

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒ/ΝΤΟΣ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI) και
άλλοι Δείκτες στην Παρακολούθηση της Υδρολογικής Ξηρασίας**



ΤΣΙΡΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ Ρ. ΔΑΛΕΖΙΟΣ

ΒΟΛΟΣ, 2006



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5788/1
Ημερ. Εισ.: 05-09-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
632.12
ΤΣΙ



**Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI) και άλλοι Δείκτες
στην Παρακολούθηση της Υδρολογικής Ξηρασίας**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

1. Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος, Καθηγητής, Αγρομετεωρολογία – Δορυφορική Μετεωρολογία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
2. Γεώργιος Δήμος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Άλγεβρα – Διαφορικός και Ολοκληρωτικός Λογισμός – Αναλυτική, Παραστατική και Διαφορική Γεωμετρία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
3. Μάριος Σαπουντζής, Λέκτορας, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Στη μνήμη του Ξαδέλφου μου

Μανώλη Μανωλιτσάκη,

σε ένδειξη εκτίμησης, αγάπης

και σεβασμού.

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Αειφορική Διαχείριση Υδατικού Περιβάλλοντος» του τμήματος Γεωπονίας Ζωικής Παραγωγής και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Νικόλαο Ρ. Δαλέζιο, ο οποίος έθεσε τις κατευθυντήριες γραμμές για την υλοποίηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Είμαι υπόχρεος για την παροχή του εργαστηριακού χώρου και εξοπλισμού κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας, την βοήθεια και την υποστήριξη που μου προσέφερε καθώς και για το συνεχές ενδιαφέρον που έδειξε. Οι υποδείξεις και οι λύσεις που κατέδειξε συντέλεσαν στην υπερπήδηση οποιασδήποτε τροχοπέδης.

Νιώθω ευγνώμων απέναντι στον Δρ. Χρήστο Δομενικιώτη, που με την εμπειρία του και τις γνώσεις του έδωσε λύσεις στα προβλήματα (εφαρμοστέας και ερμηνευτικής φύσεως) που παρουσιάστηκαν κατά την διεξαγωγή της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επίσης, θέλω να τον ευχαριστήσω για την ηθική υποστήριξη, την υπομονή και την επιμονή που είχαν καταλυτικό ρόλο στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Το συνεχές ενδιαφέρον, οι επισημάνσεις και η συμπαράσταση του Αν. Καθηγητή Γεωργίου Δήμου καθώς και του Λέκτορα Μάριου Σαπουντζή εκτιμούνται ιδιαίτερως και τους ευχαριστώ πολύ.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Κοινωφελές Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης, του οποίου είμαι υπότροφος, για την οικονομική στήριξη κατά το δεύτερο έτος εκπόνησης των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Νιώθω ευγνώμων τόσο για την

οικονομική συνεισφορά, όσο και για τον τίτλο που μου δόθηκε ως υπότροφος του Ιδρύματος.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ το Κέντρο Προστασίας Φυτών και Ποιοτικού Ελέγχου Βόλου για την προσφορά των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποίησα και την EOWEB (Earth Observation on the WEB) για την παροχή των δορυφορικών δεδομένων.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στη μητέρα μου, Αναστασία, για την ηθική και υλική υποστήριξή τους και στη Σοφία Ηλιάδου, για τη συμπαράστασή της όλα αυτά τα χρόνια διαμονής μου στο Βόλο.

Τσίρος Εμμανουήλ

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 2.1:** Ενδιαφέρουσες φασματικές περιοχές σε σχέση με πολύ σημαντικές φυσιολογικές διεργασίες των φυτικών κυττάρων (Δαλέζιος, 2002).
- Πίνακας 2.2:** Ενδεικτικές τιμές δείκτη βλάστησης σε διάφορες μορφές κάλυψης εδάφους (Δαλέζιος, 2002).
- Πίνακας 2.3:** Χαρακτηριστικά κλίματος μιας περιοχής με βάση το δείκτη ξηρότητας (UNESCO, 1979).
- Πίνακας 3.1:** Μηνιαία ποσοστά των ωρών ημέρας ως προς το ολικό ετήσιο ποσό ωρών ημέρας για γεωγραφικό πλάτος 39°.
- Πίνακας 3.2:** Μηνιαίες τιμές του AI στη Θεσσαλία για το υδρολογικό έτος 2004-2005.
- Πίνακας 4.1:** Αντιστοιχία των κανονικοποιημένων τιμών του NDVI και του DD με τις κατηγορίες ξηρασίας, όπως ορίζονται από τον AI.
- Πίνακας 6.1:** Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας επί % ωρών ημέρας του έτους (Κωτούλας, 2001).
- Πίνακας 6.2:** Αντιστοιχία των τιμών των τριών δεικτών στους μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιηθήκαν για τον προσδιορισμό των κλάσεων.

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 2.1:** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.
- Εικόνα 2.2:** Υποπεριοχές του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.
- Εικόνα 3.1:** Εβδομαδιαία εικόνα NDVI (2005-08-1^η) για την περιοχή της Ελλάδας.
- Εικόνα 3.2:** Εβδομαδιαία εικόνα NDVI (2005-08-1^η) του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.
- Εικόνα 3.3:** Απεικόνιση των σημείων που επιλέχθηκαν για χρήση στην παρεμβολή.
- Εικόνα 3.4:** Χωρική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.
- Εικόνα 3.5:** Εβδομαδιαίος χάρτης Degree Days (2005-08-1^η) του υδατικού διαμερίσματος.
- Εικόνα 4.1:** Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Οκτώβριο 2004.
- Εικόνα 4.2:** Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Νοέμβριο 2004.
- Εικόνα 4.3:** Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Δεκέμβριο 2004.
- Εικόνα 4.4:** Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Ιανουάριο 2005.
- Εικόνα 4.5:** Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Φεβρουάριο 2005.
- Εικόνα 4.6:** Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Μάρτιο 2005.

Εικόνα 4.7: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Απρίλιο 2005.

Εικόνα 4.8: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Μάιο 2005.

Εικόνα 4.9: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Ιούνιο 2005.

Εικόνα 4.10: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Ιούλιο 2005.

Εικόνα 4.11: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Αύγουστο 2005.

Εικόνα 4.12: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Σεπτέμβριο 2005.

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.1:** Ο «υδρο-παράλογος» κύκλος της ξηρασίας (Τσακίρης, 1995).
- Σχήμα 2.1:** Φυσική και κοινωνική διάσταση της ξηρασίας (Wilhite, 2005).
- Σχήμα 2.2:** Απεικόνιση λειτουργίας δορυφόρου (McVicar and Jupp, 1998).
- Σχήμα 2.3:** Περιοχές του ΗΜΦ (Μέρτικας, 1999).
- Σχήμα 2.4:** Απεικόνιση της ανάκλασης του φωτός στον μεσοκυττάριο χώρο ενός πράσινου φύλλου (Harrison and Jupp, 1989).
- Σχήμα 3.1:** Εξαγωγή της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους και θερμοκρασίας αέρα, στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.
- Σχήμα 3.2:** Βασικά εργαλεία του Model Maker.
- Σχήμα 3.3:** Απεικόνιση του μοντέλου υπολογισμού του Degree Days.
- Σχήμα 4.1:** Σκοπός της ταξινόμησης είναι ο προσδιορισμός ομάδων εικονοστοιχείων με κοινά χαρακτηριστικά (Δαλέζιος, 2002).
- Σχήμα 4.2:** Για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση επιλέγονται δειγματοληπτικές περιοχές (Α, Β, Γ) που χρησιμοποιούνται την ταξινόμηση ολόκληρης της εικόνας (Δαλέζιος, 2002).
- Σχήμα 4.3:** Γενική μεθοδολογία ανεξάρτητης ταξινόμησης. Οι αρχικές πολυφασματικές εικόνες ταξινομούνται, μέσω ενός αλγορίθμου, σε κλάσεις σύμφωνα με τις φασματικές τους ιδιότητες (Δαλέζιος, 2002).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναπτύσσεται μία νέα μεθοδολογία για την παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας. Η μεθοδολογία αποσκοπεί στην ταξινόμηση και παρακολούθηση της ξηρασίας με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) και ο δείκτης ημεροβαθμών (DD – Degree Days) που υπολογίζονται από δορυφορικά δεδομένα τύπου NOAA/AVHRR, ενώ ο έλεγχος για την εμφάνιση συνθηκών ξηρασίας γίνεται με τη χρήση του δείκτη ξηρότητας (AI – Aridity Index). Η περιοχή μελέτης είναι το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και οι υποπεριοχές από τις οποίες αυτό απαρτίζεται, ενώ η εφαρμογή γίνεται για το υδρολογικό έτος 2004-2005. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας είχε ως αποτέλεσμα την ταξινόμηση της υδρολογικής ξηρασίας με τη χρήση των δύο δεικτών, με βάση τις τιμές και τις κατηγορίες ταξινόμησης του AI και την παραγωγή δώδεκα θεματικών χαρτών (ένας για κάθε μήνα) που απεικονίζουν τις κατηγορίες ξηρασίας. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και ενθαρρυντικά, ενώ οι παραγόμενοι θεματικοί χάρτες συμφωνούν με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Λέξεις κλειδιά: Ξηρασία, Υδρολογία, NDVI, Degree Days (DD), Ταξινόμηση, Τηλεπισκόπηση, Ξηρότητα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ	
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ.....	5
2.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ - ΥΠΟΒΑΘΡΟ	5
2.1.1 Ορισμοί της ξηρασίας.....	5
2.1.2 Υδρολογικές διαδικασίες	6
2.1.3 Χαρακτηριστικά δορυφορικής απεικόνισης	9
2.2 Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΛΩΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΗΜΦ	13
2.2.1 Παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης με τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ	17
2.2.2 Φυσιολογία των φυτών.....	17
2.2.3 Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς	19
2.3 Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΗΜΦ	24
2.3.1 Θερμοκρασία επιφανείας εδάφους	26
2.4 ΗΜΕΡΟΒΑΘΜΟΙ Ή ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ.....	27
2.5 Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΟΤΗΤΑΣ (ARIDITY INDEX)	29
2.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ	30
2.6.1 Κλιματικές συνθήκες	32
2.6.2 Υδρολογικά στοιχεία.....	34
2.6.3 Διαίρεση της Θεσσαλίας σε υποπεριοχές	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	38
3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΔΟΥΦΟΡΟΥ ΝΟΑΑ	38
3.2 ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	41
3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ	42
3.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ.....	43
3.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΗΜΕΡΟΒΑΘΜΩΝ	45
3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΞΗΡΟΤΗΤΑΣ (ΑΙ)	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	55
4.1 ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ	55
4.1.1 Μέθοδοι ταξινόμησης εικόνας.....	56
4.1.2 Μεθοδολογία ανάλυσης.....	63
4.2 ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	82
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86
EXTENDED ABSTRACT	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.....	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι η ξηρασία είναι ένα ακραίο περιβαλλοντικό φαινόμενο με διάφορες μορφές ανάλογα με την παράμετρο με την οποία εκφράζεται και ανάλογα με το κλίμα της περιοχής που αναφέρεται. Ουσιαστικά το κρίσιμο επίπεδο της μεταβλητής με την οποία εκφράζεται η ξηρασία διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (Τσακίρης, 1995).

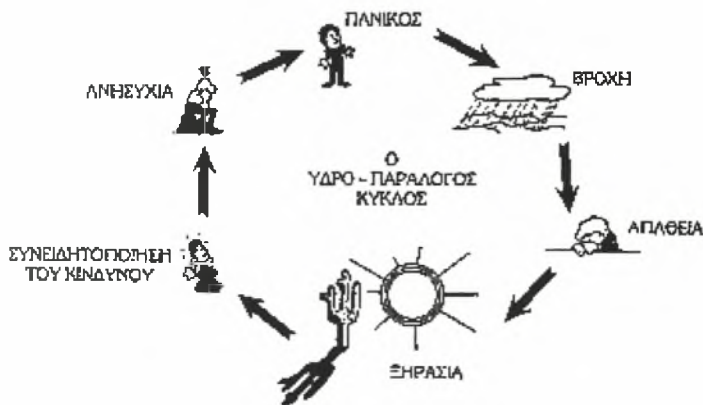
Η ξηρασία σε αντίθεση με άλλα ακραία γεγονότα όπως πλημμύρες, καταιγίδες κλπ, έχει συνήθως μεγάλη χρονική διάρκεια. Πάσχει από σαφή και απόλυτο ορισμό καθώς δεν μπορεί να ορισθεί παρά μόνο ανάλογα με την επιστημονική σκοπιά με την οποία μπορεί κανείς να τη μελετήσει. Επίσης, δεν έχει σαφή αρχή ούτε τέλος. Γι' αυτούς τους λόγους, η ξηρασία αποτελεί τον πιο σύνθετο από όλους τους φυσικούς κινδύνους (Wilhite and Glantz, 1985; Wilhite *et al.*, 2000).

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

Το φαινόμενο της ξηρασίας άρχισε πρόσφατα να απασχολεί το ευρύ κοινό λόγω της λειψυδρίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη χώρα μας αλλά και σε μεγάλο βαθμό την υπόλοιπη Ευρώπη. Έχει οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος σε αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες. Συνήθως αναγκάζει τις κυβερνήσεις να ανακοινώσουν μέτρα για τον περιορισμό της κατανάλωσης αλλά και να αναγγείλουν νέα έργα για την καλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων. Επειδή η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που εντάσσεται στη

γενικότερη διακύμανση του κλίματος μιας περιοχής πολλά από τα μέτρα που αναγγέλλονται κατά τη διάρκεια της ξηρασίας λησμονούνται μόλις έρθουν οι βροχές. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ο «υδρο-παράλογος» κύκλος.

Μια παρατεταμένη ξηρασία έχει πολλές επιπτώσεις στα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα, στο περιβάλλον και σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Η ανάλυση των επιπτώσεων της ξηρασίας είναι ένα διεπιστημονικό αντικείμενο μεγάλης σπουδαιότητας και ξεφεύγει από την υδρολογική προσέγγιση που αναπτύσσεται παρακάτω.



Σχήμα 1.1: Ο «υδρο-παράλογος» κύκλος της ξηρασίας (Τσακίρης, 1995).

Η επιστημονική προσέγγιση του φαινομένου της ξηρασίας περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης, που στηρίζονται σε διαφορετικές παραδοχές και ορισμούς. Σε κάθε περίπτωση, η προσομοίωση του φαινομένου στο σύνολό του είναι δύσκολο εγχείρημα. Σε γενικές γραμμές, η μελέτη των ξηρασιών περιλαμβάνει τόσο την ανάλυση συχνοτήτων ελαχίστων τιμών χαρακτηριστικών υδρολογικών μεταβλητών για μεγάλο χρονικό διάστημα (βροχόπτωση, απορροή κλπ.), όσο και τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεικτών που αποτελούν μέτρο ποσοτικής εκτίμησης μιας ξηρασίας (υδατικό έλλειμμα, ελλειμματική επιφάνεια, ένταση κλπ.). Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δείκτες οι οποίοι να μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση

της υδρολογικής ξηρασίας έμμεσα, μέσω δευτερευόντων συνιστωσών όπως είναι η ύπαρξη και η κατάσταση της βλάστησης ή ο ρυθμός ανάπτυξης αυτής (π.χ. δείκτες βλάστησης και αγρομετεωρολογικοί δείκτες). Όλοι οι ανωτέρω δείκτες, μπορεί να συσχετιστούν με διάφορα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Ως περιοχή μελέτης του φαινομένου, νοείται είτε μια σχετικά εκτεταμένη περιοχή (π.χ. υδρολογική λεκάνη), είτε ένα σύνολο σημειακών πηγών που συνιστούν ένα σύστημα (π.χ. ένας ή περισσότεροι ταμιευτήρες αποθήκευσης νερού που εξυπηρετούν τις υδρευτικές ανάγκες μιας μεγαλούπολης), είτε τέλος ένα μόνο σημείο (π.χ. μετεωρολογικός σταθμός). Στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται επισκόπηση του φαινομένου στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση και ανάπτυξη μεθοδολογίας για την παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας στην Θεσσαλία με τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων και συγκεκριμένα με το δείκτη βλάστησης NDVI (δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς – Normalized Difference Vegetation Index) και του αγρομετεωρολογικού δείκτη DD ή HU (Ημεροβαθμοί – Degree days ή Θερμική μονάδα - Heat Unit). Ο έλεγχος για την εμφάνιση συνθηκών ξηρασίας γίνεται με τη χρήση του δείκτη ξηρότητας AI (Aridity Index). Ο AI χρησιμοποιείται διότι αποτελεί ένα δείκτη ο οποίος υπολογίζεται σχετικά εύκολα (περιορισμένες ανάγκες σε δεδομένα) και μπορεί να απεικονίσει την ενδεχόμενη εμφάνιση υδρολογικής ξηρασίας σε περιοχική κλίμακα. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση στις δυνατότητες της τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της ξηρασίας με τη χρήση των φασματικών χαρακτηριστικών της βλάστησης (ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος) και της θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους (θερμική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος). Επίσης αναφέρεται το θεωρητικό υπόβαθρο του κάθε δείκτη καθώς και οι γενικές μεθοδολογίες

υπολογισμού αυτών. Εφόσον η μεθοδολογία αποσκοπεί στη παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας, ο έλεγχος γίνεται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και στις υποπεριοχές από τις οποίες αυτό απαρτίζεται. Το επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται στην προεπεξεργασία και επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων. Η προεπεξεργασία συντελεί ώστε τα δεδομένα να είναι κατάλληλα διαμορφωμένα για την εφαρμογή των εκάστοτε μεθοδολογιών. Περιγράφεται σύντομα η περιοχή μελέτης, καθώς και η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται, οι γεωμετρικές βελτιώσεις που έχουν εφαρμοστεί στις δορυφορικές εικόνες και τέλος ο τρόπος εξαγωγής και τα χαρακτηριστικά των δεικτών NDVI, DD και AI που χρησιμοποιούνται περαιτέρω. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των δύο δεικτών. Αρχικά ερευνάται ο συνδυασμός των NDVI και DD με επισκόπηση στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Ακολουθεί η ταξινόμηση της υδρολογικής ξηρασίας με την χρήση των δύο δεικτών, βάση των τιμών και των κατηγοριών του AI. Στο τελευταίο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή των ανωτέρω μεθοδολογιών καθώς και προτάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε πιθανή εξέλιξη των μεθοδολογιών και βελτίωση των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

2.1 Ανασκόπηση - Υπόβαθρο

2.1.1 Ορισμοί της ξηρασίας

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

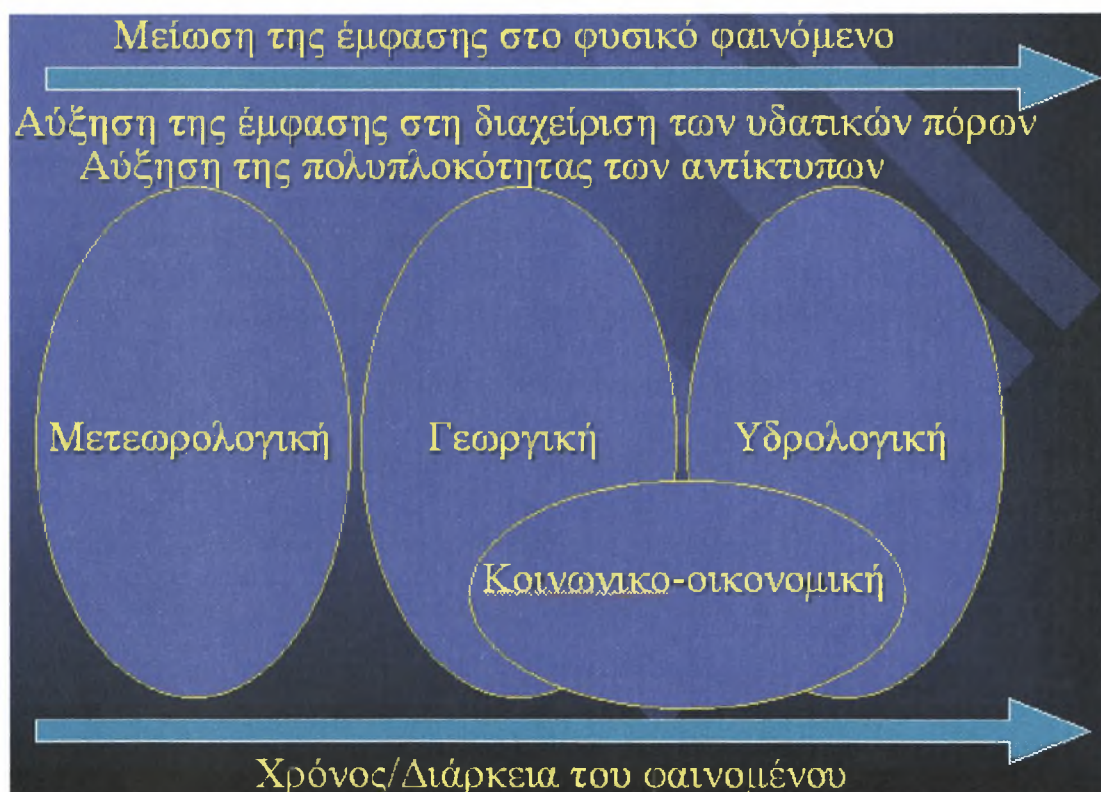
Οι πιο γνωστοί ορισμοί της ξηρασίας είναι:

- i. Μετεωρολογική ξηρασία, που θεωρείται μία παρατεταμένη, μη κανονική έλλειψη υγρασίας.
- ii. Υδρολογική ξηρασία, χαρακτηρίζεται μία περίοδος κατά την οποία η παροχή νερού είναι μικρότερη από την ελάχιστη που απαιτείται για την ικανοποίηση των αναγκών μιας περιοχής. Είναι δηλαδή μια περίοδος υδρολογικού ελλείμματος (π.χ. στην απορροή, στην αποθήκευση σε ταμιευτήρες, στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα).
- iii. Γεωργική ξηρασία, που προσδιορίζεται από την μη κανονική ανάπτυξη των καλλιεργειών σαν συνέπεια της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού και που εξαρτάται από τα επίπεδα εδαφικής υγρασίας και επάρκειας του νερού για την ανάπτυξη των καλλιεργειών.
- iv. Κοινωνικο-οικονομική, ξηρασία που αναφέρεται σε ελλείμματα υδατικών πόρων που συνήθως οφείλονται στην υπερκατανάλωση την ανεπαρκή υποδομή και

προετοιμασία και λιγότερο στις μειωμένες βροχοπτώσεις ή και στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.

Στο σχήμα 2.1 (Wilhite, 2005) απεικονίζονται τα είδη της ξηρασίας. Η κοινωνικο-οικονομική ξηρασία εμπεριέχεται στην γεωργική και στην υδρολογική. Όσον αφορά την έμφαση που δίνεται στην διαχείριση των υδατικών πόρων, η υδρολογική ξηρασία παρουσιάζει την υψηλότερη.

Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στην υδρολογική ξηρασία.



Σχήμα 2.1: Φυσική και κοινωνική διάσταση της ξηρασίας (Wilhite, 2005).

2.1.2 Υδρολογικές διαδικασίες

Οι υδρολογικές διαδικασίες επηρεάζονται από την εδαφική κάλυψη και κυρίως από την ύπαρξη βλάστησης. Η συγκράτηση της βροχόπτωσης από το φύλλωμα και η διαπνοή αποτελούν απώλειες στο υδατικό ισοζύγιο σε μία λεκάνη απορροής. Επίσης, η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής προσδίδει απώλειες στο

υδατικό ισοζύγιο και επηρεάζει την βροχόπτωση σε περιοχική κλίμακα (Savenije, 1995). Τα αποτελέσματα πολλών πειραμάτων όσον αφορά τη συγκράτηση νερού από τη βλάστηση, έδειξαν ότι οι απώλειες από την εξατμισοδιαπνοή μειώνονται ανάλογα με τον τύπο βλάστησης κατά την ακόλουθη σειρά: κωνοφόρα, φυλλοβόλα σκληρόφυλλα/μικτά σκληρόφυλλα, θάμνοι (Bisch και Hewlett, 1982). Είναι λοιπόν κατανοητό ότι οι ταξινομήσεις εδαφικής κάλυψης και κυρίως της βλάστησης με φασματικές μεθόδους επιτρέπουν μία εκτίμηση των σχετικών υδατικών απωλειών σε μία λεκάνη απορροής.

Η ύπαρξη βλάστησης λοιπόν, επηρεάζει το υδατικό ισοζύγιο με έναν από τους ακόλουθους τρόπους (Gorte, 2000):

- Συγκρατεί μέρος της βροχόπτωσης.
- Επηρεάζει την απορροή.
- Κατέχει σημαντικό ρόλο στην προστασία του εδάφους από την διάβρωση.
- Μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του νερού.
- Η συγκράτηση από το φύλλωμα και η εξατμισοδιαπνοή αποτελούν απώλειες στο υδατικό ισοζύγιο.

Η σπανιότητα της ύπαρξης απορροής στις εύκρατες περιοχές με πυκνή βλάστηση που συχνά οδηγεί σε κορεσμό της διήθησης και σε υποδερμική ροή ή ενδοροή (piston flow), έχει περιγραφεί από πολλούς ερευνητές όπως για παράδειγμα από τους Ward και Robinson (1989). Σε αντίθεση, η φτωχή βλάστηση και ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλη κλίση συνήθως οδηγεί σε άμεση και ραγδαία επιφανειακή απορροή. Σε μικρές λεκάνες απορροής είναι εμφανής η επίδραση της βλάστησης στην καθυστέρηση της απορροής που προκαλείται από υψηλής έντασης βροχόπτωση και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των αιχμών στους ρυθμούς απορροής (Bruynzeel, 1990).

Ο αριθμός καμπύλης απορροής της Soil Conservation Service (SCS) χρησιμοποιεί την υδρολογική κατάσταση της βλάστησης σε συνδυασμό με το τύπο εδάφους για τον υπολογισμό της ημερήσιας απορροής από δεδομένα βροχόπτωσης. Ο τύπος εδάφους μπορεί να εισαχθεί σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) και να συνδυαστεί με ταξινομημένες εικόνες χρήσεων γης για τον υπολογισμό και τη χαρτογράφηση του αριθμού καμπύλης απορροής.

Η παρουσία της βλάστησης επηρεάζει σημαντικά την εμφάνιση του φαινομένου της διάβρωσης του εδάφους. Η πυκνή βλάστηση εμποδίζει την διάβρωση από την πρόσκρουση της βροχής στο έδαφος, αυξάνει τη διήθηση και όπως προαναφέρθηκε, επιβραδύνει την απορροή. Έτσι, η εδαφοκάλυψη και η κατάσταση της βλάστησης που μπορούν να προσδιοριστούν με τηλεπισκοπικές μεθόδους, κατέχουν αδιαμφισβήτητα σημαντικό υδρολογικό ρόλο όσον αφορά την εισροή του νερού, τη μείωση των αιχμών απορροής και τη διάβρωση. Όλα τα διαθέσιμα δεδομένα δείχνουν ότι η εκδάσωση και η αποψίλωση των δασών οδηγούν σε αύξηση της μεταφοράς ιζημάτων και σε αυξημένο υδατικό φορτίο σε περιοχές με κλίση, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στα κατάντη και ιδιαίτερα όταν σε αυτά βρίσκονται καλλιεργούμενες εκτάσεις (Meijerink and Maathuis, 1997). Οι Σαπουντζής και Στάθης (2003) μελέτησαν την επίδραση της μείωσης του ποσοστού δασοκάλυψης υδρολογικής λεκάνης στην πλημμυρική απορροή και τη στερεομεταφορά σε επεισόδιο έντονης βροχόπτωσης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μείωση του ποσοστού δάσωσης (10%) οδηγεί σε αύξηση του όγκου του υδρογραφήματος (7%), της αιχμής της απορροής (7%) και του στερεοφορτίου (75%).

Η βλάστηση επηρεάζει και την ποιότητα των υδάτων (Gorte, 2000). Περισσότερο ευπαθείς είναι οι περιοχές με υψηλή υγρασία και προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η βλάστηση συγκρατεί τους ρύπους με το φύλλωμα και

τον δασικό τάπητα. Με την εμφάνιση βροχόπτωσης οι ρυπογόνες ουσίες είτε απορρέουν είτε διηθούνται, με αποτέλεσμα τη ρύπανση των επιφανειακών και των υπογείων υδάτων αντίστοιχα.

Η τηλεπισκόπηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση των χαρακτηριστικών λεκανών απορροής και την εκτίμηση των υδατικών απωλειών αφού αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στις ταξινομήσεις χρήσεων γης και στην παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης (Gorte, 2000) καθώς και για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σε σχέση με την εδαφοκάλυψη για κάθε εικονοστοιχείο (Bastiaansen, 1998).

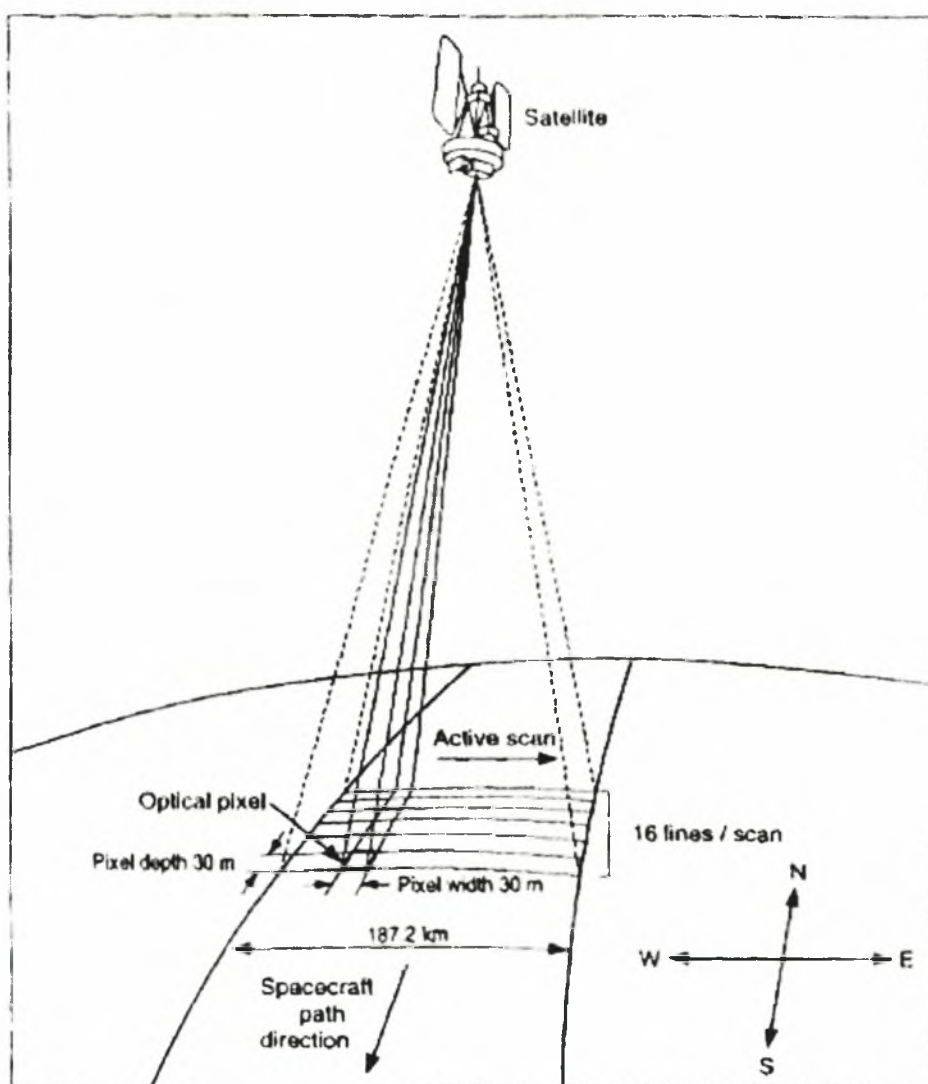
2.1.3 Χαρακτηριστικά δορυφορικής απεικόνισης

Η λέξη τηλεπισκόπηση συντίθεται από το αρχαίο επίρρημα «τηλέ» (= από μακριά), ως πρώτο συνθετικό της, και το ρήμα «επισκοπέω-ώ», που σημαίνει εξετάζω, βλέπω από ψηλά, επιθεωρώ. Τηλεπισκόπηση, επομένως, σημαίνει αντίληψη αντικειμένων ή φαινομένων από απόσταση. Ορίζεται ως η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από έναν στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς στην πραγματικότητα ο ερευνητής να έρθει σε απευθείας επαφή με αυτόν (Μέρτικας, 1999).

