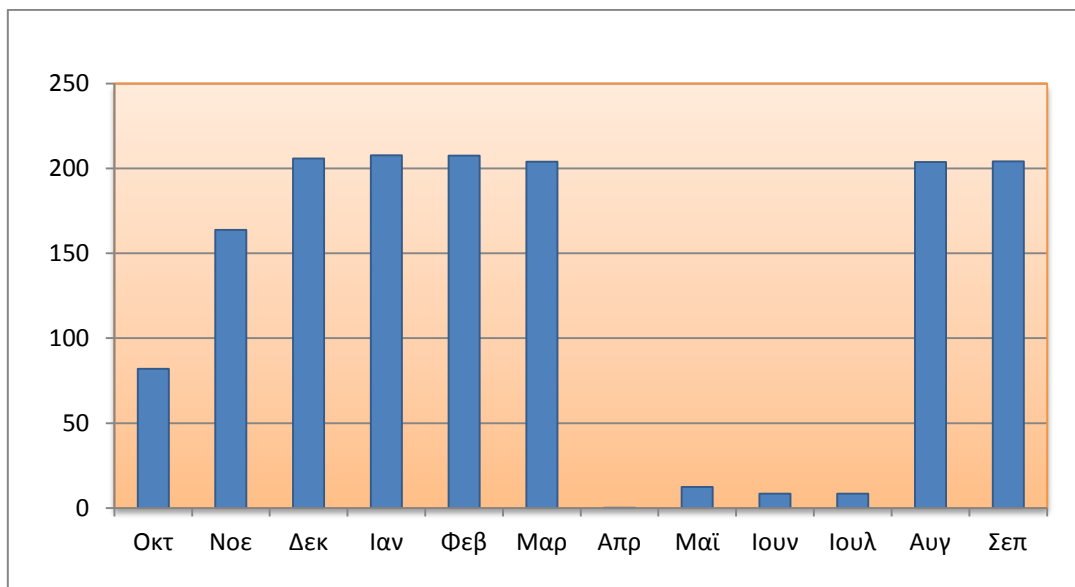
**Σχήμα 3.10:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1984-1985



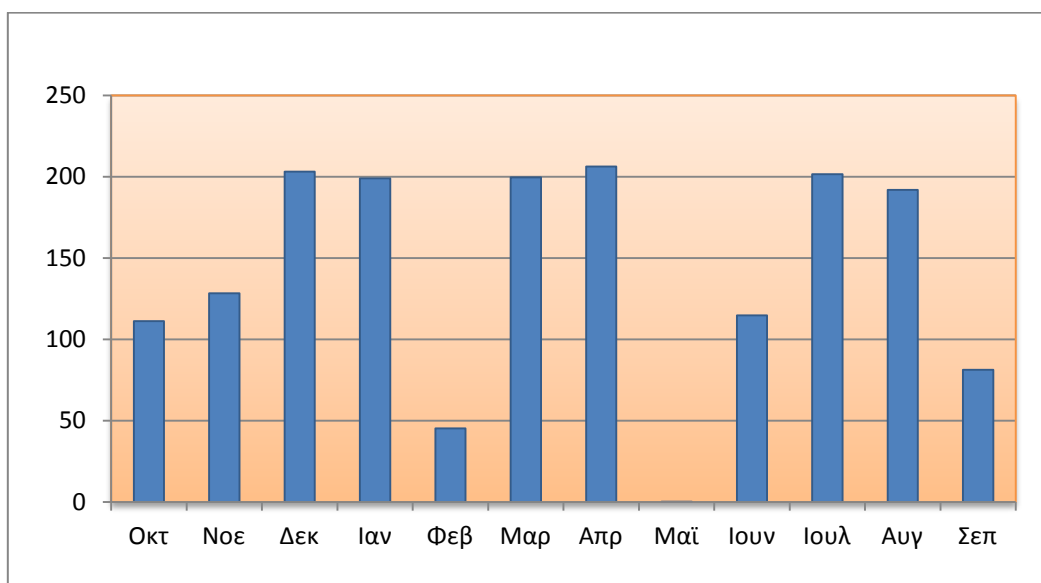
**Σχήμα 3.11:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1987-1988



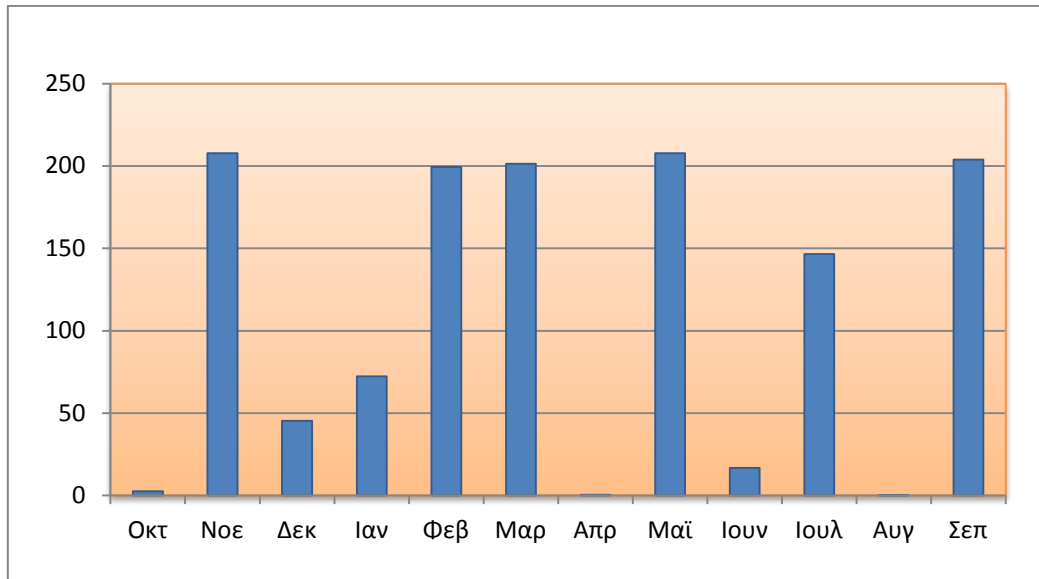
**Σχήμα 3.12:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1989-1990



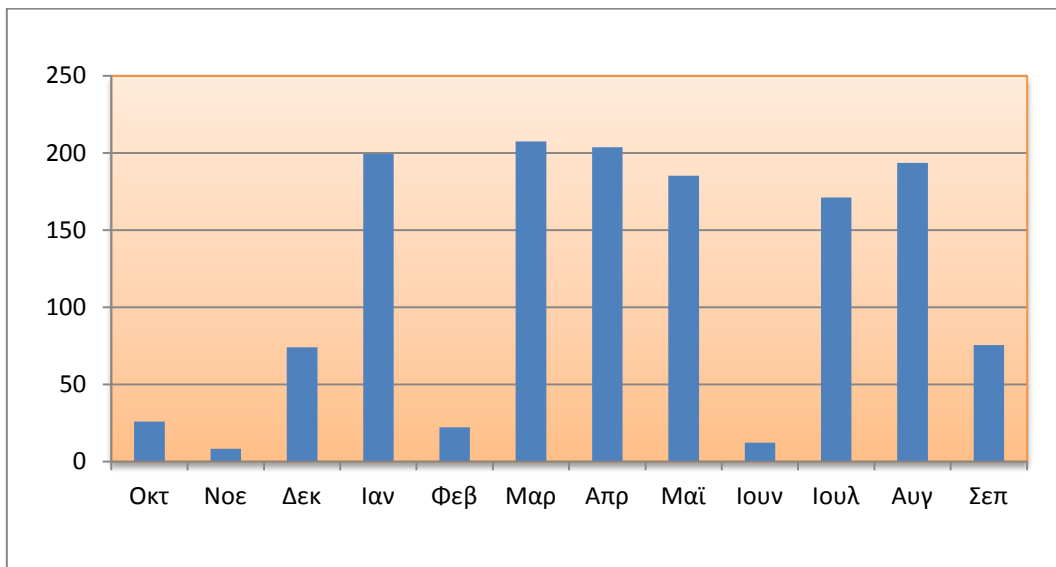
**Σχήμα 3.13:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1991-1992



**Σχήμα 3.14:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1992-1993

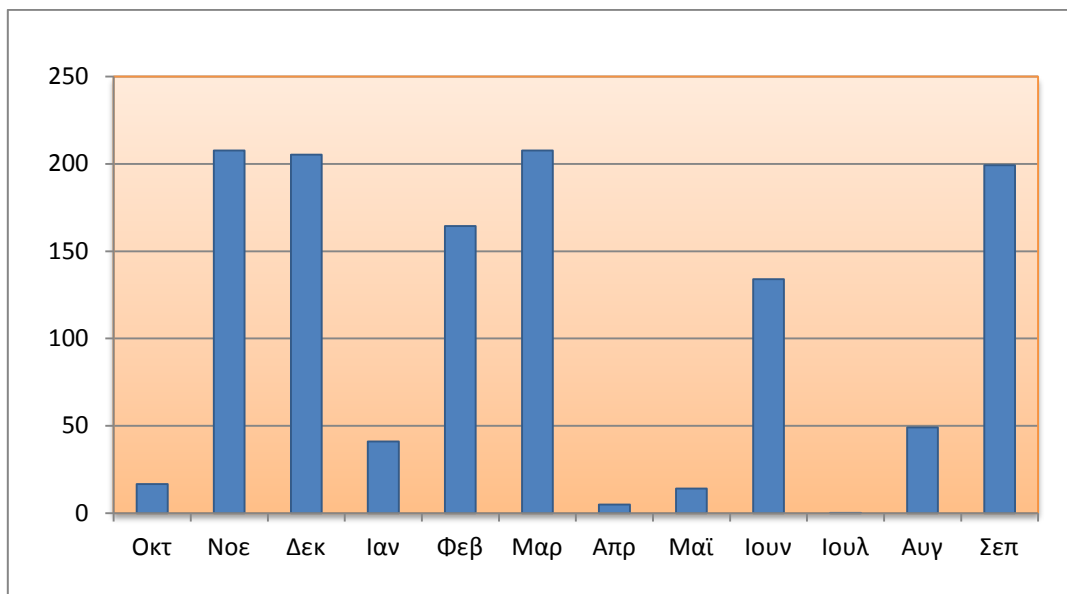


**Σχήμα 3.15:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1996-1997



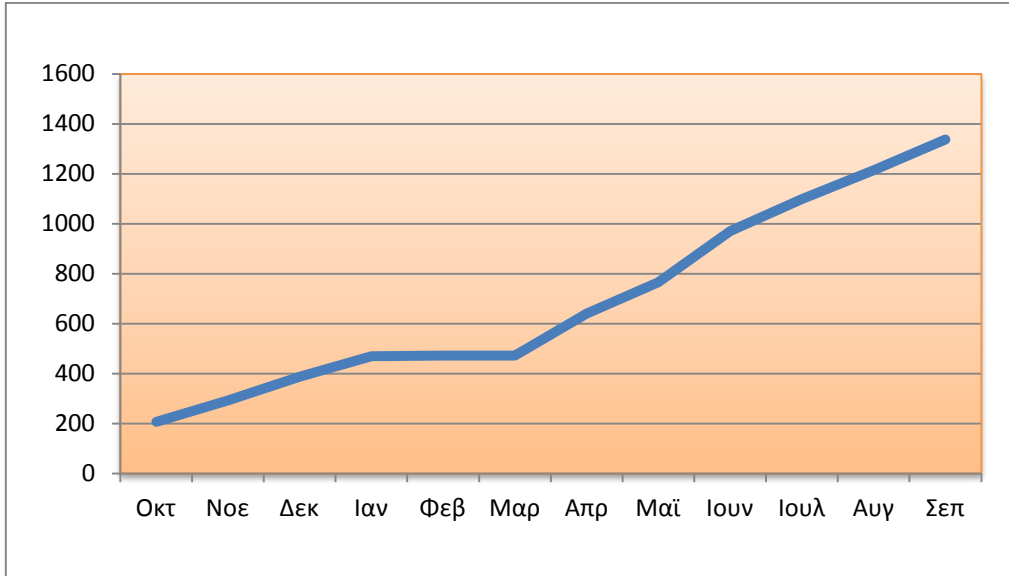
**Σχήμα 3.16:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1999-2000



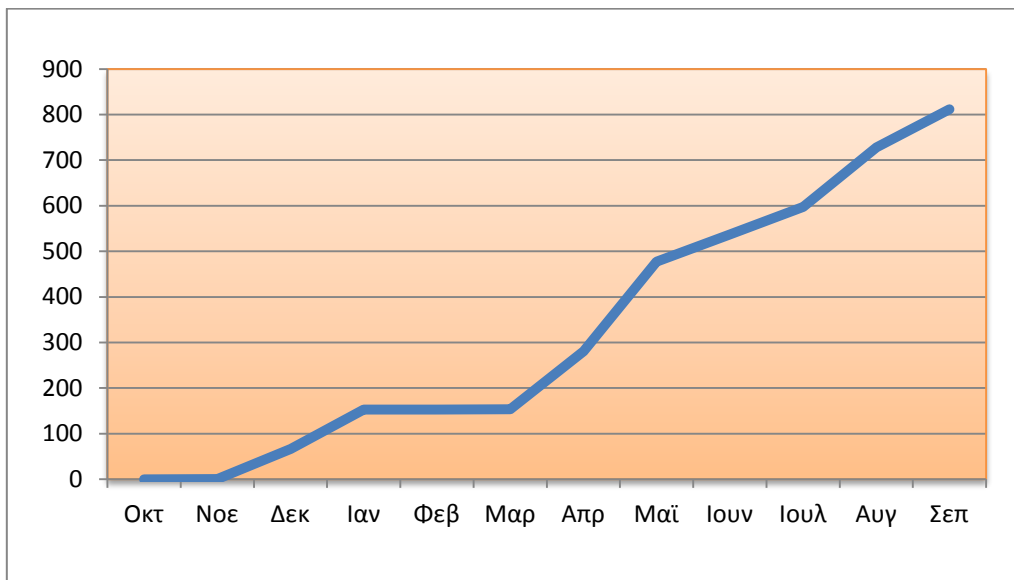


**Σχήμα 3.17:** Διάγραμμα συνολικής περιοχικής έκτασης ξηρασίας (και των τεσσάρων κατηγοριών) ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 2000-2001

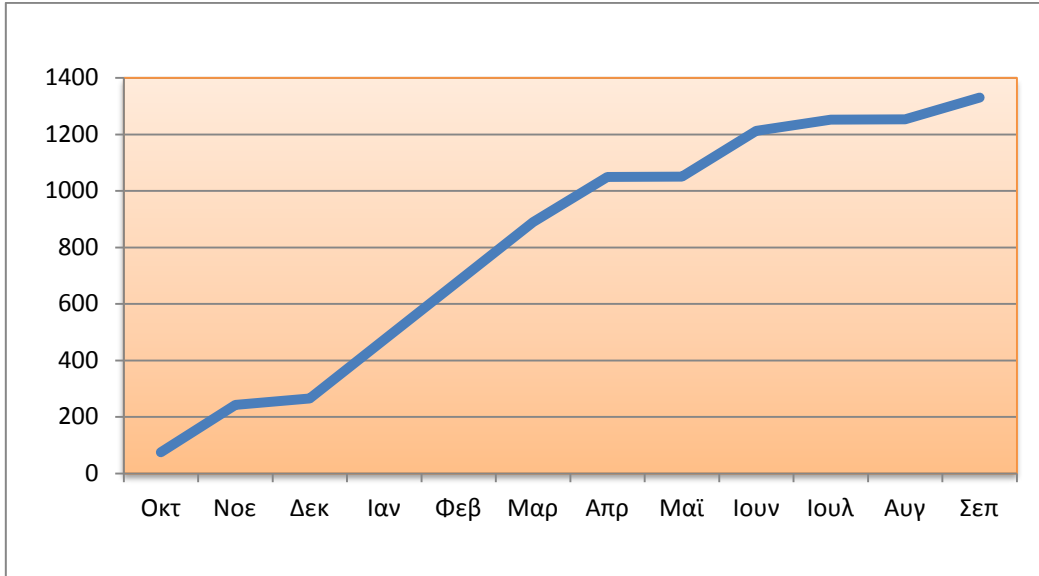
Στη συνέχεια υπολογίστηκε η αθροιστική τιμή του κάθε επεισοδίου ξηρασίας προσθέτοντας την τιμή του κάθε μήνα στην τιμή του προηγούμενου μήνα. Ως αρχικός μήνας ήταν πάντα ο πρώτος μήνας του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος). Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία οκτώ νέων διαγραμμάτων τα οποία απεικονίζουν με χαρακτηριστικό τρόπο την εξέλιξη του κάθε επεισοδίου ξηρασίας (Σχ. 3.18 έως Σχ. 3.25). Παρατηρείται πως η καμπύλη τιμών είναι αυξητική ανάλογα με την τιμή που προκύπτει από τον επόμενο μήνα και ορισμένες φορές παραμένει σταθερή. Έτσι συμπεραίνεται πως τα περισσότερα επεισόδια ξηρασίας έχουν μια λογική εξέλιξη κατά τη διάρκειά τους, η οποία συνήθως ξεκινά με μικρό αριθμό της χωρικής εξάπλωσης και στη συνέχεια, αφού περάσουν ορισμένοι μήνες, κορυφώνεται με τιμές που πλησιάζουν ακόμα και τα 1700 pixel.



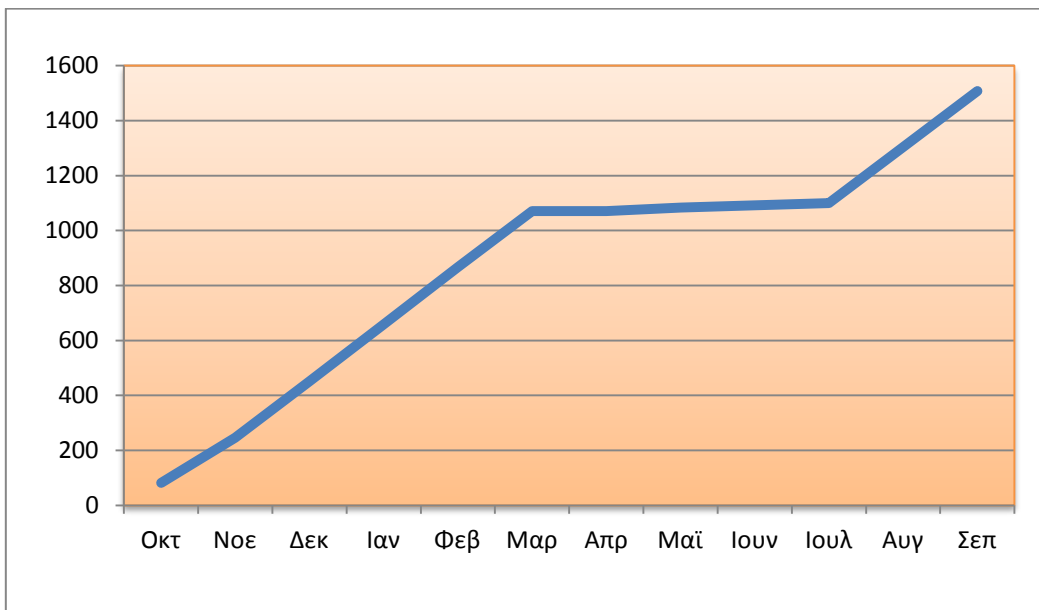
**Σχήμα 3.18:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για τα υδρολογικό έτος 1984-1985



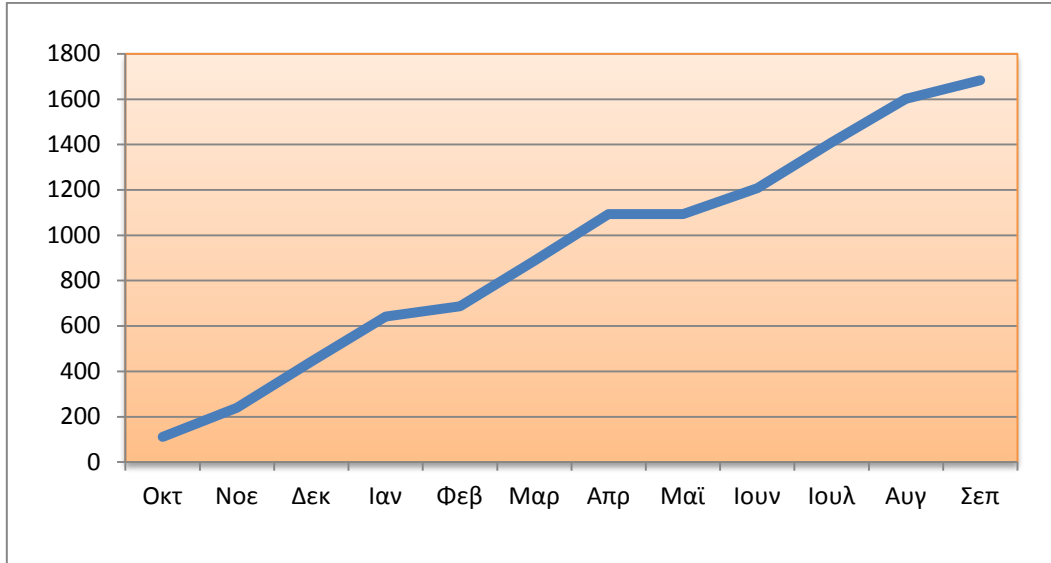
**Σχήμα 3.19:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 1987-1988



