

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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΣΕ
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΔΟΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ»**

ΑΓΛΑΙΑ ΜΑΛΙΑΡΑ

ΒΟΛΟΣ 2011

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΥΦΟΡΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

- 1) **Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος**, Καθηγητής, Αγρομετεωρολογία, Δορυφορική Μετεωρολογία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Επιβλέπων***.
- 2) **Ιφιγένεια Κάγκαλου**, Επίκουρη Καθηγήτρια, Υδρολογία, Λιμνολογία, Ποταμολογία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***
- 3) **Άρης Ψιλοβίκος**, Επίκουρος Καθηγητής, Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ***Μέλος***

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών της σχολής Γεωπονικών Επιστημών, με τίτλο ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Νικόλαου Ρ. Δαλέζιου.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, Νικόλαο Ρ. Δαλέζιο, του οποίου η συμβολή, η διαρκής υποστήριξη του και η καθοδήγηση του ήταν καθοριστικά για την εκπόνηση της Μεταπτυχιακής μου Διατριβής.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς μου επιτροπής, την κυρία Ιφιγένεια Κάγκαλου και τον κύριο Άρη Ψιλοβίκο, για τις γνώσεις, τη συμπαράσταση και τη βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα της έρευνας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Άννα Μπλάντα, η οποία ήταν πάντα δίπλα μου προσφέροντας σημαντική βοήθεια και συμπαράσταση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί μία από τις κύριες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, γι' αυτό και η εκτίμηση της είναι πολύ σημαντική. Αποδεικνύεται όμως ιδιαίτερα δύσκολο καθώς ο υπολογισμός της δεν μπορεί να γίνει άμεσα, επειδή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και ποικίλλει σημαντικά στο χώρο και στο χρόνο. Η γνώση και η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής είναι μεγάλης σημασίας διότι όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελεί μία από τις κύριες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των υδρολογικών και κλιματικών διεργασιών της γης και της ατμόσφαιρας. Επίσης επιτρέπει την παρακολούθηση της παραγωγής της καλλιέργειας με τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση του νερού, δεδομένου ότι για την γεωργική παραγωγή αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα. Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η διερεύνηση της συμβολής των δορυφορικών στοιχείων στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε υπολεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Είναι δεδομένη η σημασία που έχει η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής στην ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, αλλά και η δυσκολία υπολογισμού της με συμβατικά επίγεια δεδομένα σε λεκάνες απορροής. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής συνδυάζοντας συμβατικές μετεωρολογικές μετρήσεις εδάφους και τηλεπισκοπικά στοιχεία. Δεδομένου ότι τα στοιχεία τηλεπισκόπησης παρέχουν εκτιμήσεις σε υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής γίνεται εφικτή σε περιοχική κλίμακα. Στην παρούσα εργασία οι απαιτήσεις του νερού άρδευσης αξιολογούνται μέσω της εκτίμησης και του ελέγχου της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc, σε υπολεκάνη

απορροής του Πηνειού ποταμού, στην περιοχή του Πλατυκάμπου. Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούνται για να σκιαγραφήσουν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα του φυτικού συντελεστή K_c , και η παραγωγή της καλλιέργειας στη λεκάνη απορροής εξετάζεται για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 και 2010. Οι επίγειες παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και οι δορυφορικές εικόνες (Landsat TM) για όσες ημερομηνίες ήταν διαθέσιμες, υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για την αντίστοιχη χρονική περίοδο. Οι χάρτες που δημιουργήθηκαν για την περιοχή μελέτης, δείχνουν ότι με την κατάλληλη αξιοποίηση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και με τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (ΓΣΠ), επιτυγχάνεται η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε ευρείας κλίμακας καλλιέργειες. Ειδικότερα, προσφέρεται καλή φασματική ανάλυση, έχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη, δεδομένου ότι τα δορυφορικά δεδομένα παρέχουν εκτιμήσεις με μεγάλη χωρική και χρονική ανάλυση, δηλαδή τόσο σε όλη την επιφάνεια της περιοχής μελέτης, όσο και για τα έτη που εξετάζονται. Για τον έλεγχο της πιστότητας των αποτελεσμάτων, έγινε αξιολόγηση με στατιστικούς δείκτες και τα αποτελέσματα που προέκυψαν θεωρούνται ικανοποιητικά. Οι τιμές τους κυμαίνονται μέσα στα επιτρεπτά όρια και συμφωνούν με τις επίγειες παρατηρήσεις. Τα δορυφορικά στοιχεία παρέχουν την ικανότητα κάλυψης των περιοχών μεγάλης κλίμακας και τον έλεγχο της καλλιέργειας κατά την διάρκεια των φαινολογικών σταδίων. Η συλλογή δεδομένων με τη χρήση τηλεπισκόπησης, επιτρέπει τη συνεχή απόκτηση δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οι παρατηρήσεις είναι επαναλαμβανόμενες, προσφέρει ακριβή στοιχεία για την ανάλυση των δεδομένων, προσφέρει ευρεία περιφερειακή κάλυψη και το κόστος πρόσβασης στα δεδομένα είναι χαμηλό έναντι του κόστους για τη συλλογή των επίγειων δεδομένων με τα διαθέσιμα μέσα. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε

περιοχές ευρείας κλίμακας για τον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή K_c και της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας E_Tc και να επεκταθεί και σε άλλες καλλιέργειες χρησιμοποιώντας τα δορυφορικά στοιχεία.

Λέξεις κλειδιά: εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, τηλεπισκόπηση, συντελεστής καλλιέργειας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	8
2.1. Εξατμισοδιαπνοή.....	8
2.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής.....	11
2.1.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.....	11
2.1.1.1.1 Μέθοδος υδατικού ισοζυγίου εδαφικής κατατομής.....	11
2.1.1.2. Θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.....	12
2.1.1.2.1. Μέθοδος του ισοζυγίου ενέργειας.....	12
2.1.1.2.2. Αεροδυναμική μέθοδος.....	13
2.1.1.3. Ημιεμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.....	14
2.1.1.3.1. Μέθοδος του Penman.....	14
2.1.1.3.2. Υπολογισμός του αεροδυναμικού όρου (E_a).....	15
2.1.1.3.3. Μέθοδος των Doorenbos & Pruitt.....	18
2.1.1.3.4. Μέθοδος Penman – Monteith.....	19
2.1.1.3.5. Μέθοδος των Thom & Oliver.....	19
2.1.1.3.6. Μέθοδος των Van Bavel & Hillel.....	20
2.1.1.4. Εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.....	20
2.1.1.4.1. Μέθοδοι βασισμένες στην θερμοκρασία και την	

διάρκεια των ωρών της ημέρας.....	20
2.1.1.4.1.1. Μέθοδος των Blaney – Criddle.....	21
2.1.1.4.1.2. Μέθοδος του Thornthwaite.....	25
2.1.1.4.2. Μέθοδοι βασιζόμενες στην θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία.....	26
2.1.1.4.2.1. Μέθοδος του Turk	26
2.1.1.4.2.2. Μέθοδος των Jensen – Haize.....	27
2.2. Τηλεπισκόπηση στην εξατμισοδιαπνοή.....	28
2.2.1. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στη Τηλεπισκόπηση.....	29
2.2.2. Συστήματα τηλεπισκόπησης.....	31
2.2.3. Δορυφόροι.....	33
2.2.4. Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI).....	36
2.3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	37
2.4. ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	39
2.5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	42
2.5.1. Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc.....	42
2.5.1.1. Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ETο.....	42
2.5.1.2. Υπολογισμός φυτικού συντελεστή Kc.....	43
2.5.1.3. Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc	44
2.5.1.4. Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc και φυτικού συντελεστή Kc βασιζόμενα σε δορυφορικά δεδομένα.....	44
2.6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ.....	47
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	97