Η τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει τρία τμήματα: τους στόχους που συνιστούν τα υπό μελέτη αντικείμενα ή τα φαινόμενα μιας περιοχής, τη συλλογή δεδομένων με τη χρήση ορισμένων οργάνων και την ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων. Ο ορισμός της τηλεπισκόπησης είναι πολύ ευρύς. Παραδείγματα μετρήσεων τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν τη συμβατική φωτογραφία, την αεροφωτογραφία, τη λήψη εικόνων με Radar, τις μετρήσεις βαρύτητας κλπ. Στην πράξη όμως, οι μελέτες

τηλεπισκόπησης περιορίζονται μόνο σε συστήματα απεικονίσεων ή εικόνων, όπως αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες.

Έτσι λοιπόν, ένα τμήμα της τηλεπισκόπησης είναι η απόκτηση ψηφιακών δεδομένων και πληροφοριών στην ανακλώμενη, θερμική και μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΜΦ). Οι μετρήσεις του ΗΜΦ γίνονται συνήθως μέσω δορυφόρων, αεροσκαφών, εδαφικών συστημάτων (π.χ ραντάρ) και γενικότερα σε απόσταση από τον στόχο. Οι δορυφορικές εικόνες καταγράφονται από αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένοι οι δορυφόροι. Ένα παράδειγμα της λειτουργίας ενός δορυφόρου απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.



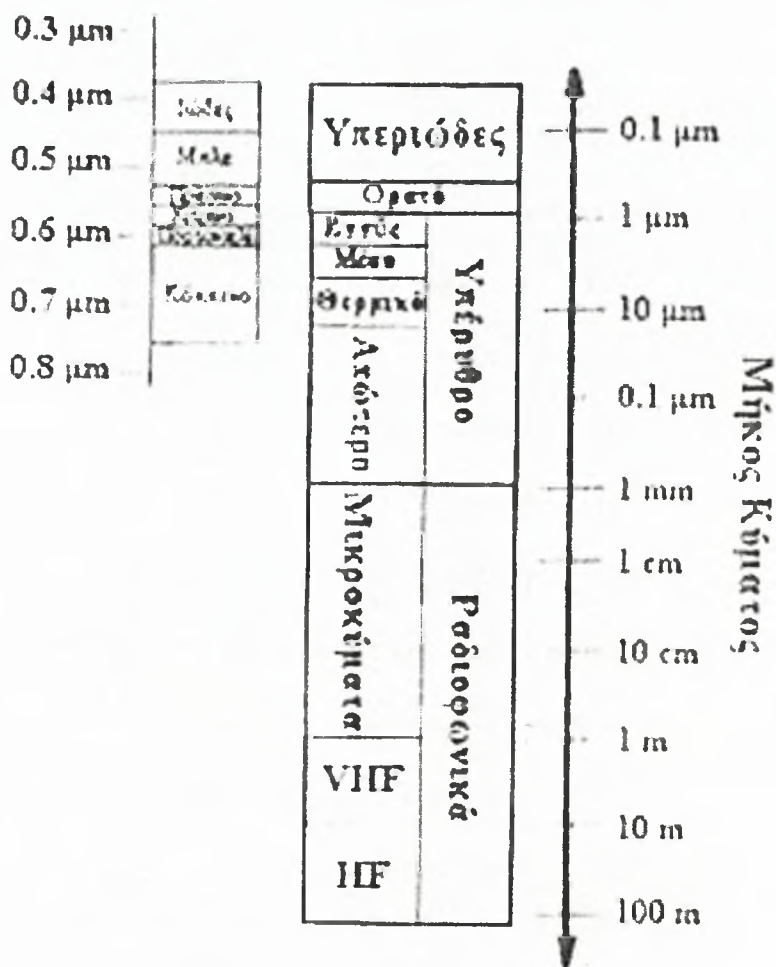
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση λειτουργίας δορυφόρου (McVicar and Jupp, 1998)

Το ύψος τροχιάς των δορυφόρων ποικίλει από περίπου 700Km πάνω από την επιφάνεια της γης για τους δορυφόρους πολικής τροχιάς, έως 36000Km για τους γεωστάσιμους (πάνω από τον ισημερινό). Οι εικόνες μπορούν να υποστούν επεξεργασία μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών για την εξαγωγή πληροφοριών ανάλογα με το αντικείμενο εφαρμογής (μετεωρολογία, γεωπονία κλπ.). Κάθε εικόνα αποτελείται από εικονοστοιχεία τα οποία συνεισφέρουν με μετρήσεις σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος του ΗΜΦ, με συγκεκριμένη χωρική διακριτική ικανότητα για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος λήψης τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι με απλή σάρωση (single overpass – δεδομένα που συλλέγονται από ένα πέρασμα του δορυφόρου), που σχηματίζουν τη δορυφορική εικόνα. Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από τον δορυφόρο NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναλύονται στο κεφάλαιο 3.1.

Η φασματική διακριτική ικανότητα και εύρος καθώς και τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά (χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα) παίζουν σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό και την επιλογή των δορυφορικών εικόνων. Το φασματικό εύρος περιγράφει τις περιοχές του ΗΜΦ που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της πληροφορίας π.χ. χρησιμοποιείται μόνο το ορατό φάσμα ή το εύρος επεκτείνεται και στο θερμικό. Η φασματική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στον αριθμό των περιοχών (bands) σε ένα συγκεκριμένο ή μη τμήμα του ΗΜΦ, π.χ. οι πολυφασματικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη φασματική διακριτική ικανότητα από τα όργανα ευρείας περιοχής φάσματος. Το χωρικό εύρος είναι η περιοχή η οποία καλύπτεται από την εικόνα. Η χωρική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στο μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixel) από τα οποία αποτελείται η

εικόνα. Το χρονικό εύρος είναι η περίοδος καταγραφής των δεδομένων. Η χρονική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στη συχνότητα επανάληψης λήψεως δεδομένων από τον δορυφόρο και για μερικές εφαρμογές στη διαθεσιμότητα λήψεως δεδομένων που δεν υπόκεινται σε περιορισμούς από νεφοκάλυψη. Το εύρος και η διακριτική ικανότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων, καθώς και άλλων πηγών δεδομένων όπως επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, είναι ανάγκη να είναι απολύτως κατανοητά για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση και χαρτογράφηση της επίγειας βλάστησης και της κατάστασης αυτής.

Η τηλεπισκόπηση της επιφάνειας του εδάφους λαμβάνει χώρα σε μήκη κύματος του ΗΜΦ στα οποία το φως μπορεί να διαπεράσει την ατμόσφαιρα χωρίς ιδιαίτερες αλληλεπιδράσεις. Αυτές οι περιοχές του ΗΜΦ ονομάζονται ατμοσφαιρικά παράθυρα και αναφέρονται στο φασματικό εύρος στο οποίο η ακτινοβολία που καταγράφεται από τα τηλεπισκοπικά όργανα περιέχει πληροφορίες για την επιφάνεια της γης. Αυτά τα ατμοσφαιρικά παράθυρα ορίζονται από τα συστατικά της γήινης ατμόσφαιρας. Υπάρχουν κάποια αέρια που σε συγκεκριμένα μήκη κύματος απορροφούν όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, απαγορεύοντας τη χρήση αυτών των περιοχών στην τηλεπισκόπηση. Οι περιοχές του ΗΜΦ, περιγράφονται συνοπτικά στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Περιοχές του ΗΜΦ (Μέρτικας, 1999).

2.2 Η Τηλεπισκόπηση στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ

Η ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ κυμαίνεται από τα 0,4 έως 3,75μm και υποδιαιρείται στο ορατό (0,4 – 0,7μm), στο κοντινό υπέρυθρο (NIR, 0,7 – 1,1μm) και στο μέσο υπέρυθρο (1,1 – 3,75μm). Η ορατή περιοχή του ΗΜΦ είναι αυτή την οποία αισθάνεται το ανθρώπινο μάτι με αποτέλεσμα την ικανότητα της όρασης. Οι διαφορετικές ανακλαστικές ιδιότητες των υλικών και επιφανειών έχουν ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των χρωμάτων στο ορατό φάσμα του ΗΜΦ. Η

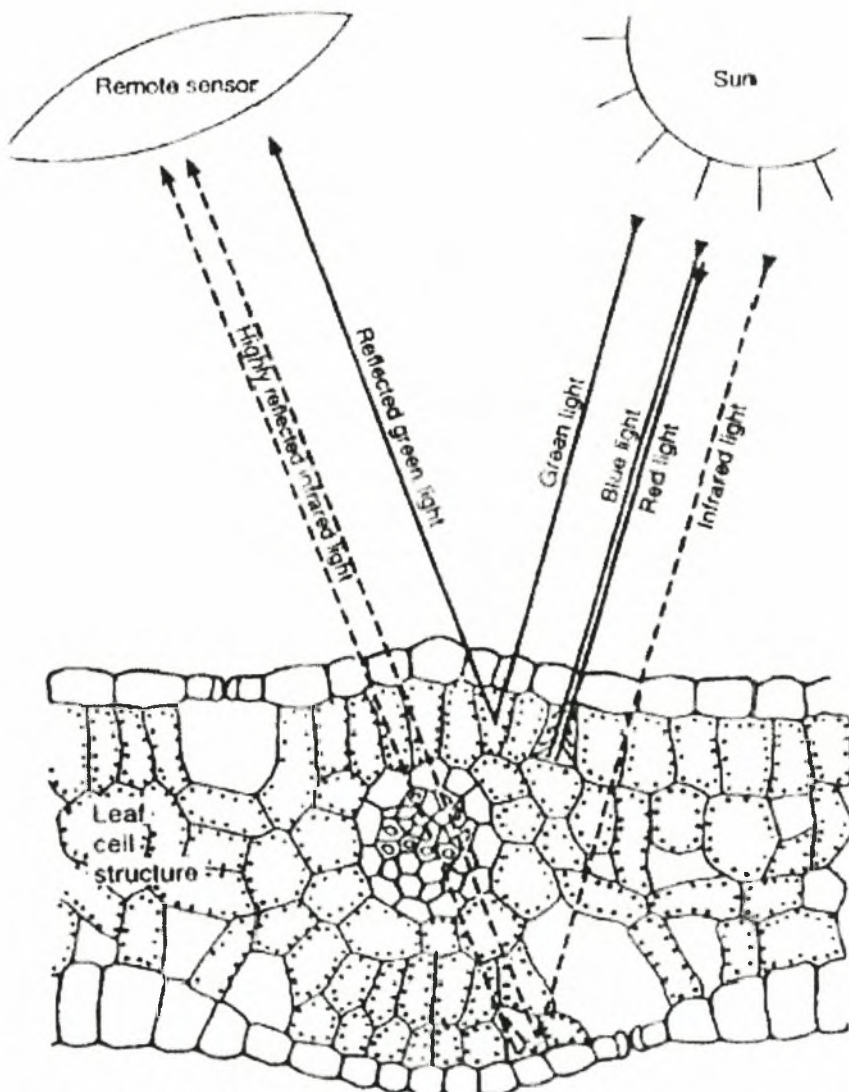
αλληλεπίδραση μεταξύ των φύλλων και του φωτός που προσκρούει σε αυτά, είναι ένας καθοριστικός παράγοντας της διαφορετικής απόκρισης στην ερυθρή και στην κοντινή υπέρυθρη περιοχή του ανακλώμενου φωτός. Η χρωστική χλωροφύλλη που περιέχεται στα φύλλα, παρουσιάζει τη μέγιστη απορρόφηση στην ερυθρή περιοχή του ορατού φάσματος. Στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου η ακτινοβολία ανακλάται ισχυρά από τον μεσοκυττάριο χώρο του φύλλου με αποτέλεσμα την αύξηση των ραδιομετρικών τιμών (σχήμα 2.4). Έτσι πολλοί αισθητήρες δορυφόρων είναι σχεδιασμένοι να καταγράφουν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη βλάστηση (π.χ. Landsat TM και NOAA/AVHRR). Χρησιμοποιώντας την πληροφορία στην ορατή και κοντινή υπέρυθρη περιοχή του ΗΜΦ μπορούν να προκύψουν δείκτες βλάστησης που έχουν αποδειχθεί σημαντικό εργαλείο στην μελέτη της κατάστασης της βλάστησης από τις αρχές της δεκαετίας του '70 (Tarpley *et al.*, 1984).

Σε σχέση με τη βλάστηση η ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ χρησιμοποιείται μεταξύ των άλλων για:

1. Τον προσδιορισμό της τρέχουσας κατάστασης της βλάστησης (McVicar and Jupp, 1998),
2. Την χαρτογράφηση των εδαφικών επιφανειών με τη χρήση δύο κύριων χαρακτηριστικών της βλάστησης: της εδαφικής φυτοκάλυψης και των φαινολογικών σταδίων της ανάπτυξης των φυτών (McVicar and Jupp, 1998),
3. Την χαρτογράφηση της επανασύστασης των φυσικών πόρων (π.χ. λιβάδια), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη πυρκαγιών κατά την διάρκεια περιόδων ξηρασίας (Chladil and Nunez, 1995, Illera *et al.*, 1996).

Προηγούμενες έρευνες απόδειξαν ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της παρουσίας του φυλλώματος, συμπεριλαμβάνοντας μετρήσεις του δείκτη φυλλικής

επιφάνειας (LAI = Leaf Area Index) (Tucker, 1979), της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το φυτό (Sellers, 1985) και δεικτών βλάστησης όπως ο απλός λόγος κοντινού υπέρυθρου – ερυθρού και ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) (Tian, 1989: Tian *et al.*, 1989).



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της ανάκλασης του φωτός στον μεσοκυττάριο χώρο ενός πράσινου φύλλου (Harrison and Jupp, 1989).

Το ποσοστό φυτοκάλυψης είναι μία από τις συνιστώσες που ορίζουν την ισχύ του σήματος στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ. Υπάρχουν όμως και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τελική τιμή του εικονοστοιχείου. Σε αυτούς περιλαμβάνεται και η γεωμετρία των θέσεων ήλιου – στόχου – αισθητήρα. Αυτός ο παράγοντας ελέγχει την συνεισφορά του ποσοστού σκίασης στο σήμα. Η σκίαση μπορεί να είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ηλίου με την τοπογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής και να επηρεάζεται από τις σκιάσεις που προκαλεί η βλάστηση. Αυτή η επίδραση, που ορίζεται από την συνάρτηση κατανομής της ανακλαστικότητας διπλής κατεύθυνσης (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) (Deering, 1989, Burgess and Pairman, 1997), είναι χαρακτηριστικό της δομής της βλάστησης. Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν την ισχύ του σήματος στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ, είναι οι μεταβολές στο χρώμα του εδάφους, στο σήμα παρατήρησης σε σχέση με τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής συνιστώσας του σήματος, εμπεριέχοντας σε αυτές και τα ατμοσφαιρικά υδάτινα κατακρημνίσματα (Choudhury and DiGirolamo, 1995, Hobbs, 1997) καθώς και οι μεταβολές στην απόκριση του αισθητήρα με την πάροδο του χρόνου.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι και μέθοδοι με τους οποίους μπορεί η τηλεπισκόπηση να συνεισφέρει στη χαρτογράφηση των χρήσεων γης με απώτερο σκοπό την αναγνώριση και την παρακολούθηση του φαινομένου της ξηρασίας. Σ' αυτές περιλαμβάνονται η χαρτογράφηση των τύπων βλάστησης και η παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης (Kogan, 1990, Samarasinghe, 2003).

2.2.1 Παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης με τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν και να εκτιμήσουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η βλάστηση, το ποσοστό εδαφοκάλυψης καθώς επίσης και τις χωρικές και χρονικές μεταβολές. Υπάρχουν πολλοί τρόποι προσέγγισης που περιγράφονται στις εξής κατηγορίες:

1. Χρήση τηλεπισκοπικών εικόνων – Δορυφορικών δεδομένων.
2. Χρήση τηλεπισκοπικών εικόνων σε συνδυασμό με μετεωρολογικές παραμέτρους.
3. Χρήση μοντέλων γεωργικής παραγωγής.
4. Αντιστροφή των μοντέλων ανάπτυξης των φυτών.

Στην παρούσα εργασία η παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης γίνεται με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων.

Όπως προαναφέρεται, η διαφορετική ανακλαστικότητα της πράσινης βλάστησης σε τμήματα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ορατό και κοντινό υπέρυθρο) παρέχει μία καινοτομική μέθοδο παρακολούθησης της επίγειας βλάστησης από το διάστημα. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου γίνεται μία σύντομη αναφορά στην φυσιολογία των φυτών.

2.2.2 Φυσιολογία των φυτών

Η ηλιακή ακτινοβολία (0.4 – 2.5 μm) που διεισδύει στο φύλλο ενός φυτού, υπόκειται σε ανάκλαση, διάθλαση και απορρόφηση. Η ανάκλαση λαμβάνει χώρα λόγω των διαφορετικών δεικτών διάθλασης μεταξύ των αερίων του μεσοκυττάριου χώρου του φύλλου και των ιδίων των κυττάρων. Επίσης κάποιο ποσοστό διάθλασης οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενδοκυτταρικών συστατικών, όπως μακρομορίων και λυσοσωμάτων, το οποίο όμως, ανέρχεται στο 10% μόνο της συνολικής διάθλασης.

Οι χρωστικές των φυτών και το νερό στο μεσόφυλλο απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία στις περιοχές 0.4 – 0.7 μm και 1.3 – 2.5 μm αντίστοιχα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ακτινοβολία στην πρώτη περιοχή είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως PAR (Photosynthetic Active Radiation) ή ενεργός/αποτελεσματική για τη φωτοσύνθεση ακτινοβολία και απορροφάται κυρίως από τη χλωροφύλλη (a και b), συστατικό των χλωροπλαστών και δευτερευόντως από τα καροτενοειδή. Στην περιοχή 0.7 – 1.3 μm πραγματοποιείται μηδαμινή ή καθόλου απορρόφηση και έτσι κυριαρχούν οι μηχανισμοί ανάκλασης και εκπομπής. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία τελικά είτε απορροφάται, είτε ανακλάται και διαχέεται διαμέσου της φυτικής μάζας ή στο υπόβαθρο αυτής (έδαφος, ατμόσφαιρα κλπ) (Δαλέζιος, 2002).

Η φασματική συμπεριφορά της φυτικής κάλυψης στο εύρος 0.4 – 0.7 μm προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών στα διάφορα στάδια καλλιεργούμενων και μη φυτών, λαμβάνοντας όμως υπόψη και την αντίστοιχη συμπεριφορά του γύρω μικροπεριβάλλοντος, π.χ. του εδάφους. Έτσι, σε γενικές γραμμές, όπως προκύπτει από μελέτες και έρευνες, τέσσερις είναι οι φασματικές περιοχές που ενδιαφέρουν στην παρακολούθηση της βλάστησης, διότι σ' αυτές κυριαρχούν πολύ σημαντικά φυσιολογικά φαινόμενα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 (Δαλέζιος, 2002).

Στις περιοχές 1 και 2 (Πίνακας 2.1) λαμβάνει χώρα η μέγιστη αντίθεση στη φασματική συμπεριφορά ανάμεσα στο γυμνό έδαφος και τη βλάστηση και, πιο συγκεκριμένα, από 0.62 έως 0.68 μm . Οι περιοχές 2 και 3 αναφέρονται στην περιοχή του ΗΜΦ που θεωρείται σημαντική βάση της φυσιολογίας των φυτών για την εξαγωγή των δεικτών βλάστησης. Έτσι, από τις περιοχές 1 και 2 είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα όσο αφορά στο ρυθμό φωτοσύνθεσης και από τις περιοχές 2

και 3 όσον αφορά στην πυκνότητα της χλωροφύλλης και στο ποσό του φυλλώματος στη φυτική μάζα. Η περιοχή 4 παρέχει χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν στο περιεχόμενο νερό στα φύλλα, γεγονός άμεσα συνδεδεμένο με το ρυθμό διαπνοής και, κατ' επέκταση, με την επίδραση αυτού στη φυσιολογική διεργασία της φωτοσύνθεσης. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση ελλείμματος νερού στους μεσοκυττάρους χώρους στο φύλλο, κάτω από προκαθορισμένα από το φυτό όρια, συνεπάγεται κλείσιμο των στοματίων για διακοπή της διαπνοής, άρα και φωτοσύνθεσης, αφού παρεμποδίζεται η ανταλλαγή αερίων με το μικροπεριβάλλον (CO₂, O₂ κλπ).

Πίνακας 2.1: Ενδιαφέρουσες φασματικές περιοχές σε σχέση με πολύ σημαντικές φυσιολογικές διεργασίες των φυτικών κυττάρων (Δαλέζιος, 2002).

1	Απορρόφηση ακτινοβολίας από καροτενοειδή και χλωροφύλλη	μέχρι 0.5 μm
2	Ισχυρή απορρόφηση ακτινοβολίας από χλωροφύλλη	0.62 – 0.7 μm
3	Ανάκλαση ακτινοβολίας από τα κυτταρικά τοιχώματα κυττάρων του μεσοφύλλου	0.74 – 1.1 μm
4	Απορρόφηση ακτινοβολίας από το νερό	1.3 – 2.5 μm

2.2.3 Δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς

Ένας πολύ γνωστός δείκτης είναι ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI). Ο δείκτης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2.1)$$

όπου, τα NIR και R έχουν οριστεί προηγουμένως. Ο NDVI προτιμάται για ολική φυτική παρακολούθηση διότι αντισταθμίζει μερικά τις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, την κλίση του εδάφους και τον προσανατολισμό θέσης. Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται θεωρητικά από -1 έως +1, όπως εξάγεται από τη μαθηματική εξίσωση που προαναφέρθηκε. Τιμές άνω του μηδενός υποδηλώνουν την ύπαρξη πράσινης βλάστησης (χλωροφύλλης) ή γυμνού εδάφους (τιμές γύρω στο μηδέν), ενώ κάτω του μηδενός δηλώνουν την ύπαρξη νερού, χιονιού, πάγου και νεφών. Ενδεικτικές τιμές για κάθε ένα από τους παραπάνω τύπους φαίνονται στον Πίνακα 2.2 (Δαλέζιος, 2002).

Η σπουδαιότητα του NDVI ενάγεται στο γεγονός ότι είναι ενδεικτικός του βαθμού της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας της υπό παρακολούθηση βλάστησης (FEWS Bulletin, 1996). Είναι ένας γρήγορος και αποδοτικός τρόπος για την εκτίμηση της υγιούς βλάστησης. Μετά από αντίξοες συνθήκες, αναμένεται σημαντική μείωση του NDVI στο πεδίο και οι τιμές αποκρίνονται στην έλλειψη στοιχείων χλωροφύλλης και άρα σε μειωμένη κατά πολύ φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι ο NDVI συσχετίζεται καλά με αθροιστική βροχόπτωση 2-3 μηνών (Malo and Nicholson, 1990, Schultz and Halper, 1993), γεγονός ιδιαίτερα ενδιαφέρον σε υδρολογικές εφαρμογές.

Οι Liu και Kogan (1996) παρατήρησαν ότι ο δείκτης NDVI παρουσιάζει μεγάλη συσχέτιση με το έλλειμμα ύδατος και την βροχόπτωση για το Cerrado (λιβάδι στη Σαβάνα) και για την Caatinga (δασικές εκτάσεις), όπου και στις δύο περιοχές υπάρχουν καλλιέργειες με κατά τόπους υγρές και ξηρές περιοχές. Για τέσσερις τοποθεσίες ο δείκτης NDVI εξήγησε 46-61% της διακύμανσης της βροχόπτωσης με

χρονικό βήμα μετρήσεων ενός μηνός και για περίοδο από τον Αύγουστο του 1981 έως τον Ιούλιο του 1987. Μέσα στο χρονικό πλαίσιο της ανάλυσης δεν υπήρξε αναφορά που να εξασφαλίζει ότι η εδαφική κάλυψη και εξαιτίας αυτής και η απόκριση του σήματος του NDVI ως συνάρτηση του καιρού, παρέμειναν σταθερές.

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές του δείκτη NDVI σε διάφορες μορφές κάλυψης εδάφους (Δαλέζιος, 2002).

ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΚΑΛΥΨΗΣ	NDVI (σε κλίμακα -1εώς 1)	NDVI (σε κλίμακα 0-255)
Πυκνή βλάστηση	$0.500 \leq \text{NDVI} \leq 1$	$210 \leq \text{NDVI} \leq 255$
Μέτρια πράσινη 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 (οργωμένο ή βραχώδες)	$0.025 \leq \text{NDVI} < 0.090$	$88 \leq \text{NDVI} < 105$
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	$-1 \leq \text{NDVI} < -0.046$	$0 \leq \text{NDVI} < 70$

Δεδομένου ότι η χλωροφύλλη απορροφά ακτινοβολία στο εύρος 0.62 έως 0.7 μm και η πράσινη επιφάνεια των φύλλων ανακλά ακτινοβολία στα μήκη από 0.74 έως 1.1 μm , ο NDVI, μπορεί να ειπωθεί, ότι είναι αξιόπιστος δείκτης της πυκνότητας της χλωροφύλλης στο φύλλο καθώς και του ποσοστού πυκνότητας φυλλικής επιφάνειας στο έδαφος. Κατ' επέκταση, έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση ξηρής φυτικής ουσίας (βιομάζας) σε εκτάσεις με φυτοκάλυψη διαφόρων ειδών.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές, ότι ο NDVI αποτελεί ένα δείκτη άρρηκτα συνδεδεμένο με την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών και πρακτικά εφαρμόσιμο μέσω της σύγχρονης τεχνολογίας για την παρακολούθηση της επίγειας βλάστησης με τηλεπισκοπικά μέσα. Η διαχρονική εξέλιξη της τιμής του σε μελέτες και αναλύσεις χρονοσειρών αντικατοπτρίζει την αύξηση των βιοχημικών και φυσιολογικών ρυθμών ανάπτυξης των φυτών, όπως έντονη βλαστική και αναπαραγωγική ανάπτυξη (ανθοφορία, καρποφορία) λόγω έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, καθώς και ικανοποιητική συσχέτιση με την τελική παραγωγή βιομάζας στο τέλος μιας βλαστικής ή καλλιεργητικής περιόδου. Αντίθετα, βαθμιαία πτώση στις τιμές του NDVI υποδηλώνει καταπόνηση (stress) από έλλειψη νερού ή υπερβολικά υψηλές για την εποχή ή για τα φυτά θερμοκρασίες, “σοκ” τα οποία οδηγούν σε μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης και, τελικά, σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμισή τους (καταπόνηση → μάρανση → ξήρανση → θάνατος). Τέτοιου είδους διεργασίες είναι είτε φυσιολογικές για ένα φυτικό είδος ως τμήμα βιολογικών κύκλων ή ενδογενών ρυθμών ανάπτυξης που διαθέτει το φυτό αυτό καθαυτό, είτε τυχαίες ανωμαλίες, άλλοτε αντιστρεπτές και άλλοτε όχι. Εμπειρικές μελέτες δείχνουν ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ της ανάπτυξης της βλάστησης και του επιπέδου των δεικτών βλάστησης (Barrett and Thompson, 1983).

Υπάρχουν παρόλα αυτά όρια στις εφαρμογές του NDVI. Περισσότερο βασικές μέθοδοι συνδέουν τον NDVI με τον Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας (LAI) (Tucker, 1979; Clevers, 1988). Ο NDVI αποτυγχάνει να εκτιμήσει τη βλάστηση με ακρίβεια, όταν ο δείκτης LAI (Leaf Area Index, δείκτης φυλλικής επιφάνειας), που είναι μέτρο του ποσοστού της κάλυψης του εδάφους με φύλλωμα, έχει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές. Έτσι, όταν η φυτική βλάστηση καλύπτει κάτω από το 20% του εδάφους, η τιμή του NDVI αντικατοπτρίζει τιμές γυμνού εδάφους και άλλων

εδαφικών σχηματισμών στην επιφάνεια. Για το λόγο αυτό η εκτίμηση βλάστησης σε ξηροφυτικές περιοχές είναι αρκετά επισφαλής.

Άλλωστε, το έλλειμα νερού είναι μόνο μία αιτία της ύπαρξης χαμηλής πράσινης φυτοκάλυψης που επάγει σε σήματα του NDVI. Για παράδειγμα, στις ορεινές περιοχές της Νέας Νότιας Ουαλίας, η υδρολογική ξηρασία μπορεί να λήξει το Μάιο, ακολουθούμενη από βροχές, αλλά η ξηρασία μπορεί να συνεχιστεί μέχρι τον Σεπτέμβριο εξαιτίας της θερμοκρασίας του αέρα που είναι περιοριστικός παράγοντας στην ανάπτυξη των φυτών (McVicar and Jupp, 1998). Έτσι για να ληφθούν υπόψη και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες (π.χ. θερμοκρασία αέρα) θα ήταν πιο ορθό να συνδυαστεί ο NDVI με έναν ακόμα δείκτη που να εμπεριέχει την επίδραση άλλων περιοριστικών παραγόντων. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης θερμικής μονάδας ή ημεροβαθμοί για την ενσωμάτωση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη της βλάστησης, την σύνδεση αυτής με την ύπαρξη υδρολογικού ελλείμματος και για την ζωνοποίηση περιοχών με κοινά υδροκλιματικά χαρακτηριστικά.

Τέλος, ο NDVI εκτιμάται από δορυφορικά δεδομένα, που στην πλειοψηφία των επιστημονικών μελετών μέχρι σήμερα, προέρχονται από τη σειρά των μετεωρολογικών δορυφόρων πολικής τροχιάς NOAA/AVHRR λόγω της υψηλής χρονικής διακριτικής ικανότητας (κάλυψη σε καθημερινή βάση), που διαθέτουν ραδιόμετρα με χωρική διακριτική ικανότητα $1 \times 1 \text{ Km}^2$ περίπου και πέντε κανάλια φασματικών συχνοτήτων, μεταξύ των οποίων είναι και αυτά του ορατού και υπερύθρου (Goward, 1991). Πολλές φορές, όταν απαιτείται υψηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα εξάγεται και από δορυφορικά δεδομένα που προέρχονται από περιβαλλοντικούς δορυφόρους (Landsat και SPOT). Έτσι λοιπόν ο υπολογισμός του

δείκτη γίνεται από διάφορους τύπους δορυφορικών εικόνων ανάλογα με την εφαρμογή. Π.χ.:

- Σε εικόνες NOAA/AVHRR (1-8 Km): Δημιουργία χαρτών NDVI σε παγκόσμια κλίμακα και καθημερινή βάση.
- Σε εικόνες SPOT-XS (20 m): Επιτρέπει την παρακολούθηση με λεπτομέρεια σε κλίμακα λεκάνης απορροής.

2.3 Η Τηλεπισκόπηση στην θερμική περιοχή του ΗΜΦ

Η θερμική περιοχή του ΗΜΦ αναφέρεται στο φασματικό εύρος από 3,75 – 12,5 μm . Η ενέργεια της ακτινοβολίας που συλλέγεται από τους τηλεπισκοπικούς αισθητήρες εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης, τους ωκεανούς και τους ανώτερους νεφικούς σχηματισμούς και είναι συνάρτηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα τα οποία επιτρέπουν τον υπολογισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων από τη θερμική περιοχή. Ο Prata (Prata, 1994, Prata *et al* 1995) αναφέρει τους αλγόριθμους και τις παραμέτρους που απαιτούνται στον υπολογισμό της θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους. Ο Barton (1995) εξετάζει ένα εύρος αλγόριθμων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (SST: Sea Surface Temperature). Ο Rassow (1989) αναφέρεται στην μέτρηση των ιδιοτήτων των νεφικών σχηματισμών με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων.

Η τηλεπισκόπηση στην θερμική περιοχή του ΗΜΦ συμβάλει στην παρατήρηση της κατάστασης του επιφανειακού ενεργειακού ισοζυγίου (SEB: Surface Energy Balance) σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο

εξαρτάται από την καθαρή ακτινοβολία που προσκρούει στην επιφάνεια. Επίσης, κατά την διάρκεια της ημέρας δέχεται την επίδραση της εισερχόμενης μικρού μήκους ηλιακής ακτινοβολίας και ένα ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας που εξαρτάται από την λευκαύγεια (albedo) της κάθε επιφάνειας. Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο επηρεάζεται ακόμα από συνιστώσες της από και προς τη γη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Στην επιφάνεια του εδάφους η καθαρή ακτινοβολία, σε όλα τα μήκη κύματος, βρίσκεται σε ισορροπία με την αισθητή, τη λανθάνουσα και την εδαφική ροή θερμότητας. Σε μεγάλες χρονικές περιόδους η εδαφική θερμική ροή θεωρείται μηδενική και το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ της αισθητής και της λανθάνουσας ροής θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η μετρούμενη επιφανειακή θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης είναι, εν μέρει, εξαρτημένη από τις σχετικές ποσότητες της αισθητής και της λανθάνουσας ροής θερμότητας.