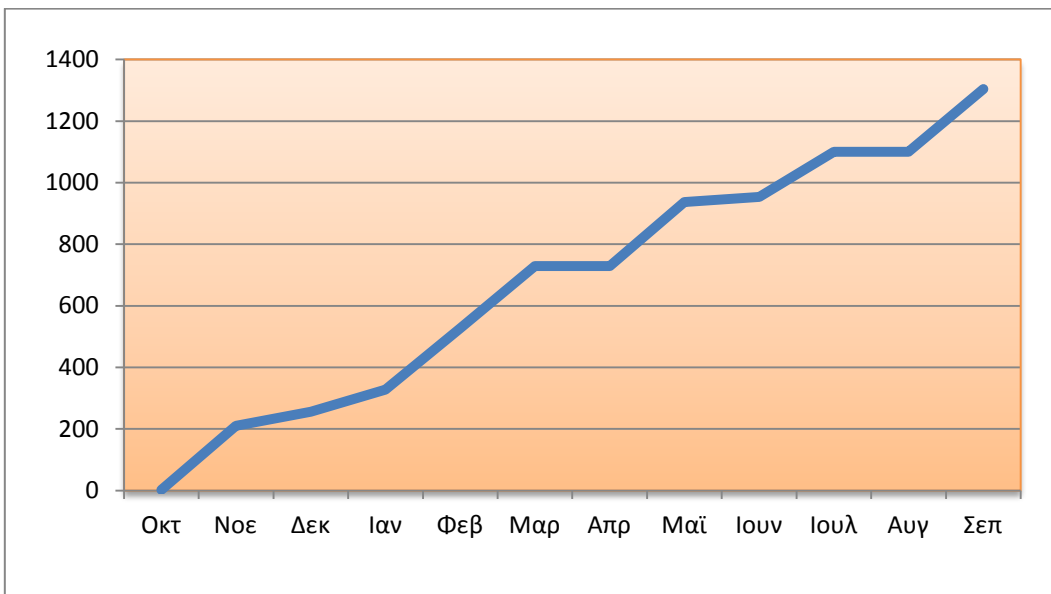
**Σχήμα 3.20:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 1989-1990



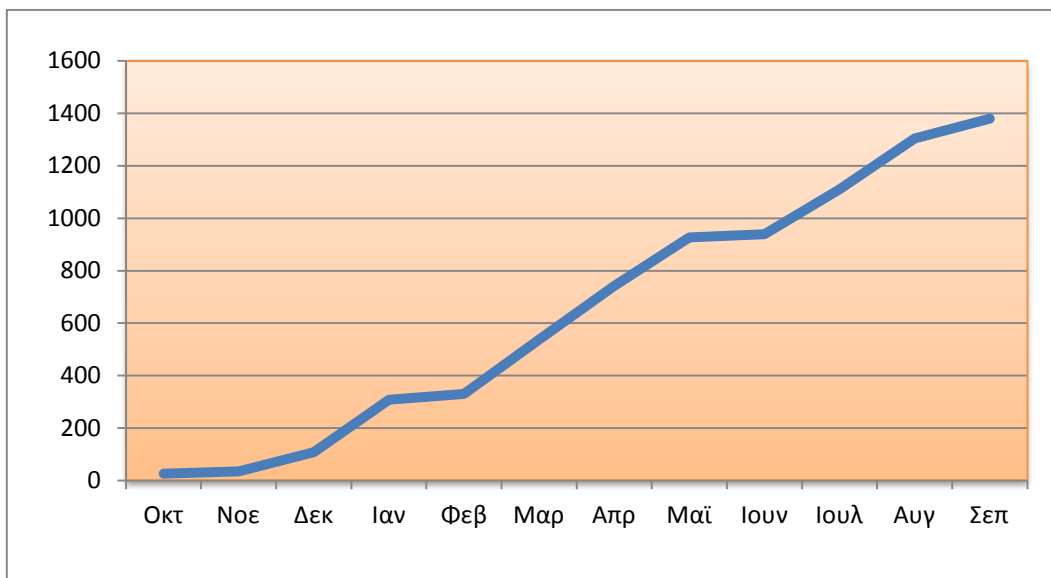
**Σχήμα 3.21:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 1991-1992



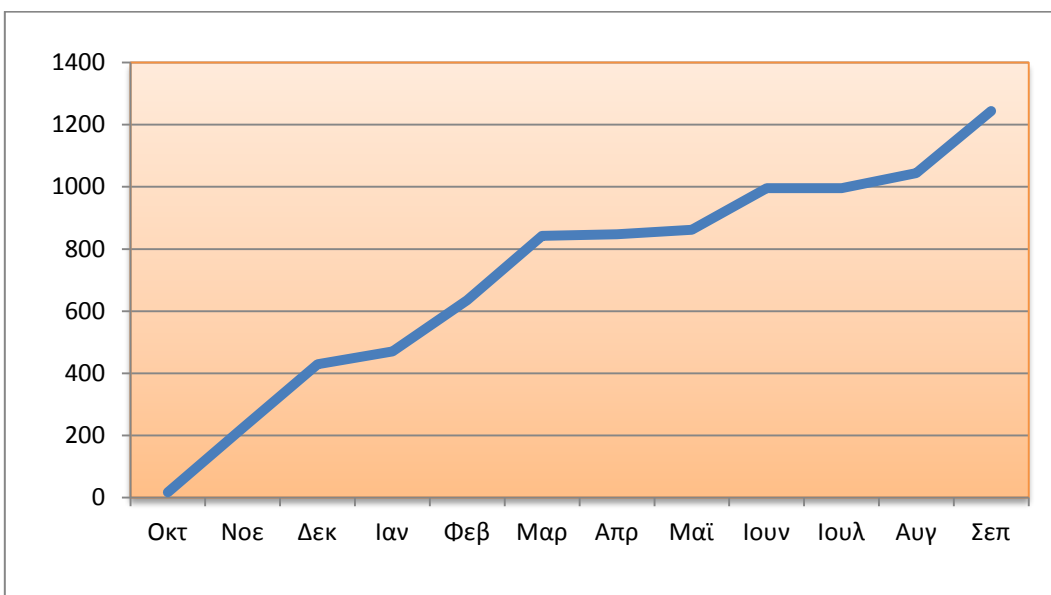
**Σχήμα 3.22:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 1992-1993



**Σχήμα 3.23:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 1996-1997



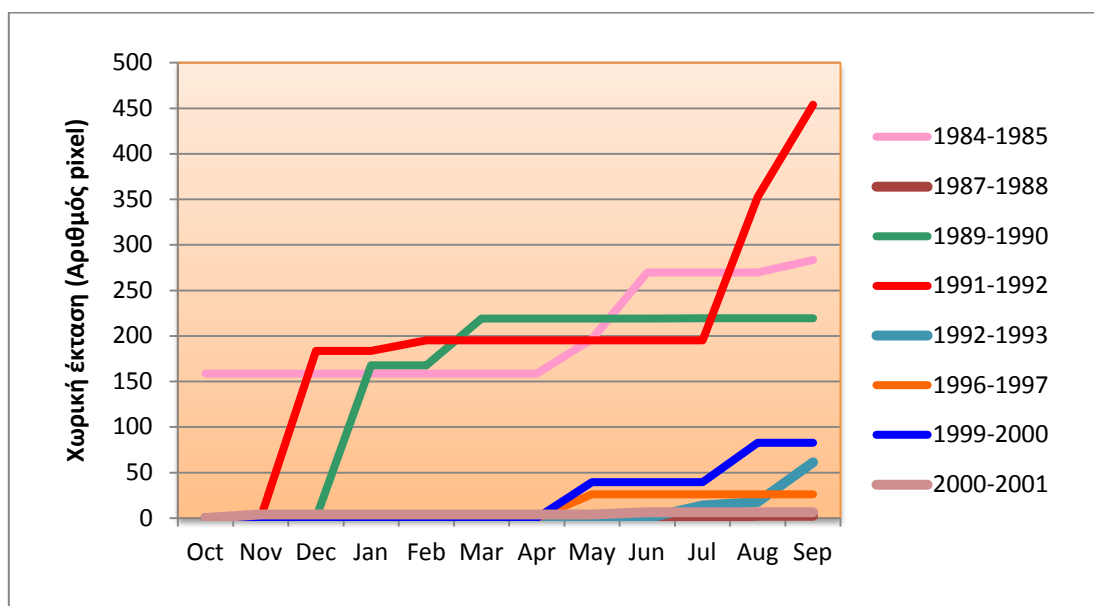
**Σχήμα 3.24:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 1999-2000



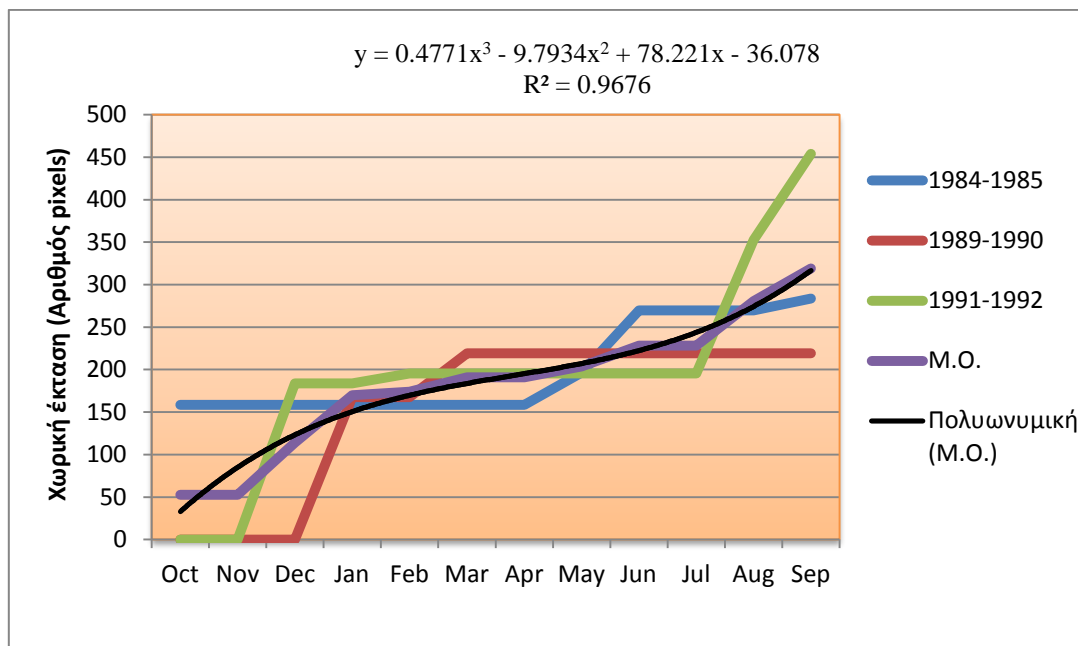
**Σχήμα 3.25:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ξηρασίας αθροιστικό ανά μήνα για το υδρολογικό έτος 2000-2001

### 3.4. Διαγράμματα περιόδων ξηρασίας

Από τις τιμές που παρουσιάστηκαν παραπάνω απομονώνονται οι ακραίες τιμές του δείκτη RDI και δημιουργείται ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα (Σχ. 3.26) των οκτώ (8) επεισοδίων ξηρασίας (Παρ. Β). Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται δύο ομάδες ξηρασίας, οι ισχυρές και οι ασθενείς. Οι δύο αυτές ομάδες απομονώθηκαν, στη συνέχεια, σε δύο νέα διαγράμματα στα οποία υπολογίστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη που δίνει τη δυνατότητα πρόδρομης εκτίμησης της εξέλιξης ενός επεισοδίου ξηρασίας ανάλογα με την ένταση που αυτό παρουσιάζει. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω (Σχ. 3.27 και Σχ. 3.28). Υπολογίστηκε επίσης το άθροισμα των τιμών της κάθε ομάδας επεισοδίων ξηρασίας (Πίν. 3.12, Πίν. 3.13).



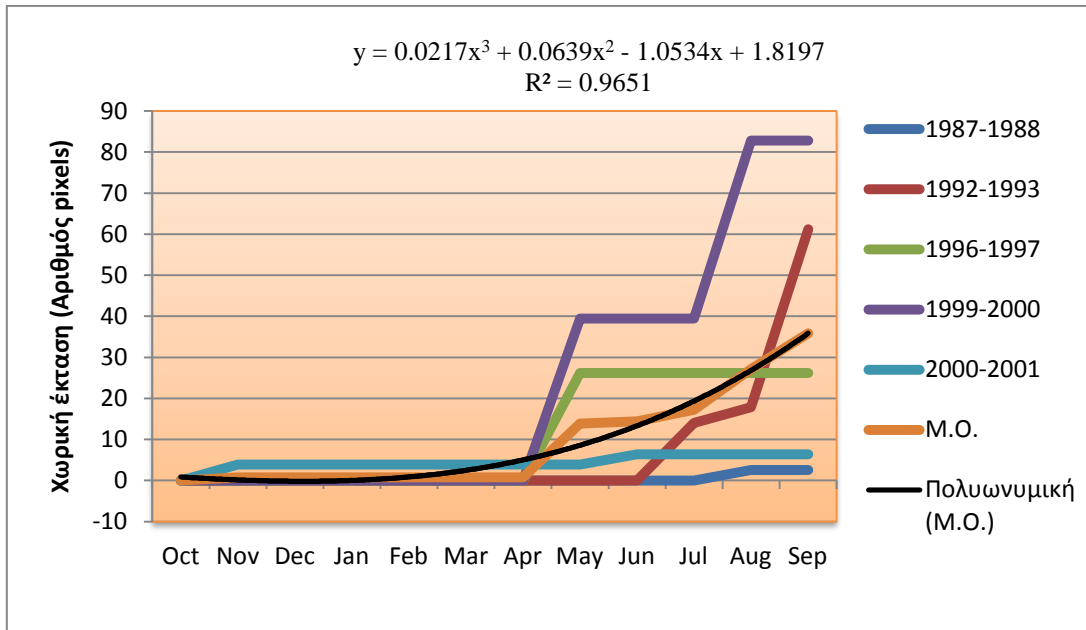
**Σχήμα 3.26:** Διάγραμμα χωρικής έκτασης σε αριθμό pixel  $8 \times 8 \text{ km}^2$  της ακραίας ξηρασίας,  $>-2$  όλων των επεισοδίων ξηρασίας της χρονοσειράς 1981-2001



**Σχήμα 3.27:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ακραίας ξηρασίας >-2 για τα 3 επεισόδια με τις μεγαλύτερες τιμές και καμπύλη  $R^2$

**Πίνακας 3.12:** Μέσος όρος τιμών για τα 3 επεισόδια με τις υψηλότερες τιμές

Πρόσθεση 3 ετών			
1984-1985	1989-1990	1991-1992	M.O.
158.6445	0	0	52.8815
158.6445	0	0	52.8815
158.6445	0	183.6641	114.1029
158.6445	167.6328	183.6641	169.9805
158.6601	167.6484	195.3282	173.8789
158.6601	219.125	195.3282	191.0377
158.6601	219.1758	195.3282	191.0547
196.6445	219.2031	195.3282	203.7253
269.5859	219.289	195.3282	228.0677
269.5859	219.3515	195.3282	228.0885
269.6328	219.3515	352.5704	280.5182
283.625	219.3515	453.8517	318.9427



**Σχήμα 3.28:** Διάγραμμα περιοχικής έκτασης ακραίας ξηρασίας >-2 για τα 5 επεισόδια με τις χαμηλότερες τιμές και καμπύλη  $R^2$

**Πίνακας 3.13:** Μέσος όρος τιμών για τα 5 επεισόδια με τις χαμηλότερες τιμές

Πρόσθεση 5 ετών						
1987-1988	1992-1993	1996-1997	1999-2000	2000-2001	M.O.	
0	0	0	0	0	0	0
0	0.003906	0	0	3.859375	0.772656	
0	0.003906	0	0	3.859375	0.772656	
0	0.003906	0	0	3.859375	0.772656	
0	0.003906	0	0	3.859375	0.772656	
0	0.003906	0	0	3.859375	0.772656	
0	0.003906	0	0	3.859375	0.772656	
0	0.003906	26.19531	39.48438	3.859375	13.90859	
0	0.003906	26.19531	39.48438	6.375	14.41172	
0.027344	13.9961	26.19531	39.48438	6.375	17.21563	
2.570313	17.85547	26.19531	82.82813	6.375	27.16484	
2.570313	61.19922	26.19531	82.82813	6.375	35.83359	



### 3.5. Στατιστικοί δείκτες

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση στατιστικών δεικτών για σφάλματα και αποκλίσεις. Τελειώνοντας πραγματοποιήθηκε και μια σειρά στατιστικών ελέγχων, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τιμές που υπολογίσθηκαν από τους πέντε (5) στατιστικούς δείκτες,  $Eff$ ,  $R^2$ ,  $BIAS$ ,  $RMSE_{(RDI)}$  και  $RMSE_{(Sat)}$  παρουσιάζονται παρακάτω, στους Πίνακες 3.14 έως Πίνακας 3.17.