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ: Ελληνική Βιβλιογραφία.....	103
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	105
Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία.....	108
7. ABSTRACT.....	109

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος και το νερό είναι οι δύο κρίσιμοι πόροι και έτσι υπάρχει μια επείγουσα και τρέχουσα ανάγκη για την έρευνα να επινοηθούν τρόποι για να ρυθμιστούν το έδαφος και οι υδάτινοι πόροι κατά τρόπο πιο βιώσιμο (National Research Council, 1991). Το νερό που διατίθεται για να αρδεύσει τη γεωργία παγκοσμίως ανέρχεται σε περίπου 80% των συνολικών παροχών νερού (Seckler et al., 1997). Επιπλέον, η γενικά χαμηλή αποδοτικότητα υπονοεί ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτού του νερού ρέει πίσω στους ποταμούς (Wang et al., 1993). Στο παρελθόν, έχουν γίνει μεγάλες επενδύσεις στον τομέα της άρδευσης και με μεγάλο κόστος, αλλά το χάσμα που δημιουργήθηκε ανάμεσα στο τι υπάρχει και τι θα μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε είναι αρκετά μεγάλο. Γι' αυτό, θα πρέπει να γίνει στροφή στην καλύτερη εκμετάλλευση των ήδη υπάρχοντων δυναμικών.

Η μελέτη του φαινομένου της εξατμισοδιαπνοής είναι σημαντική σε περιοχές με ελλειμματικούς υδατικούς πόρους. Όταν γίνεται αναφορά στον όρο εξατμισοδιαπνοή εννοείται η συνδυασμένη διαδικασία με την οποία το νερό μεταφέρεται προς την ατμόσφαιρα με την διαπνοή από τα φυτά και την εξάτμιση από την επιφάνεια του νερού και του εδάφους και την επιφάνεια των φύλλων, όταν αυτά είναι υγρά.

Η εξάτμιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα υγρό σώμα μετατρέπεται σε αέριο σώμα και απομακρύνεται από την επιφάνεια που εξατμίζεται. Το νερό εξατμίζεται από πολλές επιφάνειες, όπως ποτάμια, λίμνες, θάλασσες, εδάφη, και βλάστηση. Κατά την εξάτμιση, για να αλλάξει η κατάσταση των μορίων από υγρή σε αέρια φάση χρειάζεται να υπάρχει αρκετή κινητική ενέργεια, έτσι ώστε να ξεφεύγουν

από την έλξη των υπολοίπων μορίων και να κινούνται πλέον ελεύθερα πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Έτσι περνούν στην αέρια φάση τα μόρια.

Την διαδικασία της εξάτμισης την επηρεάζουν κάποιοι παράγοντες όπως ο βαθμός σκίασης του φυλλώματος της καλλιέργειας, το ποσό του διαθέσιμου νερού στην εξατμίζουσα επιφάνεια και όπου η εξατμίζουσα επιφάνεια είναι η υδάτινη και η εδαφική επιφάνεια. Το νερό που μεταφέρεται ανοδικά σε ένα έδαφος ή μία υδάτινη επιφάνεια, η άρδευση και οι βροχές διαβρέχουν την εδαφική επιφάνεια και όπου το έδαφος είναι ικανό να παρέχει αρκετά γρήγορα νερό έτσι ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες της εξάτμισης τότε η εξάτμιση από το έδαφος καθορίζεται μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Αντίθετα, όπου το έδαφος δεν είναι ικανό να παρέχει γρήγορα το απαιτούμενο νερό, η εδαφική επιφάνεια ξηραίνεται. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα του νερού ασκεί καθοριστική επίδραση στην εξάτμιση, κάτω από αυτές τις συνθήκες. Η εξάτμιση ελαττώνεται γρήγορα και μπορεί να σταματήσει σχεδόν τελείως μέσα σε λίγες μέρες, αν δεν τροφοδοτείται με νερό η επιφάνεια.

Η διαπνοή είναι η διεργασία μέσω της οποίας η υγρασία μεταφέρεται από τις ρίζες των φυτών μέχρι τους πόρους που βρίσκονται στο κάτω μέρος των φύλλων, όπου και μετατρέπεται σε υδρατμούς και μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα. Ουσιαστικά είναι η εξάτμιση του νερού διαμέσου των φυτών. Είναι μια αθέατη διαδικασία, καθώς δεν είναι καθόλου εύκολο να παρατηρούνται τα φύλλα καθώς το νερό εξατμίζεται από την επιφάνεια τους. Εξαρτάται από τον άνεμο, την παροχή ενέργειας και την τάση πίεσης υδρατμών, γι' αυτό και οι παράγοντες υγρασία του αέρα, θερμοκρασία του αέρα, άνεμος και ακτινοβολία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της διαπνοής. Επίσης, η διαπνοή καθορίζεται και από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, από την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει νερό στις ρίζες, από την αλατότητα του εδαφικού νερού και από το πλημμύρισμα. Επηρεάζεται

επιπλέον, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η διαχείριση του αρδευτικού νερού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της διαπνοής.

Η εξάτμιση και η διαπνοή δεν είναι εύκολο να διαχωριστούν χρονικά, αφού οι δύο αυτές διεργασίες συμβαίνουν ταυτόχρονα. Γενικά μπορεί να λεχθεί ότι η απώλεια νερού λόγω της εξάτμισης σε λεκάνη απορροής είναι αρκετά μεγάλη κατά τα στάδια του υδρολογικού κύκλου την άνοιξη, ενώ όταν υπάρχει φυτοκάλυψη και αυξάνεται, σε επόμενο στάδιο, υπάρχει απώλεια νερού κυρίως από την διεργασία της διαπνοής.

Η εξατμισοδιαπνοή επηρεάζεται από κάποιους παράγοντες όπως οι καιρικές παράμετροι όπου είναι η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία, η ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ή η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ETc) αναφέρεται στην ανάγκη εξάτμισης από καλλιέργειες που είναι ελεύθερη από ασθένειες και οποιουδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης και έχει στη διάθεση της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά και επιτυγχάνει το μέγιστο της απόδοσης και ανάπτυξης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται. Τέλος, ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει την εξατμισοδιαπνοή είναι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και η διαχείριση, όπως η εδαφική αλατότητα, η φτωχή γονιμότητα του εδάφους, η απουσία ελέγχου ασθενειών, η περιορισμένη εφαρμογή λιπασμάτων και η φτωχή διαχείριση του εδάφους, που μπορεί να μειώσουν την εξατμισοδιαπνοή και να περιορίσουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Η γνώση και η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής είναι μεγάλης σημασίας διότι όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελεί μία από τις κύριες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των υδρολογικών και κλιματικών διεργασιών της γης και της ατμόσφαιρας καθώς επίσης, επειδή επιτρέπει

τη βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων με τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση του νερού, δεδομένου ότι για τις ευάλωτες λεκάνες απορροής αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα.

Τα τελευταία χρόνια διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί τα οποία βασίζονται στη χρήση δορυφορικών δεδομένων με σκοπό την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε περιφερειακή κλίμακα. Η χρήση της τηλεπισκόπησης, μπορεί να δώσει επαναλαμβανόμενες, αποτελεσματικές και οικονομικώς αποδοτικές πληροφορίες για διάφορες ιδιότητες της επιφανείας του εδάφους και του νερού σχετικές με την εξατμισοδιαπνοή.