Το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση:

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (2.2)$$

όπου:

- R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος ($W m^{-2}$).
- E είναι η εξατμισοδιαπνοή των υδρατμών ($m s^{-1}$).
- λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του νερού ($J m^{-3}$).
- H είναι η αισθητή ροή θερμότητας ($W m^{-2}$).
- G είναι η εδαφική ροή θερμότητας ($W m^{-2}$).

Το λE αναφέρεται στο ποσό της ενέργειας που χρειάζεται για τη μετάβαση μιας συγκεκριμένης ποσότητας ύδατος από την υγρή στην αέρια μορφή είτε με εξάτμιση, είτε με διαπνοή.

Η διαθέσιμη καθαρή ενέργεια (AE: Available Energy) στην επιφάνεια της γης, που είναι διαθέσιμη για να μετατραπεί σε άλλες μορφές, μπορεί να γραφτεί ως:

$$AE = R_n - G = \lambda E + H \quad (2.3)$$

Η θερμική περιοχή του ΗΜΦ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της βλάστησης. Ο δείκτης που εξάγεται από τα δεδομένα του θερμικού καναλιού ονομάζεται δείκτης κατάστασης θερμοκρασίας (TCI: Temperature Condition Index) και μπορεί να είναι πολύ χρήσιμος στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και στην επίδρασή τους στην βλάστηση (Kogan, 1995(c)).

2.3.1 Θερμοκρασία επιφανείας εδάφους

Δύο μεγάλα προβλήματα παρουσιάζονται κατά την εξαγωγή της θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους (Land Surface Temperature – LST) από δορυφορικά δεδομένα NOAA/AVHRR:

1. Η επίδραση της ατμόσφαιρας
2. Η άγνωστη εκπομπή ακτινοβολίας της επιφάνειας υπό εξέταση.

Στην παρούσα εργασία, η παραγωγή των χαρτών LST στηρίζεται στον αλγόριθμο “split-window” των Becker και Li (1990). Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη διαφορά της επίδρασης της απορρόφησης στα κανάλια τέσσερα και πέντε (CH₄ και CH₅) για την διόρθωση της ατμοσφαιρικής εξασθένησης ή οποία προκαλείται κυρίως από την απορρόφηση των υδρατμών. Για τον υπολογισμό της εκπομπής από την επιφάνεια του εδάφους εφαρμόζεται η σχέση που δίνεται από τους Van de Griend και Owe (1993). Ο αλγόριθμος των Becker και Li (1990) αναλύεται παρακάτω:

$$T_S = 1.274 + \left(1 + 0.15616 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - 0.432 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right) \frac{T_1 + T_2}{2} + \left(6.26 + 3.93 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + 33.33 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_1 - T_2}{2} \quad (2.4)$$

όπου, TS είναι η θερμοκρασία επιφανείας, T_4 and T_5 είναι οι θερμοκρασίες (TB) των καναλιών 4 και 5 του AVHRR, αντίστοιχα, $\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2$ με ε_4 και ε_5 την εκπομπή των καναλιών 4 και 5, αντίστοιχα, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$. Οι παράμετροι δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\varepsilon_4 = 1,0094 + 0,047 \ln(\text{NDVI}) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_4 + 0,01 \quad (2.6)$$

όπου, ο NDVI αντιπροσωπεύει τις τιμές του δείκτη από την σύνθετη εικόνα μεγίστων τιμών (Maximum Value Composite – MVC) NDVI του τελευταίου δεκαημέρου.

Οι τιμές των εικονοστοιχείων στις εικόνες LST (8-bit integer format) είναι σε κλίμακα από 0-255 (κλίμακα του γκρι). Η τιμή μηδέν αναφέρεται στο «νερό», η τιμή 255 αντιπροσωπεύει «νέφη» ή την έλλειψη δεδομένων. Για να μετατραπούν οι τιμές LST σε θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση:

$$T(^{\circ}\text{C}) = (\text{τιμή σε κλίμακα του γκρι} * 0,5) - 40 \quad (2.7)$$

Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα είναι πλέον $0,5^{\circ}\text{C}$ και το εύρος των τιμών από $-39,5^{\circ}\text{C}$ (τιμή «1» σε κλίμακα του γκρι) έως 87°C (τιμή «254» σε κλίμακα του γκρι).

2.4 Ημεροβαθμοί ή Θερμική μονάδα

Είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του ρυθμού ανάπτυξης πολλών οργανισμών (Porter *et al.*, 1991). Έτσι λοιπόν, τα φυτά και άλλοι οργανισμοί (ασπόνδυλα, νηματώδεις) απαιτούν ένα ορισμένο ποσό θερμότητας για να αναπτυχθούν από ένα σημείο του κύκλου ζωής τους σε άλλο. Το μέτρο αυτής της συσσωρευμένης θερμότητας είναι γνωστό ως φυσιολογικός χρόνος. Ο φυσιολογικός χρόνος εκφράζεται συχνά και προσεγγίζεται σε μονάδες

αποκαλούμενες Ημεροβαθμοί ή Θερμικές μονάδες (Degree Days, DD ή Heat Unit, HU, °C).

Έτσι λοιπόν, ως ημεροβαθμοί ή θερμική μονάδα ορίζεται η αθροιστική μέση θερμοκρασία εκείνων των ημερών, που έχουν μέση ημερήσια θερμοκρασία υψηλότερη από μία κρίσιμη τιμή κατωφλίου ειδική για κάθε καλλιέργεια και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$DD = \sum_1^7 \delta_i (T_{mean} - T_c) \quad (2.8)$$

όπου, $\delta_i=1$ όταν $T_{mean} > T_c$, $\delta_i=0$ όταν $T_{mean} \leq T_c$, T_{mean} είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C και T_c η κρίσιμη θερμοκρασία με συνήθεις τιμές 0, 5 και 10°C. Η εξίσωση έχει την ανωτέρα μορφή διότι ο δείκτης υπολογίστηκε σε εβδομαδιαία βάση.

Οι ημεροβαθμοί αντιπροσωπεύουν την αθροιστική θερμοκρασία πάνω από μία τιμή κατωφλίου η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από είδος σε είδος. Η τιμή κατωφλίου σηματοδοτεί την αρχή της ανάπτυξης. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στην βλάστηση. Δεν εξετάζεται κάποια ποικιλία η κάποιο συγκεκριμένο είδος. Η τιμή κατωφλίου T_c που χρησιμοποιείται είναι 10 °C, αφού τα περισσότερα είδη καλλιεργειών και γενικότερα βλάστησης απαιτούν αυτή τη θερμοκρασία για να αρχίσουν να αναπτύσσονται (Dalezios and Zarpas, 1995 και 1996, Dalezios *et al.*, 2002, Migdakov and Gemtos, 1998).

Ο συγκεκριμένος δείκτης χρησιμοποιείται συχνά για την εξέταση της φαινολογικής ανάπτυξης των καλλιεργειών (Porter *et al.*, 1991). Είναι σημαντικός για διάφορα φαινολογικά στάδια (φύτρωμα, ανθοφορία, καρποφορία κτλ.) καθώς και για τη γενικότερη ολοκλήρωση του βιολογικού κύκλου κάθε φυτού. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ζωνοποίηση της κατανομής καλλιεργειών ή εντόμων (Robertson, 1973, Scriber and Hainzee, 1987).

Στην παρούσα εργασία ο δείκτης DD χρησιμοποιείται για να συνδέσει τη θερμοκρασία και τον ενδεχόμενο ρυθμό ανάπτυξης των φυτών με την εμφάνιση υδρολογικού ελλείμματος, καθώς επίσης και για την ζωνοποίηση περιοχών που εμφανίζουν έλλειμμα νερού, μιας από τις κυριότερες συνιστώσες της υδρολογικής ξηρασίας.

2.5 Ο δείκτης ξηρότητας (Aridity Index)

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

$$AI = \frac{P}{PET} \quad (2.9)$$

όπου, P το μέσο ετήσιο ύψος βροχής και PET το μέσο ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Σε περίπτωση που το χρονικό βήμα εξέτασης είναι μικρότερο του έτους, π.χ. μηνιαίο, γίνεται χρήση του της μηνιαίας βροχόπτωσης και της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Στον Πίνακα 2.3 αναγράφονται οι τιμές που λαμβάνει ο δείκτης και ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός του κλίματος μιας περιοχής βάση αυτών. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο AI χρησιμοποιείται διότι υπολογίζεται σχετικά εύκολα, εφόσον δεν απαιτεί πληθώρα δεδομένων και αποτελεί μία καλή λύση για την ένδειξη εμφάνισης της ξηρασίας αφού εμπεριέχει δύο βασικούς υδρολογικούς παράγοντες, τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά κλίματος μιας περιοχής με βάση το δείκτη ξηρότητας (UNESCO, 1979).

Κατηγορία κλίματος	P/PET
Ακραία ξηρή	<0,03
Ξηρή	0,03 - 0,20
Ημίξηρη	0,20 - 0,50
Ύφυγρη	0,50 - 0,75
Υγρή	>0,75

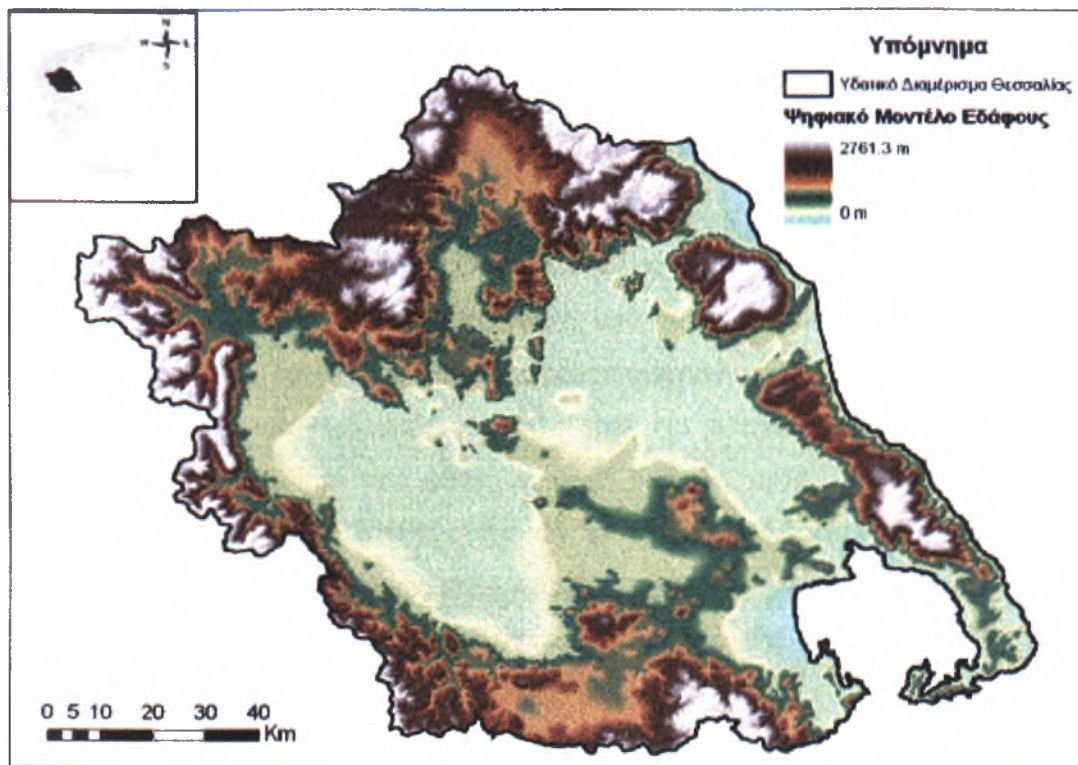
2.6 Έλεγχος στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας

Η Θεσσαλία βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της κεντρικής Ελλάδας. Ανατολικά βρέχεται από το Αιγαίο Πέλαγος, από τη δυτική και την κεντρική Μακεδονία χωρίζεται από τους ορεινούς όγκους του άνω Ολύμπου και του Τιτάρου ενώ από την Ήπειρο, η Θεσσαλία χωρίζεται από τα δυτικότερα όρη της Ν. Πίνδου. Νοτιότερα, τα διοικητικά της όρια με τη Στερεά Ελλάδα ταυτίζονται με μικρό τμήμα του Αχελώου. Η ορεινή Θεσσαλία έχει έκταση 9550 Km², με ποσοστό επί του συνόλου 33,5%. Το μέσο υψόμετρο του διαμερίσματος είναι 285m (Πέππας, 2001).

Η γενικότερη γεωμορφολογία και φυσιολογία της περιοχής μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Η πεδινή περιοχή της Θεσσαλίας χωρίζεται από τα χαμηλά Χαλκηδόνια όρη σε δύο μεγάλα τμήματα ίσης περίπου έκτασης, το ανατολικό και το δυτικό, ενώ περιφερειακά των πεδινών αυτών εκτάσεων βρίσκονται οι ορεινοί όγκοι.

Το ανατολικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας έχει τα εξής γεωγραφικά όρια: βόρεια τον Κάτω Όλυμπο και την Όσσα, ανατολικά και βορειοδυτικά το όρος Ζάρκο. Το νότιο και νοτιοανατολικό μέρος αποτελεί μια κλειστή λεκάνη, την αποξηρανθείσα λίμνη Κάρλα. Τελευταία στο χαμηλότερο τμήμα αυτής και προς το Βόλο γίνονται έργα για να επανέρθει στη φυσική της κατάσταση. Στην Ανατολική Θεσσαλία εντάσσονται και οι ορεινές, αλλά με αξιόλογη έκταση, καλλιεργούμενες εκτάσεις της Ελασσόνας και του Δαμασίου.

Το δυτικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας ορίζεται γεωγραφικά ως εξής: ανατολικά από τα Χαλκηδόνια όρη, βορειοανατολικά από το Ζάρκο, βόρεια από τα Χάσια και τα Αντιχάσια όρη, δυτικά από το Κερκέτιον όρος (Κόζιακας) και νότια από το Ναθράκιο, τους πρόποδες του όρους Τιμφρηστός και την αποξηρανθείσα λίμνη Ξυνιά. Προς τα βόρεια, οι καλλιέργειες σταματάνε στην πεδιάδα με όριο τους πρόποδες των βουνών. Αντιθέτως, στα νότια παρατηρούνται καλλιέργειες ακόμα και στους πρόποδες των βουνών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι στην κεντρική-ανατολική πλευρά της δυτικής πεδιάδας (από Φυλλήιο μέχρι και Χαλκηδόνιο), οι καλλιέργειες φθάνουν σε μεγάλο υψόμετρο, έως και 500 μέτρα, λόγω των εξαιρετικά ομαλών κλίσεων των βουνών. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το ψηφιακό ανάγλυφο του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.



Εικόνα 2.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.

2.6.1 Κλιματικές συνθήκες

Η περιοχή της Θεσσαλίας διαιρείται σε τρεις κλιματικές περιοχές:

1. Την ανατολική παράκτια και ορεινή, με μεσογειακό κλίμα
2. Την κεντρική πεδινή, με ηπειρωτικό κλίμα.
3. Την δυτική ορεινή, με ορεινό κλίμα.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C έως 17°C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22°C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την περίοδο Νοεμβρίου-Απριλίου. Οι ημέρες παγετού κυμαίνονται από 35,5 στη Λάρισα και 33,8 ημέρες στα Τρίκαλα σε μέση ετήσια βάση.

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην περιοχή είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά, στη συνέχεια μειώνεται στο πεδινό τμήμα και αυξάνεται πάλι στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Ενδεικτικές τιμές της ετήσιας βροχόπτωσης είναι 468 mm στο σταθμό Λάρισας, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1142 mm στο πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου.

Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στα ορεινά της περιοχής και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι περισσότερες χιονοπτώσεις παρατηρούνται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Στα δυτικά και ορεινά τμήματα της περιοχής αρχίζουν το Σεπτέμβριο και φθάνουν μέχρι και τις αρχές Ιουλίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο μέσος αριθμός ημερών χιονιού στη Λάρισα είναι 4,0 και στα Τρίκαλα 6,2 ημέρες. Οι χαλαζοπτώσεις είναι επίσης συχνές, κυρίως κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο στα βόρεια της περιοχής και κατά τους μήνες Φεβρουάριο ως Απρίλιο στο νοτιοανατολικό τμήμα.

Η μέση ετήσια νέφωση κυμαίνεται από 4 έως 5 βαθμίδες, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα δυτικά και τις χαμηλότερες στα ανατολικά. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% μέχρι 72%. Στο νότιο τμήμα της περιοχής εμφανίζεται ξηρή περίοδος 4 ως 5 μηνών στα ανατολικά, η οποία όμως μειώνεται βαθμιαία σε 2 ως 4 μήνες στα κεντρικά-δυτικά πεδινά και 1 ως 2 μήνες στα δυτικά ορεινά. Η φορά των ανέμων στην περιοχή ποικίλει, με τους ανατολικούς να επικρατούν στην περιοχή της Λάρισας και τους δυτικούς στην περιοχή των Τρικάλων (Πέππας, 2001).

2.6.2 Υδρολογικά στοιχεία

Οι υδατικοί πόροι της Θεσσαλίας αποτελούνται από επιφανειακά καθώς και από υπόγεια νερά. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν έργα ταμίευσης (με εξαίρεση τον Πλαστήρα), το επιφανειακό δυναμικό αναφέρεται στην παροχή των υδατορευμάτων, η οποία παρουσιάζει έντονη χωρική και χρονική διακύμανση. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα επιφανειακά νερά οριοθετούνται από το ποτάμιο υδροσύστημα και τις αντίστοιχες υδρολογικές λεκάνες, ενώ τα υπόγεια από τα αντίστοιχα υδρογεωλογικά όρια, τα οποία όμως δεν ταυτίζονται με αυτά των επιφανειακών.

Τα επιφανειακά νερά, απαντώνται σε δύο μορφές: η μια είναι τα ποτάμια ύδατα δηλαδή του Πηνειού και των κυρίων παραποτάμων του και η δεύτερη του φράγματος Πλαστήρα, ωφέλιμης χωρητικότητας $300-400\text{hm}^3$, του φράγματος του Σμοκόβου (300hm^3) που έχει κατασκευαστεί πρόσφατα και της Κάρλας που βρίσκεται υπό κατασκευήν.

Η κυριότερη λεκάνη απορροής της Θεσσαλίας, είναι αυτή του ποταμού Πηνειού και των παραποτάμων του με έκταση 9747 km^2 . Σε αυτήν ανήκουν και οι δύο μεγάλες λεκάνες της πεδινής Θεσσαλίας (ανατολική και δυτική πεδιάδα) που ο άξονάς τους έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Ολόκληρη η πεδινή Θεσσαλία, πλην της λεκάνης της Κάρλας, αποστραγγίζεται από τον Πηνειό ποταμό, ο οποίος είναι και ο αποδέκτης όλων σχεδόν των παραποτάμων και χειμάρρων που έχουν τις πηγές τους στην ορεινή Θεσσαλία. Οι δευτερεύοντες κλάδοι του Πηνειού κατέρχονται από ολόκληρη την περιφέρεια της λεκάνης απορροής της δυτικής πεδιάδας εντός αυτής. Στην ανατολική λεκάνη, ο μόνος σημαντικός δευτερεύων κλάδος ο οποίος υφίσταται είναι ο χείμαρρος Τιταρήσιος. Ανατολικότερα, βόρεια της περιοχής των Αντιχασίων και Χασίων, το κυρίως υδατόρρευμα του Πηνειού, τροφοδοτείται κυρίως από τους

ποταμούς Νεοχωρίτη, Ληθαίο και Μουργκάνι, και δυτικότερα προς την Πίνδο, από το χείμαρρο Μαλακασιώτη. Δυτικά από την ορεινή ζώνη της Νότιας Πίνδου, τροφοδοτείται κυρίως από τον Πορταϊκό ποταμό, δυτικά της Πύλης, από τον Πάμισο (ή Πλιούρη), δυτικά του Μουζακίου από το ρέμα Μέγα, και τους ποταμούς Καράμπαλη και Καλέντζη, νότια της πόλης της Καρδίτσας. Πρέπει να σημειωθεί, ότι στην ορεινή περιοχή της νότιας Πίνδου που ανήκει στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, βρίσκεται η ανάντη λεκάνη απορροής του ποταμού Αχελώου, καθώς επίσης και η ανάντη λεκάνη απορροής του παραπόταμου Ταυρώπου, του Αχελώου. Η μισή περίπου έκταση της λεκάνης απορροής του Ταυρώπου, που ανήκει διοικητικά στη Θεσσαλία, έχει δεσμευτεί από το φράγμα του Ταυρώπου το οποίο και σχηματίζει την τεχνητή λίμνη του Πλαστήρα. Μέρος του αποθηκευμένου όγκου νερού, του ταμιευτήρα αυτού, χρησιμοποιείται για την άρδευση και ύδρευση της περιοχής της Καρδίτσας. Νότια, ο Πηνειός τροφοδοτείται από πολυάριθμα ρεύματα και ποταμούς όπως ο Λεϊψίμος, ο Ρογόζινος, ο Σοφαδίτικος, ο Φαρσαλιώτης και ο Ενιπέας. Οι πηγές των ποταμών αυτών βρίσκονται στις νότιες ορεινές περιοχές.

Το φράγμα Ταυρώπου, είναι το μοναδικό εν λειτουργία φράγμα της περιοχής και υπάγεται στα διοικητικά όρια του νομού Καρδίτσας. Υπό κατασκευή βρίσκεται μόνο το φράγμα Σμοκόβου στις πηγές του Σοφαδίτικου. Στη νότια περιοχή, υπάρχει η αποξηρανθείσα λίμνη Ξυνιάδα, η οποία μέσω του ποταμού Κουμαρόρρεμα στραγγίζει τα ύδατα της προς τον Σοφαδίτικο.

Στη Θεσσαλία αναπτύσσονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς, αλλά και μεγάλες καρστικές υδρογεωλογικές ενότητες. Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία υδροφορέων, η πεδιάδα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, της δυτικής και ανατολικής Θεσσαλίας. Οι δύο λεκάνες διαχωρίζονται με λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων (Ταουσάνη), που θεωρείται

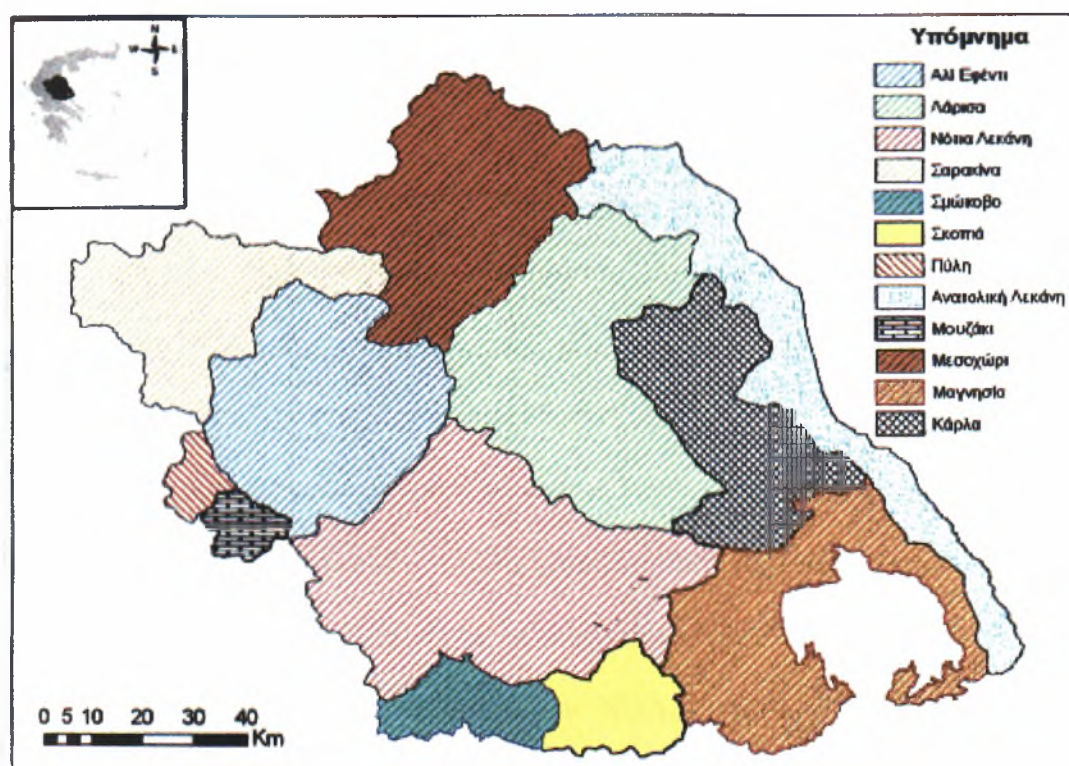
ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα. Από τις υδρογεωλογικές ενότητες της Θεσσαλίας, οι ποσότητες που μπορούν να αντληθούν έχουν υπολογιστεί σε 450 εκατομμύρια κυβικά ετησίως. Από αυτά τα 930 εκατομμύρια κυβικά θεωρούνται ότι ανήκουν στο πρακτικά εκμεταλλεύσιμο υπόγειο δυναμικό. Η μείωση αυτή οφείλεται στον συνυπολογισμό και άλλων παραγόντων όπως συνεκτίμηση του κόστους άντλησης, προστασίας υπογείων υδροφορέων από υφαλμύρωση, προστασία περιοχών προοριζόμενων για υδρεύσεις και αντικατάσταση υπογείων υδάτων από επιφανειακά.

Εκτός της ποσοτικής ανεπάρκειας στους υδατικούς πόρους της Θεσσαλίας έχει επέλθει και ποιοτική ανεπάρκεια. Ήδη παρατηρείται ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων και ειδικότερα νιτρορύπανση από τις μεγάλες ποσότητες λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες. Επίσης, λόγω της υπεράντλησης, ο υπόγειος υδατικός ορίζοντας έχει υποβαθμισθεί αισθητά, σε ορισμένες περιοχές της Θεσσαλικής πεδιάδας, με αποτέλεσμα να έχουν μειωθεί ή και μηδενιστεί οι παροχές των γεωτρήσεων και οι καλλιέργειες να μην αρδεύονται επαρκώς. Σε πολλές, τέλος περιοχές, ιδιαίτερα της ανατολικής Θεσσαλίας, έχει παρατηρηθεί και η ύπαρξη αλμυρής σφήνας στους υπόγειους υδροφορείς (Πέππας, 2001).

2.6.3 Διαίρεση της Θεσσαλίας σε υποπεριοχές

Η διαίρεση του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας σε επιμέρους περιοχές έγινε με τη χρήση γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών και συγκεκριμένα με το λογισμικό ArcGis 9.2. Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του συστήματος, η λεκάνη απορροής της Θεσσαλίας χωρίστηκε σε 12 υποπεριοχές σύμφωνα πάντοτε με τις υπολεκάνες απορροής που τροφοδοτούν τον Πηνειό και ασφαλώς με το ανάγλυφο και τη γεωμορφολογία της περιοχής. Αυτές ονομάστηκαν ως εξής: Λάρισας, Μαγνησίας, Νότια, Παράκτια, Κάρλας, Μεσοχωρίου, Σαρακίνας, Σμοκόβου, Σκοπιάς, Μουζακίου, Πύλης, και Αλί Εφέντη (Τζαμπύρας, 2005). Για

ορισμένες υποπεριοχές απαιτήθηκε περαιτέρω επεξεργασία στο γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών προκειμένου να καθοριστούν τα όρια τους. Η επεξεργασία αυτή περιελάμβανε διαδικασίες ψηφιοποίησης ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στο διαχωρισμό τους. Οι 12 υποπεριοχές παρουσιάζονται σχηματικά στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Υποπεριοχές του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Χαρακτηριστικά του δορυφόρου NOAA

Σήμερα ένα μεγάλο εύρος δορυφορικών συστημάτων είναι διαθέσιμο με διαφορετικές χωρικές και χρονικές διακριτικές ικανότητες που δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της βλάστησης. Π.χ. οι περιβαλλοντικοί δορυφόροι SPOT και Landsat παρέχουν εικόνες υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας με χαμηλή συχνότητα επανάληψης και οι NOAA/AVHRR έχουν χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα με υψηλή συχνότητα επανάληψης (Meyer-Roux and King, 1992). Οι εικόνες του NOAA είναι πολύ χρήσιμες, ιδίως όταν οι επιφανειακοί μετεωρολογικοί σταθμοί είναι σπάνιοι όπως στο Sahell (Tucker, 1979, Townshend and Justice, 1986). Διαχρονικές διακυμάνσεις μπορούν να μελετηθούν σε μεγάλες περιοχές, οι οποίες θα ήταν αδύνατο να καταγραφούν με άλλα μέσα. Αντίθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικές σε άλλες πηγές με περισσότερο ακριβείς πληροφορίες.

Το πλεονέκτημα των δορυφόρων NOAA για την παρακολούθηση της πράσινης βλάστησης είναι ότι παρέχουν ημερήσια παρατήρηση ενώ οι περιβαλλοντικοί δορυφόροι έχουν μεγάλο χρόνο επανάληψης (π.χ. ο Landsat περνάει από την ίδια περιοχή κάθε 18 ημέρες). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χρήση εικόνων NOAA γιατί εκτός του ότι παρέχουν καθημερινή κάλυψη όλης της Ελλάδας, τα στοιχεία είναι ευρέως διαθέσιμα χωρίς κόστος μέσω του διαδικτύου.

Οι δορυφόροι NOAA είναι δορυφόροι που έχουν σχεδιαστεί για τη μελέτη του γήινου, θαλάσσιου και ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Ο πρώτος δορυφόρος της σειράς NOAA εκτοξεύτηκε τον Ιούνιο του 1979. Οι δορυφόροι που βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία είναι οι NOAA-11, NOAA-12 και NOAA-14.

Η λειτουργία της σειράς των δορυφόρων NOAA απαιτεί δύο δορυφόρους σε πλήρη λειτουργία μέσου ύψους 850 Km. Το είδος αυτής της τροχιάς έχει επιλεγεί γιατί προσφέρει την πλέον κατάλληλη γεωμετρία για επαναληπτική και προκαθορισμένη κάλυψη περιοχών από δορυφόρους που χρησιμοποιούν το σύστημα πραγματικού χρόνου (real-time) μετάδοσης δεδομένων. Ο πρώτος δορυφόρος είναι σε τροχιά ημέρας (AM) και περνάει από τον ισημερινό με νότια κατεύθυνση και ο δεύτερος είναι απογευματινής τροχιάς (PM) και περνάει από τον ισημερινό με βόρεια κατεύθυνση. Η τροχιακή κλίση είναι σχεδόν πολική στις 99,8 μοίρες. Ο χρόνος για την ολοκλήρωση μιας τροχιάς είναι 102 λεπτά και ο αριθμός των τροχιών ανά ημέρα είναι 14,1. Αποτέλεσμα του μη ακέραιου αριθμού των ημερήσιων τροχιών είναι και η ασυνεχής κατόπτευση των ίδιων περιοχών σε ημερήσια βάση. Για παράδειγμα έστω ότι η δωδέκατη από τις 14,1 τροχιές κατοπτρεύει σε μια περιοχή με γεωγραφικές συντεταγμένες 25 μοίρες Βόρεια και 35 μοίρες Ανατολικά. Τότε την επόμενη ημέρα η δωδέκατη τροχιά θα κατοπτρεύσει περιοχή του ίδιου γεωγραφικού πλάτους αλλά γεωγραφικού μήκους μετατοπισμένου προς τα Δυτικά. Σημειώνεται επίσης, ότι ο τοπικός ηλιακός χρόνος (LSoT: Local Solar Time) που αντιστοιχεί στο πέρασμα του δορυφόρου παραμένει αμετάβλητος σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος. Η χρονική διακριτική του ικανότητα είναι 6 ώρες όταν δύο δορυφόροι NOAA είναι ταυτόχρονα σε λειτουργία. Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς είναι τέτοια ώστε διαδοχικές τροχιές να συναντούν τον ισημερινό σε γεωγραφικά μήκη που διαφέρουν μεταξύ 25,3 και 25,52 μοιρών. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει κενό κάλυψης, ενώ με την ταυτόχρονη λειτουργία τουλάχιστον δύο δορυφόρων, καθένας από τους οποίους επαναλαμβάνει τροχιά γύρω από τη γη δύο φορές το εικοσιτετράωρο, κάθε σημείο στον ισημερινό έχει την δυνατότητα να απεικονιστεί τέσσερις φορές, ενώ κάθε σημείο στα μέσα γεωγραφικά πλάτη μπορεί να απεικονιστεί οκτώ φορές το εικοσιτετράωρο.