**Πίνακας 3.14:** Τριμηνιαίες τιμές στατιστικών δεικτών

$E_{ff}$	-0.25	Βέλτιστη τιμή του $E_{ff} = 1$
$R^2$	0.56	Βέλτιστη τιμή του $R^2 = 1$
$BIAS$	0.09	Βέλτιστη τιμή του $BIAS = 0$
$RMSE (RDI)$	0.76	Βέλτιστη τιμή του $RMSE = 0$
$RMSE (Sat)$	0.98	Βέλτιστη τιμή του $RMSE = 0$

**Πίνακας 3.15:** Εξαμηνιαίες τιμές στατιστικών δεικτών

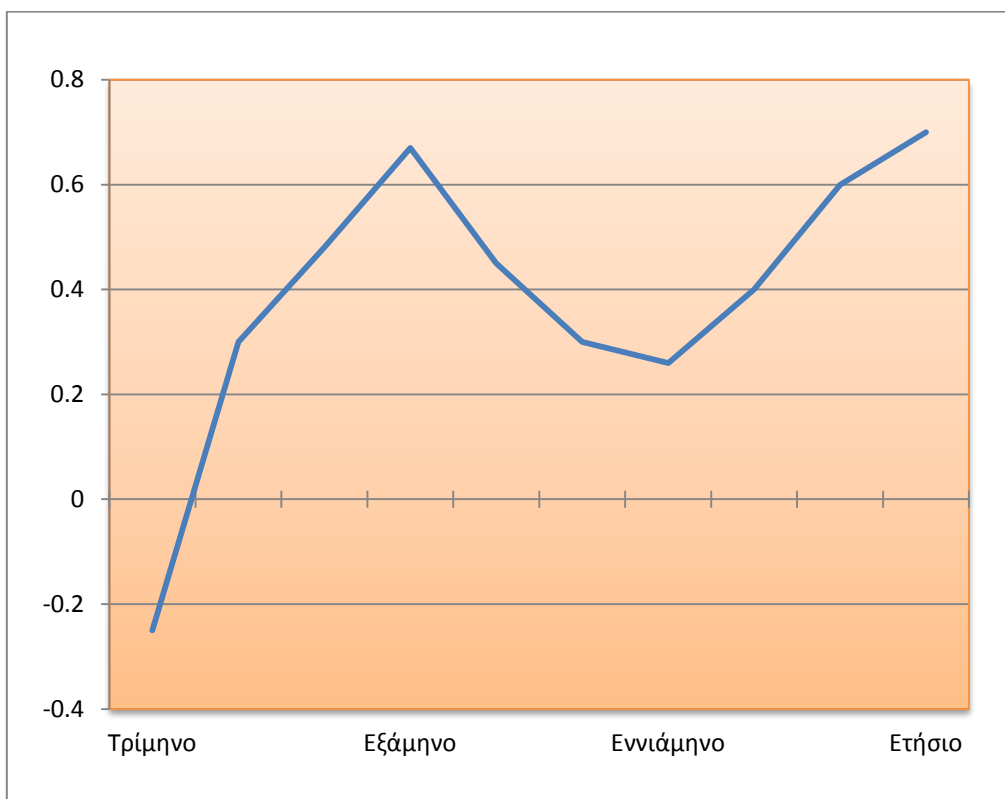
$E_{ff}$	0.67	Βέλτιστη τιμή του $E_{ff} = 1$
$R^2$	0.84	Βέλτιστη τιμή του $R^2 = 1$
$BIAS$	-0.13	Βέλτιστη τιμή του $BIAS = 0$
$RMSE (RDI)$	0.99	Βέλτιστη τιμή του $RMSE = 0$
$RMSE (Sat)$	0.97	Βέλτιστη τιμή του $RMSE = 0$

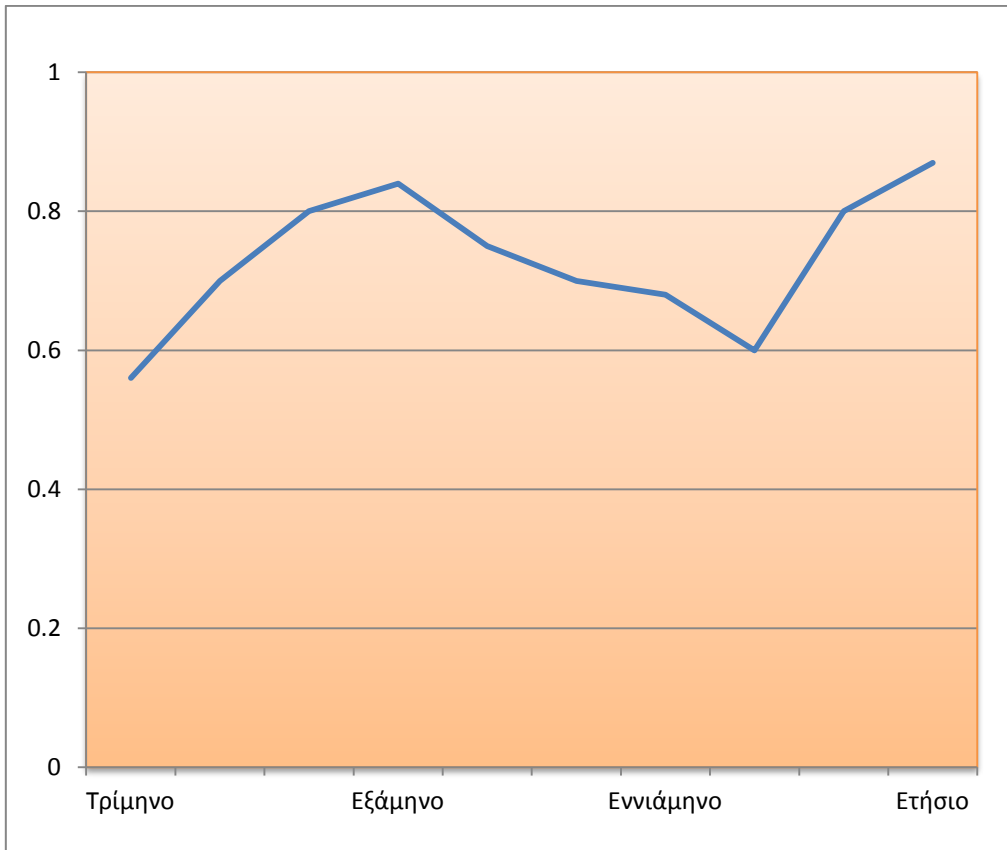
**Πίνακας 3.16:** Εννεαμηνιαίες τιμές στατιστικών δεικτών

$E_{ff}$	0.26	Βέλτιστη τιμή του $E_{ff} = 1$
$R^2$	0.68	Βέλτιστη τιμή του $R^2 = 1$
$BIAS$	-0.06	Βέλτιστη τιμή του $BIAS = 0$
$RMSE (RDI)$	0.86	Βέλτιστη τιμή του $RMSE = 0$
$RMSE (Sat)$	0.97	Βέλτιστη τιμή του $RMSE = 0$

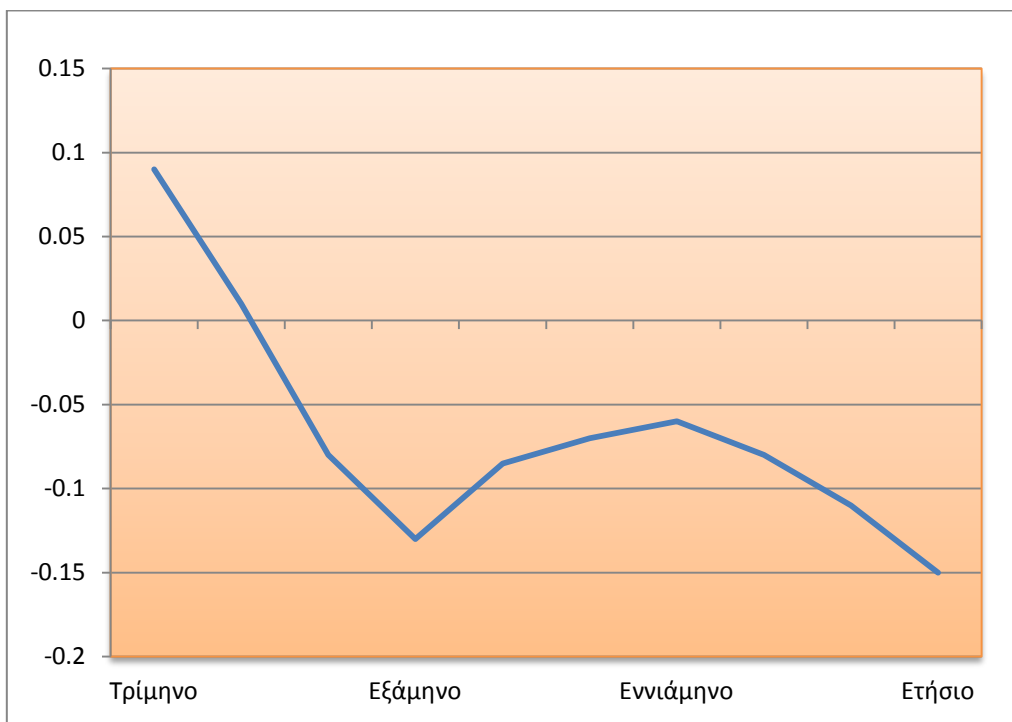
**Πίνακας 3.17:** Ετήσιες τιμές στατιστικών δεικτών

$E_{ff}$	0.7	Βέλτιστη τιμή του $E_{ff} = 1$
$R^2$	0.87	Βέλτιστη τιμή του $R^2 = 1$
BIAS	-0.15	Βέλτιστη τιμή του BIAS = 0
RMSE (RDI)	0.92	Βέλτιστη τιμή του RMSE = 0
RMSE (Sat)	0.95	Βέλτιστη τιμή του RMSE = 0

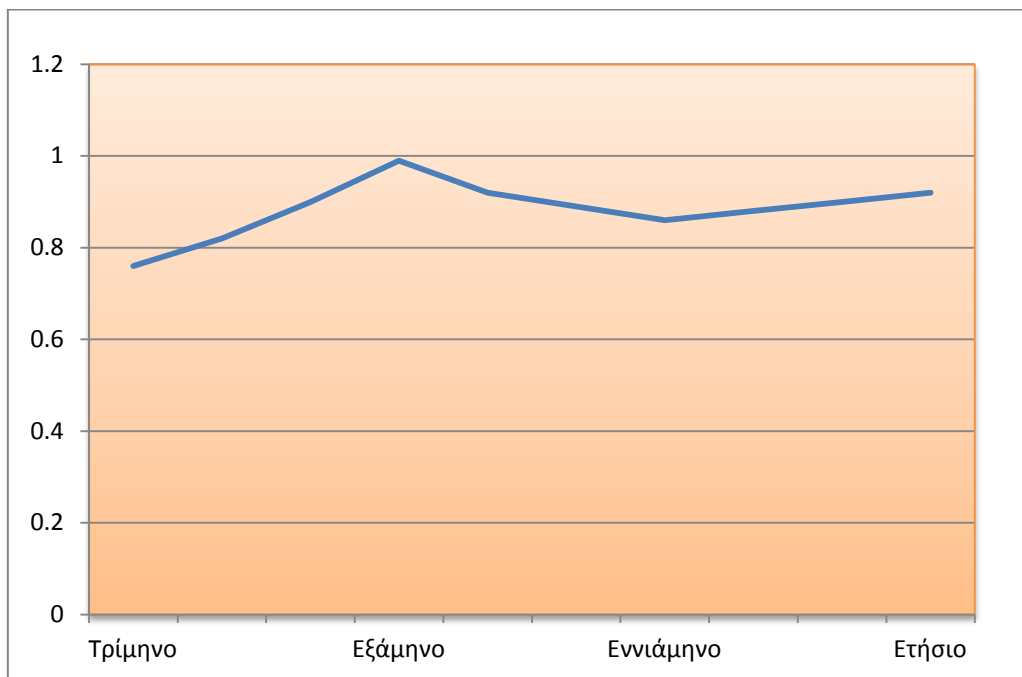
**Σχήμα 3.29:** Δείκτης αποτελεσματικότητας  $E_{ff}$



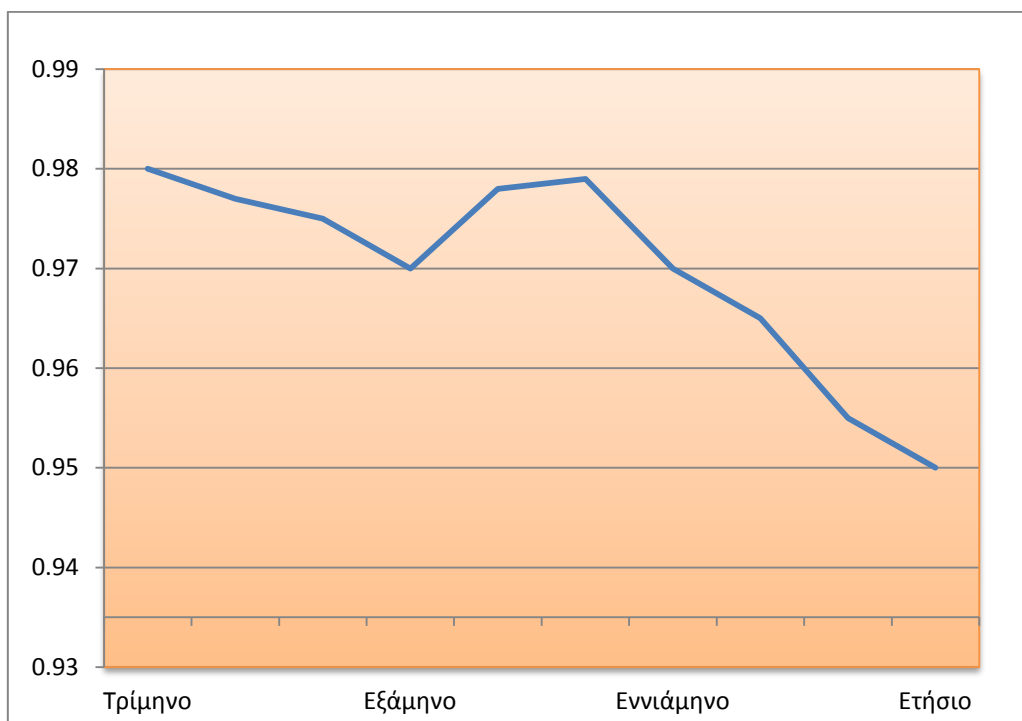
Σχήμα 3.30: Συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$



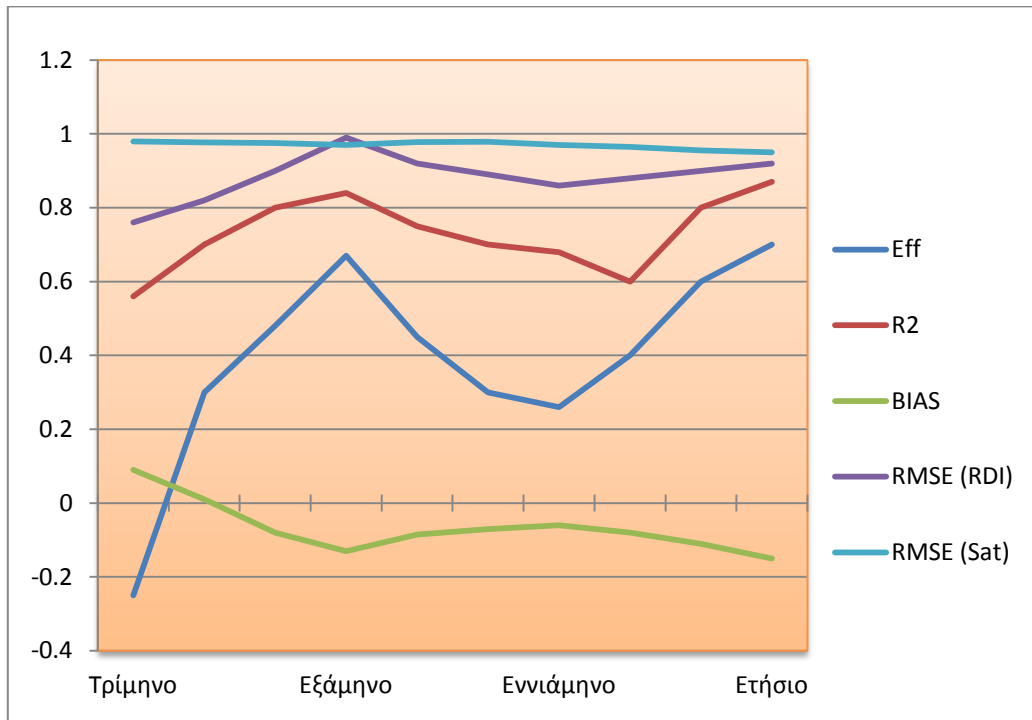
Σχήμα 3.31: Μεροληπτικό σφάλμα BIAS



**Σχήμα 3.32:** Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Con)



**Σχήμα 3.33:** Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Sat)



**Σχήμα 3.34:** Συγκεντρωτικός Πίνακας των πέντε στατιστικών δεικτών ( $E_{ff}$ ,  $R^2$ , BIAS, RMSE)

#### 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό συζητούνται τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην έρευνα αυτή, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, υπολογίστηκαν κυρίως τα διάφορα χωροχρονικά χαρακτηριστικά της ξηρασίας, όπως είναι η έναρξη και λήξη ενός επεισοδίου ξηρασίας, η χωρική έκταση, η διάρκεια και η συχνότητα. Όλες οι παράμετροι της ξηρασίας υπολογίστηκαν δορυφορικά, με τη βοήθεια της Τηλεπισκόπησης.

Αρχικά, στη σύγκριση που έγινε μεταξύ των δορυφορικών με τις επίγειες τιμές, για τα 20 υδρολογικά έτη που μελετήθηκαν (1981-2001), διαπιστώθηκε μια πολύ μεγάλη ταύτιση των τιμών μεταξύ των δύο δεικτών RDI, του δορυφορικού και του επίγειου. Συνολικά υπολογίστηκε εμφάνιση επεισοδίου ξηρασίας σε οκτώ (8) υδρολογικά έτη, το 1984-1985, το 1987-1988, το 1989-1990, το 1991-1992, το 1992-1993, το 1996-1997, το 1999-2000 και το 2000-2001. Παρατηρήθηκε πως τρεις χρονιές παρουσίασαν ακραία ξηρασία (1984-1985, 1989-1990, 1991-1992), ενώ οι υπόλοιπες πέντε χρονιές είχαν ασθενή έως μέτρια ξηρασία. Η εκτίμηση της ξηρασίας πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο και για τους δύο δείκτες. Η εκάστοτε κατηγορία δριμύτητας της ξηρασίας που παρουσίαζε ο ένας δείκτης ταυτιζόταν με την κατηγορία του άλλου δείκτη. Περισσότερο εμφανής είναι η ταύτιση στις ακραίες τιμές του δείκτη (υγρές ή ξηρές). Ο δείκτης RDI με δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιεί ένα πολύ μεγαλύτερο πλήθος τιμών και υπολογίζεται χωρικά για μια περιοχή σε σχέση με τον δείκτη RDI με επίγεια δεδομένα που υπολογίζεται σημειακά. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης μιας ευρύτερης περιοχής που πάσχει συχνά από την ξηρασία.

Στους χάρτες RDI ενός ενδεικτικού υδρολογικού έτους, του 1991-1992 (Παρ. Γ), απεικονίζονται χαρακτηριστικά δύο περίοδοι ακραίας ξηρασίας, με δύο ενδιάμεσες

περιόδους μέτριας ξηρασίας. Η πρώτη ακραία περίοδος εμφανίζεται τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριο – Μάρτιο) και η δεύτερη στα τέλη του καλοκαιριού (Αύγουστος – Σεπτέμβριος). Παρατηρείται λοιπόν πως στο συγκεκριμένο έτος υπάρχει μεγάλη ξηρασία κάτι που είναι ιδιαίτερα αισθητό τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο, κυρίως λόγω υψηλών θερμοκρασιών και απουσία βροχοπτώσεων. Η ξηρασία αυτή συνεχίστηκε και το επόμενο υδρολογικό έτος 1992-1993. Συνολικά στις οκτώ εικόνες των επεισοδίων ξηρασίας της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού έγινε μια προσπάθεια προσέγγισης των υποπεριοχών που πλήττονται συχνότερα από το φαινόμενο αυτό. Στον χάρτη του 1984-1985 διακρίνονται αρκετές περιοχές της λεκάνης που εμφανίζουν έντονη ξηρασία. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι πολύ εμφανείς οι περιοχές αυτές. Έτσι διακρίνεται χαρακτηριστικά πως βορειοδυτικά από την περιοχή του Πλατύκαμπου υπάρχει πολύ μεγάλη ξηρασία.

Στη συνέχεια αφού αναφέρθηκαν τα όρια των τεσσάρων κατηγοριών (κλάσεις) στις οποίες χωρίζεται ο δείκτης RDI δημιουργήθηκαν διαγράμματα του κάθε επεισοδίου ξηρασίας που εμπεριείχαν τις τιμές και των τεσσάρων κλάσεων. Έτσι φάνηκε χαρακτηριστικά πως για το επεισόδιο του 1984-1985 παρουσιάζεται αρχικά μια περίοδος έντονης ξηρασίας, η οποία ακολουθείται από μια περίοδο κανονικών συνθηκών και μια τελευταία περίοδο κυρίως μέτριας προς έντονης ξηρασίας. Στο επεισόδιο του 1987-1988 παρουσιάζεται έντονη ξηρασία κυρίως τους τελευταίους μήνες του υδρολογικού έτους (Ιούνιος – Σεπτέμβριος), οι οποίοι συμπίπτουν και με την θερινή περίοδο του έτους. Στο επεισόδιο του 1989-1990 στη μέση του επεισοδίου, κοντά στον 4<sup>ο</sup> μήνα (Ιανουάριος) παρατηρείται ακραία ξηρασία και ακολουθεί μια περίοδος έντονης ξηρασίας έως ότου τελικά εμφανιστούν βροχοπτώσεις την φθινοπωρινή περίοδο. Περίπου με τον ίδιο τρόπο εξελίσσεται και το επεισόδιο του

1991-1992 με ακραία ξηρασία τον Δεκέμβριο και επανεμφάνισή της τον Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Αυτό εξηγεί και το γεγονός της συνέχισης του επεισοδίου αυτού το επόμενο υδρολογικό έτος, 1992-1993, το οποίο όμως εμφανίζει μέτρια ξηρασία. Για το επεισόδιο του 1996-1997 διακρίνεται μια μικρή αυξομείωση της έντασης της ξηρασία μεταβαίνοντας από μέτρια σε κανονική και πάλι σε μέτρια ξηρασία καθ' όλη τη διάρκειά του. Στο επεισόδιο ξηρασίας του 1999-2000 παρατηρείται μια μεγάλη περίοδος, από τα μέσα του έτους και μετά, μέτριας και ακραίας ξηρασίας. Τέλος, με το επεισόδιο του 2000-2001 μπορεί να αναφερθεί η απότομη εμφάνιση έντονης ξηρασίας τον Νοέμβριο με αυξομειώσεις που φτάνουν ως την ακραία μορφή της ξηρασίας σε ορισμένους μήνες, όπως ο Μάρτιος.