Η λέξη τηλεπισκόπηση συντίθεται από το επίρρημα ‘τηλε’ (=από μακριά) και το ρήμα ‘επισκοπεύω’ που σημαίνει επιθεωρώ – εξετάζω κάτι από μακριά. Επομένως, ο όρος Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) σημαίνει αντίληψη αντικειμένων ή φαινομένων από απόσταση. Ορίζεται, ως η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από ένα στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς στην πραγματικότητα να υπάρχει απευθείας επαφή με αυτόν (Μερτίκας, 1999). Έτσι, η Τηλεπισκόπηση, μπορεί να αποδοθεί και ως η αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση (Avery & Berlin, 1992), ενώ παράλληλα υπάρχει και ο όρος Τηλεανίχνευση (Μουτσούλας, 1992).

Ένας ακόμη ορισμός για την Τηλεπισκόπηση δίνεται από το Καναδικό Κέντρο Τηλεπισκόπησης (Canada Center of Remote Sensing (CCRC)), σύμφωνα με τον οποίο Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη, και κατά κάποιο τρόπο η τέχνη απόκτησης πληροφορίας για την επιφάνεια της γης χωρίς στην ουσία να υπάρχει επαφή με αυτή. Αυτό πραγματοποιείται με την ανίχνευση και καταγραφή

ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ενέργειας, την επεξεργασία, ανάλυση και τέλος την ερμηνεία αυτής.

Τα συστήματα τηλεπισκόπησης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τα ενεργητικά συστήματα, τα οποία διαθέτουν δική τους πηγή ακτινοβολίας, εκπέμπουν ενέργεια προς ένα αντικείμενο και καταγράφουν την ανακλώμενη ακτινοβολία. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα radar. Αντίστοιχα, τα παθητικά συστήματα εξαρτώνται από το ηλιακό φως για την καταγραφή της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, επηρεάζονται όμως από την παρουσία νεφών, ομίχλης και καπνού.

Οι κυριότεροι δορυφόροι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σήμερα στις περιβαλλοντικές εφαρμογές είναι οι μετεωρολογικοί και οι περιβαλλοντικοί. Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι λαμβάνουν συνεχώς πληροφορίες και εξασφαλίζουν κάλυψη της Γης μεταδίδοντας σε επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, παρέχοντας δεδομένα για την ατμόσφαιρα και για ολόκληρη την επιφάνεια της Γης. Τέτοιοι δορυφόροι είναι οι Meteosat και οι NOAA. Οι περιβαλλοντικοί δορυφόροι, μπορούν να συλλέξουν εικόνες και στοιχεία, τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, την παρακολούθηση καλλιεργειών, την ταξινόμηση χρήσεων γης. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι δορυφόροι Landsat, SPOT και Ikonos.

Η τηλεπισκόπηση έχει αρκετές εφαρμογές. Επιγραμματικά αυτές είναι: η παρακολούθηση, εκτίμηση και αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών (ξηρασία, πλημμύρες, χαλάζι, δασικές πυρκαγιές, παγετό, καύσωνες, κ.α.), η χαρτογράφηση κάλυψης γης και χρήσεων γης, ο προσδιορισμός εδαφικής υγρασίας, ο προσδιορισμός υδατικού ισοζυγίου, ο προσδιορισμός δεικτών βλάστησης, οι ταξινομήσεις

καλλιεργειών, η εκτίμηση της παραγωγής, η παρακολούθηση θαλάσσιας ρύπανσης, ο εντοπισμός αρχαιολογικών χώρων.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η διερεύνηση της συμβολής των δορυφορικών στοιχείων στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε υπολεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού για τους εξής λόγους: δεδομένου της σημασίας που έχει η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής στην ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, αλλά και της δυσκολίας υπολογισμού της με συμβατικά επίγεια δεδομένα σε λεκάνες απορροής.

Η εργασία ξεκινά με μία γενική εισαγωγή της έννοιας της εξατμισοδιαπνοής και της συμβολής της τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής, όπου διαφαίνονται οι δυνατότητες της τηλεπισκόπησης στον τομέα αυτόν και η σημασία της εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής σε λεκάνες απορροής.

Αρχικά αναλύεται η έννοια και η σημασία της εξατμισοδιαπνοής, καθώς επίσης και οι μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

Στη συνέχεια γίνεται μια αναδρομή για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με την χρήση της Τηλεπισκόπησης, αναφέροντας τα συστήματα Τηλεπισκόπησης, τους δορυφόρους, κ.α. Κατόπιν, γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης, στην υπολεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού στην περιοχή του Πλατυκάμπου. Επίσης, αναλύεται η βάση δεδομένων, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τέλος γίνεται αξιολόγηση με στατιστικούς δείκτες.

Έχοντας ολοκληρώσει την θεωρητική ανάλυση, παραθέτονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αναλύονται τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Με τον όρο εξάτμιση, εννοείται η μετάπτωση του νερού από την υγρή στην αέρια φάση του και η μετέπειτα μετακίνησή του από την επιφάνεια εξάτμισης προς την υπερκείμενή της ατμόσφαιρα. Το νερό, όπου και να βρίσκεται, είτε πάνω από υδάτινες επιφάνειες, είτε πάνω στα φύλλα, είτε μέσα στα ανοικτά στόματα των φύλλων, χρειάζεται μια ποσότητα θερμότητας, που καλείται Λανθάνουσα Θερμότητα, για να μετατραπεί σε υδρατμούς οι οποίοι στη συνέχεια θα μεταφερθούν στην ατμόσφαιρα με Μεταγωγή και με Διάχυση, μέσω της στρωτής υπόστρωσης. Σαν Στρωτή Υπόστρωση, ορίζεται μία στρώση αέρα, πάχους 1 mm, που διαμορφώνεται πάνω στις στερεές επιφάνειες (π.χ. φύλλα), που είναι εκτεθειμένες στον αέρα, στην οποία η ροή του ανέμου είναι παράλληλη. Μέσω αυτής, γίνεται η μεταφορά ουσιών μόνο με μοριακή διάχυση, την οποία περιγράφει ο νόμος του Fick. [Taylor et al, 1972; Πουλοβασίλης, 1983].

Το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού από τα φυτά, καλείται Διαπνοή και προϋποθέτει την μετακίνηση του νερού μέσω του φυτού στις επιφάνειες του που εξατμίζουν. Το νερό των φυτών απορροφάται από το έδαφος μέσω των ριζών και, μέσω του αγγειακού συστήματος, οδηγείται στους πόρους των φυλλωμάτων, γνωστούς ως στόματα, απ' όπου διαπνέεται. Η φυσική της μεταβολής φάσης του νερού, σε γενικές γραμμές, είναι η ίδια, είτε πρόκειται για υδάτινη επιφάνεια, είτε για βλάστηση, είτε για γυμνό έδαφος. Έτσι λοιπόν, εισάγεται ένας νέος όρος για τον τρόπο μελέτης τόσο της εξάτμισης όσο και της διαπνοής, της εξατμισοδιαπνοής.

Για να λάβει χώρα η μεταφορά υδρατμών από την επιφάνεια που εξατμίζει προς την ατμόσφαιρα, θα πρέπει να επικρατεί κοντά στην επιφάνεια, μια αρνητική τάση της συγκέντρωσης, ή της μερικής πίεσης των υδρατμών, που να εξασφαλίζει την ανοδική κίνησή τους παρά την επίδραση της βαρύτητας. Έτσι μπορεί να πει κανείς πως, αν υπάρχει διαθέσιμο νερό για να λάβει χώρα η εξάτμισή του, θα πρέπει να είναι εξασφαλισμένη η παροχή θερμότητας, που απαιτείται για την κάλυψη των απαιτήσεων σε λανθάνουσα θερμότητα, αλλά και η διατήρηση κοντά στην επιφάνεια που εξατμίζει, της απαιτούμενης τάσης υδρατμών. Η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι η βασική πηγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της εξάτμισης σε θερμότητα και ο άνεμος ο βασικός παράγοντας διατήρησης της απαιτούμενης τάσης υδρατμών. (Δαλέζιος, 1994)

Υπολογισμοί και μετρήσεις της εξατμισοδιαπνοής που έχουν γίνει κατά καιρούς χρησιμοποιούν διάφορους τρόπους και μεθοδολογίες. Αξιοποίηση των ιστορικών δεδομένων ή συγκρίσεις δεν είναι δυνατές, αν προηγουμένως δεν ξεκαθαριστεί τι ακριβώς αντιπροσωπεύουν. Για το λόγο αυτό και για την εξεύρεση ενός κοινού παρονομαστή, είναι χρήσιμο και αναγκαίο να παρατεθούν οι ορισμοί που είναι σε κοινή χρήση και αναφέρονται στις διαδικασίες μέτρησης και υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Ομαδοποίηση αυτών των ορισμών έχει δοθεί από τους Doorenbos & Pruitt, (1977), Jensen et al., (1990), κ.α.

Δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι η ένταση με την οποία το νερό, κάτω από συνθήκες πλήρους διαθεσιμότητας, απομακρύνεται από το υγρό έδαφος ή υδάτινη επιφάνεια και τις φυτικές επιφάνειες. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εκφράζεται είτε σαν ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας, λETp, είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου ETp.

Εξατμισοδιαπνοή (καλλιέργειας) αναφοράς, είναι η ένταση με την οποία νερό, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες αναφοράς, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο. Καλλιέργειες αναφοράς είναι ο χορτοτάπητας με ομοιόμορφο ύψος 8-15 cm ή η μηδική με μέσο ύψος 50 cm. Οι επιφάνειες των φύλλων της καλλιέργειας αναφοράς, τυπικά δεν είναι υγρές. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή απλώς εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, εκφράζεται είτε σαν ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας, λETr, είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου, ETr.

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή (καλλιέργειας), ETa, είναι η ένταση με την οποία νερό απομακρύνεται από το έδαφος και τις φυτικές επιφάνειες που αναπτύσσεται κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες εδάφους (πλήρης ή μερική διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων, προσβολή ή μη από ασθένειες, κλπ). Εκφράζεται σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Είναι προφανές ότι $ETa \leq Etc$.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, ETc, είναι η ένταση με την οποία νερό, εφ' όσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας που αναπτύσσεται δυναμικά (είναι δηλαδή ελεύθερη από ασθένειες και οποιουδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης και έχει στη διάθεση της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά) και επιτυγχάνει το μέγιστο της ανάπτυξης και απόδοσης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται. Η συνήθης έκφραση της είναι σε ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Πολλές φορές η ETc αναφέρεται και σαν μέγιστη εξατμισοδιαπνοή, ETmax.

2.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής

2.1.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής

2.1.1.1.1 Μέθοδος υδατικού ισοζυγίου εδαφικής κατατομής

Το ισοζύγιο του νερού για ένα συγκεκριμένο και συνήθως αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μιας αρδευόμενης εδαφικής επιφάνειας με φυτοκάλυψη, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P + I - V_a = E_{Ta} + R + D + V_e \quad (2.1)$$

όπου P είναι το ύψος της βροχόπτωσης στην συγκεκριμένη χρονική περίοδο, I είναι το ύψος του νερού άρδευσης, αν υπάρχει, V_a είναι το μέρος της P (ή και της I) που συγκρατήθηκε πάνω από την εδαφική επιφάνεια (π.χ. από τα φύλλα και τα στελέχη της φυτοκάλυψης), E_{Ta} είναι το ύψος της εξατμισοδιαπνοής, R είναι οι απώλειες του νερού από επιφανειακή απορροή, D είναι το μέγεθος της κατακόρυφης εκροής με βαθειά διήθηση κάτω από το ριζόστρωμα και V_e είναι το ύψος του νερού που συγκρατήθηκε στο ριζόστρωμα.

Ο παράγοντας D είναι δυνατόν να μετρηθεί σε πειραματικά τεμάχια εδάφους που περιέχονται μέσα σε λυσίμετρα, ή αν η επιφανειακή προσθήκη νερού γίνεται σε μικρές δόσεις σ' ένα αρχικά ξηρό έδαφος και το τμήμα της εδαφικής κατατομής κάτω από το ριζόστρωμα διατηρείται τελείως ξηρό ώστε να επιτρέπει την προς τα κάτω απομάκρυνση του νερού.

2.1.1.2. Θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

2.1.1.2.1. Μέθοδος του ισοζυγίου ενέργειας

Η βασική φυσική αρχή της διατήρησης της ενέργειας εκφράζει το γεγονός ότι από όλη την προσπίπτουσα στο έδαφος ενέργεια με την μορφή της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (0,3-3μm):

- α) ένα μέρος της ανακλάται
- β) ένα άλλο συσσωρεύεται σαν θερμότητα στο έδαφος
- γ) ένα μέρος της δαπανάται για εξαέρωση ή άλλες φυτικές λειτουργίες και
- δ) ένα μέρος της εκπέμπεται από την γήινη επιφάνεια με την μορφή της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (3-50μm)

Έτσι το ισοζύγιο ενέργειας μιας επιφάνειας μπορεί να παρασταθεί από την πιο κάτω εξίσωση:

$$R_n - E_{to} - J - G - P = 0 \quad [\text{Watts m}^{-2}] \quad (2.2)$$

όπου R_n είναι η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας, E_{to} είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, J είναι η πυκνότητα ροής θερμότητας προς την ατμόσφαιρα, G είναι η πυκνότητα ροής θερμότητας προς το έδαφος και P είναι η πυκνότητα ροής ακτινοβολίας που καταναλίσκεται στην φωτοσύνθεση.

Ο παράγοντας αυτός είναι πολύ μικρός σε σχέση με τους υπόλοιπους της προηγούμενης εξίσωσης και έτσι θεωρείται αμελητέος.

Ο Bowen, 1926, αναζητώντας μια σχέση που να συνδέει τα J και LE κατέληξε στο συμπέρασμα πως το μέγεθος της LE είναι ανάλογο με την κλίση (θ_e/θ_z) ενώ η ποσότητα J είναι ανάλογη με την κλίση της θερμοκρασίας (θ_T/θ_z) και έδωσε την πιο κάτω εξίσωση [Πουλοβασίλης, 1983; Agnus et al., 1984]:

$$\beta = \gamma (\theta_T / \theta_e) = J / LE \quad [M^\circ L^\circ T^\circ] \quad (2.3)$$

όπου β είναι ο λεγόμενος Λόγος του Bowen και γ είναι η ψυχομετρική σταθερά.