Η σειρά των δορυφόρων NOAA μεταφέρει όργανα για τον καθορισμό μετεωρολογικών παραμέτρων (υγρασίας, νεφοκάλυψης κ.α), τη μελέτη του ενεργειακού ισοζυγίου της γης, τον υπολογισμό της συγκέντρωσης όζοντος και της ηλιακής ακτινοβολίας, και τη λήψη εικόνων επιφάνειας. Μεταξύ αυτών το Προηγμένο Ραδιόμετρο Πολύ Υψηλής Διακριτικής Ικανότητας (AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer) έχει μέγιστη χωρική διακριτική ικανότητα 1,1 Km στο ναδίρ (της επιφάνειας κατόπτρευσης). Η χωρική διακριτική ικανότητα του οργάνου μειώνεται στα 4 Km στα άκρα της κατοπτευσόμενης επιφάνειας. Το εύρος κάλυψής του είναι 2800 Km κατά μήκος της τροχιάς και η άμεση γωνία επόπτρευσης (IFOV) είναι 1,3 mrad. Το AVHRR καταγράφει την ακτινοβολία που φτάνει σε αυτό σε πέντε φασματικές περιοχές:

- α) κανάλι 1 (0,58 - 0,68 μm , ορατό),
- β) κανάλι 2 (0,72 - 1,10 μm , εγγύς υπέρυθρο),
- γ) κανάλι 3 (3,55 - 3,93 μm , μέσο υπέρυθρο),
- δ) κανάλι 4 (10,5 - 11,3 μm , θερμικό υπέρυθρο),
- ε) κανάλι 5 (11,5 - 12,5 μm , θερμικό υπέρυθρο).

Υπάρχουν τρεις βασικές μορφές των δεδομένων AVHRR:

α) LAC (Local Area Coverage) - δεδομένα που καταγράφονται πάνω στο δορυφόρο με χωρική διακριτική ικανότητα περίπου 1,1 χλμ.

β) HRPT (High Resolution Picture Transmission) - απευθείας μετάδοση των δεδομένων AVHRR σε πραγματικό χρόνο με την ίδια διακριτική ικανότητα όπως τα LAC.

γ) GAC (Global Area Coverage) - δεδομένα που παράγονται από τα δεδομένα LAC χρησιμοποιώντας μόνο μία από κάθε τρεις γραμμές σάρωσης. Τα δεδομένα GAC έχουν χωρική διακριτική ικανότητα περίπου 4 χλμ.

3.2 Βάση δεδομένων και περιοχή μελέτης

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από λήψεις του δορυφόρου πολικής τροχιάς NOAA/AVHRR. Καλύπτουν ολόκληρη την Ελλάδα με χωρική διακριτική ικανότητα εικονοστοιχείου 1x1 Km. Η βάση δεδομένων αποτελείται από 52 εβδομαδιαίες εικόνες NDVI που αντιστοιχούν στη χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο του 2004 έως το τέλος του Σεπτεμβρίου του 2005 και έχουν σχηματιστεί με τη μέθοδο της Σύνθεσης Μεγίστων Τιμών (MVC: Maximum Value Composites). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν 730 ημερησίες εικόνες LST (365 ημέρας και 365 νύχτας) για την ίδια υδρολογική περίοδο, με χωρική διακριτική ικανότητα 1x1 Km. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν και επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας από τους οχτώ μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλίας, για την ίδια χρονική περίοδο. Ακολουθεί μία σύνοψη των χαρακτηριστικών της υπό εξέτασης περιοχής που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ως περιοχή μελέτης για την εφαρμογή δεικτών επιλέχθηκε το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Η Θεσσαλία είναι πεδινή περιοχή και περιβάλλεται από βουνά. Συγκεκριμένα: ανατολικά, κατά μήκος της ακτογραμμής που βρέχεται από το Αιγαίο πέλαγος περιβάλλεται από το βουνό Όσσα, αρκετά νότια, στο νομό Μαγνησίας από το βουνό Πήλιο, βόρεια από τον Όλυμπο, δυτικά από την οροσειρά της Πίνδου και νότια από την οροσειρά του Όθρη. Διάφοροι ποταμοί, που συγκεντρώνονται και διαμορφώνουν τον Πηνειό, ρέουν από τα περιβάλλοντα βουνά προς τις πεδιάδες. Λόγω των μεγάλων πεδινών εκτάσεων, η Θεσσαλία αποτελεί μία εύφορη περιοχή και, μεταξύ άλλων, ένα μεγάλο προμηθευτή γεωργικών προϊόντων. Στη δυτική πλευρά της Θεσσαλίας το κλίμα είναι ηπειρωτικό, με κρύους χειμώνες, πολύ θερμά καλοκαίρια και άρα με πολύ μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ αυτών των δύο εποχών. Στην

ανατολική πλευρά το κλίμα είναι θερμό μεσογειακό. Τα καλοκαίρια στην Θεσσαλία είναι συνήθως πολύ θερμά και ξηρά και πολλές φορές κατά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο οι θερμοκρασίες μπορεί να ξεπεράσουν τους 40 °C. Γενικά οι βροχοπτώσεις είναι σπάνιες από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο ενώ οι ημέρες είναι θερμές και ξηρές, φαινόμενο συνηθισμένο για το μεσογειακό κλίμα. Οι περιοχές που βρίσκονται στα βουνά είναι πολύ πιο δροσερές με αξιοσημείωτη βροχόπτωση. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του κλίματος της πεδιάδας Θεσσαλίας είναι οι συχνές καταιγίδες κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι. Αυτά τα φαινόμενα έχουν επιπτώσεις ειδικότερα στις γεωργικές δραστηριότητες αυτής της περιοχής. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάστηκε στις υποπεριοχές του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Εικόνα 2.2) που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

3.3 Γεωμετρική διόρθωση

Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων είναι η καταχώρησή τους στο Ελλαδικό προβολικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87 (registration) και η γεωγραφική και γεωμετρική τους διόρθωση (rectification – geometric correction).

Η γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων είναι μια διαδικασία με την οποία γίνεται προβολή των δεδομένων σε ένα επίπεδο και η αναφορά του σε ένα προβολικό σύστημα συντεταγμένων (rectification and registration). Η εισαγωγή χαρτικών συντεταγμένων στα δεδομένα της εικόνας ονομάζεται και γεωαναφορά (georeferencing). Έτσι, αφού όλα τα προβολικά συστήματα χαρτών σχετίζονται με συντεταγμένες, στην διόρθωση εμπεριέχεται και η διαδικασία της γεωαναφοράς.

Η διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης έγινε μία φορά και οι παράμετροι αποθηκεύτηκαν ώστε να είναι δυνατή η επανάληψη της διαδικασίας και στις υπόλοιπες δορυφορικές εικόνες με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένα πολυωνυμικό γεωμετρικό μοντέλο 2^{ης} τάξης ενώ προκειμένου η γεωαναφορά της εικόνας να έχει υψηλή ακρίβεια, εισήχθησαν 16 σημεία ελέγχου (GCP: Ground Control Points), εκ των οποίων ένα τέθηκε ως σημείο επαλήθευσης (check points) για την μείωση του ολικού γεωμετρικού σφάλματος.

3.4 Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε χρονοσειρά εικόνων NDVI για το υδρολογικό έτος 2004 - 2005. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν ήταν όλες τύπου NOAA/AVHRR, με χωρική διακριτική ικανότητα 1x1Km. Πρέπει να αναφερθεί ότι η εξίσωση υπολογισμού του NDVI (2.1) όταν υπολογίζεται από δεδομένα NOAA/AVHRR γίνεται:

$$NDVI = \frac{CH_2 - CH_1}{CH_2 + CH_1} \quad (3.1)$$

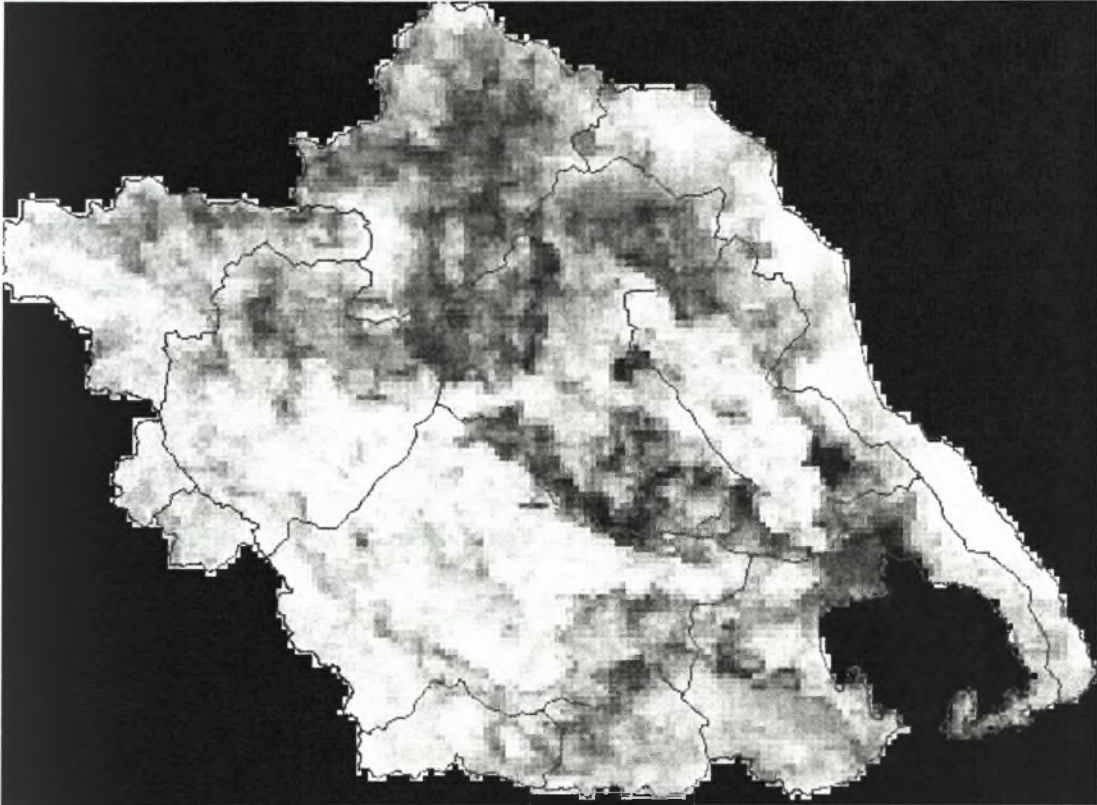
όπου CH_1 και CH_2 είναι οι μετρήσεις των καναλιών 1 και 2.

Οι εικόνες καλύπτουν ολόκληρη την Ελλάδα ενώ η υπό εξέταση περιοχή είναι το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και συγκεκριμένα οι επιμέρους λεκάνες απορροής από τις οποίες αυτό απαρτίζεται. Οι ημερήσιοι χάρτες του NDVI συντέθηκαν σε εβδομαδιαία βάση, «επιλέγοντας» εκείνες τις τιμές που έχουν τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της ακτινοβολίας του κοντινού υπέρυθρου και της ορατής περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος κατά τη διάρκεια των δέκα

ημερών, για κάθε εικονοστοιχείο του χάρτη. Με την διαδικασία αυτήν παράγονται οι σύνθετες εικόνες μεγίστων τιμών MVC's. Οι εικόνες στις οποίες εμφανίζονταν νέφη, απορρίφθηκαν με σκοπό την αποφυγή παρερμηνειών. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε για όλο το σετ δεδομένων. Έπειτα απομονώθηκε το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και οι υποπεριοχές αυτού. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν μία σειρά από εικόνες, αναφερόμενες σε εβδομαδιαία βάση, όπου κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει την τιμή του δείκτη NDVI για το υδρολογικό έτος 2004 – 2005 και την περιοχή υπό εξέταση. Ενδεικτικά στις εικόνες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται οι εικόνες NDVI για την πρώτη εβδομάδα του Αυγούστου για όλη την Ελλάδα και για το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.1: Εβδομαδιαία εικόνα NDVI (2005-08-1^η) για την περιοχή της Ελλάδας.



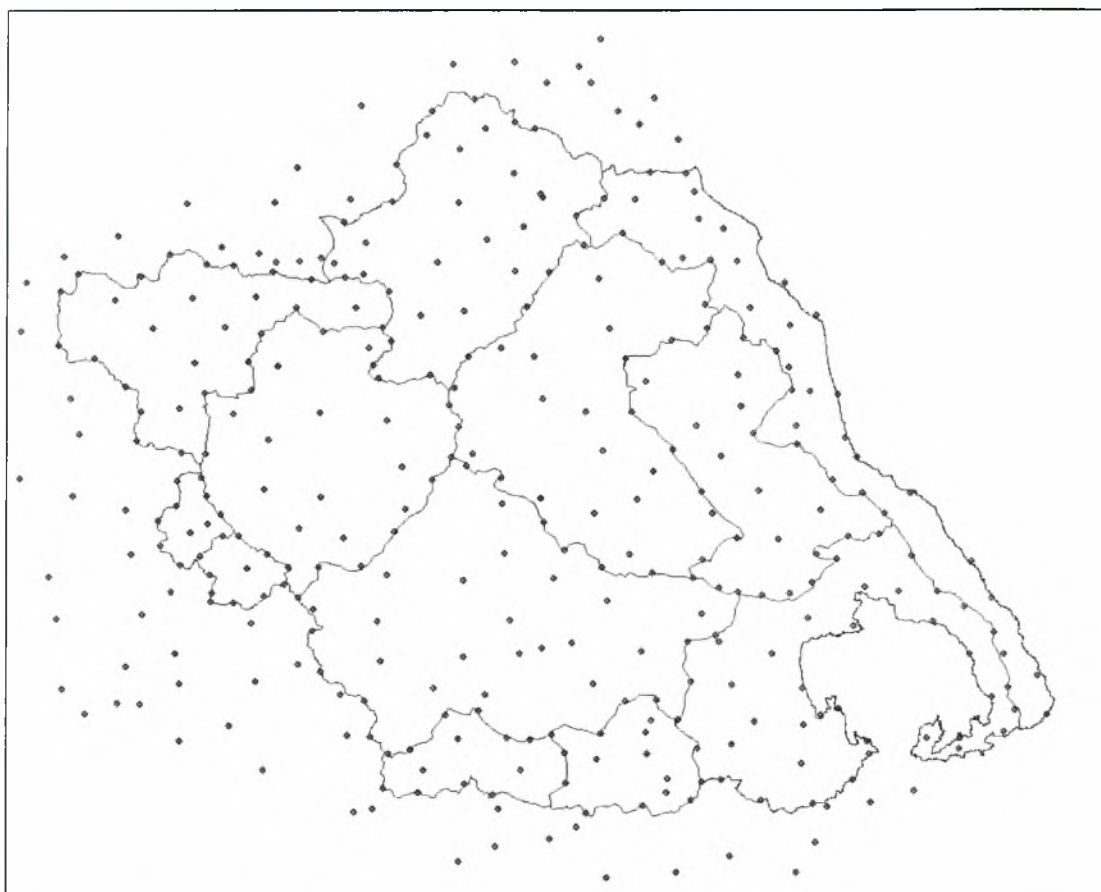
Εικόνα 3.2: Εβδομαδιαία εικόνα NDVI (2005-08-1^η) του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.

Η διαβάθμιση από μαύρο σε λευκό χρώμα αντιστοιχεί στις εβδομαδιαίες τιμές του δείκτη, με το λευκό να αντιπροσωπεύει την υψηλότερη τιμή.

3.5 Υπολογισμός των Ημεροβαθμών

Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό του Degree Days απαιτούνται δεδομένα θερμοκρασίας. Στην παρούσα εφαρμογή έγινε μία προσπάθεια υπολογισμού του DD με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν οι 730 εικόνες LST. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι εικόνες LST για ημέρα και νύχτα αποτελούν μέσες τιμές θερμοκρασίας του κάθε δωδεκάωρου και εξάγονται ως μέσοι όροι τριών τιμών που λαμβάνονται κατά την διάρκεια αυτών.

Πρώτα δημιουργήθηκε ένα μοντέλο για την εξαγωγή της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας. Έτσι λοιπόν από τις εικόνες LST (ημέρας και νύχτας) εξήχθησαν 365 εικόνες με την μέση ημερήσια θερμοκρασία επιφανείας εδάφους. Όμως, σε πολλές περιπτώσεις και ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες εξαιτίας της νεφοκάλυψης δεν μπορούσαν να ληφθούν τιμές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν κενά, χωρικά και χρονικά κατά τον υπολογισμό του δείκτη. Λόγω του αθροιστικού του χαρακτήρα, ο DD απαιτεί δεδομένα για κάθε ημέρα, που να καλύπτουν όλη την περιοχή υπό εξέταση. Έτσι αποφασίστηκε να γίνει μία προσπάθεια παρεμβολής για την πύκνωση των τιμών των εικονοστοιχείων των εικόνων LST. Επιλέχθηκαν συνολικά 360 σημεία μέσα και γύρω από το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας (Εικόνα 3.3). Με βάση αυτά τα σημεία πάρθηκαν οι τιμές των εικονοστοιχείων για κάθε ημέρα και νύχτα του υδρολογικού έτους και εισήχθησαν σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών. Με τη χρήση του προγράμματος ArcGIS 9.2 δημιουργήθηκαν 730 χάρτες παρεμβολής (365 για την ημέρα και 365 για την νύχτα) με μέγεθος εικονοστοιχείου 1x1 Km. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την παρεμβολή ήταν η Inverse Distance Weight (IDW). Η μέθοδος έχει ξαναχρησιμοποιηθεί από τους Δομενικιώτης κ.ά (2002) και παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για την επαλήθευση της ορθότητας της μεθόδου, έγινε δοκιμή και άλλων μεθόδων παρεμβολής όπως η Krigging και οι Splines. Οι μέθοδοι έδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα, όμως λόγω της απλότητας που χαρακτηρίζει την IDW επιλέχθηκε αυτή. Μετά την εφαρμογή της παρεμβολής, από τους 730 χάρτες δημιουργήθηκαν 365 που εμπεριέχουν τις μέσες ημερησίες τιμές θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους για κάθε εικονοστοιχείο.



Εικόνα 3.3: Απεικόνιση των σημείων που επιλέχθηκαν για χρήση στην παρεμβολή.

Κατά τον έλεγχο των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι και πάλι υπήρχαν προβλήματα λόγω της ύπαρξης των νεφών. Αυτή την φορά το πρόβλημα εστιάζεται στο γεγονός ότι σε μερικές περιπτώσεις δεν υπήρχαν τιμές λόγω των νεφών σε όλα τα σημεία, με αποτέλεσμα η παρεμβολή να μην είναι αντιπροσωπευτική. Για παράδειγμα εάν δεν υπήρχαν τιμές στην ανατολική πλευρά της Θεσσαλίας, η παρεμβολή σε αυτή την πλευρά γινόταν βάση των υπολοίπων τιμών, γεγονός που οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα. Επίσης υπήρχαν περιπτώσεις όπου κατά τους χειμερινούς μήνες ολόκληρο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας ήταν καλυμμένο με σύννεφα και έτσι δεν υπήρχαν καθόλου τιμές για να γίνει η παρεμβολή. Σύμφωνα με όλα τα ανωτέρω κρίθηκε αναγκαία η χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας

από τους οχτώ μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλίας. Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται η τοποθεσία των σταθμών.



Εικόνα 3.4: Χωρική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

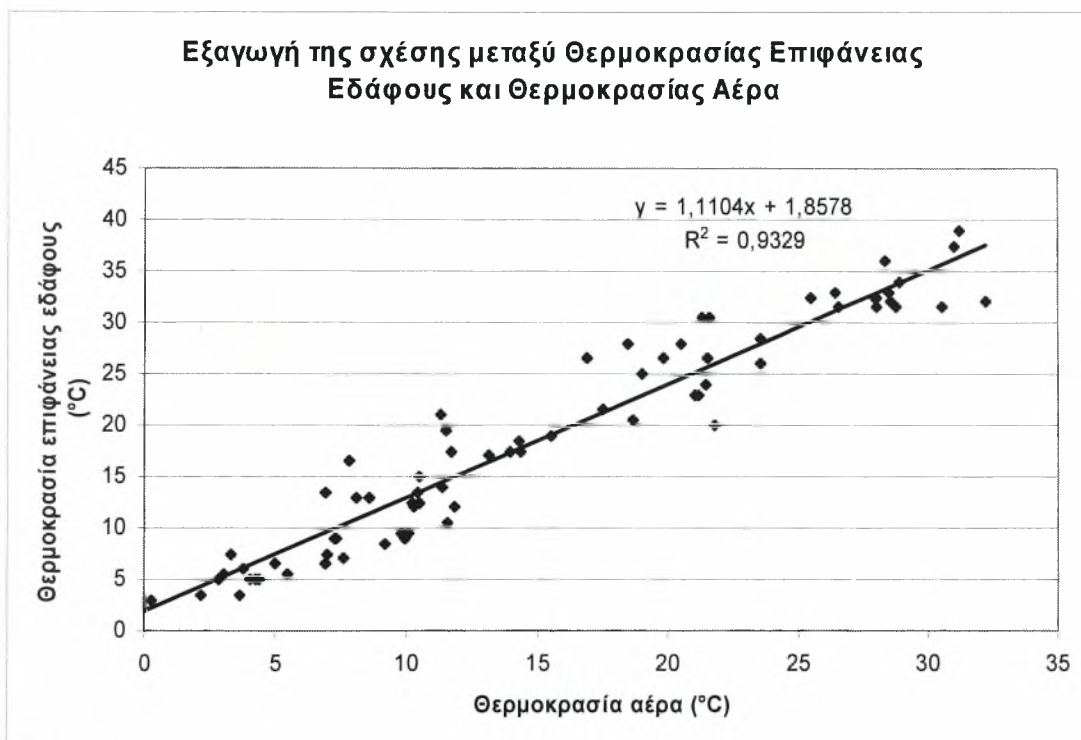
Με βάση λοιπόν τα επίγεια δεδομένα, λήφθηκε υπόψη το μετεωρολογικό σήμα και με τη χρήση της διαφοράς της θερμοκρασίας στις τιμές των σταθμών από μέρα σε μέρα, συμπληρώθηκαν οι ημέρες με τα κενά στους χάρτες παρεμβολής. Πρέπει να αναφερθεί ότι η χωρική εξάπλωση στις τιμές των σταθμών έγινε αυτόματα με τη χρήση του προηγούμενου ή του επόμενου χάρτη παρεμβολής όπου υπήρχαν τιμές. Στις περιοχές όπου δεν υπήρχε μετεωρολογικός σταθμός έγινε χρήση του σταθμισμένου μέσου όρου γειτονικών σταθμών. Τέλος, στις περιπτώσεις όπου η

θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των σταθμών ήταν 1-2°C, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των τιμών και των οχτώ για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

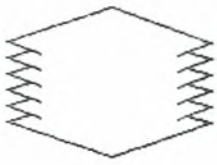
Αφού ξεπεράστηκε το πρόβλημα των νεφών και υπήρχαν τιμές και για τις 365 ημέρες του υδρολογικού έτους με πλήρη χωρική κάλυψη στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, μπορούσε πλέον να υπολογιστεί ο DD σε εβδομαδιαία βάση. Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή κατωφλίου που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του δείκτη είναι 10°C. Όμως αυτή η θερμοκρασία αναφέρεται σε θερμοκρασία αέρα ενώ οι ημερήσιοι χάρτες που παράχθηκαν εμπεριέχουν μέση ημερήσια θερμοκρασία εδάφους. Έγινε λοιπόν αναγωγή της θερμοκρασίας αέρα σε θερμοκρασία εδάφους. Για να γίνει αυτό εξήχθηκε η σχέση μεταξύ των τιμών θερμοκρασίας αέρα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (οχτώ σταθμοί, 12 ημερήσιες τιμές °C – μία για κάθε μήνα) και των τιμών θερμοκρασίας εδάφους από τις δορυφορικές εικόνες για τις γεωγραφικές τοποθεσίες των σταθμών. Η γραφική παράσταση των τιμών καθώς και η γραμμική σχέση που τις συνδέει απεικονίζονται στο σχήμα 3.1. Ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε για διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Η γραμμική σχέση επιλέχθηκε διότι παρουσίασε το μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού (Δήμος, 2005α και 2005β, Draper and Smith, 1981).

Μετά την αναγωγή η τιμή κατωφλίου είναι 12,96°C. Τέλος, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο υπολογισμού του DD για κάθε μήνα και με τη χρήση της εξίσωσης (2.8) υπολογίστηκε ο δείκτης σε εβδομαδιαία βάση. Το μοντέλο κατασκευάστηκε με τη χρήση του λογισμικού Erdas Imagine 8.6 με το εργαλείο Model Maker. Για την κατανόηση του μοντέλου είναι απαραίτητη η ανάλυση μέρους αυτού καθώς και η επεξήγηση κάποιων βασικών εργαλείων του Model Maker. Οι τρεις λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του απεικονίζονται στο σχήμα 3.2. Ενδεικτικά, η διάθρωση του μοντέλου για την εξαγωγή του DD σε εβδομαδιαία βάση

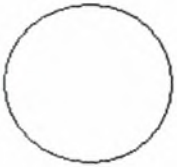
απεικονίζεται στο σχήμα 3.3. Έτσι λοιπόν, δημιουργήθηκαν 52 χάρτες ημεροβαθμών, ένας για κάθε εβδομάδα του υδρολογικού έτους υπό εξέταση. Ενδεικτικά, στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται ο παραγόμενος χάρτης ημεροβαθμών για την πρώτη εβδομάδα του Αυγούστου για το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Η διαβάθμιση από μαύρο σε λευκό χρώμα αντιστοιχεί στις εβδομαδιαίες τιμές του δείκτη, με το λευκό να αντιπροσωπεύει τις υψηλότερες τιμές αυτού.



Σχήμα 3.1: Εξαγωγή της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους και θερμοκρασίας αέρα, στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.



Εικονίδιο Raster : Εισάγει εικόνες τύπου Raster στο μοντέλο - Έξοδος για την δημιουργία επεξεργασμένων εικόνων.

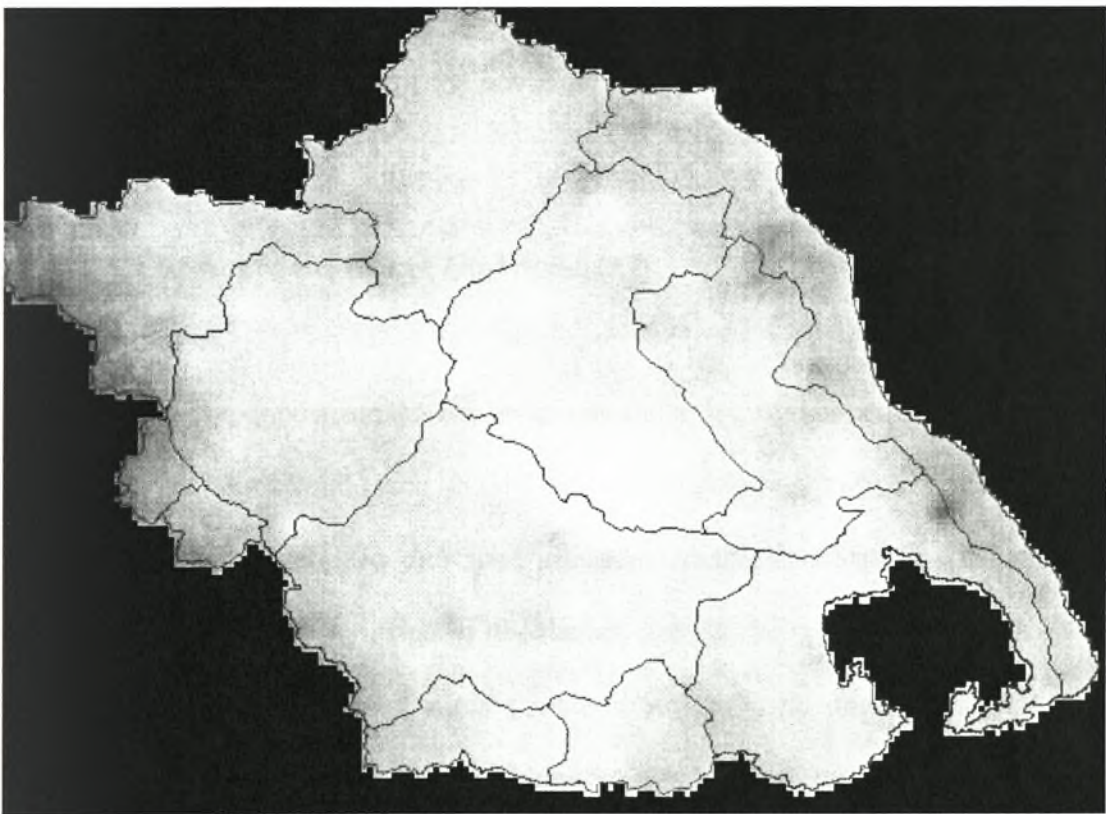


Εικονίδιο Function : Εισάγει συναρτήσεις για την επεξεργασία των εικόνων.

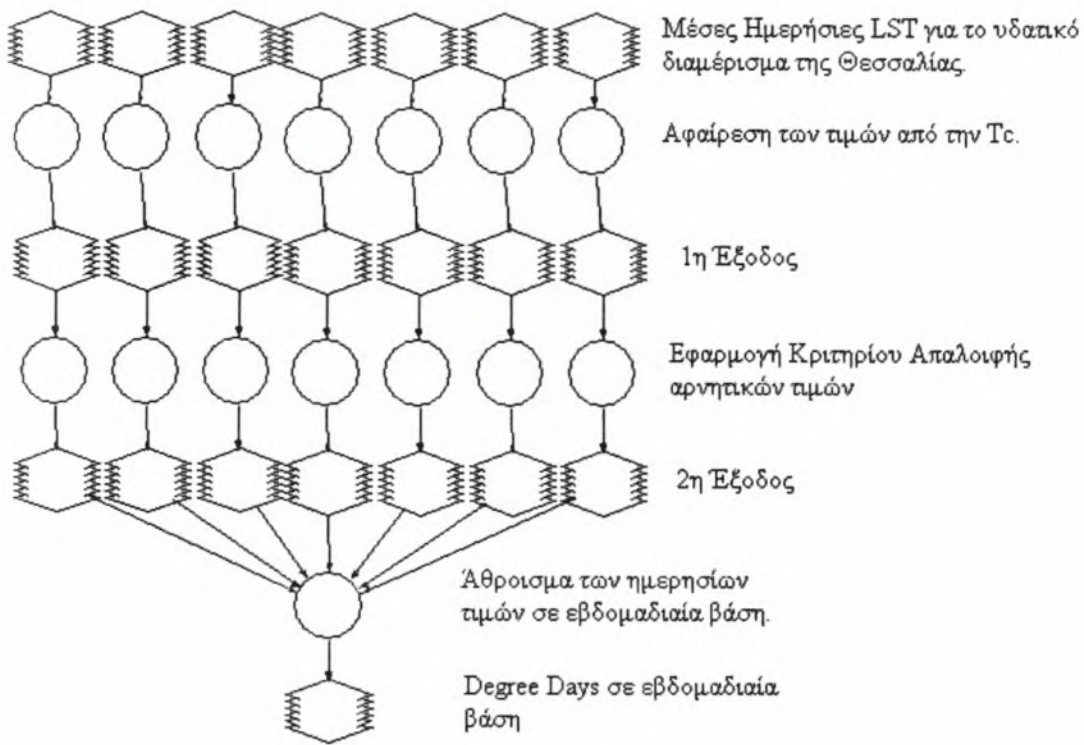


Βέλος Σύνδεσης

Σχήμα 3.2: Βασικά εργαλεία του Model Maker .



Εικόνα 3.5: Εβδομαδιαίος χάρτης Degree Days (2005-08-1^η) του υδατικού διαμερίσματος.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση του μοντέλου υπολογισμού του Degree Days.