Στο επόμενο στάδιο της εργασίας υπολογίστηκε η περιοχική έκταση κάθε επεισοδίου ξηρασίας σε pixel  $8 \times 8 \text{ km}^2$ . Έτσι για το πρώτο επεισόδιο του 1984-1985 ξεχωρίζει έντονα μια παύση δύο μηνών, Φεβρουάριο και Μάρτιο, στο τέλος δηλαδή της χειμερινής περιόδου, κάτι που παρουσιάζεται και το 1987-1988. Μια αρκετά μεγάλη ύφεση της περιοχικής έκτασης παρατηρείται και το 1991-1992, όπου από τον Απρίλιο έως τον Ιούλιο του 1992 επικρατούν πολύ χαμηλές τιμές. Τα υπόλοιπα επεισόδια ξηρασίας εξελίσσονται με αυξομειώσεις καθ' όλη τη διάρκειά τους. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί πιο χαρακτηριστικά στα σχήματα (Σχ. 3.18 – Σχ. 3.25). Στα σχήματα αυτά εμφανίζεται η αθροιστική ξηρασία, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την οποία υπολογίζεται η τιμή του RDI κάθε μήνα προσθέτοντας την τιμή του προηγούμενου μήνα. Έτσι γίνεται δυνατή η απεικόνιση της εξέλιξης του κάθε επεισοδίου. Συγκεκριμένα για το επεισόδιο του 1984-1985 (Σχ. 3.18) φαίνεται χαρακτηριστικά στην καμπύλη η έλλειψη ξηρασίας από τον Ιανουάριο ως τον Μάρτιο και η παρουσία έντονης ξηρασίας από εκεί και πέρα με τιμές που φτάνουν περίπου τα



1400 pixels ως την λήξη του επεισοδίου. Παρόμοια καμπύλη παρουσιάζεται και στο επεισόδιο του 1987-1988 με εμφανώς όμως μειωμένες τιμές που φτάνουν αθροιστικά τα 800 pixels περίπου. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται οι χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με όλα τα υπόλοιπα επεισόδια όπου οι τιμές είναι κοντά ή και ξεπερνούν αθροιστικά τα 1400 pixels. Αξίζει να σημειωθεί πως στο επεισόδιο του 1991-1992 υπάρχει μια αρκετά μεγάλη περίοδος, που περιλαμβάνει και την περίοδο γεωργικών ασχολιών των περισσότερων καλλιεργειών, από τον Μάρτιο έως και τον Ιούλιο, με μηδενικές τιμές ξηρασίας.

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα σημεία της εργασίας αυτής ήταν η δημιουργία μιας καμπύλης σύμφωνα με τις ακραίες τιμές των οκτώ επεισοδίων ξηρασίας που μελετήθηκαν. Αρχικά στο Σχήμα 3.26 τοποθετήθηκαν όλα τα επεισόδια σε ένα διάγραμμα έτσι ώστε να παρουσιαστεί η εξέλιξη του καθενός ξεχωριστά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Με τον τρόπο αυτό ξεχώρισαν τρεις χρονιές ξηρασίας, το 1984-1985, το 1989-1990 και το 1991-1992 στις οποίες σημειώνονται πολύ υψηλές τιμές στην κλάση της ακραίας ξηρασίας ( $> -2$ ) του δείκτη RDI. Επίσης ξεχώρισαν οι υπόλοιπες πέντε (5) χρονιές ξηρασίας στις οποίες παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές της ακραίας ξηρασίας του δείκτη RDI. Πιο συγκεκριμένα με το κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το επεισόδιο του 1991-1992 στο οποίο και σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές ακραίας ξηρασίας τους τελευταίους μήνες, από Ιούλιο ως Σεπτέμβριο, ενώ προηγείται μια σταθερή περίοδος από τον Δεκέμβριο ως τον Ιούνιο. Ακολουθούν τα επεισόδια του 1984-1985 και του 1989-1990 για να συμπληρωθούν τα τρία χρόνια υψηλών τιμών τα οποία ακολουθούν παρόμοια πορεία. Στα επεισόδια με τις χαμηλότερες τιμές διακρίνεται μια περίοδος έως τον Απρίλιο περίπου με πολύ χαμηλές τιμές και από εκεί και έπειτα μια αύξηση που δεν ξεπερνά αθροιστικά τα 100 pixels.

Στη συνέχεια αφού απομονώθηκαν τα τρία και τα πέντε επεισόδια σε ξεχωριστά διαγράμματα αντίστοιχα, υπολογίσθηκε η προσεγγιστική καμπύλη σε κάθε περίπτωση και δημιουργήθηκε μια εμπειρική καμπύλη εκτίμησης ξηρασίας. Σύμφωνα με αυτή μπορεί να εκτιμηθεί η σχετική εξέλιξη ενός επεισοδίου ξηρασίας. Παρακολουθείται η αρχική πορεία του επεισοδίου με τη χρήση μηνιαίων τιμών RDI από δορυφορικά στοιχεία και ανάλογα με τις τιμές που παρουσιάζει μπορεί να τοποθετηθεί είτε στην μια είτε στην άλλη περίπτωση για να επιτευχθεί στη συνέχεια η σχετική πρόδρομη εκτίμηση της εξέλιξης της ξηρασίας.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε χρήση ορισμένων στατιστικών δεικτών για την επαλήθευση των υπολογισμένων τιμών. Έτσι από τον Πίνακα 3.14 έως Πίνακα 3.17 παραθέτονται τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών, από τρίμηνες, εξάμηνες, εννεάμηνες και ετήσιες τιμές του RDI. Χαρακτηριστικά παρατηρήθηκε πως για τον δείκτη αποτελεσματικότητας ( $E_{ff}$ ) οι τιμές που συναντώνται στους τρεις και στους εννέα μήνες είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη τιμή του δείκτη, τη μονάδα, ενώ οι τιμές για τους έξι μήνες και το έτος είναι ελάχιστα πιο μακριά, αλλά παραμένουν μέσα στα όρια του αποδεκτού. Αντίστοιχα και ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) με ετήσια τιμή 0.87 και 0.84 για τους έξι μήνες, ενώ για τους τρεις και τους εννέα η τιμή του  $R^2$  είναι κοντά στο 0.60 με βέλτιστη το 1. Το μεροληπτικό σφάλμα (BIAS) διατηρείται σε σταθερές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με τιμή περίπου -0.1 και με βέλτιστη το μηδέν. Ομοίως στους δύο τύπους του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) για τα επίγεια και για τα δορυφορικά δεδομένα, οι τιμές διατηρούνται σε καλά επίπεδα και είναι κοντινές μεταξύ τους. Έτσι χαρακτηριστικά στους ετήσιους υπολογισμούς οι τιμές του RMSE είναι 0.92 και 0.95, για τα επίγεια και τα δορυφορικά δεδομένα, αντίστοιχα, και με βέλτιστη τιμή το μηδέν. Παρατηρήθηκε λοιπόν πως και στους πέντε δείκτες οι τιμές

που υπολογίστηκαν είναι μέσα στα όρια των αποδεκτών τιμών και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη τιμή. Αυτό δηλώνει την αξιοπιστία του δείκτη RDI και την αποτελεσματική εκτίμηση του φαινομένου της ξηρασίας στις κατά τόπους περιοχές εξέτασης, αλλά και σε ευρύτερες λεκάνες απορροής όπως αυτή του Πηνειού ποταμού που μελετήθηκε στην εργασία αυτή.

Αντίστοιχη προσπάθεια προσδιορισμού της ξηρασίας στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού είχε πραγματοποιηθεί και από παλιότερες έρευνες όπως η διδακτορική διατριβή της κας Κανέλλου (2010). Εφαρμόζοντας τον Δείκτη RDI εκτίμησε την περιοχική ξηρασία στον Ελλαδικό χώρο σε διάφορες περιοχές, μία εκ των οποίων ήταν και η Θεσσαλία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν από την παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό των διαφόρων χαρακτηριστικών της ξηρασίας.

Ο Βασιλειάδης (2010), στη διδακτορική του διατριβή με τίτλο Χωροχρονική ανάλυση, προσομοίωση και πρόγνωση ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας, ασχολήθηκε με ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις των χαρακτηριστικών της ξηρασίας (δριμύτητα, διάρκεια και έκταση) για την περιοχή αυτή χρησιμοποιώντας τον μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας SPI (Standardized Precipitation Index). Το σύστημα αυτό συνδυάζει ένα υβριδικό χωροχρονικό μοντέλο πρόγνωσης για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες επιχειρησιακές δράσεις αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ξηρασίας με χωρικές μεθόδους παρεμβολής για την εκτίμηση ψηφιακών τιμών του SPI (Βασιλειάδης 2010).

Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ασχολήθηκε πρόσφατα με την ξηρασίας στην περιοχή της Θεσσαλίας για τη χρονοσειρά 1980-2008, εφαρμόζοντας τον

προαναφερόμενο Δείκτη, τον SPI (Standardized Precipitation Index), αρχικά κάθε μήνα και στη συνέχεια ετησίως (12 μήνες) (DSpace@NTUA 2011). Αναλύεται η συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων ξηρασίας, η χωροχρονική εξέλιξη και η διάρκεια αυτής. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά και μπορούν να συγκριθούν με αυτά άλλων δεικτών για την αντίστοιχη περιοχή μελέτης, όπως του RDI.

Έτσι μπορεί να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα αντίστοιχων ερευνών κατά το παρελθόν είναι πολύ κοντά και σε πολλές περιπτώσεις ταυτίζονται με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Όπως ο αριθμός των επεισοδίων ξηρασίας και πολλά χαρακτηριστικά αυτής για το κάθε επεισόδιο ξεχωριστά. Όπως επίσης και η δημιουργία ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης της ξηρασίας και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις των χαρακτηριστικών της, κάτι το οποίο επιχειρήθηκε και στην εργασία αυτή με τη δημιουργία ενός μοντέλου πρόδρομης εκτίμησης ενός επεισοδίου ξηρασίας.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν έπειτα από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πάνω στο ακραίο καιρικό φαινόμενο της ξηρασίας. Επίσης διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για τη βελτίωση, συνέχιση αλλά και την τροποποίηση των μεθόδων που ακολουθούνται για τον υπολογισμό της ξηρασίας με τη βοήθεια της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

1. Συμπεραίνεται λοιπόν πως η Τηλεπισκόπηση είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την χωρική μεταβλητότητα της εκτίμησης της ξηρασίας, κάτι που δεν είναι δυνατό με τη χρήση των επίγειων μετρήσεων.
2. Έγινε δυνατό να εκτιμηθούν χαρακτηριστικά της ξηρασίας όπως περιοχική έκταση, δριμύτητα, έναρξη, λήξη, διάρκεια, συχνότητα, χωρική και χρονική κατανομή.
3. Αναπτύχθηκαν ποσοτικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών στις περιόδους (ή επεισόδια) ξηρασίας.
4. Αναπτύχθηκε μια αξιόπιστη εμπειρική σχέση που δίνει πρόδρομη εκτίμηση ξηρασίας και παρέχει προγνωστική δυνατότητα εκτίμησης της ξηρασίας για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Έτσι υπολογίζεται πως το υδρολογικό έτος 2012 θα είναι χρονιά ξηρασίας.
5. Πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση της ξηρασίας συνθετικά για κάθε επεισόδιο, καθώς και συνολικά για τα οκτώ (8) εκτιμηθέντα επεισόδια της υδρολογικής 20ετίας που αναλύθηκε, από το 1981 έως το 2001. Έτσι είναι γνωστό ποιες

περιοχές πλήττονται συχνότερα ώστε να αναπτυχθούν σχέδια και δράσεις πρόληψης και έγκαιρης αντιμετώπισης της ξηρασίας.

6. Η πανίδα των περιοχών που πλήττονται συχνότερα από το φαινόμενο της ξηρασίας κινδυνεύει άμεσα με εξαφάνιση από κάθε επεισόδιο ξηρασίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη υδάτων που είναι απαραίτητο συστατικό της ζωής για όλο τον έμβιο πληθυσμό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα νεκρών ψαριών έχουν παρατηρηθεί κατά το παρελθόν σε περιόδους ξηρασίας.

## 5.2. Προτάσεις

1. Να χρησιμοποιηθούν περισσότερα επεισόδια ξηρασίας για να εδραιωθούν οι εμπειρικές καμπύλες πρόδρομης εκτίμησης ξηρασίας.
2. Να επιχειρηθεί εφαρμογή της πρόδρομης εκτίμησης σε άλλες λεκάνες απορροής που πλήττονται από ξηρασία.
3. Να αξιοποιηθούν άλλες στατιστικές μεθοδολογίες όπως ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA) και ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis) για χωρική ταξινόμηση και ομαδοποίηση της ξηρασίας.
4. Να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων (neural network) τόσο για ταξινόμηση όσο και για πρόγνωση της ξηρασίας περιοχικά σε επίπεδο pixel (picture element).
5. Να αξιοποιηθούν άλλες προγνωστικές μέθοδοι για την πρόγνωση ξηρασίας και να εξετασθούν διάφορα χρονικά βήματα, (π.χ. εβδομάδα, 10ήμερο, μήνας, εποχή).
6. Να αξιοποιηθούν άλλοι δορυφόροι με καλύτερη διακριτική ικανότητα ώστε να εκτιμηθεί το φαινόμενο με καλύτερη χωρική λεπτομέρεια.

7. Με τη βοήθεια της χαρτογράφησης των περιοχών που πλήττονται συχνότερα από το φαινόμενο της ξηρασίας να γίνει προσπάθεια προστασίας της πανίδας και της χλωρίδας των περιοχών αυτών δημιουργώντας μικρά φράγματα και άλλα έργα βελτίωσης της ποιότητας ζωής των ενδημικών ειδών και του υπόλοιπου πληθυσμού των περιοχών αυτών για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας των περιοχών αυτών.
8. Να γίνει σύγκριση των νέων αναλύσεων με τις παλιές για να εκτιμηθεί η ενδεχόμενη βελτίωση της χωρικής ακρίβειας ενός επεισοδίου ξηρασίας και με το αντίστοιχο οικονομικό κόστος.

## 6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βασιλειάδης Λ. (2010) Χωροχρονική ανάλυση, προσομοίωση και πρόγνωση ξηρασίας στην υδρολογική λεκάνη Πηνειού ποταμού Θεσσαλίας, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 422
2. Γαλάκου Ε. (2004) Εκτίμηση βροχόπτωσης με χρήση meteosat και επίγειων βροχομετρικών στοιχείων. Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 117
3. Δαλέζιος Ρ.Ν., Πρίνος Π., Παπαζαφειρίου Ζ., Παπαμιχαήλ. Δ. (1990) Ένταση και έκταση της ξηρασίας στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα με τη χρήση του δείκτη Palmer (PDSI). Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής υδροτεχνική ένωσης. Τόμος Επεξεργασία – Διάθεση λυμάτων, Ηράκλειο Κρήτης, σελ. 71
4. Δαλέζιος Ρ.Ν. (1999) Περιβαλλοντική εκπαίδευση. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Βόλος, σελ. 502
5. Δαλέζιος Ρ.Ν. (2002) Περιβαλλοντική Τηλεπισκόπηση. Σε: Διαχείριση Περιβαλλοντικών Κινδύνων. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Βόλος, σελ. 29-136
6. Δαλέζιος Ρ.Ν. (2007) Ξηρασία. Σε: Διαχείριση Περιβαλλοντικών Κινδύνων. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Βόλος, σελ. 213-249
7. Δαλέζιος Ρ.Ν., Μπουκουβάλα Ε., Μπλάντα Α., Πισμίχος Ν., Σπυρόπουλος Ν., Ψιλοβίκος Α. (2011) Πιστοποίηση και αξιοπιστία συμβατικών δεικτών εκτίμησης υδρομετεωρολογικής ξηρασίας. Cd πρακτικών 7<sup>ου</sup> Συνεδρίου της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, Αθήνα
8. Κανέλλου Ε. (2006) Εκτίμηση περιοχικής δυναμικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 296
9. Κανέλλου Ε. (2010) Περιοχική εκτίμηση ξηρασίας. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 229
10. Μαριολόπουλος Η. (1938) Το κλίμα της Ελλάδος. Πανεπιστήμιο Αθηνών, σελ. 79-82
11. Παπαζαφειρίου Ζ. (1984) Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, σελ. 471
12. Τσακίρης Γ. (1995) Υδατικοί Πόροι: Τόμος Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, σελ. 675
13. Τσακίρης Γ., Τίγκας Δ., Βαγγέλης Χ. (2007) Επιπτώσεις της Ξηρασίας και των Κλιματικών Αλλαγών στο Επιφανειακό Δυναμικό Παράκτιων Λεκανών Απορροής στη Β. Πελοπόννησο. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων (ΕΕΔΥΠ). Χανιά, σελ. 161-169
14. Τσίρος Ε. (2009) Δορυφορικές μεθοδολογίες αγροκλιματικής - υδροκλιματικής ζωνοποίησης για γεωργική παραγωγή. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 239
15. Φειδάς Χ. (1999) Συμβολή στη ραδιομετρική ανίχνευση καταγιδοφόρων νεφικών συστημάτων και στην ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση των χαρακτηριστικών τους με τη χρήση δορυφορικών εικόνων και επίγειων δεδομένων. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, σελ. 281



ΕΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

16. Alley W.M. (1984) The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Climate and Applied Meteorology*, 23:1100-1109
17. Alley W.M. (1985) The Palmer Drought Severity Index as a measure of hydrologic drought. *Water Resources Bulletin*, 21:105-114
18. Anuradha C.T., Prabhavathy S. (2010) Water resources management for Virudhunagar district using remote sensing and GIS. *International Journal of Earth Sciences and Engineering. Special issue*, 3:55-61
19. Bayarjargal Y., Adyasuren T., Munkhtuya S. (2000) Drought and vegetation monitoring in the arid and semi-arid regions of the Mongolia using remote sensing and ground data. *Proceedings of 21<sup>st</sup> Asian Conference on Remote Sensing. Vol 1, Taipei*, p 372-377
20. Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C., Tucker C.J. (2006) A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 105(1):9-22
21. Becker F., Li Z.L. (1990) Towards a local “split window” method over land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 3:369-393
22. Blaney H.F., Criddle W.D. (1950) Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA Soil Conservation Service, Technical Paper, No 96*, p 48
23. Bonacci O. (1993) Hydrological identification of drought. *Hydrological Processes*, 7:249-262
24. Bucks D.A., Nakayamma F.S., French O.F., Regard W.W., Alexander W.L. (1985) Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress. *Agricultural water management*, 10:61-79
25. Byun H., Wilhite D.A. (1999) Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12:2.747-2.756
26. Caccamo G., Chisholm L.A., Bradstock R.A., Puotinen M.L. (2011) Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in high biomass ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 115(10):2626-2639
27. Carlson R.E., Yarger D.N, Shaw R.H. (1971) Factors affecting the spectral properties of leaves with special emphasis on leaf water status. *Agronomy Journal*, 63:486-489
28. Clevers J.G.P.W., Verhoef W. (1993) LAI estimation by means of the WDVI: A sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 7:43-64
29. Dalezios N.R. (1988) Objective Rainfall Evaluation in Radar Hydrology. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(5):531–546
30. Dalezios N.R., Papazafiriou Z.G., Papamichail D.M., Karacostas T.S. (1991) Drought assessment for the potential of precipitation enhancement in Northern Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 44:75-88
31. Dalezios N.R, Loukas A., Vasiliades L., Liakopoulos H. (2000) Severity - Duration - Frequency analysis of droughts and wet periods in Greece. *Journal of Hydrological Sciences*, 45 (5):751-770