2.1.1.2.2. Αεροδυναμική μέθοδος

Η αεροδυναμική μέθοδος ισχύει κάτω από τις προϋποθέσεις ισχύος της λογαριθμικής κατατομής της ταχύτητας του ανέμου, που εκφράζεται από την εξίσωση [Πουλοβασίλης, 1983; Allen et al., 1986] :

$$U(z) = (U / k) \ln [(z - d) / z_o] \quad [m \text{ sec}^{-1}] \quad (2.4)$$

όπου k είναι η σταθερά του Karman ($k=0.4$), U είναι η ταχύτητα τριβής, d είναι το ύψος της κατακόρυφης μετατόπισης της λογαριθμικής κατατομής της ταχύτητας του ανέμου, παρουσία βλάστησης ύψους μεγαλύτερου από το d , z_o είναι το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας, με $U(z_o)=0$

Μία δεύτερη παραδοχή ισχύος της αεροδυναμικής μεθόδου είναι ότι οι συντελεστές στροβιλώδους μεταφοράς ορμής, θερμότητας και υδρατμών είναι ίσοι

μεταξύ τους ($K_m = K_v = K_j$). Κάτω από τις συνθήκες αυτές η εξίσωση που δίνει την εξατμισοδιαπνοή είναι [Πουλοβασίλης, 1983]:

$$E_{To} = -0,0995 \rho (U_2 - U_1) (e_2 - e_1) / P / [\ln(z_2 - d) / (z_1 - d)]^2 \quad (2.5)$$

2.1.1.3. Ημιεμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

2.1.1.3.1. Μέθοδος του Penman

Η εξίσωση συνδυασμού του Penman για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς έχει τύχει παγκόσμιας εφαρμογής εξ' αιτίας της θεωρητικής της βάσης. Στη μέθοδο αυτή γίνεται συνδυασμός των εξισώσεων του ενεργειακού ισοζυγίου μιας επιφάνειας και της αεροδυναμικής μεθόδου, με αποτέλεσμα η εξίσωση της μεθόδου να περιλαμβάνει τον αεροδυναμικό αλλά και τον ενεργειακό όρο, ως εξής [N. Δαλέζιος, 1994] :

$$E_{To} = [(\Delta/\gamma)R_n + LE_a] / (1 + \Delta/\gamma) \quad [\text{Watts m}^{-2}] \quad (2.6)$$

$$\text{ή } E_{To} = 0,0344 [(\Delta/\gamma)R_n + LE_a] / (1 + \Delta/\gamma) \quad [\text{mm ημέρα}^{-1}] \quad (2.7)$$

όπου γ είναι η ψυχομετρική σταθερά, R_n είναι η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας, L είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, E_a είναι η αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας.

Εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια. Μια βασική παραδοχή για την ανάπτυξη της, η οποία ευσταθεί για υδάτινη επιφάνεια,

είναι ότι οι υδρατμοί κοντά στην επιφάνεια είναι κορεσμένοι. Στην περίπτωση της διαπνοής, οι υδρατμοί δεν είναι κορεσμένοι στην επιφάνεια των φύλλων.

Ο Penman θεωρεί ότι η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους είναι ίση με την θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m. [δηλαδή $e_o(T_o)=e_{o,s}$]. Ακόμη, δέχεται ότι η πυκνότητα ροής θερμότητας προς το έδαφος είναι αμελητέα [δηλαδή $G=0$].

2.1.1.3.2. Υπολογισμός του αεροδυναμικού όρου (E_a)

Αναφέρεται και σαν αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας και είναι το γινόμενο δύο παραγόντων, της συνάρτησης του ανέμου και του ελλείμματος κόρου [N. Δαλέζιος, 1994]. Αρχικά ο Penman έδωσε στην E_a μια εξίσωση του Dalton, 1802, που ήταν της μορφής :

$$E_a = f(u) (e_{os} - e_2) \quad (2.8)$$

όπου $f(u)$ είναι μια συνάρτηση της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου, e_{os} είναι η πίεση κορεσμένων υδρατμών στην επιφάνεια του εδάφους, e_2 είναι η πραγματική πίεση υδρατμών σε ύψος 2m από την επιφάνεια του εδάφους.

Μετάπειτα ο Penman, κατόπιν και των εργασιών του Rohwer, 1931, αλλά και δικών του πειραμάτων έδωσε την πιο κάτω εξίσωση για τον αεροδυναμικό όρο (1948, 1963) [Cuenca et al., 1982] :

$$E_a = 0,263 (1 + 0,537 U_2)(e_s - e_d) \quad [\text{mm ημέρα}^{-1}] \quad (2.9)$$

Οι Burman et al., 1980, Cuenca & Nickolson, 1982, ισχυρίζονται πως η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελλείμματος κόρου πρέπει να διαφέρει κάθε φορά αναλόγως της εμπειρικής εξίσωσης υπολογισμού $f(u)$. Σε γενικές γραμμές υπάρχουν έξι μέθοδοι υπολογισμού του ελλείμματος κόρου σε mbars που χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

A. Μέθοδοι μέσης θερμοκρασίας [Cautenet et al., 1986]

- i. Η ποσότητα Δe υπολογίζεται από την πίεση υδρατμών κορεσμού στη μέση θερμοκρασία μείον την πίεση υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία δρόσου:

$$\Delta e = e_s - e_{dmin} \quad (2.10)$$

- ii. Η ποσότητα Δe υπολογίζεται από την πίεση υδρατμών κορεσμού στη μέση θερμοκρασία μείον την πίεση υδρατμών στην μέση θερμοκρασία δρόσου :

$$\Delta e = e_s - e_{dmean} \quad (2.11)$$

- iii. Η ποσότητα Δe υπολογίζεται από την πίεση υδρατμών κορεσμού στη μέση θερμοκρασία μείον την μέση σχετική υγρασία επί την πίεση υδρατμών κορεσμού στην μέση θερμοκρασία του αέρα :

$$\Delta e = e_s (T_{mean}) - R.H. e_s (T_{mean}) \quad (2.12)$$

B. Μέθοδοι μέσης πίεσης υδρατμών [Cautenet et al., 1986]

- i. Η ποσότητα Δe υπολογίζεται από τις πιέσεις υδρατμών κορεσμού στη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία μείον την πίεση υδρατμών κορεσμού στην μέση θερμοκρασία δρόσου:

$$\Delta e = 0,5 e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min}) - e_{\text{mean}} \quad (2.13)$$

- ii. Η ποσότητα Δe υπολογίζεται από το μέσο έλλειμμα κόρου υπολογιζόμενο στη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία :

$$\Delta e = 0.5[e_s(T_{\max}) - e(T_{\max}) + e_s(T_{\min}) - e(T_{\min})] \quad (2.14)$$

- iii. Η ποσότητα Δe υπολογίζεται από την πίεση υδρατμών κορεσμού στη μέση θερμοκρασία μείον την πραγματική πίεση υδρατμών υπολογιζόμενη από την μέτρηση του υγρού θερμομέτρου (ΔT_{wet}) ενός ψυχομέτρου :

$$\Delta e = e_s(T_{\text{mean}}) - e(\Delta T_{\text{wet}}) + \gamma \Delta T_{\text{wet}} \quad (2.15)$$

όπου T_{\max} , T_{mean} , T_{\min} είναι αντίστοιχα η μέγιστη, η μέση και η ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα.

2.1.1.3.3. Μέθοδος των Doorenbos & Pruitt

Οι Doorenbos & Pruitt, 1977, πρότειναν μια τροποποιημένη εξίσωση του Penman, εισάγοντας καινούργιους συντελεστές για τις περιοχές εκείνες, στις οποίες υπήρχαν διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα. Σε γενικές γραμμές η εξίσωση τους

ισχύει κάτω από τις ίδιες προϋποθέσεις, όπως και η εξίσωση του Penman. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει έως και μέσες ημερήσιες τιμές κλιματικών δεδομένων. Εφ' όσον οι ημερήσιες και νυχτερινές κλιματικές συνθήκες επιδρούν σημαντικά στην εξατμισοδιαπνοή ένας αντισταθμιστικός παράγοντας λαμβάνεται υπ' όψη και γι' αυτό. Η συνιστώμενη εξίσωση από τους Doorenbos & Pruitt είναι:

$$E_{To} = c[W R_n + (1-W) f(u) (e_s - e_a)] \quad (2.16)$$

όπου E_{To} είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς σε mm ημέρα⁻¹, c είναι ένας παράγοντας διευθέτησης για την αντιστάθμιση των ημερήσιων και νυχτερινών καιρικών συνθηκών, είναι ένας παράγοντας εξαρτώμενος από την θερμοκρασία του αέρα, R_n είναι η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας σε mm ημέρα⁻¹, $f(u)$ είναι η συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, $e_s - e_a$ είναι το έλλειμμα πίεσεως κορεσμού σε mbars.