3.6 Υπολογισμός του δείκτη ξηρότητας (AI)

Ο δείκτης ξηρότητας AI υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (2.9), σε μηνιαία βάση για το υδρολογικό έτος 2004-2005. Ο υπολογισμός έγινε σημειακά και χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλίας (Εικόνα 3.4). Έτσι υπολογίστηκε η αθροιστική μηνιαία βροχόπτωση για κάθε έναν από τους σταθμούς καθώς και η μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής έγινε χρήση της μεθόδου Blaney-Criddle. Δεδομένου ότι το κλίμα της Ελλάδας προσομοιάζει αυτό των δυτικών ΗΠΑ όπου και αναπτύχθηκε η μέθοδος, η χρήση της Blaney-Criddle στην Ελλάδα είναι ενδεδειγμένη (Σακκάς, 2004). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την θερμοκρασία του

αέρα για τους διάφορους υπολογισμούς και δίνεται από την εξίσωση (Παπαζαφειρίου, 1999):

$$ETp = C [P (0.46 T_{\alpha} + 8,13)] \tag{3.2}$$

όπου:

- C παράγοντας που προσδιορίζεται είτε πειραματικά είτε από διάφορους κλιματικούς παράγοντες.
- P το μηνιαίο ποσοστό % των ωρών ημέρας ως προς το ολικό ετήσιο ποσό ωρών ημέρας (Πίνακας 3.1).
- T_α η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C.

Ο παράγοντας C, θεωρήθηκε ίδιος για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και ίσος με 0,68 (Papadopoulou *et al.*, 2003). Για το μέσο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης (39°), το μηνιαίο ποσοστό % των ωρών ημέρας ως προς το ολικό ετήσιο ποσό ωρών ημέρας υπολογίστηκε με γραμμική παρεμβολή από τον Πίνακα 6.1 του Παραρτήματος II. Τα αποτελέσματα της παρεμβολής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Μηνιαία ποσοστά των ωρών ημέρας ως προς το ολικό ετήσιο ποσό ωρών ημέρας για γεωγραφικό πλάτος 39°.											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
6,82	6,76	8,33	8,92	9,97	10,01	10,16	9,50	8,38	7,77	6,77	6,59

Τέλος υπολογίστηκε ο AI, για κάθε μήνα και για κάθε μετεωρολογικό σταθμό, για το υδρολογικό έτος υπό εξέταση. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 3.2. Τα κενά δηλώνουν την έλλειψη δεδομένων βροχόπτωσης ή την ύπαρξη

λανθασμένων τιμών, με αποτέλεσμα την αδυναμία υπολογισμό του ΑΙ στις συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Πίνακας 3.2: Μηνιαίες τιμές του ΑΙ στη Θεσσαλία για το υδρολογικό έτος 2004 - 2005.

	Καλαμπάκα	Καρδίτσα	Ζαγορά	Τσαριτσάνη	Αγιά	Τύρναβος	Λάρισα
Οκτ-04	0,01	1,42			0,63	0,39	0,62
Νοε-04	1,36	0,67	0,15	0,57	0,47	0,52	0,46
Δεκ-04	2,28	1,47	2,61	1,31	0,79	1,01	0,80
Ιαν-05	3,50	1,32	1,26	0,89	0,56	0,67	0,57
Φεβ-05	2,94	2,33	3,22	1,34	1,01	1,16	1,02
Μαρ-05	0,84	1,11	1,10	0,99	0,90	0,77	0,90
Απρ-05	0,14	0,14	0,06	0,08	0,06	0,05	0,06
Μαϊ-05	0,40	0,39			0,21	0,11	0,20
Ιουν-05	0,03	0,07			0,00	0,05	0,00
Ιουλ-05	0,00	0,03			0,16	0,06	0,16
Αυγ-05	0,00	0,16			0,12	0,25	0,12
Σεπ-05		0,24			0,45	0,56	0,44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Θεματική ταξινόμηση

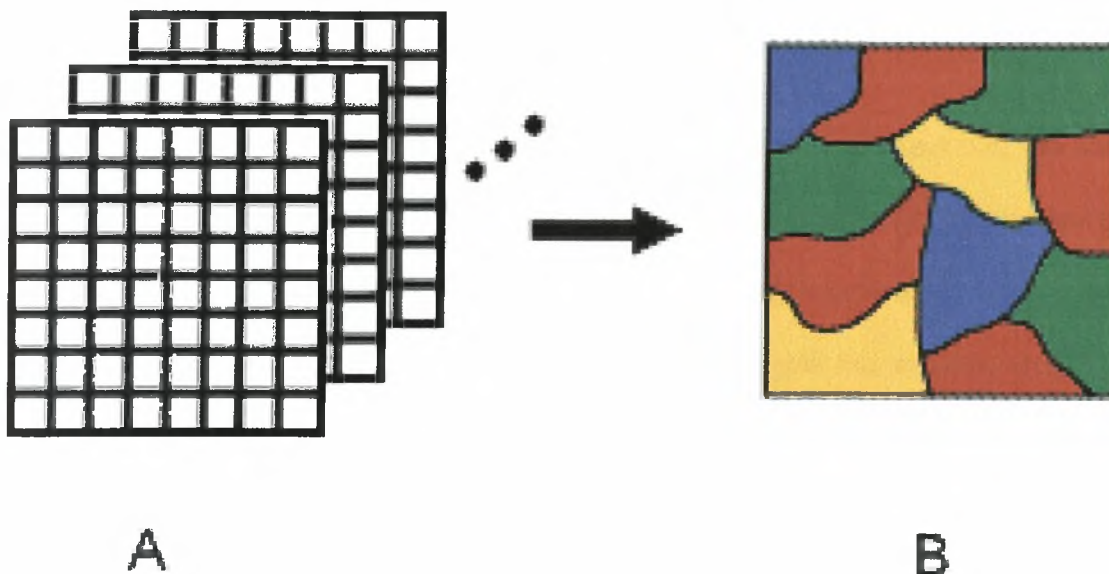
Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στο μετασχηματισμό των συνεχών τηλεπισκοπικών δεδομένων σε διακριτά αντικείμενα, που ξεχωρίζουν μεταξύ τους από μία διακριτή θεματική ταξινόμηση. Τα αντικείμενα αυτά εμπεριέχουν έναν μοναδικό τύπο που ονομάζεται κλάση και εμπεριέχεται στον τελικό παραγόμενο θεματικό χάρτη. Η σχέση δεν είναι ένα προς ένα. Μεταξύ διαφορετικών αντικειμένων της ίδιας κλάσης και ακόμα και μέσα στο ίδιο αντικείμενο μπορεί να παρουσιάζονται διαφορετικές τιμές εικονοστοιχείων. Αντιστρόφως, διαφορετικές θεματικές κλάσεις μπορεί να μην είναι δυνατόν να διαχωριστούν διότι παρουσιάζουν περίπου τις ίδιες τιμές. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι προσδιοριστικές μέθοδοι δεν είναι επαρκείς. Μία όμως πιθανοθεωρητική προσέγγιση μπορεί να είναι ικανή να περιγράψει τις φασματικές διακυμάνσεις μεταξύ των ομάδων και να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα προσδιορισμού λανθασμένων κλάσεων (Gorte, 2000).

Η επιλογή των κλάσεων βασίζεται κυρίως στα φασματικά χαρακτηριστικά ή στις τιμές των εικονοστοιχείων. Η συλλογή μετρήσεων σε ένα εικονοστοιχείο ονομάζεται διάνυσμα μετρήσεων (measurement vector) ή διάνυσμα στοιχείων (feature vector). Σε M φασματικές περιοχές, το διάνυσμα στοιχείων έχει M συνιστώσες και αντιστοιχεί σε ένα σημείο σε ένα χώρο στοιχείων M -διαστάσεων. Σκοπός της ταξινόμησης είναι να προσδιορίσει ένα τίτλο κλάσης (class label) σε κάθε χαρακτηριστικό διάνυσμα, δηλαδή να υποδιαιρέσει το χαρακτηριστικό χώρο σε μέρη τα οποία ανταποκρίνονται στις κλάσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αναγνώριση υποδείγματος (pattern recognition) (Ripley, 1996).

Στην παρούσα εργασία λαμβάνει χώρα η ταξινόμηση της υδρολογικής ξηρασίας βάση των τιμών των δεικτών NDVI και DD.

4.1.1 Μέθοδοι ταξινόμησης εικόνας

Σκοπός μιας βασικής επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων είναι ο εντοπισμός και αναγνώριση (ταξινόμηση) των αντικειμένων και η παρουσίασή τους σε μορφή χάρτη ή πινάκων (σχήμα 4.1). Ο εντοπισμός και τα χωρικά χαρακτηριστικά (spatial features) (μέγεθος, σχήμα, κατεύθυνση) των αντικειμένων προσδιορίζονται μέσω των αλλαγών των μέσων τιμών των φασματικών ιδιοτήτων των. Αυτά τα χωρικά χαρακτηριστικά επιτρέπουν και την εξέταση των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στα αντικείμενα. Έτσι, επιτρέπουν μόνο μία γενική κατάταξη των αντικειμένων της εικόνας. Οι μέθοδοι ταξινόμησης, τις περισσότερες φορές, βασίζονται στα φασματικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τεχνικές αναγνώρισης προτύπων (Δαλέζιος, 2002).



Σχήμα 4.1: Σκοπός της ταξινόμησης είναι ο προσδιορισμός ομάδων εικονοστοιχείων με κοινά χαρακτηριστικά (Δαλέζιος, 2002).

Η ταξινόμηση αποτελεί σημαντικό βήμα στην εξαγωγή θεματικής πληροφορίας από δορυφορικές εικόνες. Θεωρητικά, είναι δυνατό να ταξινομηθεί μία εικόνα με τη χρήση μίας μπάντας (band) (π.χ. πανχρωματικό του SPOT), μπορούν όμως να επιτευχθούν πολύ καλύτερα αποτελέσματα με τη χρήση περισσότερων μπάντων ταυτόχρονα (π.χ. τρεις μπάντες από πολυφασματική εικόνα του SPOT) (Gorte, 2000).

Η ταξινόμηση των πολυφασματικών εικόνων βασίζεται στην εφαρμογή του απλού κανόνα απόφασης (decision rule) σε κάθε εικονοστοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται ξεχωριστά μόνο βάσει των φασματικών μετρήσεων. Βασική προϋπόθεση είναι ότι ένα αντικείμενο είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Διαφορετικά ένα μεγάλο ποσοστό εικονοστοιχείων μπορεί να αποτελείται από δύο ή περισσότερα αντικείμενα, κάνοντας την στατιστική ταξινόμηση αναξιόπιστη. Αυτό θα έχει σαν συνέπεια, οι προσδιορισμένες κατηγορίες σύμφωνα με τις οποίες θα πρέπει να γίνει η ταξινόμηση της εικόνας, να μην είναι κατάλληλες για την περιγραφή της πραγματικής κατάστασης της φύσης (Δαλέζιος, 2002).

Τα εικονοστοιχεία που έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά, που είναι πολύ πιθανό να ανήκουν στην ίδια κλάση χρήσεων γης ή εδαφοκάλυψης, βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο στο χώρο στοιχείων (feature space) άσχετα από την απόσταση που απέχουν στην εικόνα και στο έδαφος. Τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην ίδια κλάση θα σχηματίσουν την λεγόμενη ομάδα (cluster) ή κλάση (class) στο χώρο στοιχείων. Τα υπόλοιπα στοιχεία που ανήκουν σε άλλες κλάσεις δεν θα ενταχθούν σε αυτήν την ομάδα, αλλά στις υπόλοιπες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις. Μία πρώτη διάκριση της ταξινόμησης, είναι σε επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη (Gorte, 2000).

Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι απαραίτητη η γνώση της σχέσης μεταξύ των κλάσεων και των στοιχείων διανύσματος. Ο χρήστης πρέπει να ορίσει μόνος του την αντιστοιχία των στοιχείων διανύσματος με τις κλάσεις. Απαιτείται όμως προσοχή διότι στις εικόνες εμπεριέχονται και άλλοι ανεπιθύμητοι παράγοντες όπως η κατάσταση της ατμόσφαιρας, η γωνία πρόσπτωσης του ήλιου, ο τύπος εδάφους, η υγρασία εδάφους, το στάδιο ανάπτυξης της βλάστησης κτλ. Το να ληφθούν υπόψη όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι αδύνατο. Έτσι, πρέπει να ληφθεί υπόψη η σχέση μεταξύ της ανακλαστικότητας και των κλάσεων των χρήσεων γης ή της εδαφοκάλυψης (Gorte, 2000).

Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση χωρίζεται σε δύο φάσεις:

- Την εκπαίδευση, όπου ο χρήστης εκπαιδεύει τον υπολογιστή διευκρινίζοντας ποια εικονοστοιχεία ανήκουν σε ποια κλάση στην συγκεκριμένη εικόνα.
- Τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, όπου ο υπολογιστής προσδιορίζει την κλάση για όλα τα στοιχεία με τα ορισμένα χαρακτηριστικά, σε όλη την εικόνα.

Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση χρησιμοποιεί αλγόριθμους οι οποίοι κατατάσσουν τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Οι αλγόριθμοι αυτοί στηρίζονται κυρίως στη θεωρία των πιθανοτήτων. Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης είναι (σχήμα 4.2) (Δαλέζιος, 2002):

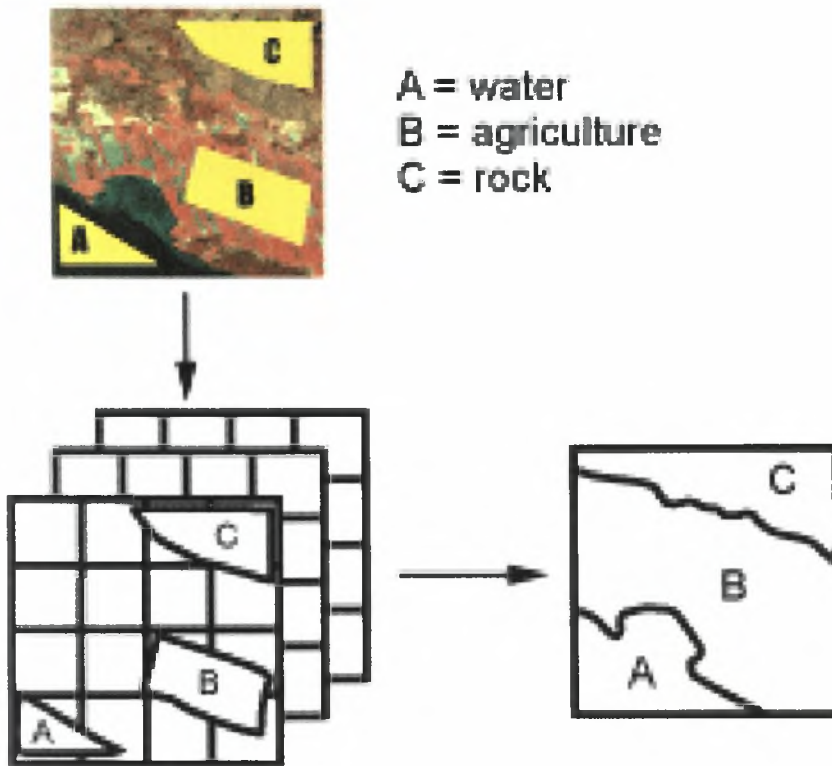
- (α) Προσδιορισμός του αριθμού των κλάσεων στις οποίες θα χωριστεί (segmented) η εικόνα (π.χ. νερό, έδαφος, διάφορα είδη καλλιεργειών). Στο στάδιο αυτό καθορίζεται, αντικειμενικά, ο αριθμός των τάξεων που θα

χρησιμοποιηθούν, ο οποίος και εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης και την περιοχή. Π.χ. όταν χρειάζεται να γίνει ταξινόμηση των ειδών βλάστησης μιας αγροτικής περιοχής τότε οι διαφορετικές καλλιέργειες λαμβάνονται σαν ξεχωριστές κλάσεις. Όταν το ενδιαφέρον στρέφεται στη γενικότερη ταξινόμηση μιας περιοχής (π.χ. αγροτική, αστική, υδάτινη) τότε τα είδη βλάστησης λαμβάνονται σαν μία κατηγορία.

- (β) Επιλογή προτύπων (prototypes) εικονοστοιχείων από κάθε κλάση, τα οποία αποτελούν τα εκπαιδευτικά δεδομένα (training data). Η επιλογή γίνεται βάσει πληροφοριών που συλλέγονται από κατά τόπους επισκέψεις, αεροφωτογραφίες κ.λ.π. Η δειγματοληψία των προτύπων πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική και, εάν αυτό είναι δυνατόν, να γίνει από όλη την περιοχή της εικόνας. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό γιατί θα καθορίσει το ποσοστό ακρίβειας της ταξινόμησης.
- (γ) Προσδιορισμός των παραμέτρων των ταξινομητών (classifiers) που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Οι παράμετροι αυτοί λέγονται υπογραφές (signatures) των δεδομένων.
- (δ) Ένταξη κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας σε μία από τις κλάσεις, που έχουν προσδιοριστεί, χρησιμοποιώντας τον εκπαιδευμένο ταξινομητή (trained classifier).
- (ε) Δημιουργία πινάκων σε μορφή πίνακα ή θεματικών χαρτών που δίνουν τα αποτελέσματα της ταξινόμησης.

Αναφορικά, δύο από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα βήματα (γ) και (δ) είναι:

- 1) Η ταξινόμηση με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας.
- 2) Η ορθογώνια παραλληλεπίπεδη ταξινόμηση.



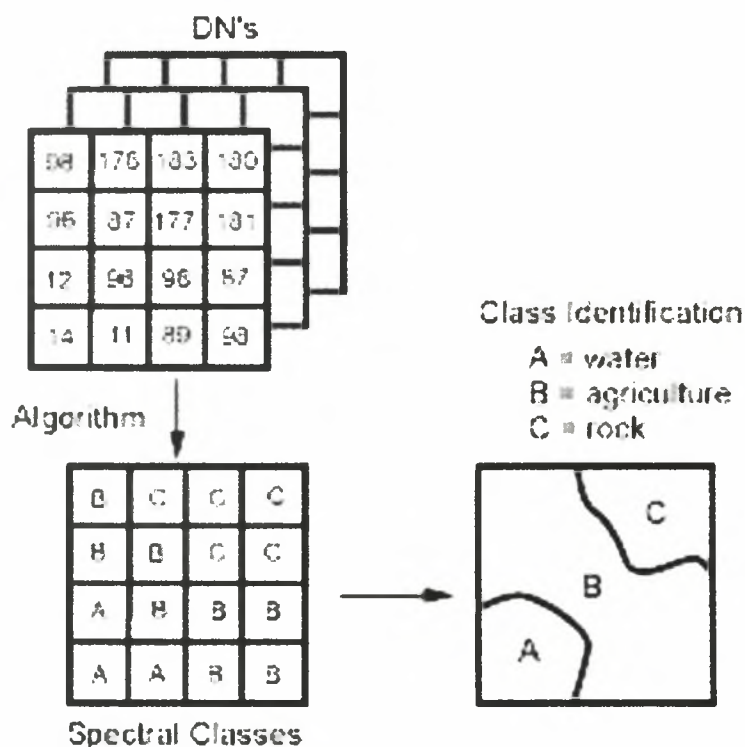
Σχήμα 4.2: Για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση επιλέγονται δειγματοληπτικές περιοχές (A, B, C) που χρησιμοποιούνται την ταξινόμηση ολόκληρης της εικόνας (Δαλέζιος, 2002).

Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση δεν απαιτεί γνώση της εικόνας εκ των προτέρων, αλλά εφαρμόζει υποδιαίρεσεις που βασίζονται σε «εσωτερικές» ιδιότητες των εικόνων. Οι ψηφιακές τιμές κάθε εικονοστοιχείου, σε κάθε μήκος κύματος, εξετάζονται και κατόπιν η εικόνα υποδιαιρείται σε έναν αριθμό κλάσεων (σχήμα 4.3).

Άρα, μία ταξινόμηση μπορεί να γίνει πλοτάροντας όλα τα διανύσματα στοιχείων της εικόνας σε ένα χώρο στοιχείων (feature space) ο οποίος θα αναλυθεί για την ομαδοποίηση των διανυσματικών στοιχείων σε ομάδες. Η διαδικασία ονομάζεται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση και τα λογισμικά που κάνουν αυτόματα την

ταξινόμηση λογισμικά ομαδοποίησης. Το λογισμικό όμως δεν έχει γνώση των ονομάτων των θεματικών κλάσεων της εδαφοκάλυψη ή των χρήσεων γης όπως δρόμος, πόλεις, σιτηρά κτλ. Το μόνο που κάνει είναι να αναγνωρίσει ότι υπάρχουν π.χ. 16 διαφορετικές φασματικές κλάσεις στην εικόνα και να τους δώσει αύξων αριθμό. Δηλαδή δημιουργεί ένα χάρτη (raster map) στον οποίο κάθε εικονοστοιχείο έχει τιμή από 1 – 16 (για το ανωτέρω παράδειγμα), ανάλογα με την ομάδα στην οποία αντιστοιχούν τα εικονοστοιχεία (Gorte, 2000). Σχεδόν όλα τα λογισμικά επεξεργασίας εικόνων επιτρέπουν στον χρήστη να ορίσει τον αριθμό των κλάσεων ή τις φασματικές διαφορές που θα πρέπει να υπάρχουν μεταξύ των κλάσεων.



Σχήμα 4.3: Γενική μεθοδολογία ανεξάρτητης ταξινόμησης. Οι αρχικές πολυφασματικές εικόνες ταξινομούνται, μέσω ενός αλγορίθμου, σε κλάσεις σύμφωνα με τις φασματικές τους ιδιότητες (Δαλέζιος, 2002).

Στην πράξη, για εξοικονόμηση χρόνου, η αρχική ομαδοποίηση ξεκινάει με την αναγνώριση των «φυσικών κλάσεων» εξετάζοντας μόνο ένα δείγμα από το σύνολο των εικονοστοιχείων της εικόνας. Κατόπιν καθορίζονται στατιστικές ποσότητες των κλάσεων και ακολουθεί η ταξινόμηση ολόκληρης της εικόνας (Δαλέζιος, 2002).

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούν συνήθως τα λογισμικά για να εκτελέσουν την ταξινόμηση είναι ο ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique). Τα αρχικά σημαίνουν «Επαναλαμβανόμενη και αυτό-οργανωμένη τεχνική ανάλυσης δεδομένων». Το «επαναλαμβανόμενη» αναφέρεται στο ότι εκτελεί την ταξινόμηση επανειλημμένα δίνοντας στην έξοδο ένα θεματικό ψηφιδωτό χάρτη και επαναυπολογίζει τα στατιστικά στοιχεία. Το αυτό-οργανωμένη αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο εντοπίζει τις κλάσεις που ενυπάρχουν στα δεδομένα.

Η μέθοδος ομαδοποίησης ISODATA χρησιμοποιεί την ελάχιστη φασματική απόσταση για να σχηματίσει τις κλάσεις. Ξεκινάει θέτοντας αυθαίρετα τους μέσους όρους κάθε κλάσης και κάθε φορά που η ομαδοποίηση επαναλαμβάνεται, οι μέσοι όροι των κλάσεων μεταβάλλονται. Οι νέοι μέσοι όροι των κλάσεων χρησιμοποιούνται για την επόμενη επανάληψη. Η εφαρμογή του αλγόριθμου συνεχίζεται έως ότου εκτελεσθεί ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ή επιτευχθεί ένα μέγιστο ποσοστό αμετάβλητων εικονοστοιχείων μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Έτσι, στη συγκεκριμένη μέθοδο πρέπει να οριστεί ο αριθμός των κλάσεων, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και το ποσοστό σύγκλισης (συνήθως 95%).

Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά γρήγορη και επιτρέπει στον χρήστη να λάβει μία αντικειμενική εικόνα των κύριων φασματικών τύπων. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να ακολουθήσει η επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

4.1.2 Μεθοδολογία ανάλυσης

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της επιβλεπόμενης ταξινόμησης και συγκεκριμένα της παραλληλεπίπεδης ταξινόμησης. Για την εφαρμογή της μεθόδου δημιουργήθηκαν δώδεκα μηνιαίες εικόνες με δύο επίπεδα (Layers), ένα για τον NDVI και ένα για τον DD. Οι μηνιαίες εικόνες του NDVI προέκυψαν με τη μέθοδο μεγίστων τιμών από τις εβδομαδιαίες MVC εικόνες του NDVI. Οι μηνιαίοι χάρτες του DD αποτελούν το άθροισμα των εβδομαδιαίων, λόγω του αθροιστικού χαρακτήρα του δείκτη. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μηνιαίων τιμών των δεικτών απεικονίζονται στο Παράρτημα Ι. Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε να είναι ο μήνας έτσι ώστε να υπάρχει σύμπτωση, όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη, με τον δείκτη AI και για να είναι δυνατή η χρονική παρακολούθηση και σύγκριση της εμφάνισης συνθηκών ξηρασίας, κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους υπό εξέταση.

Έτσι λοιπόν, στις δώδεκα εικόνες κάθε επίπεδο αντιστοιχεί στον μηνιαίο χάρτη του κάθε δείκτη για το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Ο αριθμός των κλάσεων βάση του οποίου θα γινόταν η ταξινόμηση ορίστηκε από τις κατηγορίες ξηρασίας που ορίζει ο AI (πέντε κατηγορίες). Έτσι λοιπόν ορίστηκαν πέντε κλάσεις για τις πέντε διαφορετικές κατηγορίες. Αυτές είναι η υγρή, η ύφυγρη, η ημίξηρη, η ξηρή και τέλος η ακραία ξηρή. Στη συνέχεια βρέθηκαν οι συνδυασμοί και τα εύρη των τιμών των δύο δεικτών που σχετίζονται με τις κατηγορίες που ορίζει ο AI. Για να είναι δυνατός ο προσδιορισμός του εύρους των τιμών των δύο δεικτών ανά κατηγορία, πρέπει να υπάρχει μία κοινή κλίμακα αναφοράς η οποία να βασίζεται στο παρατηρούμενο εύρος των τιμών του NDVI και του DD, ανά εικονοστοιχείο, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και να εμπεριέχει τη χωρική μεταβλητότητα των δεικτών (από εικονοστοιχείο σε εικονοστοιχείο). Έτσι λοιπόν, έγινε μία κανονικοποίηση των

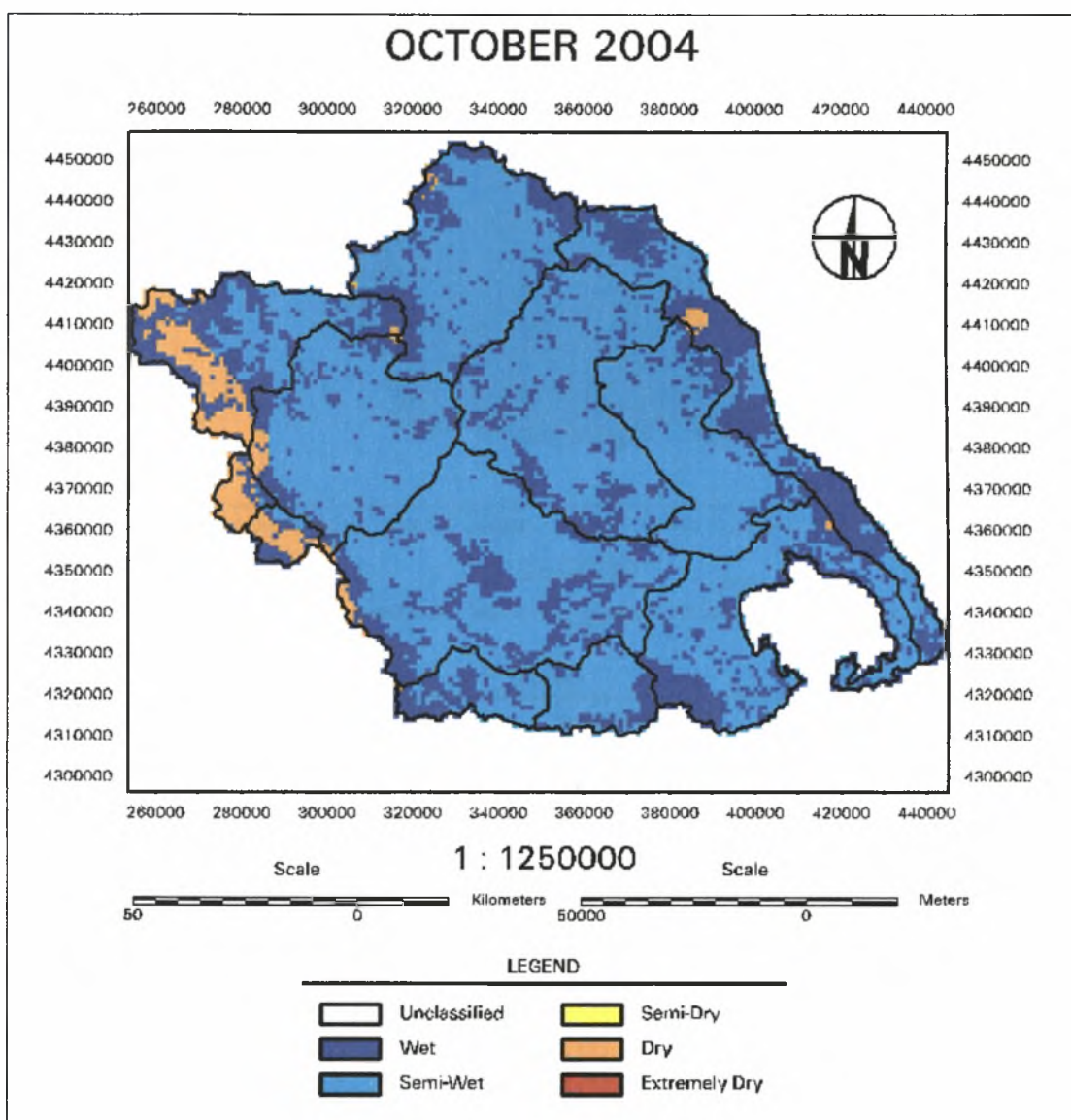
τιμών των δύο δεικτών με εύρος από μηδέν έως ένα, βάση των παρατηρούμενων τιμών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ανά εικονοστοιχείο. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ι. Έπειτα, με τη χρήση των μηνιαίων τιμών του ΑΙ προσδιορίστηκαν τα εύρη των κανονικοποιημένων τιμών που αντιστοιχούν σε κάθε κατηγορία κατάστασης ξηρασίας (Πίνακας 6.2, βλ. Παράρτημα ΙΙ). Κατά τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν οι σταθμοί που παρουσιάζουν τιμές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ενώ ο προσδιορισμός έγινε με βάση τις τιμές έως τον μήνα Μάιο, αφού οι τιμές του NDVI πέραν αυτού του μηνός είναι αρκετά επισφαλής λόγω διεργασιών και ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα τη θερινή περίοδο (π.χ. θερισμός σιτηρών). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 4.1. Οι τιμές και στους τρεις δείκτες είναι αδιάστατες.

Πίνακας 4.1: Αντιστοιχία των κανονικοποιημένων τιμών του NDVI και του DD με τις κατηγορίες ξηρασίας, όπως ορίζονται από τον ΑΙ.