32. Dalezios N.R., Blanta A., Spyropoulos N., Pismichos N., Boukouvala E. (2011) Spatiotemporal classification of drought severity. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment. Vol. 1, Skiathos, pp 171-182
33. Deering D.W. (1978) Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph.D. Dissertation, Texas A & M University, College Station, p 338
34. Delbart N., Kergoat L., Toan T.L., J. Lhermitte J., Picard G. (2005) Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 97:26-38
35. Ding S., Rulinda C.M., Stein A., Bijker W. (2011) NDVI time series and Markov chains to model the change of fuzzy vegetative drought classes. Proceedings of 6th International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images. Art no 6005083, Multi-Temp 2011, p 201-204
36. Domenikiotis C., Tsiros E., Spiliotopoulos M., Dalezios N.R. (2005) Zoning of cotton production areas based on NOAA/AVHRR images. Proceeding of International Symposium in GIS and Remote Sensing: Environmental Applications, Volos, p 119-132
37. Feng R., Ji R., Wang H., Wu J., Zhang Y., Yu W., Cai F., Li L. (2011) Research on the remote sensing monitoring method for large-area spring drought in Liaoning Province. Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Art no 5965047, China, p 3421-3424
38. Guttman N.B., Wallis J.R., Hosking J.R.M. (1992) Spatial Comparability of the Palmer Drought Severity Index. *Water Resources Bulletin*, 28:1111-1119
39. Habib A.S., Chen X., Gong J., Wang H., Zhang L. (2009) Analysis of China vegetation dynamics using NOAA-AVHRR data from 1982 to 2001. *Geo-Spatial Information Science* 12(2):146-153
40. Heim R.R. (2002) A review of twentieth- century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8):1149-1165
41. Hondronikou E., Loukas A., Vassiliades L., Dalezios N.R. (2005) Objective intercomparison of water balance modeling in small watersheds. Proceedings of 6th International Conference of European Water Resources Association at France (in press)
42. Hongwei Z., Huailiang C., Shuanghe S., Chunhui Z. (2008) Drought remote sensing monitoring based on the modified perpendicular drought index method. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. art no 71101F, China, pp. 55-56
43. Huete A.R. (2002) Soil - plant spectral mixtures. In: Lal R. (ed) *Encyclopedia of Soil Science*, 352, Marcel Dekker, Inc., online and print versions, p 1247-1249
44. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., Leeuwen W.Van. (1997) A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS - MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59:440-451
45. Huete A.R., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83:195-213

46. Idso S.B., Jackson R.D., Jr Pinter P.J., Reginato R.J., Hatfield J.L (1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24:45-55
47. Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Jr Pinter P.J. (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17:1133-1138
48. Jamshidi H., Khalili D., Zadeh M.R., Hosseinipour E.Z. (2011) Assessment and comparison of SPI and RDI meteorological drought indices in selected synoptic stations of Iran. *Proceedings of the 2011 World Environmental and Water Resources Congress*. California, p 1161-1173
49. Johnson G.E., Achutuni V.R., Thiruvengadachari S., Kogan F.N. (1993) The role of NOAA satellite data in drought early warning and monitoring: Selected case studies. In: Wilhite D.A. (ed) *Drought assessment, management, and planning: Theory and case studies*. Kluwer Academic Publishers, New York, p 31-48
50. Jordan C.F. (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50:663-666
51. Jupp D.L.B., Tian G., McVicar T.R., Qin Y., Li F. (1998) Monitoring Soil Moisture and Drought Using AVHRR Satellite Data I: Theory. CSIRO Earth Observation Centre Technical Report. Canberra, p 96
52. Justice C., Townshend J. (2002) Special issue on the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): A new generation of land surface monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 83:1-2
53. Kanellou E., Domenikiotis C., Dalezios N.R. (2008a) Description of Conventional and Satellite Drought Indices. Report of Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean, pp 23-57
54. Kanellou E., Tsiros E., Domenikiotis C., Dalezios N.R. (2008b) RDI and VHI estimation in Thessaly based on satellite data. Report of PRODIM (Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean), Athens, pp 233-245
55. Kanellou E., Tsiros E., Domenikiotis C., Dalezios N.R. (2008c) Drought monitoring using several indices. *Proceedings of 4th International Conference on Information and Communication Technologies in Bio and Earth Sciences (HAICTA)*. Athens, pp 32-37
56. Kanellou E., Domenikiotis C., Tsiros E., Dalezios N.R., (2008d) Satellite-based drought estimation in Thessaly. *European Water*, 23/24:111-122
57. Kanellou E., Domenikiotis C., Dalezios N.R. (2009) Mapping of the Reconnaissance Drought Index (RDI) based on Remote Sensing and GIS over Greece. *Proceedings of European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2009*. Vol 11 Poster, Vienna, p 8464-1
58. Katergi N., Itier B., Ferreira I. (1988) Etude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agronomie (Paris)*, 8:425-433
59. Keener M.E., Kircher P.L. (1983) The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agricultural meteorology*, 28:339-349
60. Keyantash J., Dracup J.A. (2002) The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of American Meteorological Society*, pp 1167-1180

61. Kogan F.N. (1995) Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar - orbiting satellite data. *Bulletin of American Meteorological Society*, 76:655-668
62. Kogan F.N. (1997) Global drought watch from space. *Bulletin of American Meteorological Society*, 78:621-636
63. Kogan F.N. (2000) Contribution of remote sensing to drought early warning. In: Wilhite D.A., Wood D.A. (eds) *Early warning systems for drought preparedness and drought management*. World Meteorological Organization, Geneva, p 75-87
64. Kogan F.N. (2001) Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of American Meteorological Society*, 82(9):1949-1964
65. Kogan F.N. (2002) World droughts in the new millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices. *EOS Transaction, American Geophysics Union*, 83(48):562-563
66. Koutroulis A.G., Vrohidou A.E.K., Tsanis I.K. (2011) Spatiotemporal Characteristics of meteorological drought for the Island of Crete. *Journal of Hydrometeorology*, 12(2):206-226
67. Krause P., Boyle D.P., Base F. (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Proceedings of the advances in geosciences*. p 89-97
68. Lambin E.F., Ehrlich D. (1996) The Surface Temperature - Vegetation Index space for land cover and land - cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 17:463- 487
69. Lillesand T.M., Kiefer R.W. (1979) *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons, New York, pp 612
70. Loukas A., Vasiliades L., Spiliotopoulos M., Bampzelis D., Domenikiotis C., Dalezios N.R. (2002) An assessment of regional droughts in Greece using two meteorological drought indices. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Hellenic Conference in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Ioannina, p 708-716
71. Mavromatis T. (2010) Use of drought indices in climate change impact assessment studies: An application to Greece. *International Journal of Climatology*, 30(9):1336-1348
72. McVicar T.R., Jupp D.L.B., Yang X., Tian G. (1992) Linking regional water balance models with remote sensing. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing*. Ulaanbaatar, p B.6.1-B.6.6
73. McVicar T.R., Jupp D.L.B. (1998) The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a Review. *Agricultural Systems*, 57(3):399-468
74. Morid S., Smakhtin V., Moghaddasi M. (2006) Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26:971-985
75. Nalbantis I. (2008) Drought and streamflow. *Proceedings of the International Symposium of Water Shortage Management*, Athens, pp 53-64
76. Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282-290
77. Qi S., Li Z., Wang C. (2009) Study on drought-stricken and drought-damaged farmland in China during 1982-2001 with remote sensing. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Art no 749252, Cardiff, p 1-8

78. Palmer W.C. (1965) Meteorological drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C. pp 58
79. Piechota T.C., Dracup J.A. (1996) Drought and regional hydrology variation in the United States: associations with the El Nino- Southern Oscillation. *Water Resources Research*, 32(5):1359-1373
80. Rahimzadeh Bajgiran P., Darvishsefat A.A., Khalili A., Makhdoum M.F. (2008) Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the Northwest of Iran. *Journal of Arid Environments*, 72(6):1086-1096
81. Redmond K. (1991) Climate monitoring and indices. *Proceedings of Drought Management and Planning Seminar and Workshop, Denver Colorado*, p 29-33
82. Reed B.C. (1993) Using remote sensing and Geographic Information Systems for analyzing landscape/drought interaction. *International Journal of Remote Sensing* 14:3489-3503
83. Ripple W.J. (1986) Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52:1669-1675
84. Rundquist B.C., Jr. Harrington J.A. (2000) The effects of climatic factors on vegetation dynamics of tall grass and short grass cover. *GeoCarto International*, 15:31-36
85. Sandholt I., Rasmussen K., Andersen J. (2002) A simple interpretation of the surface temperature / vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79:213-224
86. Stanghellini C., De-Lorenzi F. (1994) A comparison of soil and canopy temperature - based methods for the early detection of water stress in a simulated patch of pasture. *Irrigation Science*, 14:141-146
87. Thenkabail P.S. (2003) Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 24:839-877
88. Thenkabail P.S., Gamage M.S.D.N., Smakhtin V.U. (2004) The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in southwest Asia. *Research Report, International Water Management Institute*, 85:1-25
89. Thiruvengadachari S., Gopalkrishna H.R. (1993) An Integrated PC Environment for Assessment of Drought. *International Journal of Remote Sensing*, 14:3201-3208
90. Thompson D.R., Wehmanen O.A. (1980) Using Landsat digital data to detect moisture stress in corn-soybean growing regions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46:1087-1093
91. Tian G., Li F., Sui H., Zheng K. (1989) Estimating of evapotranspiration and soil moisture using NOAA-AVHRR image and ground based meteorological data. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Kuala Lumpur*, p A.I.8.1-A.I.8.6
92. Tsakiris G., Vangelis H. (2005) Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10:3-11
93. Tsakiris G., Pangalou D., Vangelis H. (2007) Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5):821-833
94. Tsakiris G. (2008) Final Report of Proactive Management of Water Systems to Face Drought and Water Scarcity in Islands and Coastal Areas of the Mediterranean (PRODIM), Athens, pp 445

95. Tucker C.J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8:127-150
96. UNEP, (1992) *World Atlas of Desertification*. Edward Arnold, London, p 69
97. Ungani L.S., Kogan F.N. (1998) Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 63:219-232
98. Vangelis H., Spiliotis M., Tsakiris G. (2010) Drought Severity Assessment Based on Bivariate Probability Analysis. *Water Resources Management*, 25:357-371
99. Vasiliades L., Loukas A. (2009) Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece. *Desalination*, 237(1-3):3-21
100. Walsh J.S. (1987) Comparison of NOAA AVHRR data to meteorological drought indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(8):1069-1074
101. Wang J., Price K.P., Rich P.M. (2001) Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22:3827-3844
102. Wen X., Zhao H., Li G. (2011) Drought/flood change in the guanzhong region between the 8th and the 13th century. *Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*. Art no 5964476, RSETE 2011, p 1118-1121
103. White D.H. (1990) A study of the feasibility of using simulation models and mathematical programs as aids to drought monitoring and management. *Bureau of Rural Resources, Canberra*, 2:90
104. Wilhite D.A. 2005 *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp 431
105. Wilhite D.A., Glantz M.H. (1985) Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10:111-120
106. Whipple W. (1996) Integration of water resources planning and environmental regulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3):189-196
107. Wooster M.J., Perry G.L.W., Zoumas A. (2011) Fire, drought and El Niño relationships on Borneo during the pre-MODIS era (1980-2000). *Biogeosciences Discussions*, 8(1):975-1013
108. World Meteorological Organization (1975) *Drought and agriculture*. Publ. WMO 392, Geneva, pp 127
109. World Meteorological Organization (1986) *The Global Climate System, A contribution to the Global Environmental Monitoring System*. Geneva
110. Yating Z., Ming W., Ailian M. (2010) Drought monitoring with remote sensing data and atmospheric elements. *Proceedings of International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering*. Art no 5493085, CESCE 2010, p 256-259
111. You L., Qin Q., Dong H., Li J., Wang J., Yang X. (2010) The component-based design and development of remote sensing system for drought monitoring. *Proceedings of 30th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Category number CFP10IGA-ART, Honolulu, Code 83256

112. Yu M., Gao Y., Zhang H. (2010) Improvement of Ts-NDVI space method in drought monitoring. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(9):243-250
113. Zhou T., Li C., Yu F., Chai Z (2011) Evolution characteristics analysis of meteorological drought based on GIS. *Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*. Art no 5964735, China, p 2160-2163

#### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

114. DSpace@NTUA (2011) DSpace at NTUA (Beta), Κεντρική Βιβλιοθήκη Ε.Μ.Π., Ιδρυματικό Αποθετήριο, Διπλωματικές Εργασίες: [http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/5573?mode=simple&submit\\_simple](http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/5573?mode=simple&submit_simple) Πρόσβαση: 26/01/2012)
115. MEDROPLAN (2007) Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning: <http://www.iamz.ciheam.org/medroplan/index.htm> (Πρόσβαση: 12-05-2011)
116. Natural Resources Canada (2011) Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Earth Sciences Sector, Canada Centre for Remote Sensing: [http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/index\\_e.php](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/index_e.php) (Πρόσβαση: 11-05-2011)

## 7. ABSTRACT

Droughts affect agriculture, environment and the economy of several regions globally. In this thesis, several drought features are analyzed and assessed by using remotely sensed Reconnaissance Drought Index (RDI). The developed methodology is applied to the basin of Pinios River of Thessaly, Central Greece, which is the major agricultural area in the country.

Developing an integrated methodology, which is easy to use it is possible to assess droughts very effectively. All required data are derived from monthly remotely sensed RDI images for the period 1981-2001. The images also extracted from NOAA/AVHRR satellite and cover entire Thessaly with a spatial resolution of 8x8 km for 20 consecutive hydrological years (October 1981 - September 2001).

The estimation of Reconnaissance Drought Index (RDI) is based on conventional or remote sensing data and techniques. This index is calculated using precipitation and potential evapotranspiration. Estimation of RDI is achieved with the use of monthly temperature maps, crop coefficient ( $K_c$ ) maps, sunlight maps ( $p$ ), potential evapotranspiration maps using Blaney - Criddle ( $ET_p$ ) method and rain maps ( $P$ ). In this study, RDI is calculated on a monthly and annual basis. Then several drought features are calculated such as severity, duration, periodicity, areal extent, onset and end time.

Drought mapping takes place for each drought episode within the data base of 20 consecutive hydrological years.

Especially interest depict the price charts of all the categories drought of the eight drought events, through which and in combination with the maps have been counted the areas which are afflicted more often from apical drought ( $< -2$  in RDI scale). Also there have been allocated



the periods of its occurrence in these areas. More specific some years of drought as 1984, 1989 and 1991 presented apical drought.

There are depicted in the diagram the apical prices of all the drought events and furthermore, according this diagram, towered two drought subcategories, the forceful and the mean or weak. Observing the development of this phenomenon the first months, is appointed the subcategory in which belongs and thereafter the analogue forerunner evaluation of the development of the event.

Hence it has been observed that in all five indexes the prices that have been calculated are in the limits of the acceptable prices and in some cases are very close in the optimal prices as for the efficiency index,  $E_{ff}$  its annual price is 0.7 and for the coefficient of determination,  $R^2$  0.87 with optimal the 1 and for the two indexes. The same for the bias error, BIAS its annual price is -0.15 with optimal the 0. Finally the two indexes of the median squared error (RMSE), one for the earthly and one for the satellite data presented prices close to 1 (0.92 and 0.95 respectively) with optimal the 0.

The results show an increase in the areal extent during each drought episode. Also droughts are classified in two classes, namely small areal extent drought and large areal extent drought, respectively. The duration of each drought episode is 12 or 13 months coincides closely to the hydrological years. The onset of large droughts coincides with the beginning of the hydrological years, whereas the onset of small drought is in spring. During each drought episode the maximum severity and areal extent occurs in the summer. The empirical relationship between areal extent and severity can be use for prognostic potential of drought development during each episode.

The remote sensing potential is explored by assessing several drought features towards drought severity classification. The results are encouraging since drought episodes are classified in two distinct classes with prognostic ability for each class.

Error statistics are applied for validation of this methodology, namely Efficiency Coefficient ( $E_{ff}$ ), Root Mean Square Error (RMSE) for conventional and satellite data, Statistical Bias (BIAS) and Coefficient of Determination ( $r^2$ ). The evolution of episodes of drought in a hydrological year can be assessed by estimating 3, 6, 9 and 12-month time interval of error statistics.

**Key words:** Drought, RDI, Remote Sensing, Error statistics

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## Παράρτημα Α

### Δορυφορικοί δείκτες ξηρασίας

1. Δείκτης απόκλισης του NDVI (Deviation NDVI index-  $DEV_{NDVI}$ )
2. Δείκτης ενισχυμένης βλάστησης (Enhanced Vegetation Index- EVI)
3. Δείκτης κατάστασης βλάστησης (Vegetation Condition Index- VCI)
4. Μηνιαίος δείκτης κατάστασης βλάστησης (Monthly Vegetation Condition Index- MVCI)
5. Δείκτης κατάστασης θερμοκρασίας (Temperature Condition Index- TCI)
6. Δείκτης υγιούς βλάστησης (Vegetation Health Index)
7. Δείκτης θερμοκρασίας κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Temperature Index- NDTI)
8. Δείκτης υδατικού στρες καλλιέργειας (Crop Water Stress Index- CWSI)
9. Δείκτης δριμύτητας ξηρασίας (Drought Severity Index- DSI)
10. Δείκτης ξήρανσης θερμοκρασίας- βλάστησης (Temperature- Vegetation Dryness Index TVDI)
11. Δείκτης νερού κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Water Index- NDWI)
12. Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index- NDVI)
13. Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI)

## 1. Δείκτης απόκλισης του NDVI ( $DEV_{NDVI}$ )

Για υπολογιστεί η δριμύτητα (ή έκταση) μιας ξηρασίας μετράται η απόκλιση των τιμών NDVI από το μέσο όρο μιας μακροχρόνιας σειράς τιμών του ίδιου δείκτη (Deviation NDVI index -  $DEV_{NDVI}$ ) (Ding *et al.* 2011, Yu *et al.* 2010). Η απόκλιση αυτή υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ των τιμών του δείκτη για την τρέχουσα χρονική στιγμή και του μέσου όρου των τιμών για τον ίδιο μήνα από ένα πλήθος αιτών.

$$DEV_{NDVI} = NDVI_i - NDVI_{mean,m} \quad (A.1)$$

όπου,  $NDVI_i$  είναι η τρέχουσα τιμή NDVI (πχ μήνα) και  $NDVI_{mean,m}$  είναι ο μέσος όρος NDVI για τον ίδιο μήνα.

Σύμφωνα με τον δείκτη απόκλισης του NDVI ( $DEV_{NDVI}$ ) όσο πιο αρνητικές τιμές εμφανίζονται τόσο πιο μεγάλο είναι το φαινόμενο της ξηρασίας. Σε γενικές γραμμές, η απόκλιση αυτή παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την κατάσταση της περιοχής από έναν απλό δείκτη ξηρασίας, διότι συσχετίζει την απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες υγιούς βλάστησης, που επικρατούν στις υγρές χρονικές περιόδους (Thenkabail *et al.* 2004). Μπορεί να παρερμηνευθεί όμως εάν σε ένα δεδομένο έτος η μεταβλητότητα των συνθηκών βλάστησης μιας περιοχής είναι πολύ υψηλή διότι η απόκλιση από το μέσο όρο δε λαμβάνει υπόψη την τυπική απόκλιση.

## 2. Δείκτης ενισχυμένης βλάστησης (EVI)

Ο δείκτης ενισχυμένης βλάστησης (Enhanced Vegetation Index - EVI) αναπτύχθηκε από τους Huete *et al.* (2002) με τη χρήση δεδομένων του δορυφόρου MODIS. Πλεονεκτεί έναντι του δείκτη NDVI διότι λαμβάνει δεδομένα από περισσότερα δορυφορικά κανάλια. Ο δείκτης EVI υπολογίζεται ως εξής:

$$EVI = G * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{Red} - C_2 * \rho_{Blue} + L} \quad (A.2)$$

όπου  $\rho_{NIR}$ ,  $\rho_{Red}$ ,  $\rho_{Blue}$  είναι η ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο, στο υπέρυθρο και στο υπεριώδες φάσμα, αντίστοιχα,  $C_1$ ,  $C_2$  είναι οι συντελεστές διόρθωσης ατμοσφαιρικής αντίστασης για το υπέρυθρο και το υπεριώδες, αντίστοιχα,  $L$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της φωτεινότητας της φυτοκάλυψης, και  $G$  ο παράγοντας κέρδους.

Οι συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του EVI είναι:  $L = 1$ ,  $C_1 = 6$ ,  $C_2 = 7.5$ , και  $G = 2.5$ . Ο δείκτης EVI εμφανίζει έντονη ευαισθησία στην υψηλή βιομάζα των περιοχών και διασφαλίζει την όσο το δυνατόν καλύτερη παρακολούθηση της βλάστησης μέσω της μείωσης των ατμοσφαιρικών επιρροών (Huete 2002). Οι σύνθετοι υπολογισμοί κατά την εφαρμογή του, όμως, κατέστησαν τη χρήση του περιορισμένη.