2.1.1.3.4. Μέθοδος Penman – Monteith

Ο Monteith, 1965, ερεύνησε τις ιδέες και τις σχέσεις της αεροδυναμικής αντίστασης και της αντίστασης της κάλυψης του εδάφους με τη διαδικασία της εξάτμισης και ενσωματώνοντας τες στην εξίσωση του Penman πρότεινε την πιο κάτω εξίσωση συνδυασμού [Monteith, 1975; Allen et al., 1986] :

$$E_{To} = [\Delta(R_n - G) + \gamma E_a] / (\Delta + \gamma) \quad [\text{Watts m}^{-2} \text{ ή ημέρα}^{-1}] \quad (2.17)$$

όπου E_{To} είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}), R_n είναι η καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας σε mm ημέρα^{-1} , G είναι η πυκνότητα ροής εδαφολογικής θερμότητας ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), E_a είναι η αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας, γ είναι η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), Δ είναι η καμπύλη πίεσης ατμού κλίσεων ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

2.1.1.3.5. Μέθοδος των Thom & Oliver

Η εξίσωση των Thom & Oliver, 1977, [Doorenbos & Pruitt, 1977] είναι όμοια με την εξίσωση των Penman & Monteith, μόνο που ο αεροδυναμικός όρος E_a υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_a = 0.263 \left\{ \ln \left[\frac{(z-d)}{z_{op}} \right] / \ln \left[\frac{(z-d)}{z_o} \right] \right\}^2 (1 + 0.537 U_2) (e - e_d)$$

[mm ημέρα⁻¹]

(2.18)

όπου το e συνιστάται να υπολογίζεται στην μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα, η ποσότητα z_{op} είναι το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας κατά Penman, και το οποίο είναι ίσο με 1,37 mm ενώ z , d , z_o , U_2 είναι οι ίδιες παράμετροι, όπως ακριβώς ορίζονται παραπάνω.

2.1.1.3.6. Μέθοδος των Van Bavel & Hillel

Οι Van Bavel & Hillel, 1976, παρουσίασαν μία ημιεμπειρική μέθοδο υπολογισμού της E_{To} , στην οποία το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο συνδυάζεται με τη σύγχρονη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών. Ο συνδυασμός αυτός λαμβάνει

χώρα, τόσο στον αέρα πάνω από την επιφάνεια που μελετάται, όσο και στη σύγχρονη μεταφορά θερμότητας και νερού μέσα στο έδαφος. Οι παραπάνω ερευνητές ισχυρίζονται, πως η κατά τον τρόπο αυτό τροποποιηθείσα εξίσωση τους δίνει καλά αποτελέσματα ακόμη και για χρονικές περιόδους μιας ώρας, τόσο για επιφάνειες ελεύθερου νερού όσο και για γυμνό ή και υγρό έδαφος.

2.1.1.4. Εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

2.1.1.4.1. Μέθοδοι βασιζόμενες στην θερμοκρασία και τη διάρκεια των ωρών της ημέρας

2.1.1.4.1.1. Μέθοδος των Blaney – Criddle

Αυτή η μέθοδος συνιστάται να χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν διαθέσιμα μόνο δεδομένα θερμοκρασίας του αέρα. Η αυθεντική εξίσωση των Blaney – Criddle, 1950, χρησιμοποιούσε μετρήσεις της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας T_a , σε $^{\circ}\text{C}$, του ποσοστού των ολικών ετησίων ωρών ημέρας P_{Bc} που παρατηρούνται την περίοδο κατά την οποία γίνεται ο προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, καθώς και έναν συντελεστή καλλιέργειας, η τιμή του οποίου, εκτός από τα χαρακτηριστικά της βλάστησης εξαρτάται και από κλιματικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για μικρές εκτάσεις και για τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους για τις οποίες υπολογίσθηκαν οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές. Διαπιστώθηκε όμως, πως η επίδραση του κλίματος πάνω στην εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ορίζεται ανεπαρκώς μόνο με τα δεδομένα της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και του μήκους της ημέρας και έτσι έγινε η εισαγωγή

και ενός άλλου συντελεστή ο οποίος εκφράζει τις συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής που μελετάται. Σήμερα, η εξίσωση που συνιστάται προς χρήση για την μέθοδο αυτή είναι [Doorenbos & Pruitt, 1977]:

$$ET_o = c PBC (0.46 T_a + 8) / 30 \quad [\text{mm ημέρα}^{-1}] \quad (2.19)$$

όπου ET_o είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για τον συγκεκριμένο υπό μελέτη μήνα, T_a είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$, PBC είναι το μέσο ημερήσιο ποσοστό ωρών ημέρας, για τον συγκεκριμένο μήνα και γεωγραφικό πλάτος, c είναι ένας συντελεστής διόρθωσης ο οποίος εξαρτάται από την ελάχιστη σχετική υγρασία, τις ώρες ηλιοφάνειας και από την εκτιμώμενη ταχύτητα του ανέμου.

Στην χώρα μας η εξίσωση των Blaney – Criddle θα πρέπει να χρησιμοποιείται με επιφυλάξεις στις πιο κάτω περιπτώσεις:

- i. Σε μικρά νησιά και σε παράκτιες περιοχές όπου η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζεται από την θερμοκρασία της θάλασσας ενώ η εποχική αλλαγή της ακτινοβολίας είναι μικρή.
- ii. Σε μεγάλα υψόμετρα εξ' αιτίας της σταθερά χαμηλής μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αν και τα επίπεδα της ημερήσιας ακτινοβολίας είναι σχετικά υψηλά.
- iii. Σε τοπικά κλίματα που παρουσιάζουν ευρεία διακύμανση των ωρών ηλιοφάνειας κατά την διάρκεια των μεταβατικών εποχών (δηλαδή τους μήνες της Άνοιξης και του Φθινοπώρου).

Στις περιπτώσεις αυτές η χρήση της μεθόδου του ενεργειακού ισοζυγίου είναι προτιμότερη, ακόμη και αν τα απαραίτητα δεδομένα ηλιοφάνειας ή ακτινοβολίας πρέπει να υπολογισθούν από τοπικούς ή παγκόσμιους χάρτες, εξ' αιτίας της απουσίας

μετρούμενων τιμών. Παρόλα αυτά, αν γίνει χρήση της μεθόδου Blaney – Criddle σε μεγάλα υψόμετρα, τότε συνίσταται στις ημίξηρες και ξηρές περιοχές, η υπολογιζόμενη τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς να μειώνεται κατά 10% για κάθε 1000m υπεράνω του επιπέδου της θάλασσας. Επίσης ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς δεν θα πρέπει να γίνεται για χρονικές περιόδους μικρότερες του μήνα [Doorenbos & Pruitt, 1977].

Μετά τον υπολογισμό της τιμής της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκτιμηθεί με την χρήση του κατάλληλου φυτικού συντελεστή K_c .

Οι φυτικοί συντελεστές χρησιμοποιούνται μαζί με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό των διαφόρων καλλιεργειών. Οι ανάγκες αυτές εκφράζονται από την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, οι φυτικοί συντελεστές προσδιορίζονται από πειραματικά δεδομένα και εκφράζονται από την σχέση:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (2.20)$$

όπου ET_c είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της μελετούμενης βλάστησης σε mm ημέρα⁻¹, ET_o είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για τον συγκεκριμένο υπό μελέτη μήνα, K_c είναι ο φυτικός συντελεστής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βλάστησης, από τον χρόνο της σποράς ή της φύτευσης, από τα διάφορα στάδια ανάπτυξης του φυτού και γενικά από τις κλιματικές συνθήκες [Allen et al., 1986].