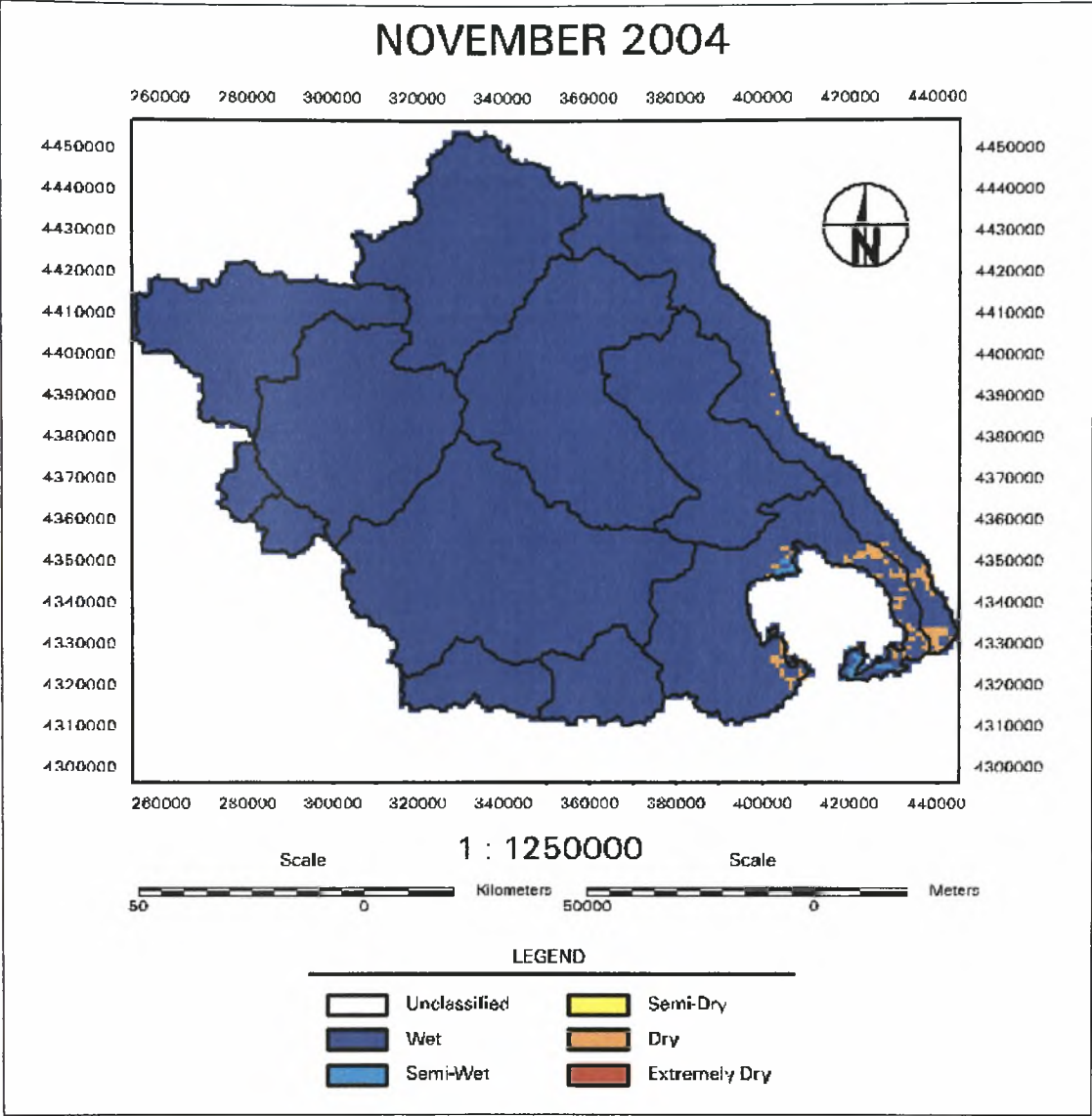
Κατηγορία	ΑΙ	NDVI	DD
Υγρή	>0,75	0-0,56	0-0,15
Ύφουγη	0,50 - 0,75	0-0,56	0,3-0,5
Ημίξηρη	0,20 - 0,50	0,82-1,00	0,51-0,8
Ξηρή	0,03 - 0,20	0,57-0,81	0,81-0,88 και 0,16-0,29
Ακραία Ξηρή	<0,03	-----	0,88-1

Η ταξινόμηση έγινε με τη χρήση του λογισμικού Erdas Imagine 8.6, με το εργαλείο “Supervised Classification”. Τα εύρη των τιμών των δύο δεικτών που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση ορίστηκαν με τη χρήση του εργαλείου “Signature

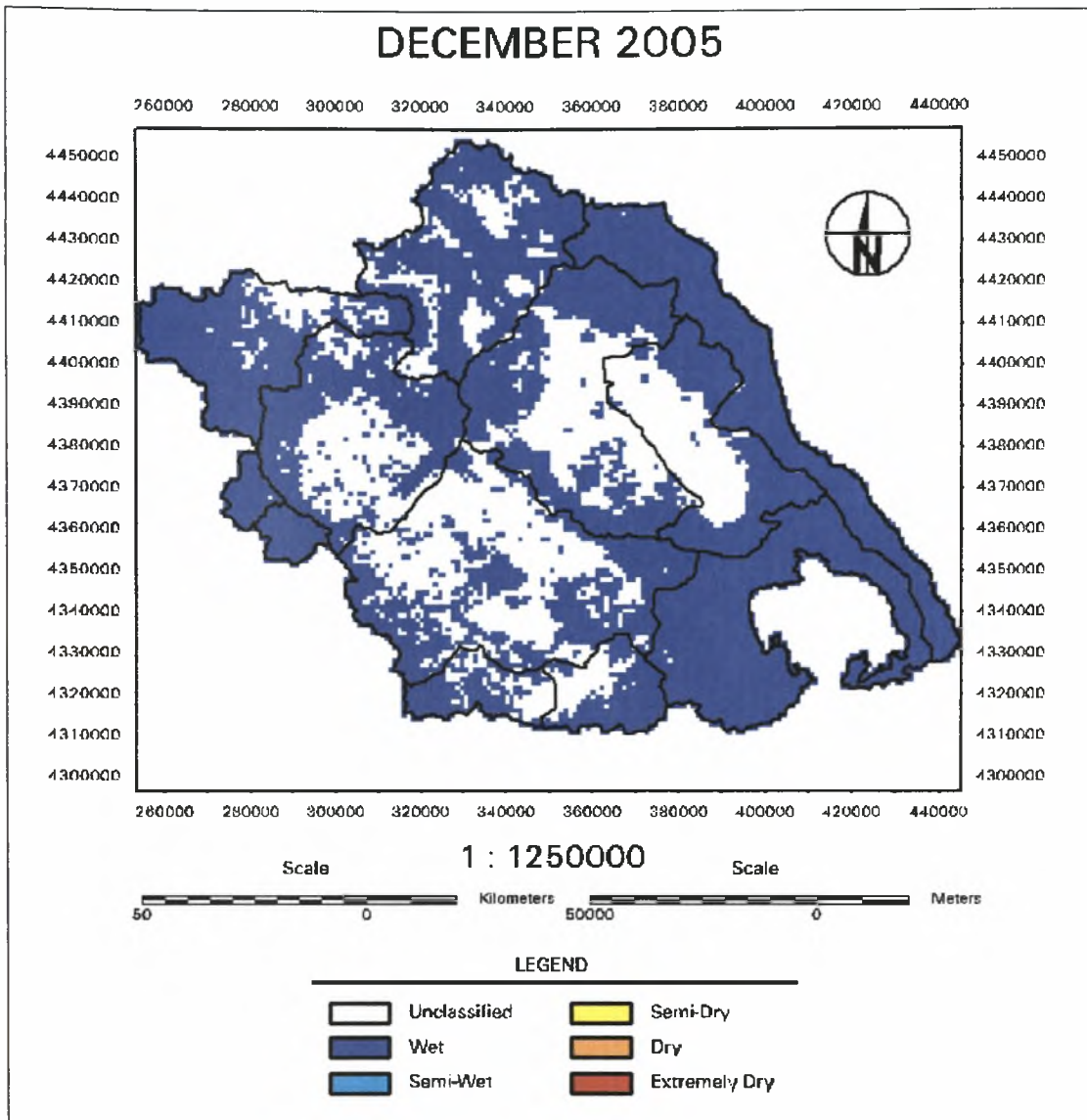
Editor". Οι παραγόμενοι θεματικοί χάρτες δημιουργήθηκαν με διαβάθμιση χρώματος από μπλε για τις υγρές συνθήκες, έως κόκκινο για τις ακραία ξηρές και απεικονίζουν τις πέντε κατηγορίες κατάστασης ξηρασίας όπως αυτές προσδιορίστηκαν από την ταξινόμηση. Οι δώδεκα χάρτες απεικονίζονται στις Εικόνες 4.1 έως 4.12, από τον μήνα Οκτώβριο έως και τον Σεπτέμβριο αντίστοιχα.



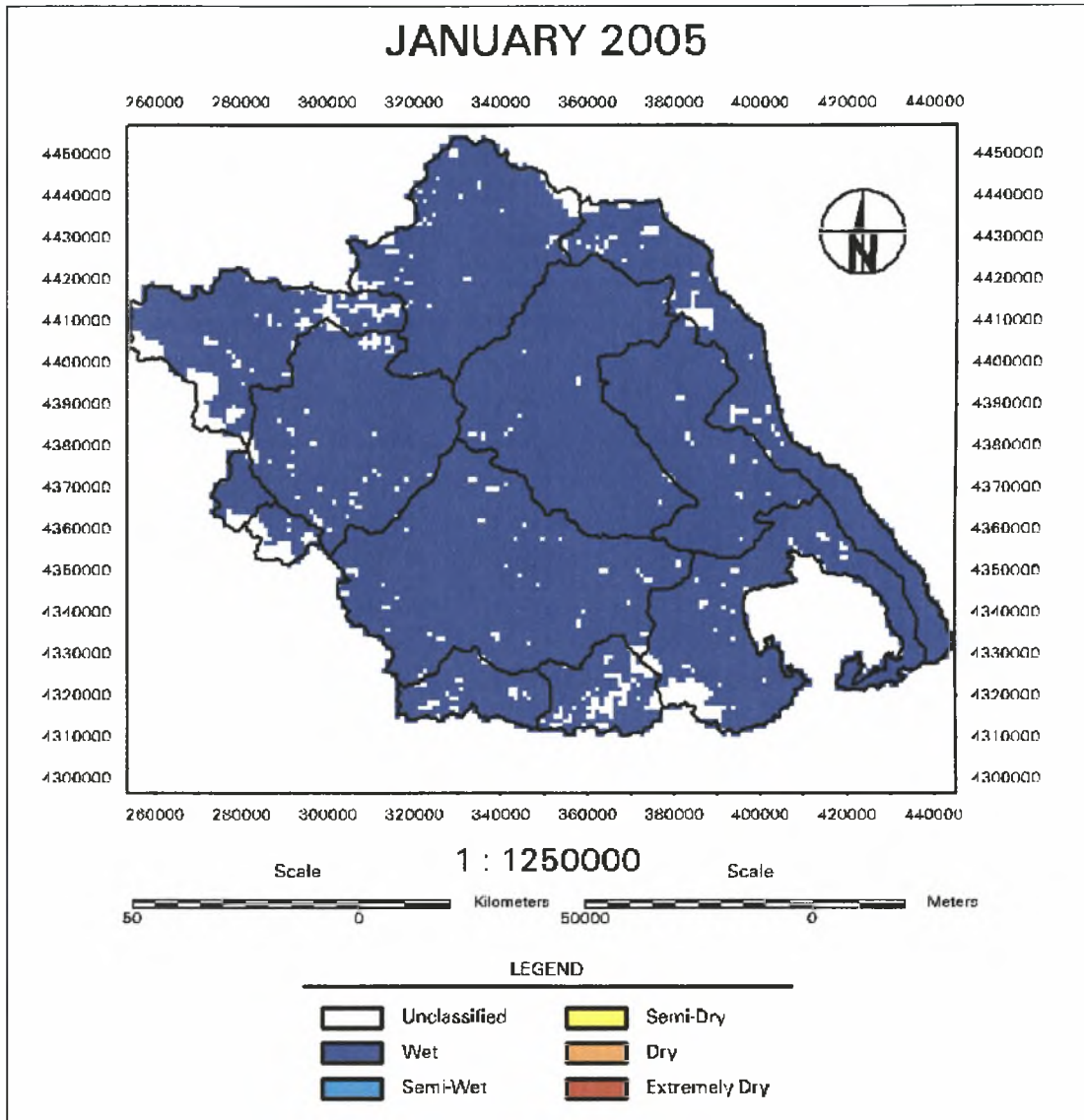
Εικόνα 4.1: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Οκτώβριο 2004.



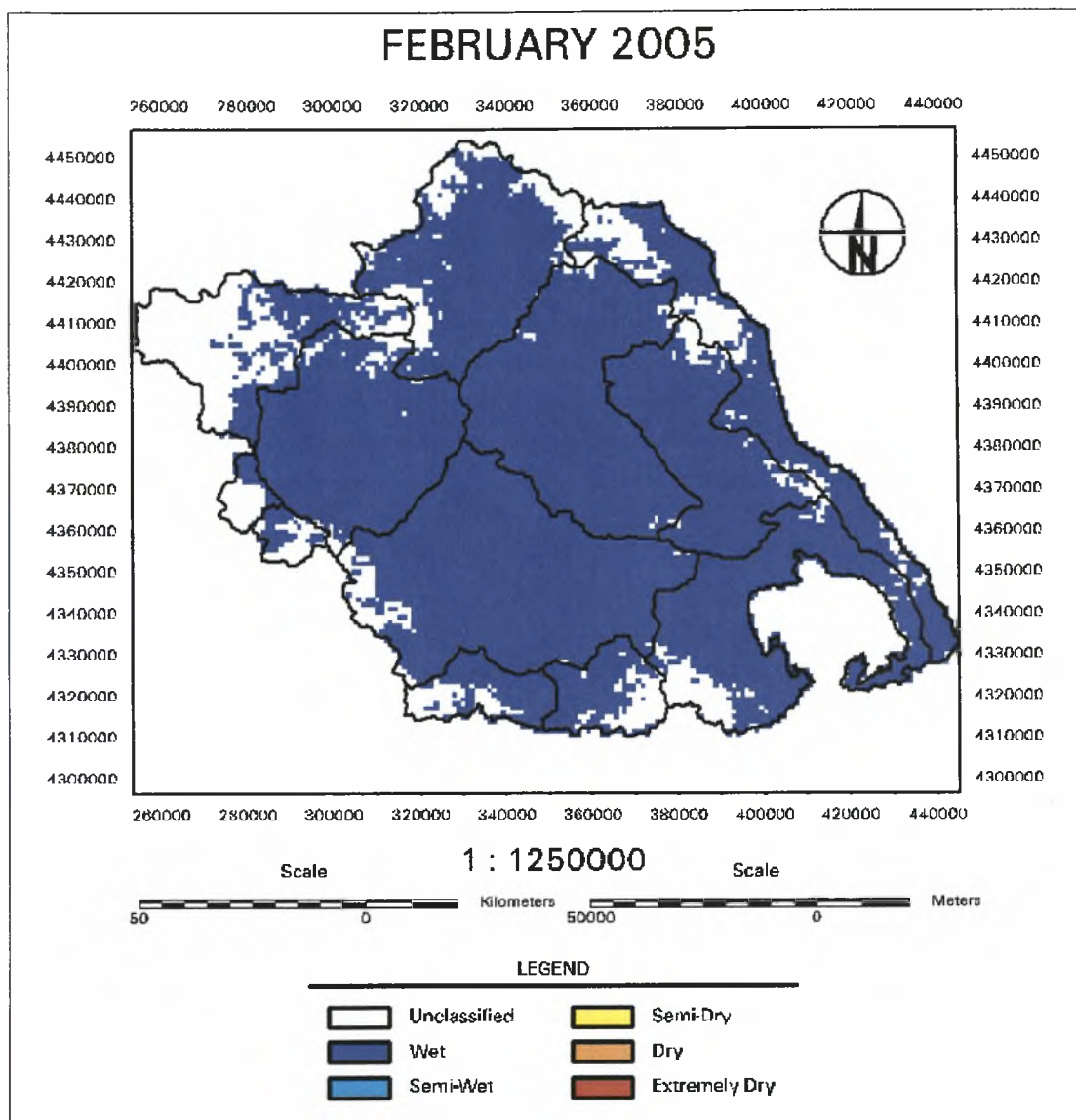
Εικόνα 4.2: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Νοέμβριο 2004.



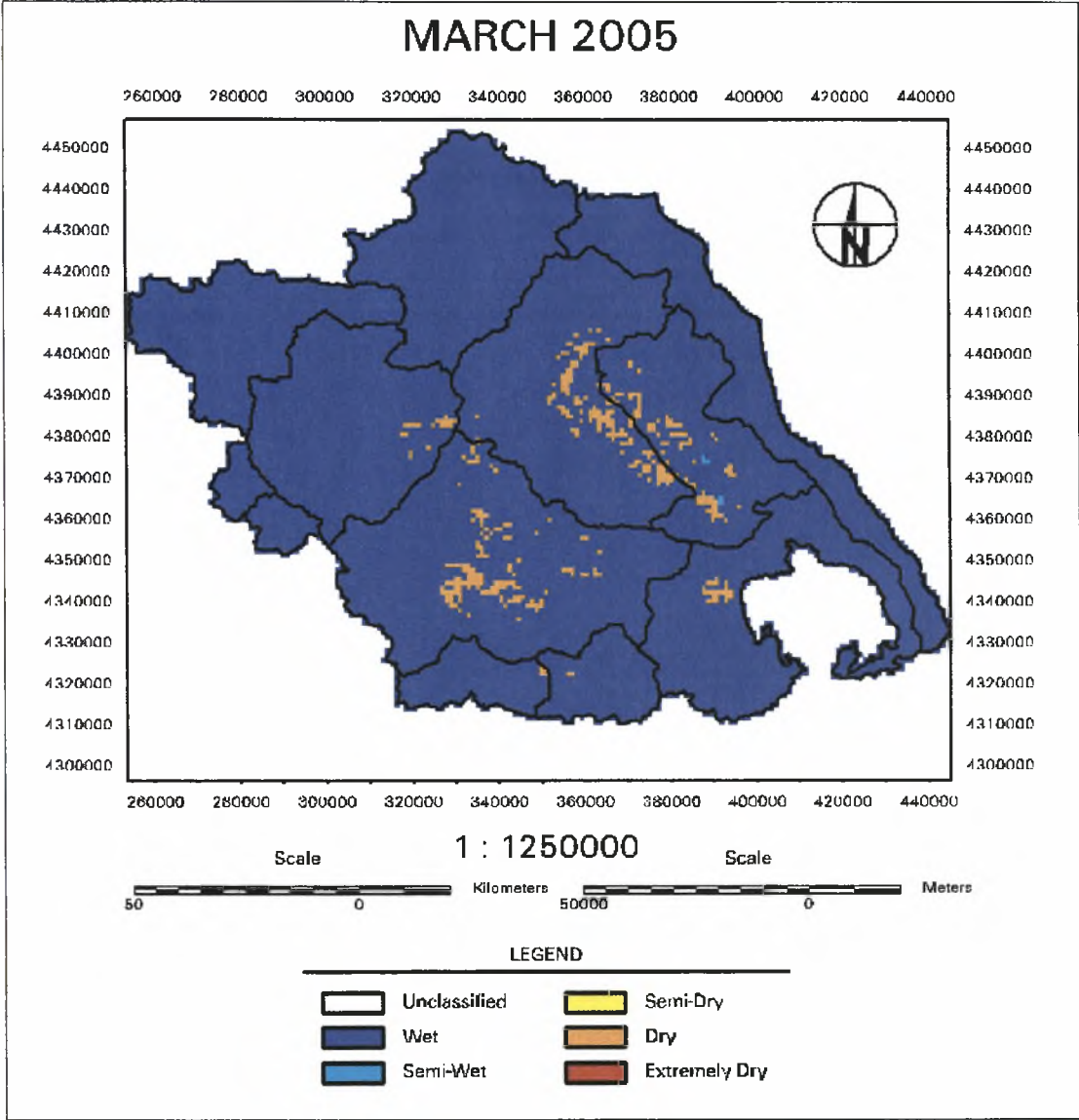
Εικόνα 4.3: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Δεκέμβριο 2004.



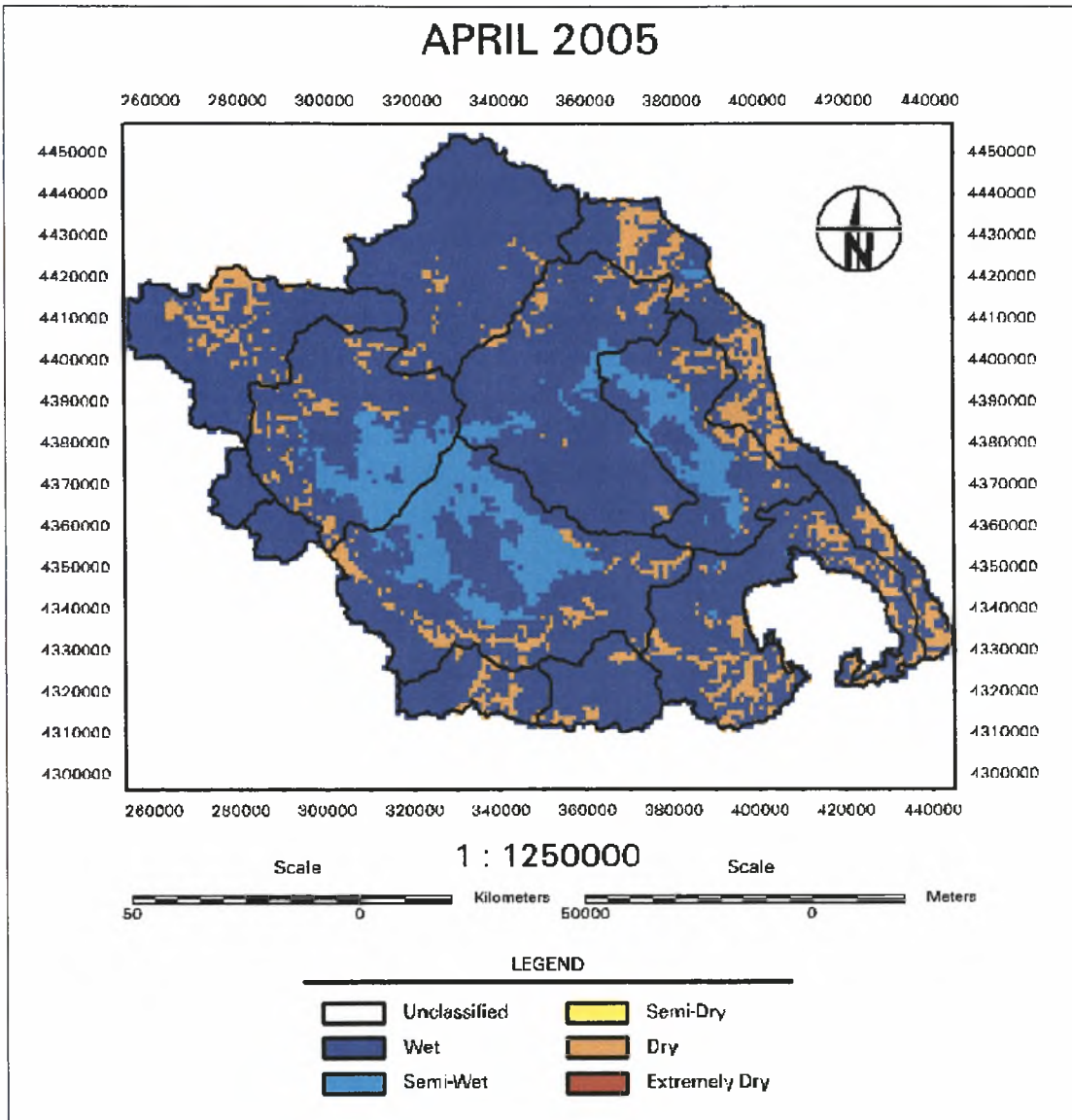
Εικόνα 4.4: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Ιανουάριο 2005.



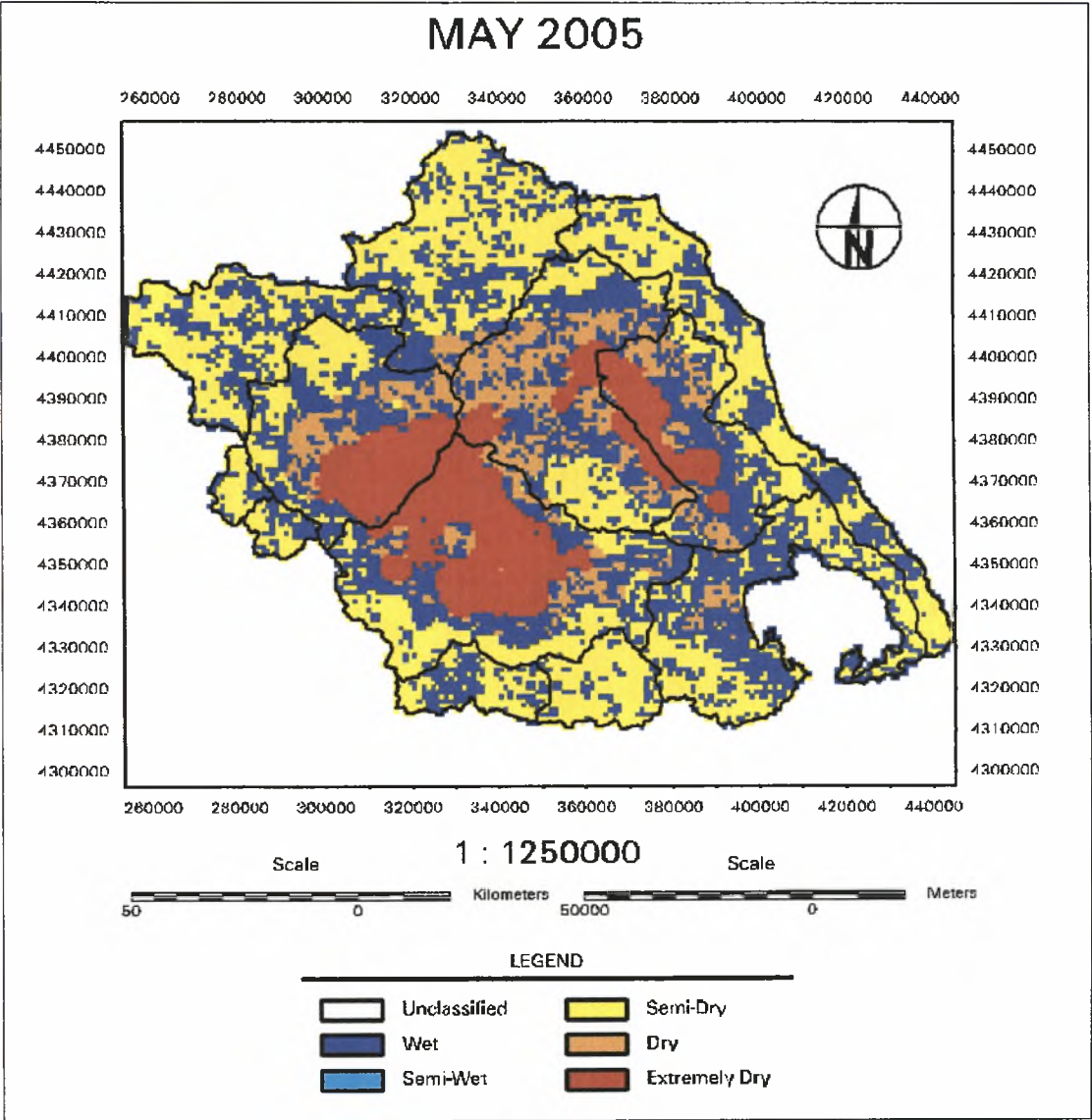
Εικόνα 4.5: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Φεβρουάριο 2005.



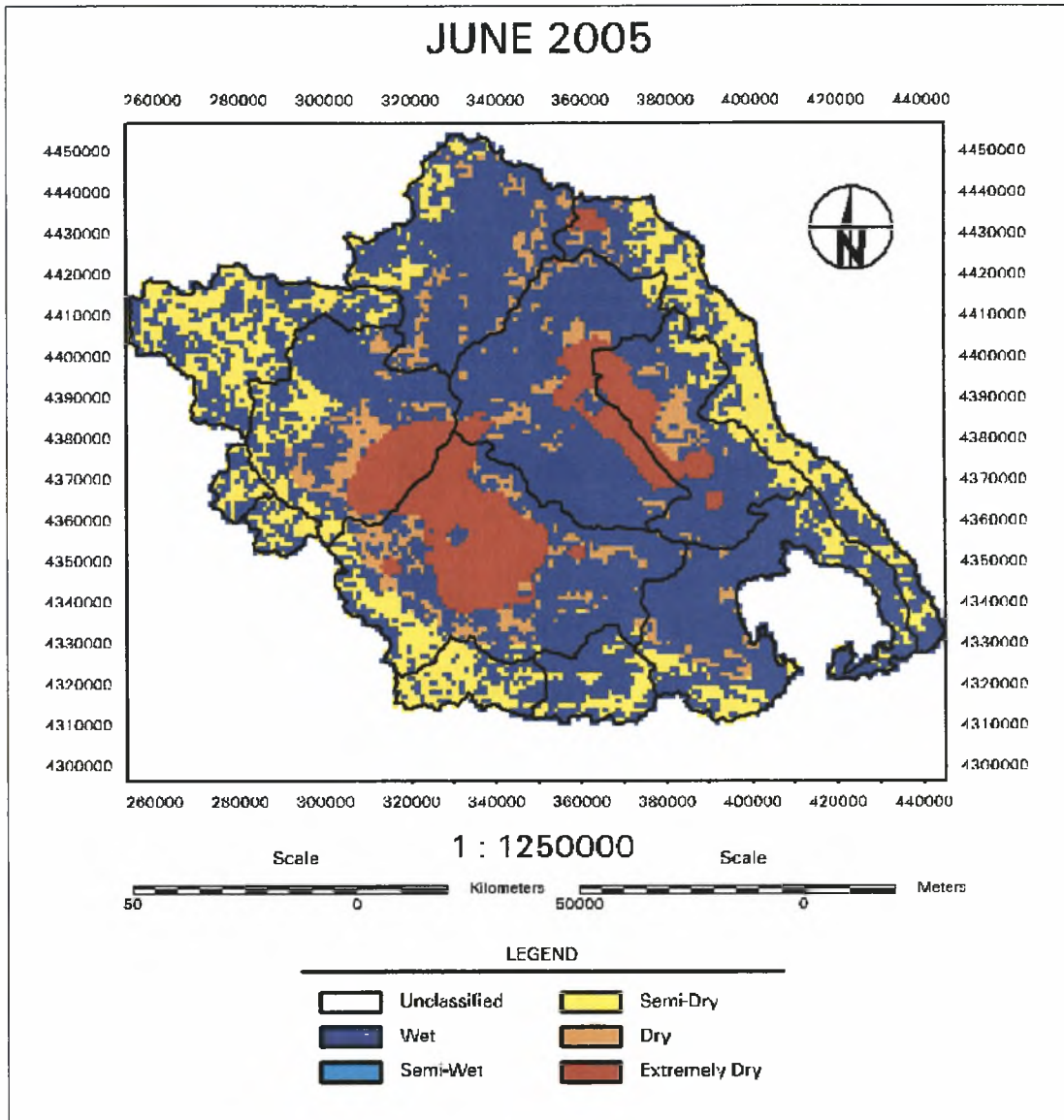
Εικόνα 4.6: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Μάρτιο 2005.



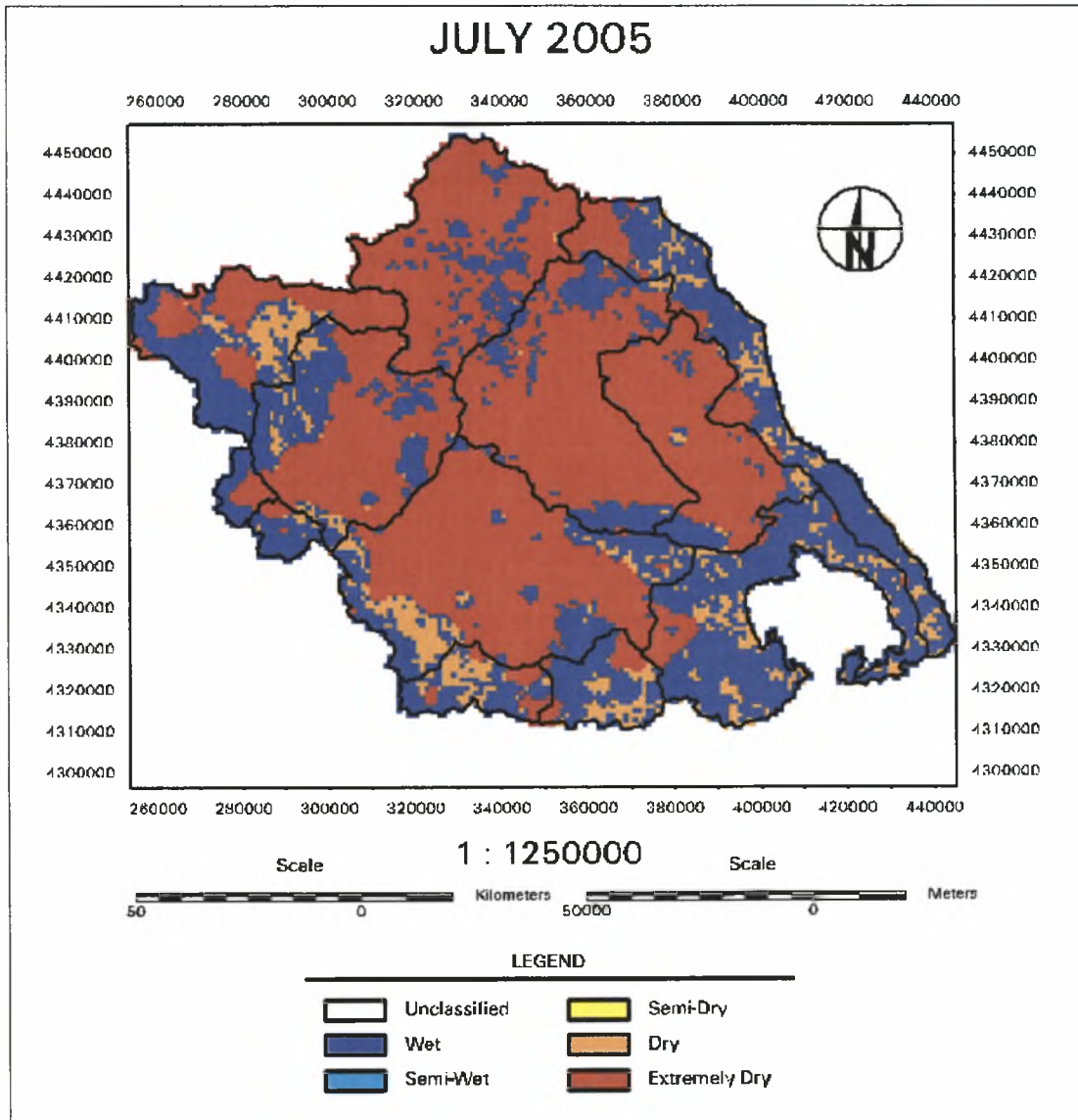
Εικόνα 4.7: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Απρίλιο 2005.