### 3. Δείκτης κατάστασης βλάστησης (VCI)

Ο δείκτης αυτός (Vegetation Condition Index - VCI) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Kogan (1995, 1997). Υπολογίζει την απόκλιση της τρέχουσας τιμής του NDVI από την ελάχιστη τιμή μιας χρονοσειράς δορυφορικών δεδομένων του ίδιου δείκτη (Thenkabail *et al.* 2004).

$$VCI_j = \frac{(NDVI_j - NDVI_{\min}) * 100}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (A.3)$$

όπου,  $NDVI_{\max}$  και  $NDVI_{\min}$  είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του δείκτη NDVI, αντίστοιχα, που υπολογίζονται από ένα μεγάλο πλήθος δορυφορικών δεδομένων (π.χ., 18 χρόνια) για μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (πχ. μια εβδομάδα), και  $NDVI_j$

είναι η τρέχουσα τιμή του δείκτη της ίδιας χρονικής διάρκειας (Rahimzadeh Bajgiran *et al.* 2008).

Οι τιμές που δίνει ο δείκτης VCI εκφράζονται σε ποσοστό επί τις εκατό. Σε περιόδους ακραίας ξηρασίας οι τιμές τείνουν στο 0%, ενώ ποσοστό πάνω από 50% θεωρούνται ικανοποιητικές συνθήκες βλάστησης. Ο Kogan (1995) καθόρισε την τιμή 35% του VCI ως το όριο που προσδιορίζει τις ακραίες συνθήκες ξηρασίας. Στο 100% του δείκτη η κατάσταση της βλάστησης θεωρείται ως άριστη. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο δείκτης NDVI της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής (μήνας) ισούται με το  $NDVI_{max}$ . Ο δείκτης VCI αναπτύχθηκε για να συγκρίνει τις μεταβολές στις τιμές του NDVI λόγω καιρικών συνθηκών.

#### 4. Μηνιαίος δείκτης κατάστασης βλάστησης (MVCI)

Ο μηνιαίος δείκτης κατάστασης βλάστησης (Monthly Vegetation Condition Index – MVCI) προσδιορίζει τις μεταβολές του NDVI χρησιμοποιώντας δεδομένα χρονοσειράς ίδιων χρονικών περιόδων διαδοχικών ετών (π.χ. το Σεπτέμβριο μιας σειράς ετών). Είναι μια διαφοροποιημένη έκφραση του δείκτη VCI. Η παρακάτω εξίσωση ορίζει τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη παίρνοντας ως τυχαίο παράδειγμα το μήνα Σεπτέμβριο.

$$MVCI_{j, Sep} = \frac{NDVI_{j, Sep} - NDVI_{min, Sep}}{NDVI_{max, Sep} - NDVI_{min, Sep}} \quad (A.4)$$

όπου  $MVCI_{j, Sep}$  είναι η εικόνα των τιμών του μηνιαίου δείκτη κατάστασης βλάστησης για μια χρονική στιγμή  $j$ , η οποία βρίσκεται εντός του μηνός Σεπτεμβρίου,  $NDVI_{j, Sep}$  είναι η εικόνα του δείκτη NDVI του συγκεκριμένου μήνα,  $NDVI_{max, Sep}$  είναι η εικόνα των μεγίστων τιμών NDVI που προέκυψαν από όλες τις εικόνες του μήνα Σεπτέμβριου κάθε χρονιάς της χρονοσειράς και  $NDVI_{min, Sep}$  είναι η εικόνα των ελαχίστων τιμών

NDVI που προέκυψαν από όλες τις εικόνες του Σεπτεμβρίου της χρονοσειράς. Με τον δείκτη αυτόν επιτρέπεται η σύγκριση μιας τιμής του δείκτη NDVI ενός μηνός με όλες τις τιμές των NDVI των ίδιων μηνών όλων των ετών της χρονοσειράς (McVicar & Jupp 1998).

##### 5. Δείκτης κατάστασης θερμοκρασίας TCI)

Ο δείκτης κατάστασης θερμοκρασίας (Temperature Condition Index TCI) εμφανίζει πολλές ομοιότητες με τον VCI. Προτάθηκε και αυτός από τον Kogan (1995, 1997) και υπολογίζεται ομοίως με τον VCI, με μια διαφορά στο ότι για τον υπολογισμό της απόκρισης βλάστησης μετρά τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Όσο αυξάνουν οι τιμές της θερμοκρασίας τόσο εντονότερη είναι η ξηρασία. Ο TCI βασίζεται σε δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας λαμπρότητας (Brightness Temperature), όπως αποκαλείται, και αντιπροσωπεύει την απόκλιση του τρέχοντος μηνός (ή εβδομάδας) από τη μέγιστη τιμή που καταγράφηκε (Thenkabail *et al.* 2004). Υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$TCI_j = \frac{(BT_{\max} - BT_j)}{BT_{\max} - BT_{\min}} * 100 \quad (A.5)$$

όπου η BT είναι η θερμοκρασία λαμπρότητας (κανάλι 4 του δορυφόρου NOAA/AVHRR) (Johnson *et al.* 1993). Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της BT υπολογίζονται από μια εκτεταμένη χρονοσειρά δορυφορικών εικόνων (π.χ. 18 ετών) για κάθε εβδομάδα ή μήνα j. Και ο δείκτης αυτός εκφράζεται σε ποσοστό επί τις εκατό όπου τιμές της τάξεως του 50%, υποδηλώνουν φυσιολογικές συνθήκες θερμοκρασίας για το μήνα μελέτης (BT<sub>j</sub>), ενώ όταν το ποσοστό πλησιάζει το 100%, η θερμοκρασία λαμπρότητας είναι ίση με την ελάχιστη θερμοκρασία όλων των pixel για τη χρονοσειρά



των εικόνων που υπολογίστηκαν. Όταν, τέλος, οι τιμές του TCI προσεγγίζουν το 0% υποδηλώνουν αυξημένες συνθήκες ξηρασίας για τον μήνα που εξετάστηκε και η θερμοκρασία λαμπρότητας, του ίδιου μήνα, είναι ίση με τη μέγιστη θερμοκρασία όλων των pixel για τη χρονοσειρά των εικόνων που μελετήθηκαν. Εάν οι τιμές του TCI επιμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα αυτό δηλώνει την ανάπτυξη ενός επεισοδίου ξηρασίας.

Ο δείκτης TCI ίσως είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται μηνιαία ή εποχικά διότι εμφανίζει κάποια μειονεκτήματα όπως το γεγονός ότι δε λαμβάνει υπόψη του την επίδραση των διαφόρων μετεωρολογικών συνθηκών και τις εποχικές διακυμάνσεις κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας της γης (Becker 1990, Morid *et al.* 2006).

#### 6. Δείκτης υγιούς βλάστησης (VHI)

Ο δείκτης υγιούς βλάστησης (Vegetation Health Index VHI) αναπτύχθηκε από τον Kogan (2001, 2002) ο οποίος για τον προσδιορισμό του χρησιμοποίησε έναν συνδυασμό των δεικτών VCI και TCI. Εφαρμόζεται κυρίως στην παρακολούθηση της υγείας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας της βλάστησης, όπως επίσης και για τον προσδιορισμό των περιοχών που εμφανίζουν επεισόδιο ξηρασίας (Bayarjargal *et al.* 2006. Ο VHI υπολογίζεται παίρνοντας το ίδιο ποσοστό βαρύτητας των δεικτών VCI και TCI. Πιο συγκεκριμένα εκφράζεται ως:

$$VHI = 0.5(VCI) + 0.5(TCI) \quad (A.6)$$

Ενώ ο VCI χαρακτηρίζει με διαφορετικό τρόπο τις συνθήκες υγρασίας της βλάστησης και ο TCI, αντίστοιχα, της θερμοκρασίας, ο VHI αντιπροσωπεύει τη συνολική υγεία της βλάστησης. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ολοκληρωμένη

χαρτογράφηση της ξηρασίας καθώς οι συνθήκες αυτής διαχωρίζονται σε πέντε κατηγορίες (Πίνακας Α.1).

**Πίνακας Α.1:** Κατηγοριοποίηση ξηρασίας σύμφωνα με το δείκτη VHI

Κατηγορίες ξηρασίας	Τιμές του δείκτη VHI
Ακραία ξηρασία	<10.0
Έντονη ξηρασία	<20.0
Μέτρια ξηρασία	<30.0
Ελαφριά ξηρασία	<40.0
Καθόλου ξηρασία	>40.0

#### 7. Δείκτης θερμοκρασίας κανονικοποιημένης διαφοράς (NDTI)

Ο δείκτης θερμοκρασίας κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Temperature Index NDTI) χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της εποχικής τάσης από την ανάλυση των ημερήσιων εικόνων εδαφικής θερμοκρασίας. Αναπτύχθηκε από τους McVicar *et al.* (1992) και Jupp (1998) και παίρνει δεδομένα από τον αισθητήρα του δορυφόρου AVHRR. Ο δείκτης NDTI υπολογίζεται ως εξής:

$$NDTI = \frac{T_{\infty} - T_s}{T_{\infty} - T_0} \quad (A.7)$$

όπου  $T_{\infty}$  είναι η θερμοκρασία εδάφους που αντιστοιχεί σε άπειρη επιφανειακή αντίσταση (π.χ. η εξατμισοδιαπνοή ET είναι μηδέν),  $T_s$  είναι η θερμοκρασία εδάφους του αισθητήρα AVHRR και  $T_0$  είναι η θερμοκρασία για μηδενική επιφανειακή αντίσταση (η εξατμισοδιαπνοή ET ισούται με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή  $ET_p$ ).

Οι παράμετροι που καταγράφονται καθημερινά από τους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι η θερμοκρασία του αέρα και η βροχόπτωση (McVicar & Jupp 1998, Caccamo *et al.* 2001) Για τον υπολογισμό όμως των παραμέτρων  $T_{\infty}$  και

Το χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου, για το οποίο απαιτούνται μετεωρολογικές παράμετροι όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, καθώς επίσης και παράμετροι βλάστησης.

#### 8. Δείκτης υδατικού στρες καλλιέργειας (CWSI)

Ο δείκτης υδατικού στρες καλλιέργειας (Crop Water Stress Index CWSI) πρόκειται για μια εμπειρική μέθοδο ποσοτικοποίησης του υδατικού στρες στις ξηρές περιοχές, που αναπτύχθηκε από τους Idso *et al.* (1981). Η μεθοδολογία του δείκτη βασίζεται στον προσδιορισμό των μη-στρες συνθηκών, είναι εξειδικευμένη για κάθε καλλιέργεια και εν μέρει επηρεάζεται από το κλίμα (Bucks *et al.* 1985, Bonacci 1993). Ο δείκτης CWSI υπολογίζεται ως εξής:

$$CWSI = \frac{T_c - T_{cmin}}{T_{cmax} - T_{cmin}} = 1 - \frac{E_d}{E_{pd}} \quad (A.8)$$

$$\frac{E_d}{E_{pd}} = m_{ad} \quad (A.9)$$

όπου  $T_c$  είναι η παρατηρούμενη θερμοκρασία μιας περιοχής υπό υδατικό στρες (αναλογεί μια τιμή για κάθε pixel),  $T_{cmin}$  είναι η παρατηρούμενη θερμοκρασία μιας πλήρως αρδευόμενης περιοχής,  $T_{cmax}$  είναι μια υποθετική τιμή θερμοκρασίας που εκτιμάται βάσει της παραδοχής ότι η καθαρή ακτινοβολία μεταφράζεται σε θερμοκρασία (Katergi *et al.* 1988),  $E_d$  είναι η ημερήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή,  $E_{pd}$  είναι η ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή και  $m_{ad}$  είναι το διαθέσιμο ποσοστό υγρασίας, το οποίο προκύπτει από το λόγο της ημερήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής προς τη δυνητική εξατμισοδιαπνοής.

Μια νέα τροποποιημένη μορφή του δείκτη CWSI αναπτύχθηκε από τους Jackson *et al.* (1981), οι οποίοι πρόσθεσαν ορισμένες μεταβλητές όπως την καθαρή ακτινοβολία, το έλλειμμα της πίεσης των υδρατμών και την αεροδυναμική αντίσταση. Η νέα αυτή θεωρητική προσέγγιση προσδιορισμού του υδατικού στρες χρησιμοποιώντας το δείκτη CWSI παρουσιάζει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα από την πρώτη εμπειρική προσέγγιση, κυρίως σε περιοχές με πολύ υψηλές συνθήκες υγρασίας (Keener & Kircher 1983). Οι κατηγορίες της ξηρασίας, σύμφωνα με το δείκτη CWSI, παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.2.

**Πίνακας Α.2:** Κλιματικές συνθήκες σύμφωνα με το δείκτη CWSI

<b>Κλιματικές συνθήκες</b>	<b>Τιμές δείκτη CWSI</b>
Έντονη ξηρασία	> 0.913
Μέτρια ξηρασία	0.912 to 0.765
Ελαφριά ξηρασία	0.764 to 0.617
Κανονικές συνθήκες	0.616 to 0.322
Συνθήκες υγρασίας	< 0.321

Ένας βασικός παράγοντας ανάπτυξης των καλλιεργειών είναι η ορθολογική χρήση του νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές που το έχουν μεγάλη ανάγκη, κάτι που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του δείκτη CWSI. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της περιοχικής εδαφικής υγρασίας και την παρακολούθηση της ξηρασίας στη Βόρεια πεδιάδα της Κίνας (Tian *et al.* 1989, Hongwei *et al.* 2009). Επίσης εφαρμόστηκε σε καλλιέργεια γρασιδιού σε θερμοκήπιο και έδειξε πολύ καλή προσομοίωση των συνθηκών υδατικού στρες στην καλλιέργεια (Stangehellini & De Lorenzi 1994).

## 9. Δείκτης δριμύτητας ξηρασίας (DSI)

Ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας (Drought Severity Index DSI) αναπτύχθηκε με σκοπό τη σύγκρισή του με άλλους δείκτες ξηρασίας. Εφαρμόστηκε από τους Bayarjargal *et al.* (2006) με βάση μια παλαιότερη προσέγγισή τους Bayarjargal *et al.* (2000), η οποία εκφράζει τις τιμές των μεταβλητών σε ίδια κλίμακα και τις καθιστά συγκρίσιμες. Ο DSI υπολογίζεται από τη διαφορά των κανονικοποιημένων τιμών της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους (LST) και του δείκτη βλάστησης (NDVI) για ένα συγκεκριμένο μήνα. Ο DSI υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$DSI_{ijk} = \Delta LST_{ijk} - \Delta NDVI_{ijk} \quad (A.10)$$

όπου,  $DSI_{ijk}$  είναι η τιμή του DSI για ένα pixel  $i$  και μήνα  $j$ , έτους  $k$ , και

$$\Delta LST_{ijk} = \frac{\overline{LST}_{ij} - LST_{ijk}}{\sigma LST_{ij}} \quad (A.11)$$

$$\Delta NDVI_{ijk} = \frac{\overline{NDVI}_{ij} - NDVI_{ijk}}{\sigma NDVI_{ij}} \quad (A.12)$$

όπου,  $\overline{LST}_{ij}$  και  $\overline{NDVI}_{ij}$  είναι οι μέσοι όροι θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (LST) και δείκτη βλάστησης (NDVI), αντίστοιχα, μιας μεγάλης χρονοσειράς ετών για ένα pixel  $i$  και μήνα  $j$ ,  $LST_{ijk}$  και  $NDVI_{ijk}$  είναι οι τιμές της LST και του NDVI, αντίστοιχα, για ένα pixel  $i$  και μήνα  $j$ , έτους  $k$ , και  $\sigma LST_{ij}$ ,  $\sigma NDVI_{ij}$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις της LST και του NDVI, αντίστοιχα, για pixel  $i$  και μήνα  $j$ .

## 10. Δείκτης ξηρασίας θερμοκρασίας – βλάστησης (TVDI)

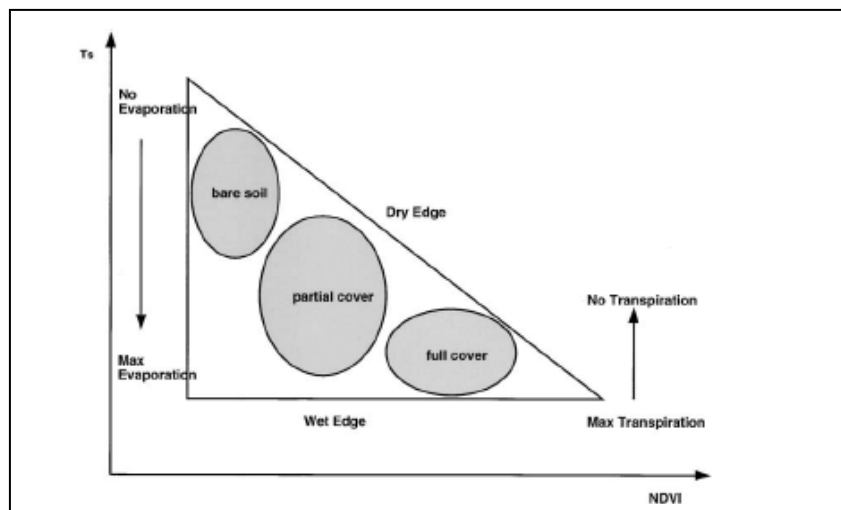
Με τον δείκτη ξήρανσης θερμοκρασίας - βλάστησης (Temperature - Vegetation Dryness Index- TVDI) εκτιμάται η υγρασία της επιφάνειας του εδάφους. Παίρνει τιμές

από 0 όπου έχουμε ακραία υγρασία και έντονη εξατμισοδιαπνοή έως 1 όπου έχουμε ακραία ξηρασία και περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Ο δείκτης TVDI ορίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω Σχέσεις (A.13) και (A.14):

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s\min}}{T_{s\max} - T_{s\min}} \quad (A.13)$$

$$T_{s\max} = a + bNDVI \quad (A.14)$$

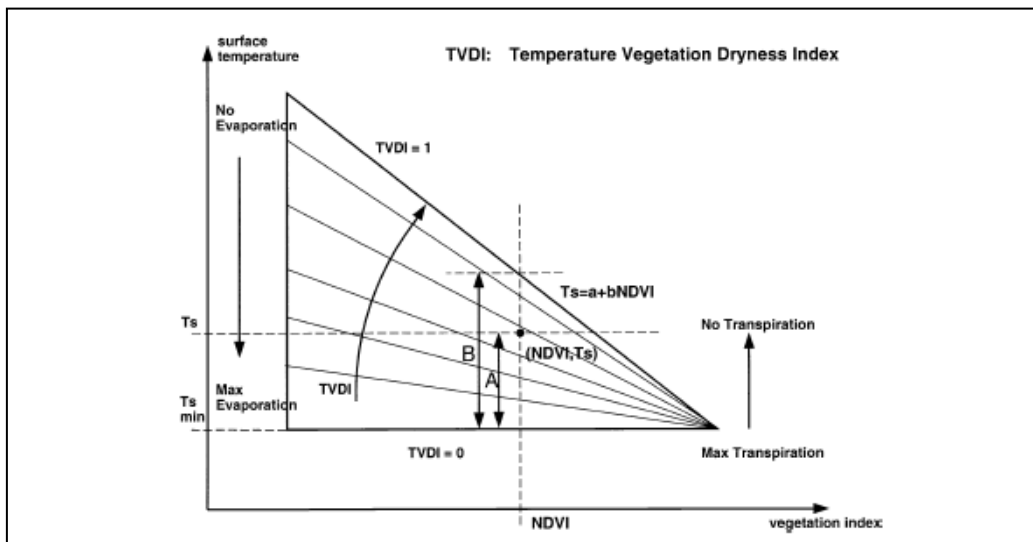
όπου  $T_{s\min}$  είναι η ελάχιστη θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους στο τρίγωνο τιμών (Σχ. A.1), η οποία καθορίζει την ακραία τιμή των υγρών συνθηκών,  $T_s$  είναι η παρατηρούμενη θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους σε συγκεκριμένο pixel, NDVI είναι η παρατηρούμενη τιμή του δείκτη βλάστησης,  $T_{s\max}$  είναι η μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους που παρατηρείται για μια συγκεκριμένη τιμή NDVI.



**Σχήμα A.1:** Σύνολα «τρίγωνου» τιμών του λόγου  $T_s/NDVI$  για ακραίες συνθήκες ξηρασίας (Dry edge) και υγρασίας (Wet edge) και είδους φυτοκάλυψης

Οι τιμές  $a$ ,  $b$  είναι συντελεστές της γραμμικής εξίσωσης (A.14), οι οποίοι καθορίζουν την ακραία τιμή των συνθηκών ξηρασίας. Για να αντιπροσωπεύουν ολόκληρο το φάσμα των συνθηκών μιας περιοχής, οι συντελεστές αυτοί,  $a$  και  $b$ ,

υπολογίζονται από τα εικονοστοιχεία (pixels) μιας ευρύτερης περιοχής. Έτσι αντιπροσωπεύονται οι ακραία ξηρές και υγρές περιοχές αντίστοιχα, αλλά και περιοχές με γυμνό έδαφος και με πλήρη φυτοκαλυμμένη επιφάνεια. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του NDVI, οι καμπύλες της εξίσωσης του δείκτη TVDI πλησιάζουν αρκετά (Σχ. A.2), οπότε μειώνεται η ακρίβεια της προσέγγισης (Sandholt *et al.* 2002).