Οι ετήσιες καλλιεργείες παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση, κυρίως σε ότι αφορά το ποσοστό κάλυψης του εδάφους κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στη διαμόρφωση της ET_c και κατά συνέπεια, στις τιμές

των φυτικών συντελεστών. Για τη διευκόλυνση του προσδιορισμού των τιμών των συντελεστών αυτών, η βλαστική περίοδος χωρίζεται σε τέσσερα κύρια στάδια ανάπτυξης. Αυτά τα στάδια είναι:

1. **Αρχικό στάδιο ή στάδιο εγκατάστασης.** Το στάδιο αυτό αρχίζει με τη σπορά ή φύτευση και φτάνει μέχρι την οριστική εγκατάσταση της καλλιέργειας. Κατά το στάδιο αυτό το ποσοστό κάλυψης του εδάφους είναι από μηδενικό μέχρι το πολύ ίσο με 10%, οπότε η ET_c κυριαρχείται από την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους, λόγω του πολύ μικρού ποσοστού φυτοκάλυψης, το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται από την υγρότητα της επιφάνειας, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα των βροχών ή / και των αρδεύσεων.
2. **Στάδιο ταχείας ανάπτυξης ή στάδιο κύριας βλάστησης.** Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από την έντονη ανάπτυξη των φυτών, αρχίζει μετά το τέλος του προηγούμενου σταδίου και τελειώνει με την πλήρη κάλυψη του εδάφους από την καλλιέργεια. Το έδαφος θεωρείται πλήρως καλυμμένο όταν το ποσοστό φυτοκάλυψης είναι $\geq 70\%$. Η σταδιακή αύξηση του ποσοστού κάλυψης συνεπάγεται μια συνεχή μεταβολή του φυτικού συντελεστή, που αρχίζει από μια ελάχιστη τιμή που είναι ίση με αυτή του αρχικού σταδίου και φτάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή, όταν το φύλλωμα καλύψει πλήρως την επιφάνεια του χωραφιού, η οποία είναι ίση με τον φυτικό συντελεστή του επόμενου σταδίου.
3. **Στάδιο μέσης περιόδου ή στάδιο διαμόρφωσης της παραγωγής.** Κατά το στάδιο αυτό η κάλυψη του εδάφους από τα φυτά είναι πλήρης και περιλαμβάνει την περίοδο ανθοφορίας και σχηματισμού των καρπών. Λόγω της πλήρους φυτοκάλυψης, η τιμή του K_c παραμένει σταθερή για όλη την περίοδο και διαμορφώνεται στο υψηλότερο επίπεδο όλης της βλαστικής

περιόδου. Προσδιορίζεται πειραματικά για κάθε καλλιέργεια και τόπο, αφού στη διαμόρφωσή της ασκούν σημαντική επίδραση οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

- 4. Τελικό στάδιο ή στάδιο ωρίμανσης.** Κατά το στάδιο αυτό συντελείται η ωρίμανση των καρπών και τερματίζεται με τη συγκομιδή. Το στάδιο αυτό έχει ορισμένες ιδιαιτερότητες, αφού η ποιότητα και ποσότητα των συγκομιζόμενων προϊόντων έχει άμεση σχέση με το επίπεδο της εδαφικής υγρασίας και τις φυσιολογικές διαφοροποιήσεις των φυτών που γίνονται κατά τη διάρκειά του. Λογικά, η τιμή του σταδίου αυτού πρέπει να μειώνεται όσο προχωρούμε προς το χρόνο συγκομιδής.

Η διάρκεια της βλαστικής περιόδου και των επί μέρους σταδίων ανάπτυξης διαφέρει από καλλιέργεια σε καλλιέργεια και επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε τόπο. Για το λόγο αυτό, πρώτο μέλημα στη διαδικασία προσδιορισμού των φυτικών συντελεστών είναι ο καθορισμός της βλαστικής περιόδου και των επί μέρους σταδίων ανάπτυξης για κάθε εδαφικό διαμέρισμα.

2.1.1.4.1.2. Μέθοδος του Thornthwaite

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μόνο την μέση θερμοκρασία σε °C για να εκφράσει την επίδραση του κλίματος πάνω στην τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Για αυτόν τον λόγο δίνει καλά αποτελέσματα όταν δεν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς σε μικρά χρονικά διαστήματα, γιατί η μέση μηνιαία θερμοκρασία από μόνη της, δεν είναι αρκετή για να εκφράσει την ενέργεια που διατίθεται στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής.

Κατά τον Thornthwaite η τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{To}=0.533 L_d (10 T_a / I)^a \quad [\text{mm ημέρα}^{-1}] \quad (2.21)$$

όπου T_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$ υπολογιζόμενη από τις μέσες ημερήσιες, I είναι ο δείκτης θερμότητας, που δίνεται από την εξίσωση [Τολίκας, 1979]:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (T_a / 5)^{1.514} \quad (2.22)$$

όπου $a=0,000000675 I^3 - 0,000077 I^2 + 0,49239$, L_d είναι ένας διορθωτικός συντελεστής που είναι συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους.

Θα πρέπει και πάλι να τονιστεί εδώ, πως η μέθοδος αυτή δίνει καλά αποτελέσματα όταν δεν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς σε μικρά χρονικά διαστήματα, γιατί η μέση θερμοκρασία δεν είναι ένα κατάλληλο μέτρο για την ενέργεια που διατίθεται στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής.

2.1.1.4.2. Μέθοδοι βασιζόμενες στην θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία

2.1.1.4.2.1. Μέθοδος του Turk

Ο Turk, 1954 [Τολίκας, 1979], έδωσε την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς:

$$E_{To} = 0,1 (P+80) / - \{1 + [(P+45) / LTc]^2\} \quad [\text{mm ημέρα}^{-1}] \quad (2.23)$$

όπου P είναι η βροχόπτωση σε mm / 10 ημέρες και ο παράγοντας LTc δίνεται από την εξίσωση [Τολίκας, 1959]:

$$LTc = 0.0899(2+T_a) - R_s \quad (2.24)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m, εκφραζόμενη σε °C, R_s είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος σε Watts m⁻².

2.1.1.4.2.2. Μέθοδος των Jensen – Haize

Η εξίσωση που δίνουν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς είναι:

$$E_{To} = 0,035(0,025 T_a + 0,08)R_s \quad [\text{mm ημέρα}^{-1}] \quad (2.25)$$

όπου R_s είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος σε Watts m⁻², T_a είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m, εκφραζόμενη σε °C.

Η μέθοδος αυτή, όπως και η προηγούμενη, δίνει μικρότερες τιμές από τις πραγματικά μετρούμενες της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά την διάρκεια της Άνοιξης και μεγαλύτερες κατά την διάρκεια του Καλοκαιριού. Κατά την γνώμη των ερευνητών αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπερεκτιμούν την επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την επίδραση της ακτινοβολίας.

2.2. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Ο όρος Τηλεπισκόπηση συντίθεται από το επίρρημα ‘τηλε’ (=από μακριά) και το ρήμα ‘επισκοπεύω’ που σημαίνει επιθεωρώ – εξετάζω κάτι από μακριά. Επομένως, ο όρος Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) σημαίνει αντίληψη αντικειμένων ή φαινομένων από απόσταση. Ορίζεται, ως η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από ένα στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς στην πραγματικότητα να υπάρχει σε απευθείας επαφή με αυτόν (Μερτίκας, 1999). Έτσι, η Τηλεπισκόπηση, μπορεί να αποδοθεί και ως η αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση (Avery & Berlin, 1992).