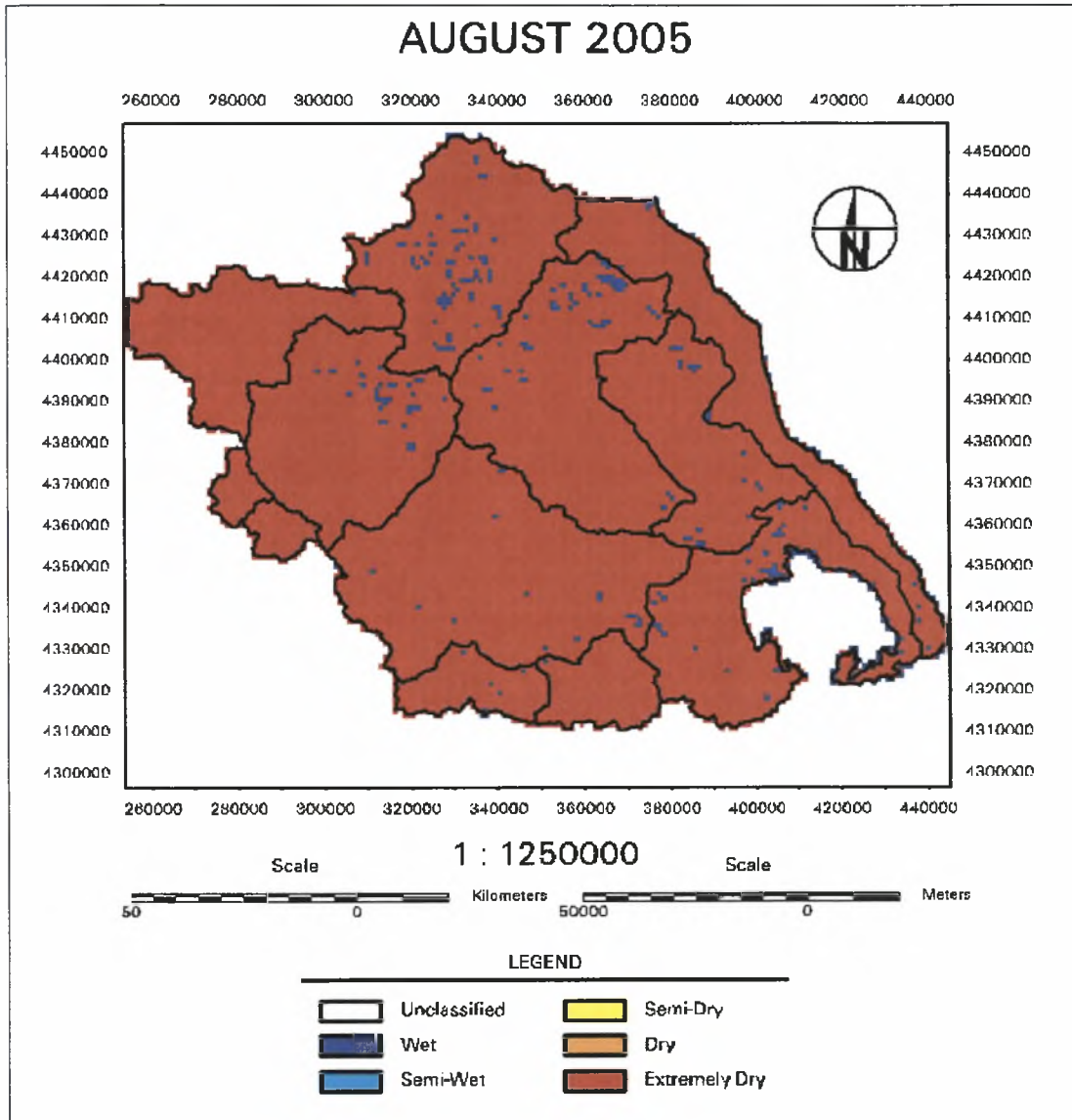
Εικόνα 4.8: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Μάιο 2005.



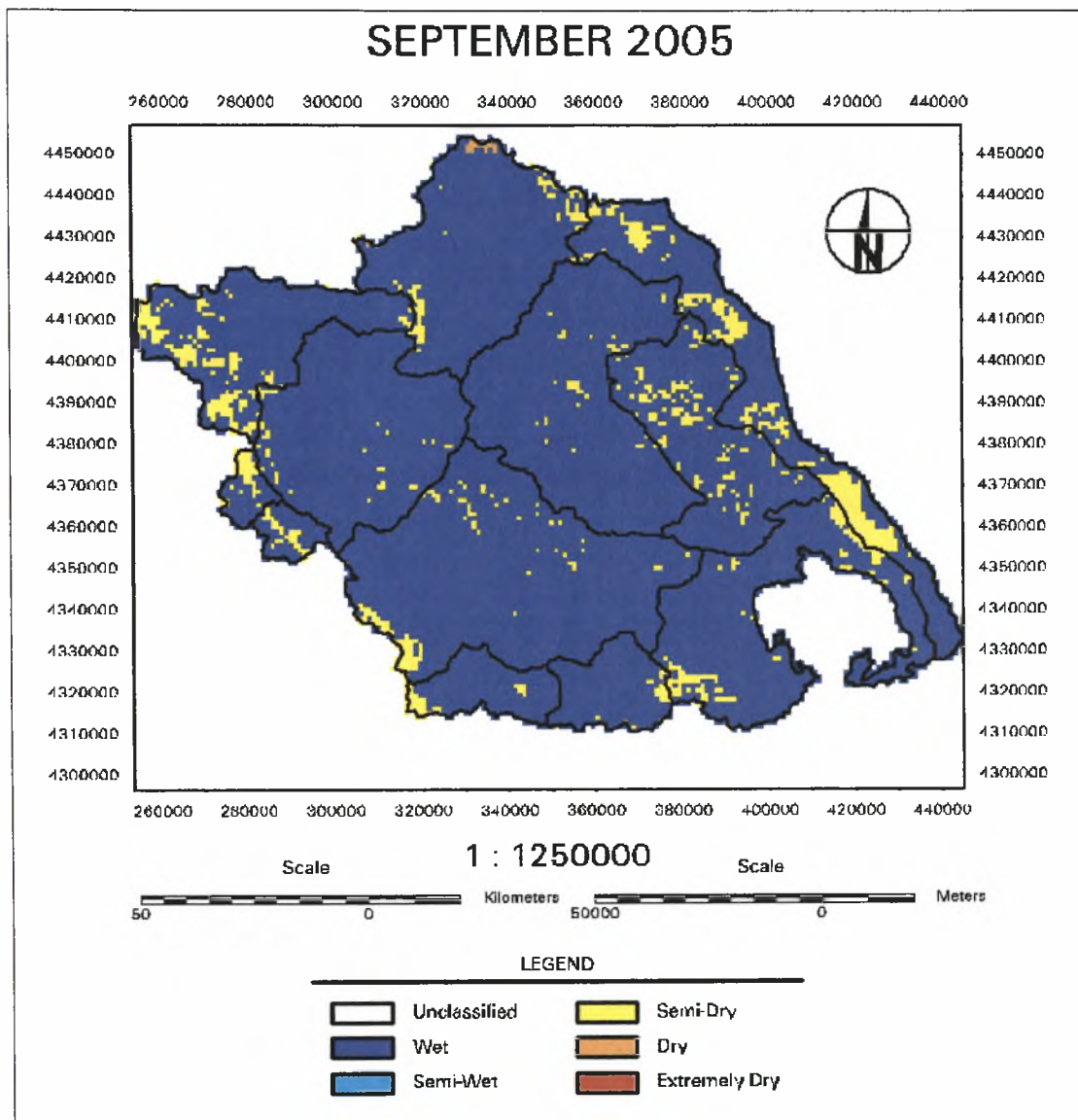
Εικόνα 4.9: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Ιούνιο 2005.



Εικόνα 4.10: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Ιούλιο 2005.



Εικόνα 4.11: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Αύγουστο 2005.



Εικόνα 4.12: Θεματικός χάρτης κατηγορίας ξηρασίας στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, για το μήνα Σεπτέμβριο 2005.

4.2 Επισημάνσεις

Όπως προαναφέρθηκε, στους θεματικούς χάρτες η ξηρασία παρουσιάζει πέντε διαβαθμίσεις (Πίνακας 2.3 και 4.1). Είναι λογικό σε κάποιους μήνες να μην εμφανίζεται καθόλου μία ή και περισσότερες κατηγορίες, όπως επίσης σε κάποιες περιπτώσεις να κυριαρχεί μόνο μία. Έτσι στους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο έως και Φεβρουάριο) κυριαρχεί η υγρή κατηγορία ενώ στο θερμότερο καλοκαιρινό μήνα, τον Αύγουστο, η ακραία ξηρή. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1, ενώ οι υποπεριοχές αυτού παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2 του δευτέρου κεφαλαίου.

Το μήνα Οκτώβριο κυριαρχούν ύφυγρες συνθήκες γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στην εμφάνιση των πρώτων βροχών (Εικόνα 4.1). Σε κάποιες περιοχές οι συνθήκες είναι υγρές, ενώ σε μερικές περιπτώσεις και σε περιοχές με υψηλό υψόμετρο (Δυτική Θεσσαλία) παρατηρούνται συνθήκες ξηρασίας. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην ελλιπή συγκράτηση νερού από το έδαφος λόγω της γεωμορφολογίας (μεγάλες κλίσεις). Επίσης, στην ελλιπή συγκράτηση νερού μπορεί να συντελέσει και η ύπαρξη αραιής βλάστησης η οποία δεν είναι ικανή να καθυστερήσει την απορροή. Έτσι λοιπόν, σε όλες τις υποπεριοχές, πλην αυτών της Δυτικής Θεσσαλίας (Σαρακίνα, Μουζάκι, Πύλη) και της Ανατολικής-Παράκτιας, επικρατούν οι ύφυγρες συνθήκες. Παρατηρείται εναλλαγή στο χώρο μεταξύ ύφυγων και υγρών συνθηκών ή οποία πιθανόν να οφείλεται στη χωρική διαφοροποίηση της θερμοκρασίας. Στις υπολεκάνες Σαρακίνα, Μουζάκι και Πύλη, όπου στη δυτική τους πλευρά παρατηρούνται ορεινοί όγκοι με μεγάλο υψόμετρο (Χάσια όρη και Πίνδος), εμφανίζονται ξηρές συνθήκες στις περιοχές που υπάρχει κλίση (Εικόνα 4.1). Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται στην Ανατολική Λεκάνη, στην περιοχή του όρους Όσσα και σε περιορισμένη χωρική

επέκταση στα Αντιχάσια όρη και στη Νότια Πίνδο (Νότια Λεκάνη). Κατάντη των περιοχών εμφάνισης της ξηρασίας παρατηρούνται υγρές συνθήκες. Αυτό είναι λογικό διότι τα ύδατα τα οποία απορρέουν λόγω της έντονης κλίσης και της ύπαρξης αραιής βλάστησης, μη ικανής να συγκρατήσει την απορροή, συλλέγονται στις γειτονικές πεδινές περιοχές. Επιπλέον, στην Ανατολική Λεκάνη παρατηρείται η εμφάνιση υγρών συνθηκών με συχνές αλλά μικρής έκτασης διακοπές από ύφυγρες κατά μήκος της ακτογραμμής.

Από τον μήνα Νοέμβριο έως και τον Φεβρουάριο κυριαρχούν οι υγρές συνθήκες (Εικόνες 4.2 – 4.5). Οι αυξημένες βροχοπτώσεις καθώς και οι χαμηλές θερμοκρασίες που χαρακτηρίζουν αυτήν την περίοδο, έχουν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πλεονάσματος ύδατος και την μείωση της εξατμισοδιαπνοής που σε συνδυασμό οδηγούν στην εμφάνιση υγρών συνθηκών. Η εμφάνιση απροσδιόριστων περιοχών στους τρεις χειμερινούς μήνες συνδέεται με την εμφάνιση πολύ χαμηλών τιμών των δεικτών NDVI και DD (κανονικοποιημένες τιμές $<0,00001$) οι οποίες ομοιάζουν με την τιμή που έχει δοθεί στη θάλασσα και η οποία δεν εμπεριέχεται σε κάποια από τις πέντε κατηγορίες. Όσον αφορά τον μήνα Νοέμβριο, αυτός χαρακτηρίζεται από χωρική ομοιομορφία (Εικόνα 4.2). Εμφανίζονται υγρές συνθήκες σ' όλο το υδατικό διαμέρισμα με εξαίρεση την εμφάνιση ξηρασίας στο όρος Πήλιο, το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ έντονη γεωμορφολογία και κλίση.

Ο μήνας Μάρτιος μπορεί να χαρακτηριστεί ως το μεταβατικό στάδιο από τις υγρές, στις ξηρές συνθήκες (Εικόνα 4.6). Ενώ σε γενικές γραμμές κυριαρχούν οι υγρές συνθήκες, στις κεντρικές επιμέρους περιοχές του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στις Λάρισας, Κάρλας και στη Νότια Λεκάνη, παρατηρείται μικρής έκτασης ξηρασία. Το φαινόμενο εμφανίζεται σε μικρότερη κλίμακα στις υποπεριοχές Μαγνησία και Αλί Εφέντι. Η εμφάνιση ξηρασίας πιθανόν

να οφείλεται στην ύπαρξη αυξημένων θερμοκρασιών στις συγκεκριμένες πεδινές περιοχές. Επίσης, λόγω του ότι οι συγκεκριμένες εκτάσεις είναι ως επί το πλείστον καλλιεργήσιμες, πιθανόν να παρουσιάζουν και αυξημένη εξατμισοδιαπνοή με αποτέλεσμα την εμφάνιση ξηρασίας.

Το μήνα Απρίλιο η ανωτέρω κατάσταση διαφοροποιείται (Εικόνα 4.7). Η ξηρασία εμφανίζεται σε ορεινές περιοχές και σε περιοχές με σημαντική παρουσία βλάστησης. Η σπορά των εαρινών καλλιεργειών στα τέλη Μαρτίου με αρχές Απριλίου που συνεπάγεται χαμηλές τιμές του NDVI στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υγρών και ύφυγρων συνθηκών στον κάμπο της Θεσσαλίας. Σ' όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρατηρείται εναλλαγή μεταξύ των υγρών και ξηρών συνθηκών, ενώ μόνο στις τέσσερις κεντρικές υποπεριοχές (Λάρισας, Κάρλας, Νότια Λεκάνη και Αλί Εφέντι) εμφανίζονται ύφυγρες συνθήκες. Τέλος σε ορεινές περιοχές όπου παρατηρήθηκε αυξημένη βροχόπτωση όπως στη δυτική και βόρεια Θεσσαλία (Πύλη, Μουζάκι και Μεσοχώρι), παρατηρούνται υγρές συνθήκες.

Τα φαινόμενα έντονης ξηρασίας εμφανίζονται την περίοδο του Μαΐου (Εικόνα 4.8). Πρέπει να αναφερθεί ότι η εμφάνιση ακραίων φαινομένων ξηρασίας αφορά το υδρολογικό έτος υπό εξέταση, με αποτέλεσμα η κατηγορία της ακραίας ξηρασίας να υποδεικνύει την ύπαρξη αντίξοων συνθηκών βάση της εμφάνισης αυτών στο συγκεκριμένο υδρολογικό έτος (2004-2005). Το ίδιο ισχύει και για την εμφάνιση υγρών συνθηκών που συνεπάγονται την ύπαρξη ευνοϊκών συνθηκών. Έτσι λοιπόν, τον μήνα Μάιο παρατηρούνται τέσσερις κατηγορίες ξηρασίας στις κεντρικές και κυρίως πεδινές υποπεριοχές της Θεσσαλίας. Ως επί το πλείστον επικρατούν φαινόμενα ξηρασίας (ακραία ξηρή και ξηρή κατηγορία), ενώ εμφανίζονται και περιπτώσεις ημίξηρων και υγρών συνθηκών. Η ακραία ξηρή κατηγορία εμφανίζεται

συνεχής όσον αφορά τη χωρική της εξάπλωση ενώ παρατηρείται εναλλαγή των υγρών, ημίξηρων και ξηρών συνθηκών. Στις υπόλοιπες υποπεριοχές που χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη ορεινών όγκων με μεγάλα υψόμετρα, παρατηρείται η ύπαρξη δύο κατηγοριών, της ημίξηρης και της υγρής. Γενικότερα, τον μήνα Μάιο παρατηρήθηκαν ικανοποιητικά για την εποχή ύψη βροχόπτωσης. Η εμφάνιση ξηρασίας σχετίζεται άμεσα με την υπέρμετρη ανάπτυξη της βλάστησης τη συγκεκριμένη περίοδο και την άνοδο της θερμοκρασίας, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της εξατμισοδιαπνοής.

Οι δύο πρώτοι καλοκαιρινοί μήνες, αποτελούν το μεταβατικό στάδιο προς τα φαινόμενα έντονης ξηρασίας που εμφανίζονται τον Αύγουστο. Τον Ιούνιο, παρότι η θερμοκρασία παρουσιάζει άνοδο, παρατηρείται η ύπαρξη υγρών συνθηκών σε αρκετά τμήματα των κεντρικών υποπεριοχών του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Εικόνα 4.9). Πιθανόν οι βροχοπτώσεις του Μαΐου να είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της εδαφικής υγρασίας σε περιοχές με μικρή κλίση, η οποία συνδέεται άμεσα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η βλάστηση και τον δείκτη NDVI. Όμως, η χωρική εξάπλωση των ακραίων συνθηκών ξηρασίας παραμένει σχεδόν αμετάβλητη (ελαφρώς μειωμένη) σε σχέση με τον προηγούμενο μήνα, με έμφαση του φαινομένου στις τέσσερις κεντρικές υποπεριοχές (Λάρισας, Κάρλας, Νότια Λεκάνη και Αλί Εφέντι). Στις υπόλοιπες παρατηρείται εναλλαγή μεταξύ υγρών και ημίξηρων συνθηκών. Σε σχέση με τον προηγούμενο μήνα (Εικόνα 4.8) υπάρχει μείωση όσον αφορά τη χωρική εξάπλωση των ημίξηρων και ξηρών συνθηκών.

Τον Ιούλιο η άνοδος της θερμοκρασίας και η έλλειψη βροχοπτώσεων οδηγούν στην αύξηση των ακραία ξηρών συνθηκών (Εικόνα 4.10). Στις κεντρικές και βόρειες υποπεριοχές κυριαρχεί η έντονη ξηρασία ενώ όσον αφορά τη χωρική μεταβλητότητα του φαινομένου, παρατηρείται σ' αυτές εναλλαγή μεταξύ ακραία ξηρών και υγρών

συνθηκών. Στην Ανατολική Λεκάνη και στις νότιες υποπεριοχές (Σμόκοβο, Σκοπιά, Μαγνησίας) του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας εναλλάσσονται οι ξηρές με τις υγρές συνθήκες, ενώ εμφανίζονται και μικρής έκτασης φαινόμενα έντονης ξηρασίας. Τέλος, στις δυτικές υποπεριοχές (Σαρακίνα, Μουζάκι, Πύλη) παρατηρούνται τρεις κατηγορίες ξηρασίας, η ακραία ξηρή, η ξηρή και η υγρή.

Τον μήνα Αύγουστο κυριαρχούν οι ακραίες συνθήκες ξηρασίας (Εικόνα 4.11). Αυτό οφείλεται, αφενός στην ύπαρξη χαμηλών ποσών βροχόπτωσης και αφετέρου στις υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται εκείνη την εποχή. Όπως προαναφέρθηκε, η εμφάνιση ακραία ξηρών συνθηκών σχετίζεται άμεσα και με το γεγονός ότι ο έλεγχος γίνεται σε ένα μόνο υδρολογικό έτος. Έτσι με βάση τα δεδομένα της χρονοσειράς που χρησιμοποιήθηκε, οι πιο αντίξοες συνθήκες (ελάχιστο ύψος βροχής και μέγιστες θερμοκρασίες) που συνεπάγονται και την εμφάνιση ακραίων φαινομένων ξηρασίας, παρατηρούνται κυρίως το συγκεκριμένο μήνα με χωρική εξάπλωση σε όλη την περιοχή μελέτης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σποραδική και σημειακού χαρακτήρα εμφάνιση υγρών συνθηκών σε ορισμένες υποπεριοχές.

Τέλος, τον μήνα Σεπτέμβριο σηματοδοτείται η αρχή της υγρής περιόδου. Κυριαρχούν οι υγρές και ύφυγρες συνθήκες (Εικόνα 4.12). Αυτό συνδέεται άμεσα με την εμφάνιση υψηλών βροχοπτώσεων καθώς επίσης και με την σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας. Σε κάποιες ορεινές περιοχές (Πήλιο, Όσσα, Πίνδος κτλ.) εμφανίζονται ημίξηρες συνθήκες, πιθανόν εξαιτίας της ύπαρξης μεγάλης κλίσης που οδηγεί σε ραγδαία απορροή. Οι κεντρικές υποπεριοχές (Λάρισα, Αλί Εφέντι, Κάρλας, Νότια Λεκάνη), που απαρτίζονται κυρίως από πεδινά τμήματα, παρουσιάζουν ομοιομορφία όσον αφορά τη χωρική εξάπλωση του φαινομένου και χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση υγρών συνθηκών και τη σποραδική εμφάνιση ημίξηρων, με υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης των τελευταίων στην περιοχή της Κάρλας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μετά από την εφαρμογή των δεικτών, τη θεματική ταξινόμηση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διεκπεραίωση της παρούσης μεθοδολογίας, δίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα καθώς και η αξιολόγηση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό προτείνονται και τρόποι βελτίωσης της μεθοδολογίας που θα οδηγήσουν στην καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου της ξηρασίας με τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων.

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας με σκοπό την ταξινόμηση και παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας στην Θεσσαλία με τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων. Συγκεκριμένα οι τηλεπισκοπικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο NDVI και ο DD, ενώ ο έλεγχος για την εμφάνιση ξηρασίας γίνεται με τη χρήση του δείκτη ξηρότητας. Ο AI υπολογίζεται σχετικά εύκολα εφόσον δεν απαιτεί πληθώρα δεδομένων και αποτελεί μία καλή λύση για την ένδειξη εμφάνισης της υδρολογικής ξηρασίας.

Η κατάσταση της βλάστησης και κατ' επέκταση ο NDVI, συνδέεται άμεσα με την κατάσταση της εδαφικής υγρασίας. Ο DD δίνει μία ένδειξη της δυναμικής ανάπτυξης των φυτών και ταυτόχρονα εμπεριέχει την επίδραση της θερμοκρασίας. Επίσης, ο DD φαίνεται να εμπεριέχει την υψομετρική διαβάθμιση, αφού η χωρική διαφοροποίηση της θερμοκρασίας συνδέεται άμεσα με την αύξηση του υψομέτρου (αύξηση του υψομέτρου συνεπάγεται και μείωση της θερμοκρασίας). Κατ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη η κλίση και η γεωμορφολογία του εδάφους που κατέχουν

σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση απορροής. Οι παραπάνω λόγοι καθιστούν τους δύο δείκτες ιδανικούς για την ταξινόμηση και παρακολούθηση της ξηρασίας.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι ικανοποιητικά και ενθαρρυντικά. Γενικότερα οι παραγόμενοι θεματικοί χάρτες συμφωνούν με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα φαινόμενα ακραίας ξηρασίας έκαναν την εμφάνισή τους κατά τους θερινούς μήνες. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εμφάνιση ξηρασίας τους μήνες Οκτώβριο, Μάρτιο, Απρίλιο και ακραίας ξηρασίας τον Μάιο καθώς και η ύπαρξη ύφυγρων συνθηκών στην αρχή και στο μέσο του υδρολογικού έτους (Οκτώβριο και Απρίλιο), εκεί όπου παρουσιάζεται μετάβαση από την ξηρή στην υγρή περίοδο και αντίστροφα. Όμως, η μεθοδολογία πρέπει να εφαρμοστεί για περισσότερα έτη ώστε το «καλμπράρισμα» των τιμών των δύο δεικτών για την ταξινόμηση βάση των τιμών του AI, να γίνει σε μεγαλύτερο εύρος τιμών και σε σειρά συνεχόμενων ετών, για να εξεταστούν εκτενέστερα τέτοιες περιπτώσεις.

Επιπλέον, ο συνδυασμός των δύο δεικτών φαίνεται να λαμβάνει υπόψη την χρονική υστέρηση μεταξύ της βροχόπτωσης, της απορρόφησης αυτής από το έδαφος, την αύξηση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας και την πρόσληψη αυτής από τα φυτά. Αυτό διαφαίνεται από την περίπτωση του Ιουνίου όπου ενώ παρατηρείται μείωση της βροχόπτωσης και άνοδος της θερμοκρασίας, οι συνθήκες είναι ευνοϊκότερες από αυτές του Μαΐου, όπου παρουσιάστηκαν υψηλά για την εποχή ύψη βροχής. Έτσι, η υστέρηση της απόκρισης της βλάστησης στην βροχόπτωση καθώς και η επίπτωση της θερμοκρασίας στην περιεχόμενη υγρασία φαίνεται να λαμβάνονται υπόψη.

Έτσι λοιπόν, οι δύο δείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση και παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας καθώς και για την ομαδοποίηση

ομοιογενών περιοχών, όσον αφορά την εμφάνιση συνθηκών ξηρασίας. Η ομαδοποίηση περιοχών με κοινά χαρακτηριστικά έχει ενδιαφέρον τόσο σε επίπεδο υπολεκανών και υποπεριοχών, όσο και για ολόκληρο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

Τέλος, τα βασικότερα πλεονεκτήματα της παρούσας μεθοδολογίας είναι δύο. Πρώτον ότι παρέχει πληροφορίες τόσο για τη χωρική εξάπλωση όσο και για τη χρονική εξέλιξη της ξηρασίας, τόσο σε επίπεδο υποπεριοχών, όσο και σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος και δεύτερον, ότι χρησιμοποιεί δεδομένα που είναι εύκολο να αποκτηθούν και σπανίως είναι ελλιπή ή παρουσιάζουν κενά. Στην περίπτωση της ύπαρξης νεφών η εφαρμογή μίας μεθόδου παρεμβολής δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην χωρική πυκνωση των παρατηρούμενων τιμών.

5.2 Προτάσεις

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής ήταν ικανοποιητικά και ενθαρρυντικά, οδηγώντας στην παραγωγή θεματικών χαρτών για την παρακολούθηση του φαινομένου της ξηρασίας. Υπάρχουν όμως δυνατότητες για την βελτίωση της υπάρχουσας μεθοδολογίας καθώς και για την ανάπτυξη νέων που πιθανόν να οδηγήσουν ενδεχομένως σε λεπτομερέστερα αποτελέσματα.

Πρώτη βελτίωση αποτελεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε χρονοσειρά ετών. Με αυτόν τρόπο ο υπολογισμός του εύρους των τιμών που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση, όπως αυτές ορίζονται από τον ΑΙ, θα γίνεται σε σειρά ετών συντελώντας έτσι στον καλύτερο προσδιορισμό των ακραίων περιπτώσεων. Επίσης, η κανονικοποίηση των δεικτών βάση της μέγιστης και ελάχιστης τιμής που εμφανίζεται σε σειρά ετών θα οδηγήσει στην καλύτερη ταξινόμηση του φαινομένου της ξηρασίας.

Επίσης, μπορεί να γίνει ένας έλεγχος της κατηγοριοποίησης με βάση τους συγκεκριμένους δείκτες σχετικά με το αν ο συνδυασμός τους μπορεί να προσδιορίσει τις τέσσερις κατηγορίες εδαφών από υδρολογική άποψη, που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο SCS (Soil Conservation Service). Οι κατηγορίες αυτές σε συνδυασμό με τη βάση δεδομένων χρήσεων γης του Corine μπορούν να εισαχθούν σε ένα Γ.Σ.Π. για τη χαρτογράφηση του CN (Curve Number).

Η κανονικοποίηση του δείκτη NDVI βάση χρονοσειράς ετών οδηγεί στην εξαγωγή ενός άλλου δείκτη βλάστησης, του δείκτη κατάστασης βλάστησης (VCI - Vegetation Condition Index) που έχει κριθεί κατάλληλος στην παρακολούθηση του φαινομένου της ξηρασίας (Johnson *et al.*, 1993; Kogan, 1990, 1994, 1995(a), 1995(b), 1995(c), 1997; Liu and Kogan, 1996). Ο VCI έχει εφαρμοστεί από τους Domenikiotis *et al.* (2002) στην περιοχή της Θεσσαλίας για την αναγνώριση ξηρών περιόδων και έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Έτσι λοιπόν, ο συνδυασμός του VCI και του DD φαίνεται να υπόσχεται πολλά όσον αφορά την βελτίωση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Τέλος, ως αλλαγή της παρούσης μεθοδολογίας, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας άλλος, πιο εξειδικευμένος δείκτης υδρολογικής ξηρασίας, ο υδρολογικός δείκτης ξηρασίας του Palmer (1965) (PHDI - Palmer Hydrological Drought Index) για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων και την ταξινόμηση σε περισσότερες κατηγορίες ξηρασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Barrett, T.C. and Thompson D.F. (1983). Large area relation of Landsat MSS and NOAA/AVHRR spectral data to wheat yield. *Remote Sensing of Environment*, 13: 277-290.
2. Barton, I.J. (1995). Satellite derived sea surface temperatures: current status. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C5): 8777-8790.
3. Bastiaanssen, W. (1998). Remote sensing in water resources management: the state of the art. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
4. Becker, F. and Li Z.L. (1990). Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 369-393.
5. Bisch, J.M. and Hewlett J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55: 3-23.
6. Bruynzeel, L.A. (1990). Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. UNESCO: 224.
7. Burgess, D.W. and Pairman D. (1997). Bidirectional reflectance effects in NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2815-2825.
8. Chladil, M.A. and Nunez M. (1995). Assessing grassland moisture and biomass in Tasmania – the application of remote sensing and empirical methods for a cloudy environment. *International Journal of Wildland Fire*, 5: 165-171.

9. Choudhury, B.J. and DiGiorolamo N.E. (1995). Quantifying the effect of emissivity on the relation between AVHRR split window temperature difference and atmospheric precipitable water over land surface. *Remote Sensing of Environment*, 54: 313-323.
10. Clevers, J.G.P.W. (1988). The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 29: 25-37.
11. Dalezios, N.R. and Zarpas C.D. (1995). Monitoring major crops in Greece by using NDVI and meteorological indices. *Proceedings of COST 77 European Workshop on Remote Sensing in Agrometeorology*, 19-21 September, Budapest, Hungary: 233-242.
12. Dalezios, N.R. and Zarpas C.D. (1996). The role of NDVI and meteorological indices in the phenology of cotton, vineyards and apples in Greece. *International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, N.R. Dalezios (ed.), 24-26 April, Volos, Greece: 185-190.
13. Dalezios, N.R., Loukas A. and Bampzelis D. (2002). Assessment of NDVI and agrometeorological indices for major crops in central Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 1025-1029.
14. Deering, D.W. (1989). Field measurements of bidirectional reflectance. In: *Theory and Application of Optical Remote Sensing*. G. Asrar (ed.), John Wiley, New York: 14-65.
15. Domenikiotis, C., Spiliotopoulos M., Tsiros E. and Dalezios N.R. (2002). Application of NOAA/AVHRR VCI for drought monitoring in Thessaly. *Proceedings of the 6th International Conference of Protection and Restoration of the Environment*, Skiathos, Greece: 1663-1670.