**Σχήμα A.2:** Ο δείκτης TVDI για ένα δεδομένο pixel ( $T_s/NDVI$ ) υπολογίζεται ως αναλογία μεταξύ των καμπύλων A και B (Lambin & Ehrlich 1996)

#### 11. Δείκτης νερού κανονικοποιημένης διαφοράς (NDWI)

Η βασική λειτουργία του δείκτη νερού κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Water Index - NDWI) είναι το ότι χρησιμοποιεί δύο κανάλια στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου του φάσματος (περιοχές των 0,86  $\mu\text{m}$  και 1,24  $\mu\text{m}$ ). Έχει παρόμοιο υπολογισμό με το δείκτη NDVI, που ορίζεται ως εξής (Delbart *et al.* 2005) :

$$NDWI = \frac{\rho(0.86\mu\text{m}) - \rho(1.24\mu\text{m})}{\rho(0.86\mu\text{m}) + \rho(1.24\mu\text{m})} \quad (\text{A.15})$$

όπου,  $\rho(\lambda)$  είναι η ανάκλαση στα συγκεκριμένα μήκη κύματος,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος. Το  $\rho(\lambda)$  ισούται με:

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi L(\lambda)}{\cos(\theta_0) E_0(\lambda)} \quad (\text{A.16})$$

όπου,  $L(\lambda)$ ,  $\theta_0$ , και  $E_0(\lambda)$  είναι η μετρημένη ακτινοβολία, η ζενίθεια γωνία του ηλίου και η ηλιακή ακτινοβολία στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας, αντίστοιχα.

## 12. Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI)

Ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) έγινε γνωστός για πρώτη φορά από τον Tucker (1979) ως ένας δείκτης που προσδιορίζει την υγεία και την πυκνότητα της βλάστησης. Ο NDVI υπολογίζεται από τον τύπο:

$$NDVI = \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{red}}{\lambda_{NIR} + \lambda_{red}} \quad (\text{A.17})$$

όπου  $\lambda_{NIR}$  και  $\lambda_{red}$  είναι η ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο και στο υπέρυθρο αντίστοιχα.

Ο NDVI είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης βλάστησης (Jordan 1969, Deering 1978, Tucker 1979). Κυμαίνεται από -1 έως +1, με εύρος τιμών 0-255 σε μια δορυφορική εικόνα πριν την κανονικοποίηση τους και διακρίνεται σε επτά κατηγορίες είδους εδαφοκάλυψης (Πιν. Α.3), καθώς παρέχει πληροφορίες τόσο για τη βλάστηση, όσο και για το γυμνό έδαφος, το νερό και το χιόνι.



**Πίνακας Α.3:** Είδος εδαφοκάλυψης σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη NDVI

Είδος εδαφοκάλυψης	NDVI (-1, +1)	NDVI (0-255)
Πυκνή βλάστηση	$0.500 \leq \text{NDVI} \leq 1$	$210 \leq \text{NDVI} \leq 255$
Μέτρια βλάστηση	$0.140 \leq \text{NDVI} < 0.500$	$118 \leq \text{NDVI} < 210$
Αραιή βλάστηση	$0.090 \leq \text{NDVI} < 0.140$	$105 \leq \text{NDVI} < 118$
Γυμνό έδαφος	$0.025 \leq \text{NDVI} < 0.090$	$88 \leq \text{NDVI} < 105$
Νέφη	$0.002 \leq \text{NDVI} < 0.025$	$83 \leq \text{NDVI} < 88$
Χιόνι και πάγος	$-0.046 \leq \text{NDVI} < 0.002$	$70 \leq \text{NDVI} < 83$
Νερό	$-1 \leq \text{NDVI} < -0.046$	$0 \leq \text{NDVI} < 70$

Ο δείκτης αυτός όμως χρησιμοποιεί μόνο δύο δορυφορικά κανάλια με αποτέλεσμα να μην είναι αρκετά ευαίσθητος στις επιδράσεις της ανάκλασης του εδάφους σε περιοχές μικρής φυτοκάλυψης. Επίσης παρουσιάζει μια υστέρηση στην απόκριση της ξηρασίας (Reed 1993, Rundquist & Harrington 2000, Wang *et al.* 2001), λόγω της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας. Η υστέρηση αυτή ποικίλει ανάλογα με το ρυθμό άρδευσης της περιοχής. Όσο λιγότερο αρδεύεται μια περιοχή τόσο μικρότερη είναι η χρονική υστέρηση εμφάνισης ξηρασίας (Παπαζαφειρίου 1984).

### 13. Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI)

Ο Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI - Reconnaissance Drought Index) βασίζεται σε επίγεια και δορυφορικά στοιχεία και παρέχει πληροφορίες για αρκετά χαρακτηριστικά της ξηρασίας όπως είναι η έναρξη, η λήξη, η διάρκεια, η δριμύτητα και η συχνότητα. Στην παρούσα έρευνα τα χαρακτηριστικά αυτά θα υπολογιστούν Τηλεπισκοπικά με χρήση δορυφορικών στοιχείων για μια χρονοσειρά 20 υδρολογικών ετών (1981 έως 2001). Είναι αρκετά εύχρηστος και ευέλικτος δείκτης με αποτέλεσμα να προσδιορίζει την χωρική εξάπλωση και εξέλιξη του φαινομένου σε οποιαδήποτε περιοχή εφαρμογής. Στη συγκεκριμένη έρευνα η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη

απορροής του Πηνειού ποταμού στο Θεσσαλικό κάμπο.

Ο αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (Reconnaissance Drought Index - RDI) είναι ένας αρκετά νέος δείκτης ξηρασίας που εφαρμόζεται σε αρκετές περιοχές και δίνει πληροφορίες τόσο για τη μετεωρολογική ξηρασία, στην οποία αναφέρεται, όσο και για την υδρολογική. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ανάπτυξή του χρησιμοποιεί συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Για τον υπολογισμό του απαιτούνται η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα και η μηνιαία αθροιστική βροχόπτωση (Tsakiris *et al.* 2007). Η αρχική τιμή  $a_k$ , που παίρνει ο δείκτης RDI υπολογίζεται από το λόγο της συνολικής βροχόπτωσης σε μια περιοχή προς τη συνολική δυνητική εξατμισοδιαπνοή με το  $k$  να υποδηλώνει τη συνεχόμενη περίοδο μηνών του έτους (π.χ.  $\alpha_{12}$ ) (Εξ. A.18).

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (\text{A.18})$$

όπου  $P_j$  και  $PET_j$  είναι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, αντίστοιχα, για κάθε μήνα  $j$ . Στην περίπτωση που υπολογίζεται το  $a$  ενός και μόνο μηνός το  $k=1$ , για δύο συνεχείς μήνες  $k=2$  κ.ο.κ. Αν ο  $\alpha_{12}$  εμφανίζει μικρότερες τιμές του δείκτη ξηρασίας AI (Aridity index) για ένα συγκεκριμένο έτος, τότε θεωρείται πως η περιοχή υποφέρει από ξηρασία (UNEP 1992).

Ο δείκτης RDI εμφανίζεται με δύο μορφές, ως κανονικοποιημένος (Normalised) RDI ( $RDI_n$ ), και ως τυποποιημένος (Standardised) RDI ( $RDI_{st}$ ) και υπολογίζεται ως εξής:

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (\text{A.19})$$

και

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (\text{A.20})$$

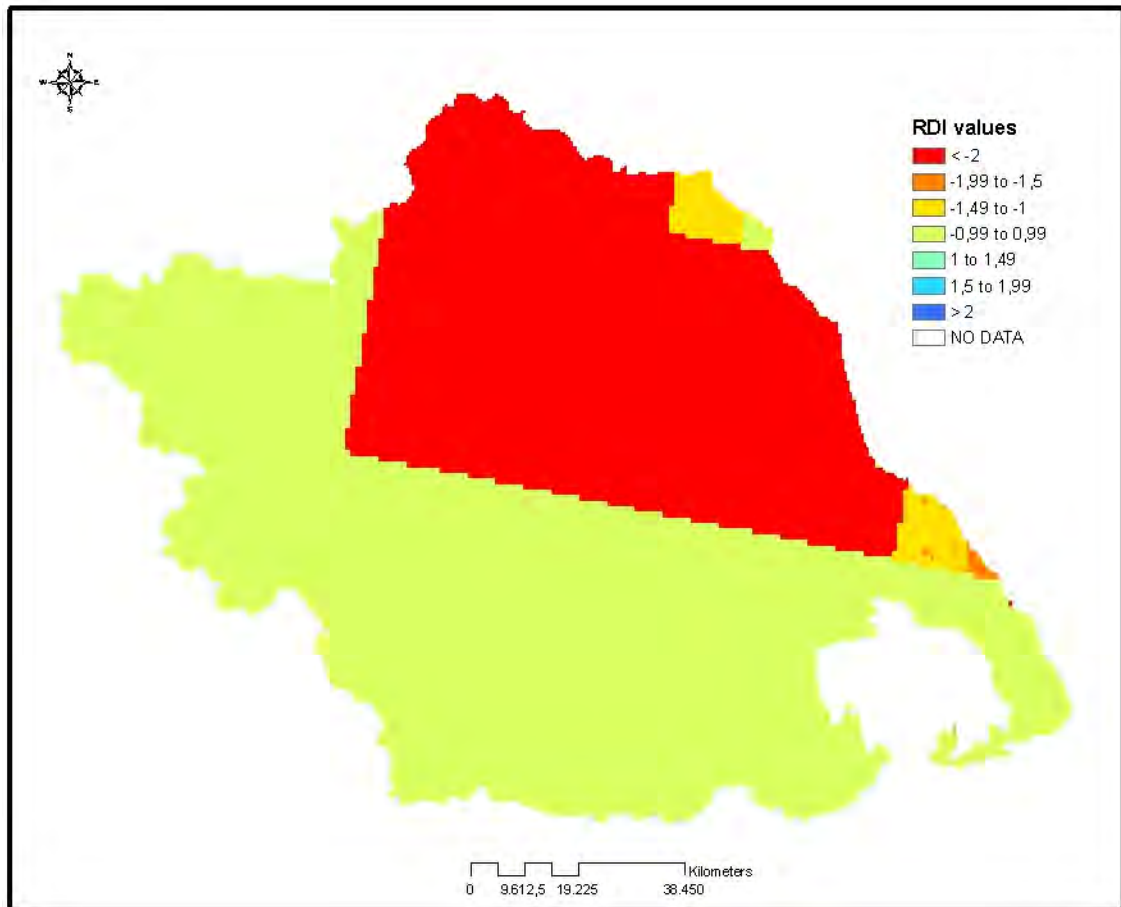
αντίστοιχα, όπου,  $a_k$  είναι η αρχική τιμή του δείκτη για κάθε διάρκεια,  $\bar{a}_k$  είναι ο μέσος όρος των  $a_k$ ,  $y_k$  είναι ο νεπέριος λογάριθμος (ln) του  $a_k$ ,  $\bar{y}_k$  και  $\hat{\sigma}_k$  είναι ο αριθμητικός μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, των  $y_k$ . Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται ο τυποποιημένος RDI.

Οι τιμές που παίρνει ο RDI είναι από -2 έως 2 όπως φαίνονται στον Πίνακα A.4.

**Πίνακας A.4:** Κατηγορίες ξηρασίας σύμφωνα με το δείκτη ξηρασίας RDI (Tsakiris & Vangelis, 2005)

Κατηγορίες ξηρασίας	Τιμές δείκτη RDI
Εξαιρετικά υγρές	>2.00
Πολύ υγρές	1.50 έως 1.99
Μέτρια υγρές	1.00 έως 1.49
Κανονικές συνθήκες	-0.99 έως 0.99
Μέτρια ξηρές	-1.00 έως -1.49
Έντονα ξηρές	-1.50 έως -1.99
Ακραία ξηρές	<-2.00

Ο δείκτης αυτός είναι από τους πλέον διαδεδομένους τόσο στον Ελλαδικό χώρο, όσο και σε άλλες περιοχές της Μεσογείου και συγκρίνεται με άλλους δείκτες όπως ο SPI και ο PDSI του Palmer.



**Εικόνα Α.1:** Ετήσιος χάρτης RDI για το υδρολογικό έτος 1984-1985

## Παράρτημα Β

Στα παρακάτω Σχήματα Β.1-Β.8, παραθέτονται τα διαγράμματα των ακραίων τιμών ξηρασίας για κάθε ένα από τα οκτώ συνολικά έτη ξηρασίας.

1984-1985

1987-1988

1989-1990

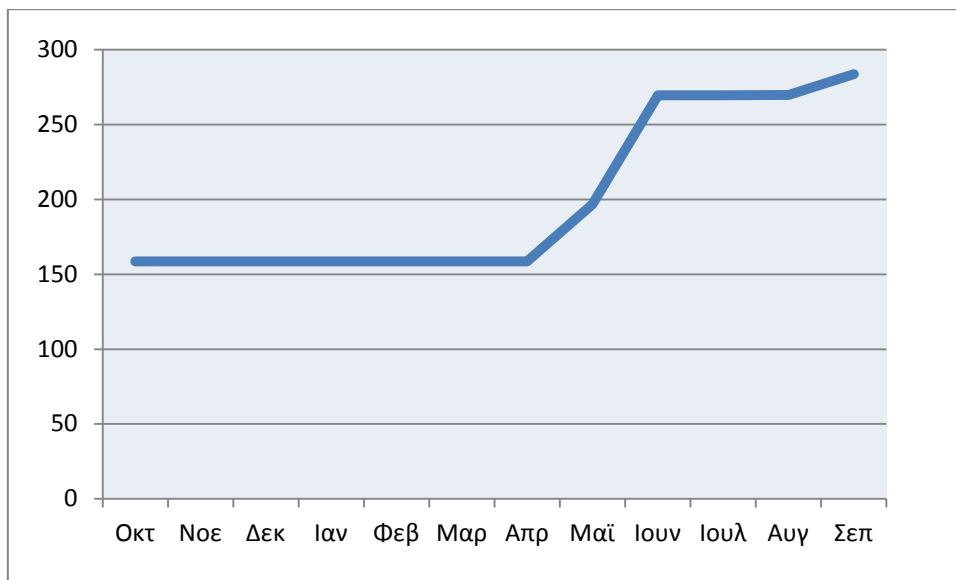
1991-1992

1992-1993

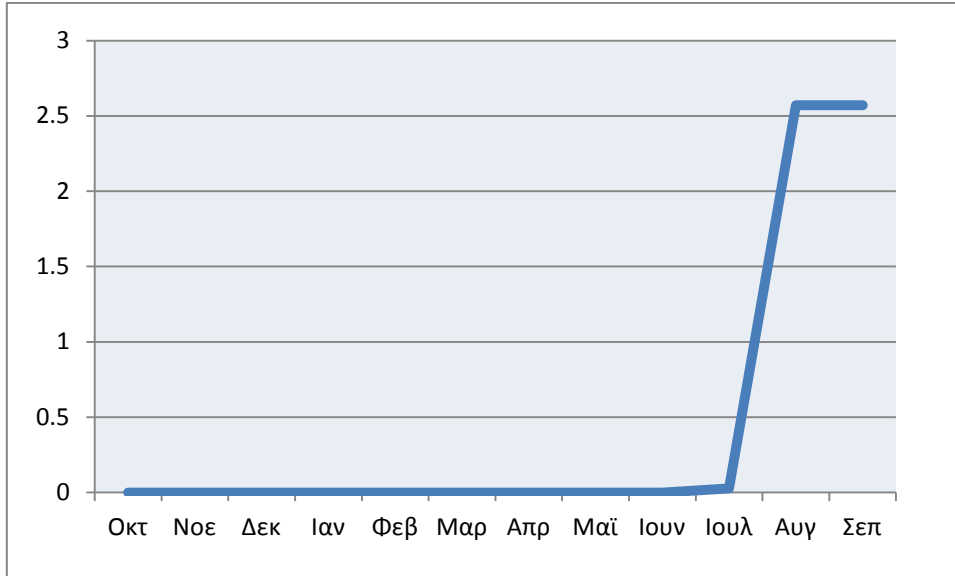
1996-1997

1999-2000

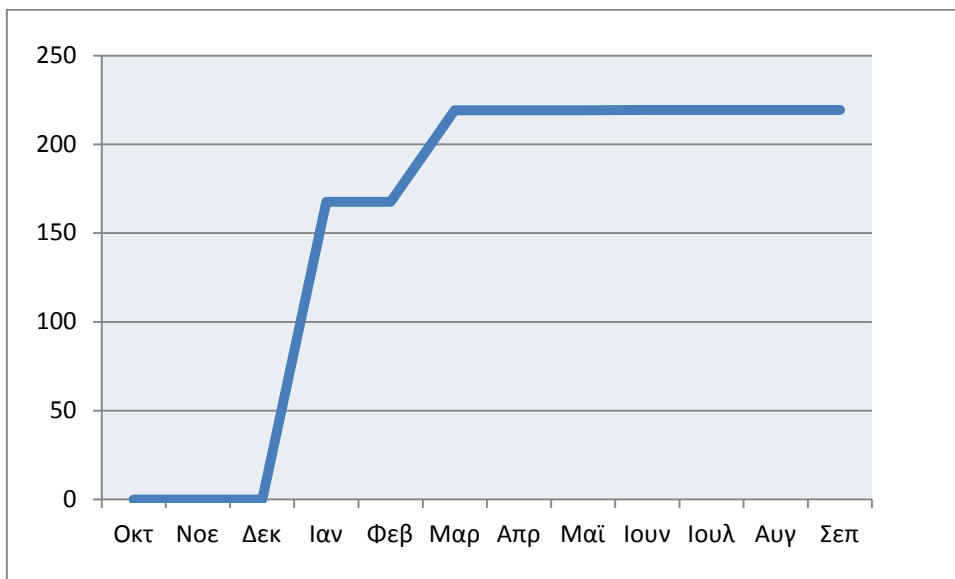
2000-2001



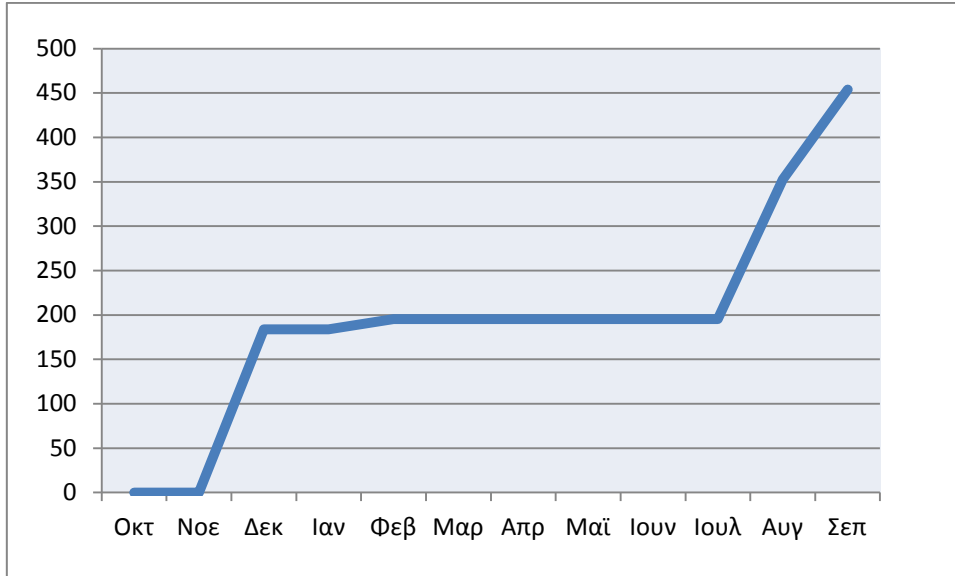
**Σχήμα Β.1 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1984-1985



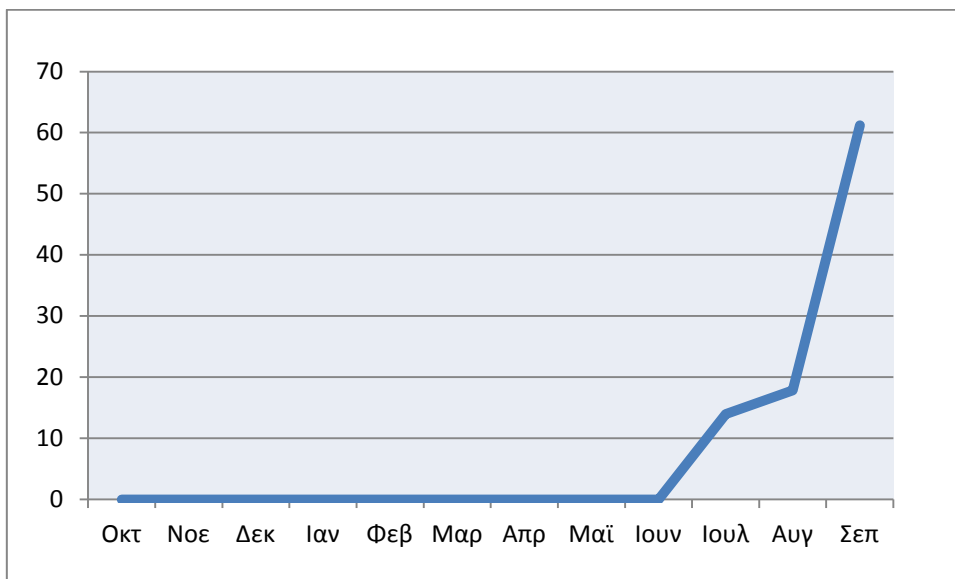
**Σχήμα Β.2 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1987-1988



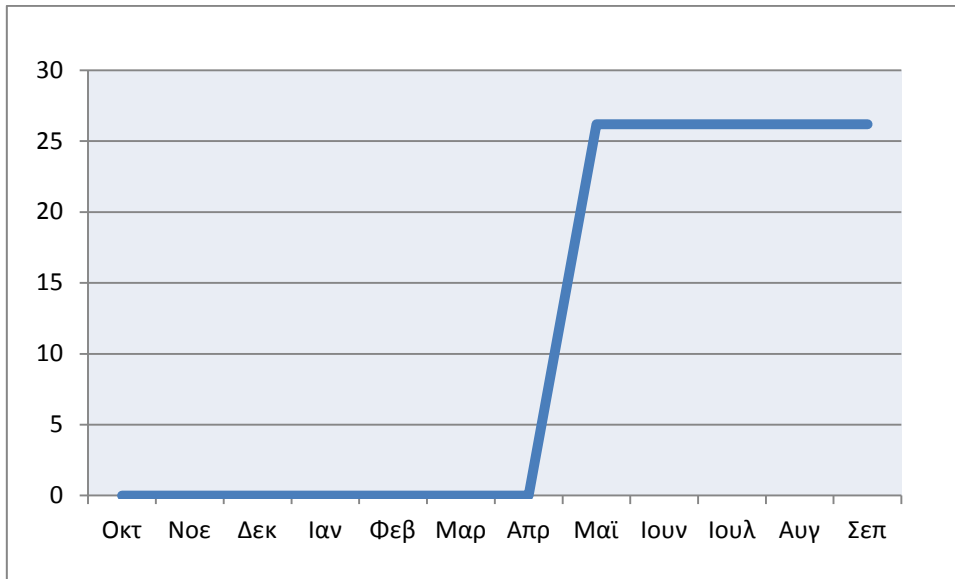
**Σχήμα Β.3 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1989-1990



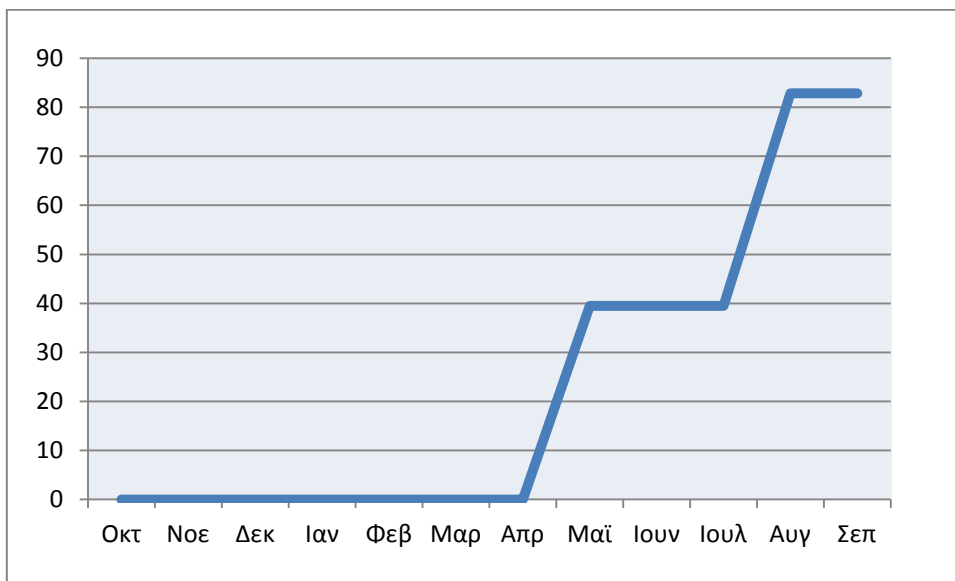
**Σχήμα Β.4 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1991-1992



**Σχήμα Β.5 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1991-1993

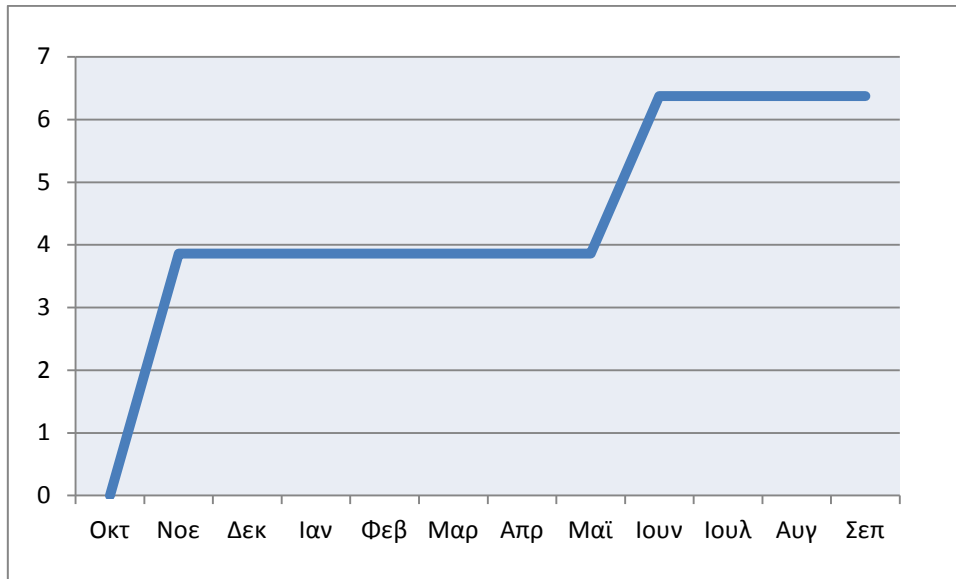


**Σχήμα Β.6 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1996-1997



**Σχήμα Β.7 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 1999-2000

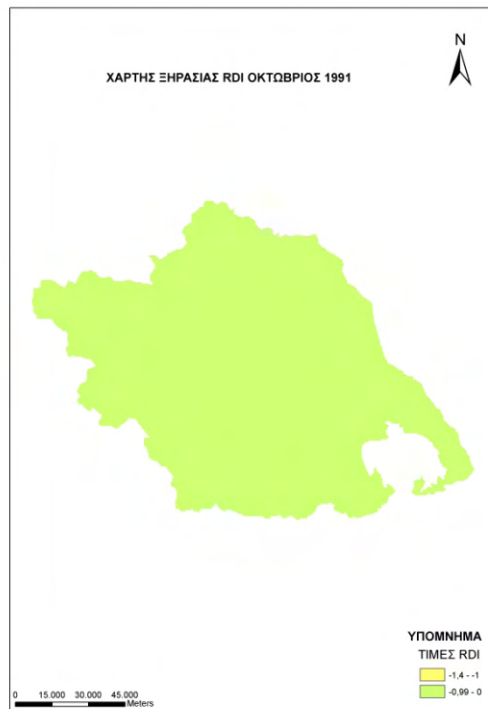




**Σχήμα Β.8 :** Διάγραμμα ακραίων τιμών ξηρασίας για το έτος 2000-2001

## Παράρτημα Γ

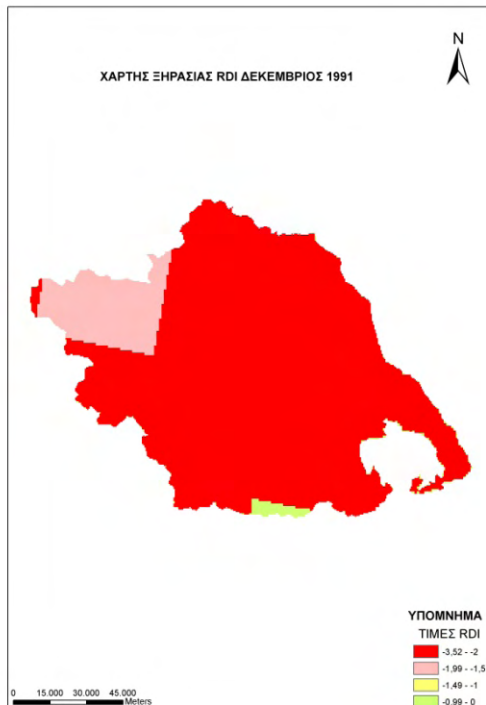
Στις Εικόνες Γ.1 έως Γ.12 παρουσιάζεται η μηνιαία μεταβολή των τιμών του δείκτη RDI, ενδεικτικά, κατά τη διάρκεια ενός από τα πιο ξηρά υδρολογικά έτη (1991-1992).



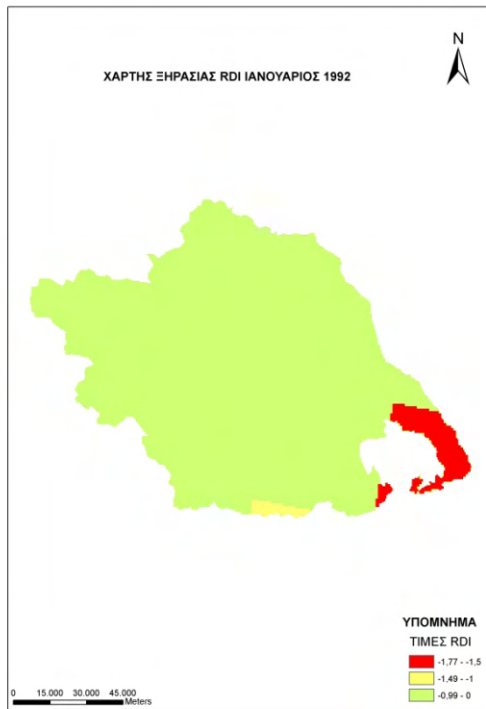
**Εικόνα Γ.1:** Χάρτης RDI για τον μήνα Οκτώβριο του 1991



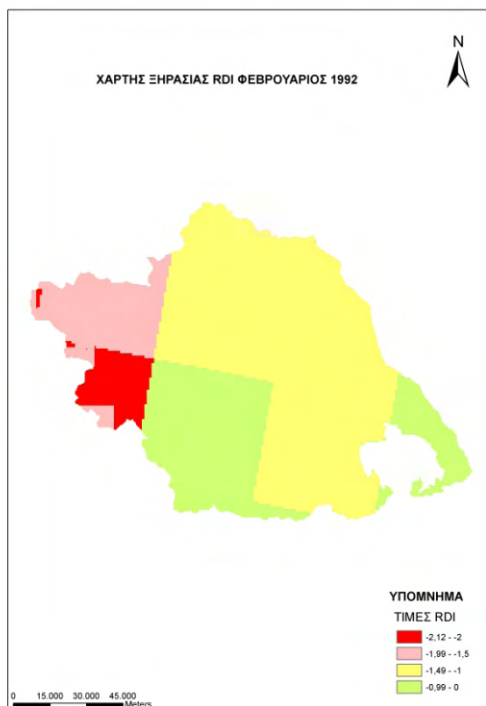
**Εικόνα Γ.2:** Χάρτης RDI για τον μήνα Νοεμβρίου του 1991



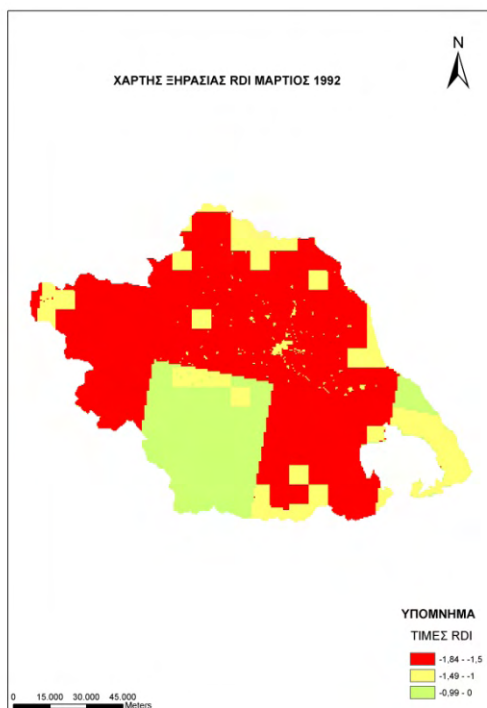
**Εικόνα Γ.3:** Χάρτης RDI για τον μήνα Δεκεμβρίου του 1991



**Εικόνα Γ.4:** Χάρτης RDI για τον μήνα Ιανουαρίου του 1992



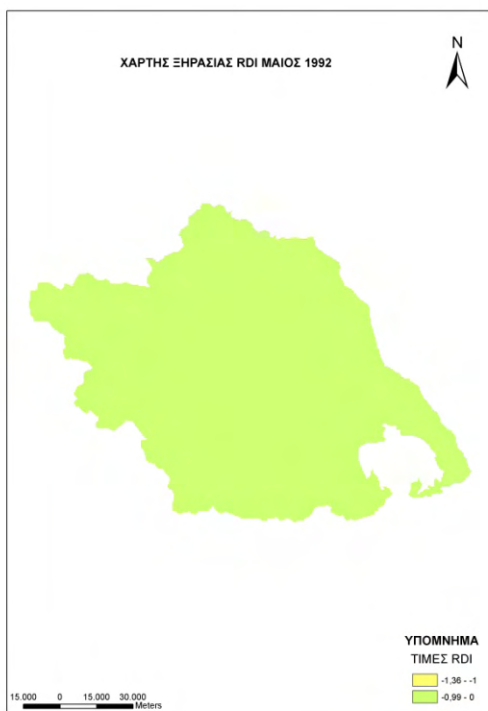
**Εικόνα Γ.5:** Χάρτης RDI για τον μήνα Φεβρουαρίου του 1992



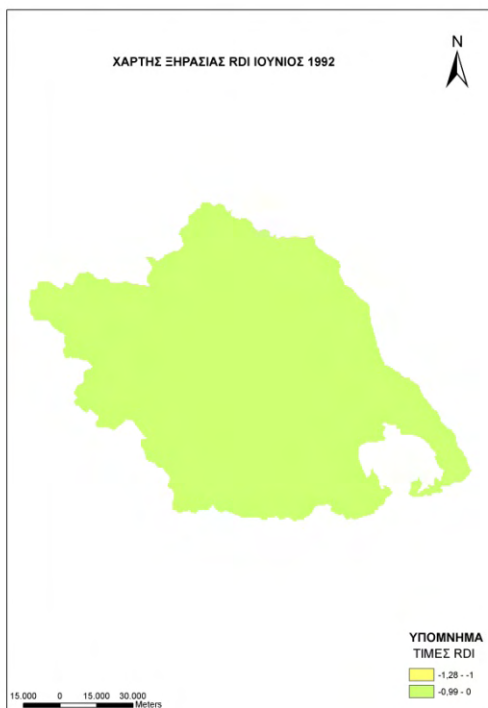
**Εικόνα Γ.6:** Χάρτης RDI για τον μήνα Μαρτίου του 1992



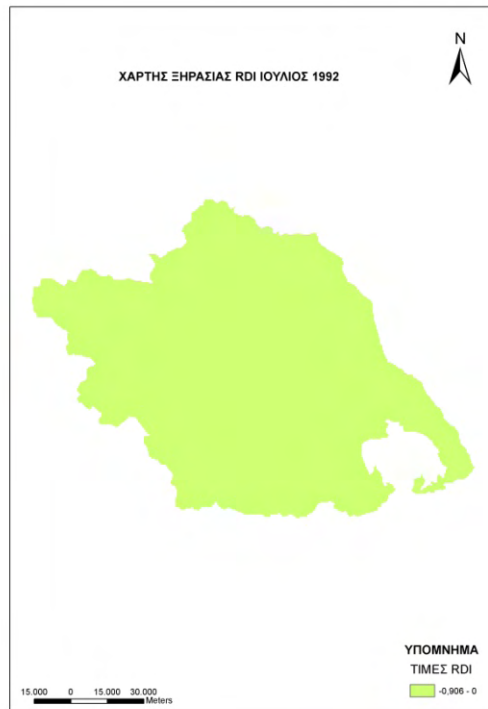
**Εικόνα Γ.7:** Χάρτης RDI για τον μήνα Απριλίου του 1992



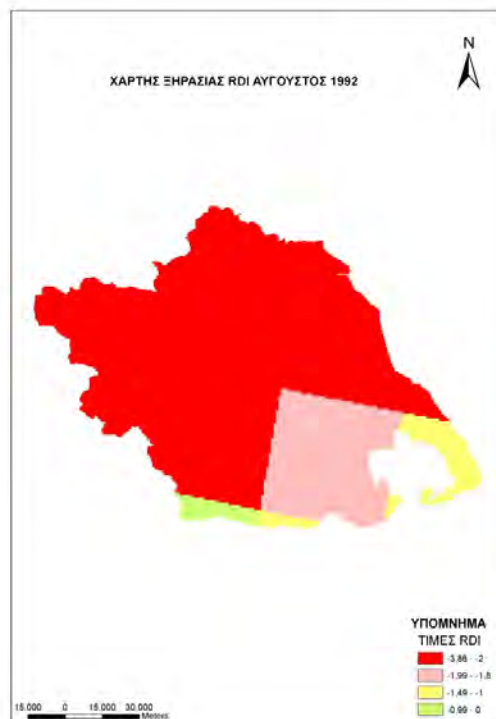
**Εικόνα Γ.8:** Χάρτης RDI για τον μήνα Μαΐου του 1992



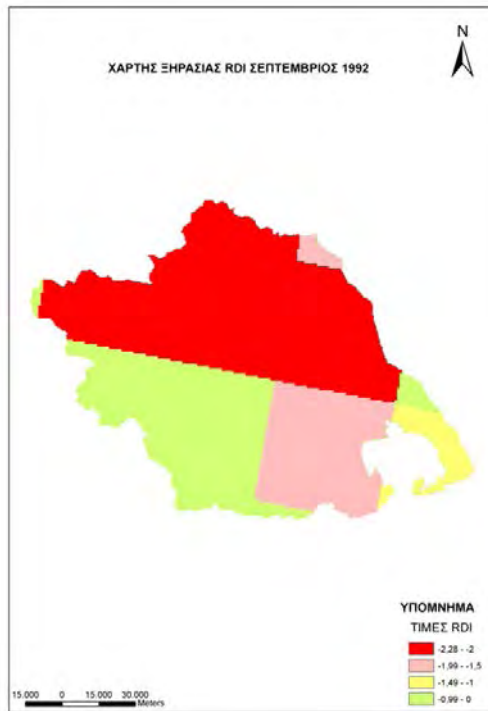
**Εικόνα Γ.9:** Χάρτης RDI για τον μήνα Ιουνίου του 1992



**Εικόνα Γ.10:** Χάρτης RDI για τον μήνα Ιουλίου του 1992



**Εικόνα Γ.11:** Χάρτης RDI για τον μήνα Αυγούστου του 1992



**Εικόνα Γ.12:** Χάρτης RDI για τον μήνα Σεπτεμβρίου του 1992



## Παράρτημα Δ

Χαρακτηριστική εικόνα θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (LST) για τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού



**Εικόνα Δ.1:** Εξαγωγή LST για το σύνολο της χρονοσειράς των 20 υδρολογικών ετών (1981-2001) σε pixel  $8 \times 8 \text{ km}^2$  (Κανέλλου 2010)