16. Draper, N.R. and Smith H. (1981). Applied Regression Analysis, Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.
17. FEWS Bulletin (1996). United States Agency for International Development (USAID).
<http://www.info.usaid.gov/fews/fews.html>
18. Gorte, B.G.H. (2000). Land-use and catchment characteristics. In: Remote Sensing in Hydrology and Water Management. G.A. Schultz and E.T. Engman, eds., Springer, Berlin: 133-156.
19. Goward, S.N., Markham B., Dye D.G., Dulaney W. and Yang J. (1991). Normalised Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. Remote Sensing of Environment, 35: 257-277.
20. Harrison, B.A. and Jupp D.L.B. (1989). Introduction to remotely sensed data. CSIRO Publications, Melbourne, Australia.
21. Hobbs, T.J. (1997). Atmospheric correction of NOAA-11 NDVI data in the arid rangelands of Central Australia. International Journal of Remote Sensing, 18: 1051-1058.
22. Illera, P., Fernandez A. and Delgado J.A. (1996). Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. Agricultural and Forest Meteorology, 17: 1093-1105.
23. Johnson, G. E., Achutuni V.R., Thiruvengadachari S. and Kogan F.N. (1993). The role of NOAA satellite data in drought early warning and monitoring selected case studies. In: Drought Assessment, Management and Planning Theory and Case Studies. Kluwer Academic, Boston: 31-49.
24. Kogan, F.N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogenous areas. International Journal of Remote Sensing, 11: 1405-1419.

25. Kogan, F. N. (1994). NOAA plays leadership role in developing satellite technology for drought watch. *Earth Observation Magazine*, September: 18-21.
26. Kogan, F. N. (1995(a)). Droughts of the late 1980's in the United States as derived from NOAA polar orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76: 655-668.
27. Kogan, F. N. (1995(b)). AVHRR data for detection and analysis of vegetation stress. *Proceedings of the 1995 Meteorological Satellite Data Users Conference*, 4-8 September, Winchester, UK: 155-162.
28. Kogan, F. N. (1995(c)). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15: 91-100.
29. Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 621-636.
30. Liu, W.T. and Kogan F.N. (1996). Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 2761-2782.
31. Malo, A.D. and S. E. Nicholson (1990). A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environments*, 19: 1-24.
32. McVicar, T.R. and 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.
33. Meijerink, A.M.J. and B.H.P. Maathuis (1997). Use of remote sensing to assess flood damage to rice lands caused by accelerated erosion and neo-tectonics, Komering River, Sumatra. *River Flood Disasters. Proceedings ICSU SC/IDNDR. IHP/OHP-Berichte, Sondeheft 10, Koblenz: 97-105.*

34. Meyer-Roux, J. and King, C. (1992). Agriculture and Forestry. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 1329-1341.
35. Migdakov, E. and Gemtos T. (1998). Relationship between Growing Degree Days and phenological stages of cotton growth in Greece - A case study of Karditsa Prefecture. *Proceedings of International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, N.R. Dalezios (ed.), 24-26 April, Volos, Greece: 425-430.
36. Palmer, W.C. (1965). Meteorological Drought. Research Paper, No 45, U.S. Weather Bureau, Washington D.C.: 58.
37. Papadopoulou, E., Varanou E., Baltas E., Dassaklis A. and Mimikou M. (2003). Estimating potential evapotranspiration and its spatial distribution in Greece using empirical methods. *Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology*. 8-10 September 2003, Lemnos Island, Greece: 650-658.
38. Porter, J.H., Parry M.L. and Carter T.R. (1991). The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57: 221-241.
39. Prata, A.J. (1994). Land Surface temperature. In: *AVHRR Workshop Proceedings*, A.J. Prata (ed.). CSIRO Division of Atmospheric Research, 28 February, Melbourne, Australia: 67-68.
40. Prata, A.J., Caselles V., Coll C., Otle C. and Sobrino J. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12: 175-224.
41. Rasso, W.B. (1989). Measuring cloud properties from space: a review. *Journal of Climate*, 2: 201-213.

42. Ripley, B.D. (1996). Pattern recognition and neural networks. Cambridge University Press.
43. Robertson, G.W. (1973). Development of simplified agroclimatological procedures for assessing temperature effects on crop development. Plant Response to Climatic Factors. Proceedings Upps-ala Symposium, UNESCO, Paris: 574.
44. Samarasinghe, G.B. (2003). Growth and productions of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. Agricultural Water Management, 58: 145-157.
45. Savenije, H.H.G. (1995). New definitions of moisture recycling and the relation with land use changes in the Sahel. Journal of Hydrology, 167: 57-78.
46. Schultz, P.A. and Halper M. S. (1993). Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. Advances in Space Research, 13: 277-280.
47. Scriber, J.M. and Hainzee J.H. (1987). Geographic invasion and abundance as facilitated by differential host plant utilization abilities. In: Insect Outbreaks. (P. Barbosa and J.C. Schultz (Eds.), Academic Press, San Diego, California: 469-504.
48. Sellers, P.J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International Journal of Remote Sensing, 6: 1335-1372.
49. Tarpley, J.D., Schnieder S.R. and Oney R.L. (1984). Global Vegetation Indices from NOAA-7 Meteorological Satellite. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23: 491-503.
50. Tian, G. (1989). Spectral signatures and Vegetation Indices of Crops. CSIRO Division of Water resources, Divisional Report, 89/4, Canberra, ACT.
51. Tian, G., Li, F., Sui, H. and Zheng, K. (1989). Estimating of evapotranspiration and soil moisture using NOAA/AVHRR image and ground based meteorological

- data. Proceedings of the 10th Asian Conference on Remote Sensing, 23-29 November, Kuala Lumpur, Malaysia: A.I.8.1-A.I.8.6.
52. Townshend, J.R.G. and Justice C.O. (1986). Analysis of the dynamics of African vegetation using the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11): 1435-1446.
53. Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
54. UNESCO (1979). Map of the world distribution of arid regions: Explanatory Note. *Man and the Biosphere, Technical Notes 7*, Paris.
55. Van de Griend, A.A. and Owe M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (6): 1119-1131.
56. Ward, R.C. and M. Robinson (1989). *Principles of Hydrology*. McGraw-Hill, UK: 365.
57. Wilhite, D.A. (2005). Planning for drought: Moving from crisis response to Risk Management. Invited presentation at EWRA 2005, Sep 6-10, Menton, France.
58. Wilhite, D.A. and M. H. Glantz (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10: 111–120.
59. Wilhite, D.A., Hayes M.J. and Svoboda M.D. (2000). Drought monitoring assessment: Status and Trends in the United States. In: *Drought and drought mitigation in Europe*. J. Vogt and F. Somma (eds), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht: 149-160.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

60. Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2002). Περιβαλλοντική Τηλεπισκόπηση. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας: 127.
61. Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2004). Φυσικοί Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
62. Δήμος, Γ. (2005α). Γενικά Μαθηματικά. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.
63. Δήμος, Γ. (2005β). Βιοστατιστική. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.
64. Δομενικιώτης, Χ., Τσίρος Ε., Σπηλιοτόπουλος Μ. και Δαλέζιος Ν.Ρ. (2002). Σύγκριση μεθόδων παρεμβολής για τον υπολογισμό θερμοκρασίας, με τη χρήση του ArcView. Marathon Data Systems, 12^η Πανελλήνια συγκέντρωση χρηστών του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (G.I.S.) ArcView – ArcInfo. 7–8 Νοεμβρίου, Αθήνα. (Παρουσίαση και περίληψη)
65. Κωτούλας, Δ. (2001). Υδρολογία και υδραυλική του φυσικού περιβάλλοντος. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Εκδόσεων.
66. Μέρτικας, Σ.Π. (1999). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή ανάλυση εικόνας. Εκδόσεις Ίων, Στέλλα Παρίκου και ΣΙΑ Ο.Ε.
67. Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ. (1999). Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
68. Πέππας, Α. (2001). Προσομοίωση υδατικών πόρων και χρήσεων νερού στη Θεσσαλία. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
69. Σακκάς, Ι. (2004). Τεχνική Υδρολογία Τόμος 1: Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Αίβαζή, Θεσσαλονίκη.

70. Σαπουντζής, Μ. και Στάθης Δ. (2003). Η επίδραση του βαθμού δασοκάλυψης υδρολογικής λεκάνης στην πλημμυρική απορροή και στερεομεταφορά. 9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Απρίλιος, Θεσσαλονίκη: 27-34.
71. Τζαμπύρας, Ι. (2005). Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ένταση ξηρασίας στις λεκάνες απορροής του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Διαχείρισης Αγροτικού Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων (Π.Σ.Ε.), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
72. Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί πόροι: Ι Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

EXTENDED ABSTRACT

In the current thesis a new methodology is developed in order to monitor hydrological drought. The methodology intends to classify and monitor drought with the use of satellite data. Specifically, two indices are considered, namely Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Degree Days (DD). Both indices are derived from NOAA/AVHRR data, while the recognition of drought conditions is being held with the use of Aridity Index (AI). The developed method is applied in the region of Thessaly, Greece.

It is well known that vegetative cover influences hydrological processes in various ways. For example, vegetation affects surface runoff and overland flow, infiltration and soil erosion. The relation between remotely sensed measurements and vegetation parameters is implemented through vegetation indices. In the current thesis NDVI, a well-known and widely used index, is computed in order to capture this influence. The magnitude of NDVI is indicative of the level of photosynthetic activity in the vegetation being monitored and of its condition. NDVI is also indicative of the vegetation condition (stressed or not).

The other index that is used is Degree Days. DD (also known as effective temperature sum) represents the accumulation of temperature above a critical threshold throughout a fixed time period and it is usually calculated on a daily basis. In the current methodology, DD is computed by NOAA/AVHRR data and specifically from daily Land Surface Temperature (LST) maps. As temperature is known to play an important role in determining the rate of development of both organisms and vegetation, DD is often used to examine their potential development. DD also

incorporates the affect of temperature, a very important factor by hydrological and not only means. In this thesis DD is used to associate temperature and the implicit rate of development of the vegetation, with the occurrence of water shortage.

The identification of drought conditions is being held with the use of Aridity Index (AI). AI is a function of the ratio of mean annual precipitation to annual potential evapotranspiration. According to this index a region can be characterized as extremely dry, dry, semi-dry, semi-wet and wet. In this study AI is calculated on a monthly basis. The potential evapotraspiration is calculated with the use of Blaney-Criddle equation. Hourly temperature and precipitation data from eight (8) meteorological stations of Thessaly district were used for the computation of this index.

The region under investigation is the aquatic district of Thessaly, Greece, including watersheds and drainage basins. The area is divided into 12 sub-regions according to the terrain, the elevation gradation and the geomorphology of the area in order to create more homogeneous regions and for comparison reasons. The methodology is applied to the hydrological year 2004-2005 (October 2004 – September 2005).

The computation of the NDVI and DD has resulted into 104 weekly maps, 52 for each index for the year under investigation. For the estimation of DD, daily LST data for daytime (365 images) and nighttime (365 images) has been used. Because of the presence of clouds, many images exhibit gaps according to the spatial layering of the information. In order to fill in these gaps an interpolation method has been implemented. Specifically, the Inverse Distance Weight method has been used and has resulted into 730 interpolation maps comprising LST information (365 daytime

and 365 nighttime maps). From the 730 maps, mean daily LST was computed (365 maps) and DD was derived on weekly basis.

The current application has resulted into the classification of hydrological drought by the use of the two indices, based on the values and the classification categories of AI. The method that was used is supervised classification by means of parallelepiped limits. The final products are 12 thematic maps (one for each month of the year) which depict the categories of drought as they are defined by AI. The results from the application of the methodology are satisfactory and encouraging, whereas the derived thematic maps comply with the climatic conditions of the study area. Also, NDVI and DD take under consideration the spatial gradient and variability and of course the vegetative cover.

In conclusion, the two indices (NDVI, DD) along with the AI can be used for the classification and mapping of drought. Also, they can be used for grouping areas with contiguous drought conditions. It is the first time that NDVI in combination with DD are used along with AI in order to classify and monitor hydrological drought. The main advantages of the methodology are that it provides continuous spatial and temporal information of drought and the data that it uses can be obtained quite easy without presenting chronical gaps or lacking temporal information. According to the problem derived from the presence of clouds can be solved by the use of interpolation methods.

Key words: Drought, Hydrology, NDVI, Degree Days (DD), Classification, Remote Sensing, Aridity.

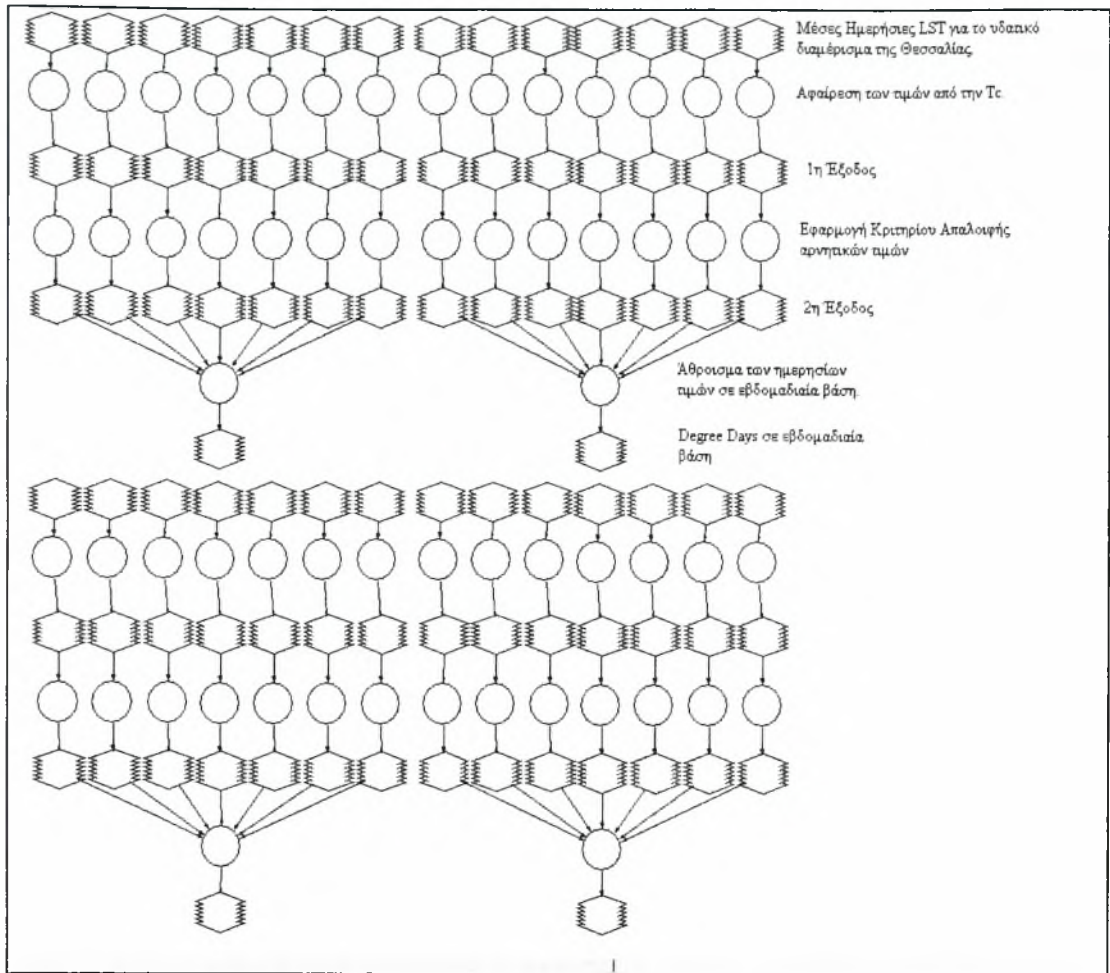
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1: Απεικόνιση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δεικτών.

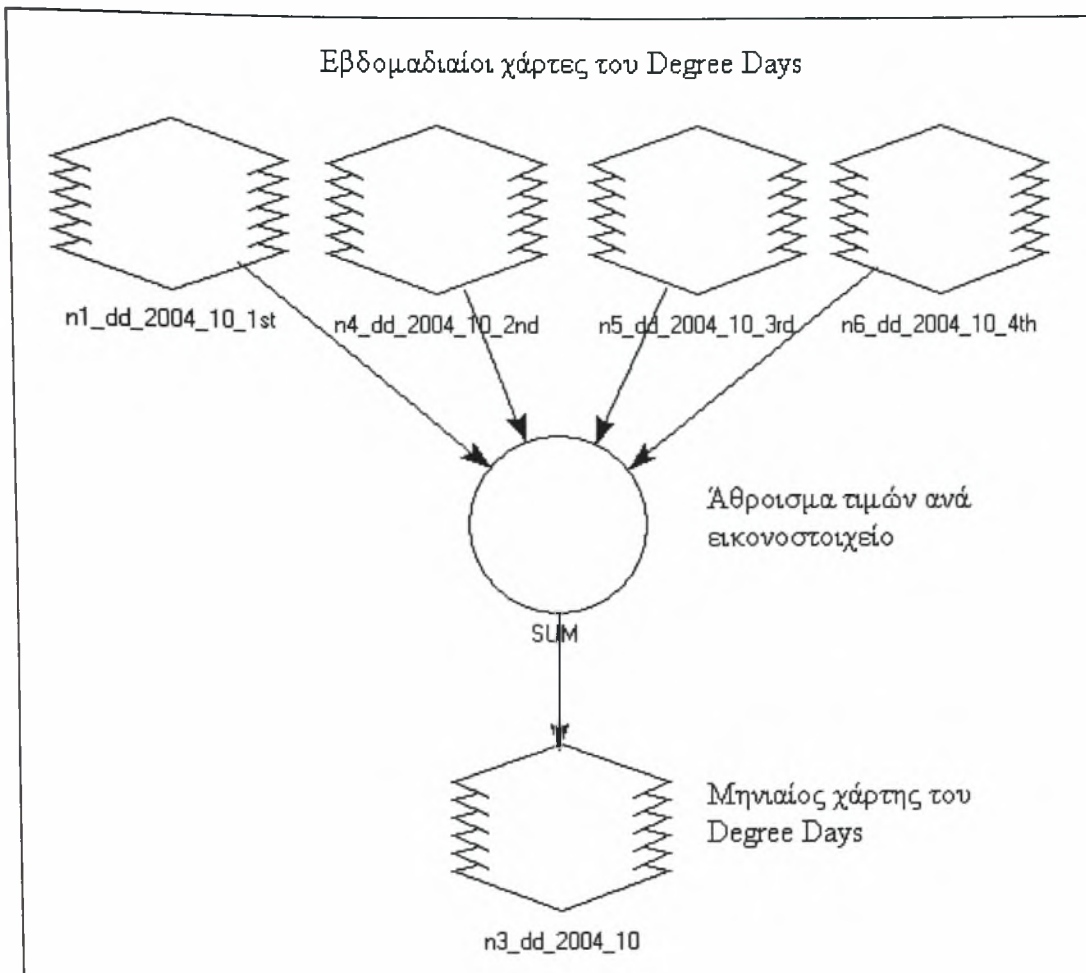
Π2: Συμπληρωματικοί Πίνακες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

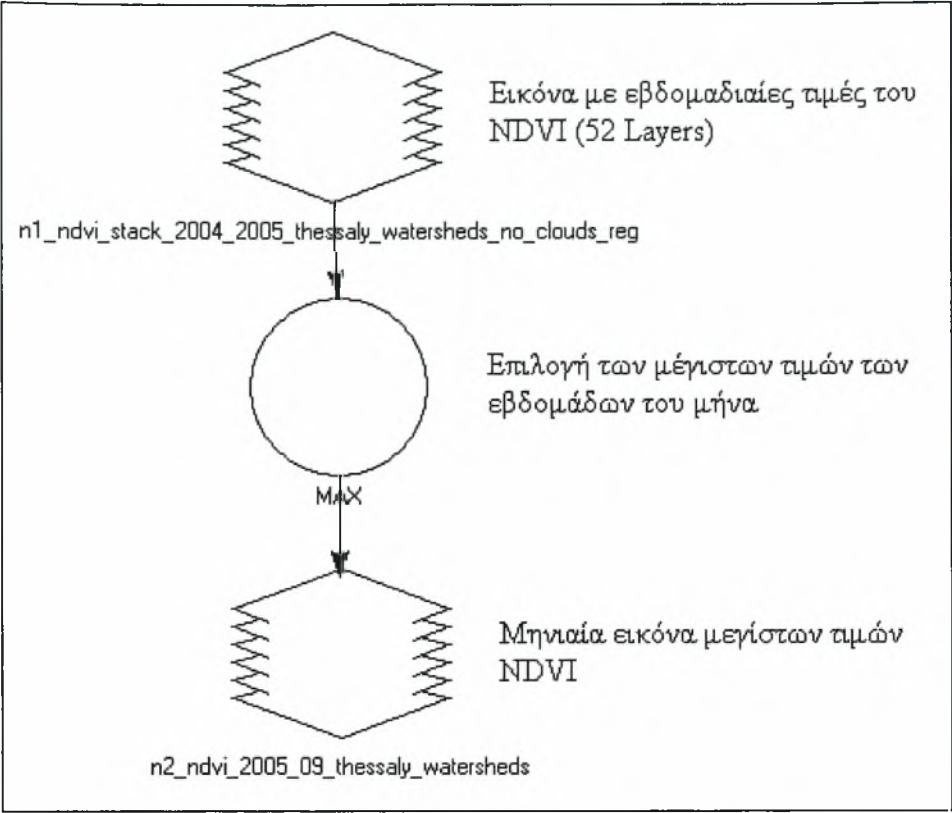
Απεικόνιση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δεικτών



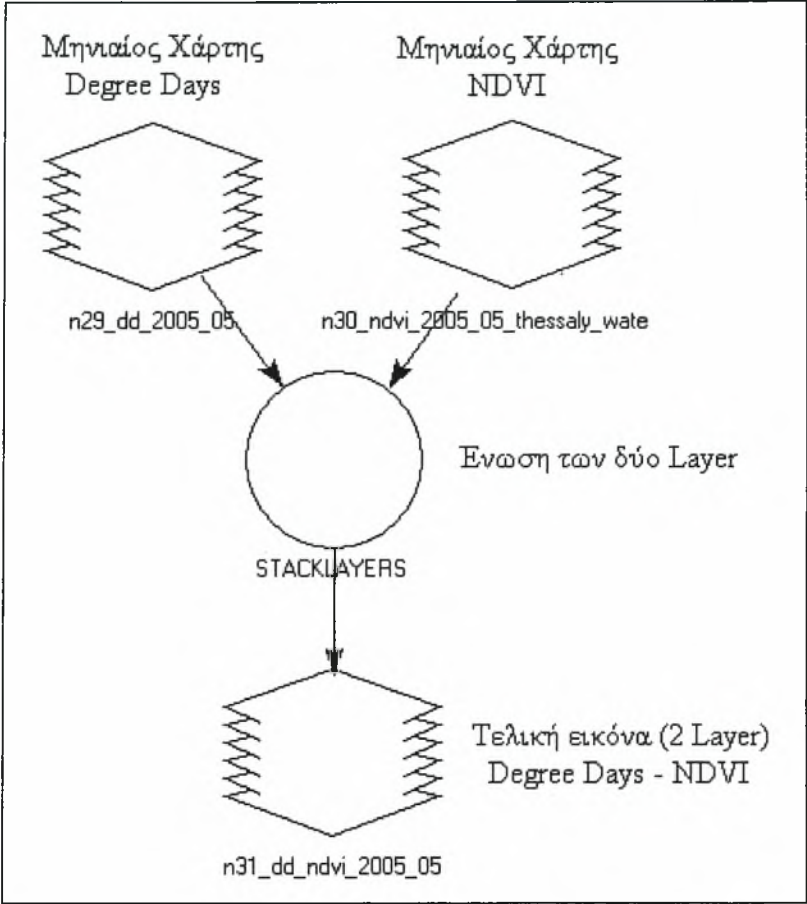
Συνολικό μοντέλο εξαγωγής του DD σε εβδομαδιαία βάση, για κάθε μήνα.



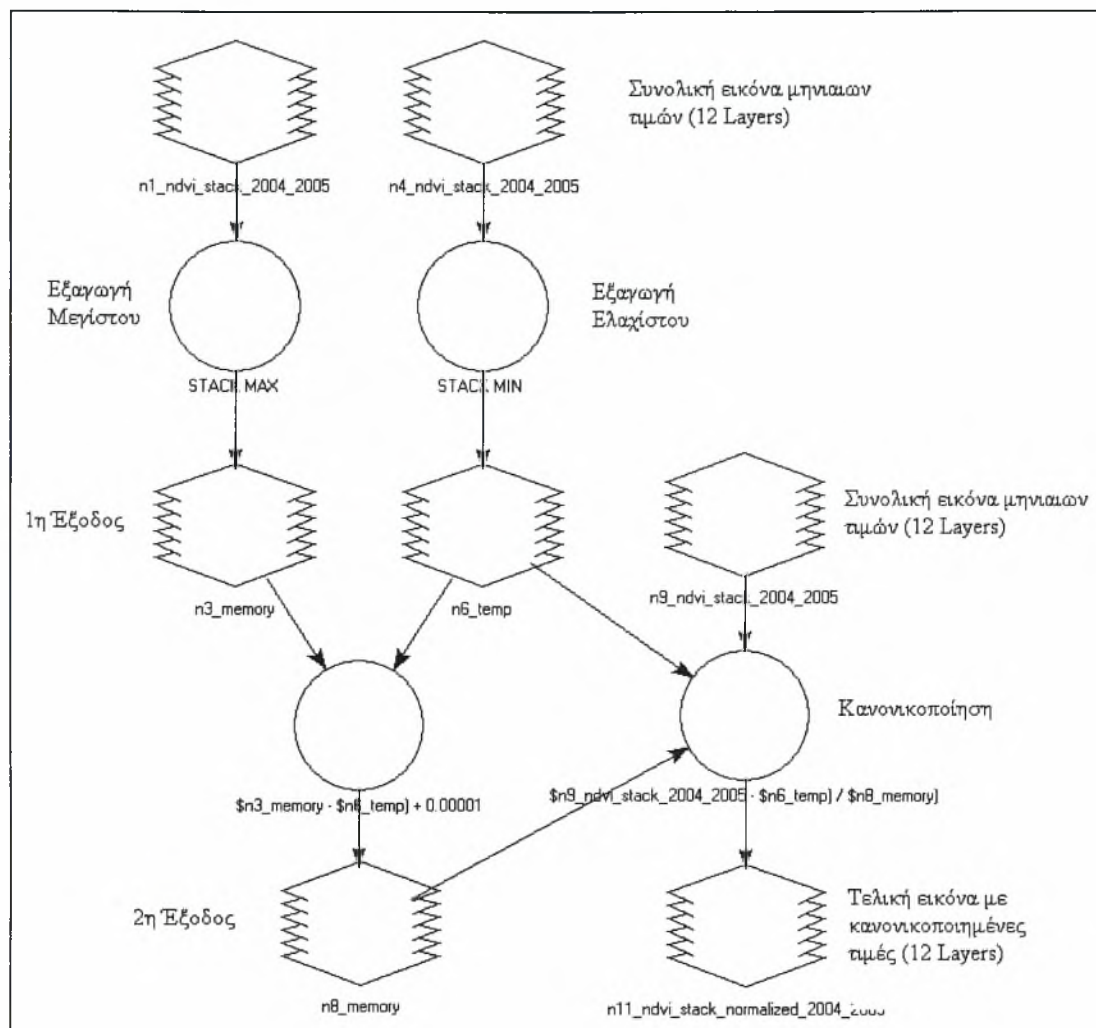
Μοντέλο εξαγωγής του μηνιαίου χάρτη του DD



Μοντέλο εξαγωγής των μηνιαίων εικόνων μέγιστων τιμών NDVI



Μοντέλο εξαγωγής των μηνιαίων εικόνων DD – NDVI



Μοντέλο εξαγωγής των μηνιαίων εικόνων NDVI με κανονικοποιημένες τιμές.

Το ίδιο μοντέλο εφαρμόστηκε και για την κανονικοποίηση των τιμών του DD.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Συμπληρωματικοί Πίνακες

Πίνακας 6.1: Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας επί % ωρών ημέρας του έτους (Κωτούλας, 2001).												
Β. Γεωγ. Πλάτος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
24	7,58	7,17	8,40	8,60	9,30	9,20	9,41	9,05	8,31	8,09	7,43	7,46
26	7,49	7,12	8,40	8,64	9,36	9,49	9,10	8,31	8,06	9,30	7,36	7,35
28	7,40	7,07	8,39	8,68	9,46	9,38	9,58	9,16	8,32	8,02	7,27	7,27
30	7,30	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,34	7,99	7,19	7,14
32	7,20	6,97	8,37	8,75	9,63	9,60	9,77	9,28	8,34	7,93	7,11	7,05
34	7,10	6,91	8,36	8,80	9,72	9,70	9,88	9,33	8,36	7,90	7,02	6,92
36	6,99	6,86	8,35	8,85	9,81	9,83	9,99	9,40	8,36	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,90	9,92	9,95	10,10	9,47	8,38	7,80	6,82	6,66
40	6,76	6,73	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,38	7,75	6,72	6,52
42	6,62	6,65	8,31	9,00	10,14	10,21	10,35	9,62	8,40	7,70	6,62	6,38
44	6,40	6,58	8,30	9,05	10,26	10,38	10,49	9,70	8,41	7,63	6,49	6,22
46	6,33	50	8,29	9,12	10,39	10,54	10,64	9,79	8,42	7,58	6,36	6,04
48	6,17	6,42	8,27	9,18	10,53	10,71	10,80	9,89	8,44	7,51	6,22	5,86
50	5,98	6,32	8,25	9,25	10,69	10,93	10,99	10,00	8,44	7,43	6,07	5,65

Πίνακας 6.2: Αντιστοιχία των τιμών των τριών δεικτών στους μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των κλάσεων.

Σταθμός	Kalampaka			Karditsa			Agia			Tirnavos			Larisa		
	Aridity index	NDVI	DD	Aridity index	NDVI	DD	Aridity index	NDVI	DD	Aridity index	NDVI	DD	Aridity index	NDVI	DD
Μήνας															
Οκτ-04				1,42	0,43	0,06	0,63	1,00	0,34	0,69	0,38	0,36	0,62	0,14	0,38
Νοε-04	1,36	0,40	0,05	0,67	0,51	0,31	0,47	0,83	0,09	0,52	0,57	0,10	0,46	0,28	0,09
Δεκ-04	2,28	0,15	0,00	1,47	0,15	0,00	0,79	0,00	0,00	1,01	0,10	0,00	0,80	0,19	0,00
Ιαν-05	3,50	0,08	0,00	1,32	0,21	0,00	0,56	0,21	0,00	0,77	0,51	0,00	0,57	0,37	0,00
Φεβ-05	2,94	0,00	0,00	2,33	0,00	0,00	1,01	0,09	0,00	1,16	0,32	0,00	1,02	0,17	0,00
Μαρ-05	0,84	0,10	0,08	1,11	0,25	0,07	0,90	0,27	0,09	0,77	0,56	0,12	0,90	0,56	0,15
Απρ-05	0,14	0,57	0,17	0,14	0,70	0,18	0,06	0,66	0,20	0,05	1,00	0,26	0,06	1,00	0,29
Μαϊ-05	0,40	1,00	0,62	0,39	1,00	0,69	0,21	0,82	0,72	0,11	0,60	0,82	0,20	0,57	0,84
Ιουν-05	0,03	0,75	0,67	0,07	0,99	0,71	0,00	0,79	0,74	0,05	0,44	0,83	0,00	0,35	0,87
Ιουλ-05	0,00	0,88	0,88	0,03	0,63	0,87	0,16	0,84	0,89	0,06	0,00	0,90	0,16	0,24	0,91
Αυγ-05	0,00	0,46	1,00	0,16	0,58	1,00	0,12	0,82	1,00	0,25	0,32	1,00	0,12	0,20	1,00
Σεπ-05				0,24	0,44	0,62	0,45	0,65	0,63	0,56	0,22	0,64	0,44	0,00	0,65