Η δορυφορική Τηλεπισκόπηση παρέχει μεγάλη χωρική κάλυψη και δίνει τη δυνατότητα μελέτης παραμέτρων, όπως θερμοκρασίας εδάφους, ηλιακής ακτινοβολίας, βροχόπτωσης, εδαφικής υγρασίας, ανέμου, κατάστασης βλάστησης, καθώς και της ανάπτυξης και παραγωγής των καλλιεργειών, μετρώντας ανακλώμενη και εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από την επιφάνεια και την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα της γης (Δαλέζιος, 2002).

Ο στόχος ή το αντικείμενο μελέτης της Τηλεπισκόπησης μπορεί να είναι είτε πολύ μεγάλο, όπως ολόκληρη η Γη, η Σελήνη και άλλοι πλανήτες, είτε πολύ μικρό, όπως για παράδειγμα τα βιολογικά κύτταρα που ερευνούνται με μικροσκόπια στην ιατρική και στη βιολογία (Μερτίκας, 1999).

Τέλος, η Τηλεπισκόπηση παίζει έναν γενικότερο ρόλο στη συλλογή των στοιχείων εφ’ όσον με τη δυνατότητα συλλογής και «μη ορατών δεδομένων» που έχει, χρησιμοποιείται και για τη συλλογή θεματικού τύπου πληροφοριών, όπως π.χ.

θερμοκρασία υδάτινων μαζών, θαμμένα μνημεία, κλπ, γεγονός που την αναδεικνύει σε πολυδύναμο μέσο συλλογής δεδομένων παρατήρησης γεωμετρικού και θεματικού τύπου (Λιβιεράτος, 1985).

2.2.1. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Η ύπαρξη μιας πηγής ενέργειας για τον φωτισμό ενός στόχου αποτελεί ένα από τα κύρια στοιχεία στα οποία στηρίζεται η Τηλεπισκόπηση. Τέτοια ενέργεια είναι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (ΗΜΕ). Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι η πιο σημαντική για την Τηλεπισκόπηση, η οποία μπορεί να μεταφερθεί με ατομικές και μοριακές συγκρούσεις, με φυσική κίνηση της ύλης και με κυματικά και σωματιδιακά φαινόμενα.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜΑ) συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας των κυμάτων και αποτελείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο (E) το οποίο μεταβάλλεται σε ένταση με κατεύθυνση κάθετη στη κατεύθυνση μετάδοσης και ένα μαγνητικό πεδίο (M) κάθετο στο ηλεκτρικό πεδίο. Με την ταχύτητα του φωτός μεταδίδονται και τα δύο. Η μετάδοσή της εξηγείται με την θεωρία των κυμάτων και ανιχνεύεται εάν υποθεθεί ότι αποτελείται από σωματίδια, τα οποία έχουν ιδιότητες ενέργειας και ροπής παρόμοιες των σωματιδίων. Στην Τηλεπισκόπηση, οι διαδικασίες περιλαμβάνουν την αλληλοεπίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με τους υπό μελέτη στόχους. Η σημαντικότερη παράμετρος της ακτινοβολίας που σχετίζεται με τη δορυφορική Τηλεπισκόπηση είναι η απορρόφηση. Επίσης, τα σωματίδια της ατμόσφαιρας επηρεάζουν τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διασπείροντας της. Οι αισθητήρες των δορυφόρων σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποφεύγονται εκείνες οι περιοχές του φάσματος, τα μήκη κύματος των

οποίων απορροφούνται από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Η σκέδαση της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος είναι μικρότερη από ότι στα μικρά μήκη κύματος.

Οι δορυφορικοί αισθητήρες λαμβάνουν τη μικρού μήκους κύματος σκεδαζόμενη ή ανακλώμενη ακτινοβολία και τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, που προσπίπτει στη γήινη επιφάνεια καθώς και στα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Ως ανακλαστικότητα μιας επιφάνειας ορίζεται το ποσοστό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος που ανακλάται σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (Δαλέζιος, 2002). Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανακλάται με διαφορετικό τρόπο από κάθε υλικό και χαρακτηρίζεται από τις συγκεκριμένες τιμές που εκπέμπει στις περιοχές του φάσματος. Δηλαδή, το σήμα που καταγράφεται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του κάθε αντικειμένου είναι μοναδικό και ονομάζεται φασματική υπογραφή αυτού και υποδηλώνουν το ποσοστό ανάκλασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου κατά μήκος του φάσματος και επιτρέπουν την ανίχνευση των αντικειμένων αυτών στο χώρο κατά την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (ΗΜΦ) είναι η κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας συναρτήσει του μήκους κύματος. Μέσω δορυφόρων, αεροσκαφών, εδαφικών συστημάτων (π.χ. ραντάρ) και γενικότερα σε απόσταση από το στόχο γίνονται συνήθως οι μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έχουν δοθεί ορισμένα χαρακτηριστικά ονόματα ανάλογα με την περιοχή του φάσματος στην οποία γίνεται αναφορά. Έτσι υπάρχει η ορατή περιοχή, η υπεριώδη περιοχή, ακτίνες-X, περιοχή ραδιοκυμάτων, κλπ. Η ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι αυτή η οποία ορίζεται από την ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού και βρίσκεται μεταξύ 0,36 – 0,75 μm . Μία άλλη περιοχή που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι η υπέρυθη, που καλύπτει το φάσμα από 0,7 μm – 100 μm .

2.2.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Τα δορυφορικά συστήματα διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, στα ενεργητικά και στα παθητικά. Τα ενεργητικά συστήματα ή ενεργητικοί ανιχνευτές διαθέτουν δική τους πηγή ακτινοβολίας, εκπέμπουν ενέργεια προς ένα αντικείμενο και στη συνέχεια καταγράφουν την ανακλώμενη ακτινοβολία. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μετεωρολογικά και δορυφορικά Radar, καθώς και ο περιβαλλοντικός δορυφόρος Radarsat. Η ακτινοβολία που καταγράφουν τα ενεργητικά συστήματα είναι μεταξύ 1cm και 1m στη φασματική περιοχή, και είναι σε θέση να διαπεράσει τα σύννεφα, την ισχυρή βροχόπτωση και την ομίχλη. Για το λόγο αυτό η επιχειρησιακή τους δυνατότητα είναι μεγάλη με την προϋπόθεση ότι ο δορυφόρος διέρχεται συχνά πάνω από τις ίδιες περιοχές.

Τα παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης (ραδιόμετρα) εξαρτώνται από το ηλιακό φως για την καταγραφή της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Επηρεάζονται όμως από την παρουσία νεφών, ομίχλης, καπνού και σκότους (Δαλέζιος, 2002). Τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα καταγραφής από το υπεριώδες τμήμα του φάσματος έως και το μακρινό υπέρυθρο (Φείδας, 1999).

Η διακριτική ικανότητα των δορυφόρων αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό τους και διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Χωρική διακριτική ικανότητα: θεωρείται η διάκριση δύο διαφορετικών αντικειμένων από τον ανιχνευτή και μετράται με τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των αντικειμένων αυτών, η οποία είναι απαραίτητη για να τα διαχωρίσει ο αισθητήρας. Πρακτικά, η χωρική διακριτική ικανότητα είναι το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel) σε πραγματικές διαστάσεις.

- Φασματική διακριτική ικανότητα: είναι οι περιοχές του φάσματος που καταγράφονται από τον κάθε αισθητήρα. Πρακτικά, μετράται με τον αριθμό των καναλιών (bands) όπως λέγονται, του δορυφόρου.
- Χρονική διακριτική ικανότητα: είναι το χρονικό διάστημα που θα χρειαστεί ένας δορυφόρος για να σαρώσει την ίδια περιοχή. Δηλαδή, η συχνότητα με την οποία παρέχει πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο σημείο ο δορυφόρος.
- Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα: περιγράφει την ικανότητα του αισθητήρα του δορυφόρου να διακρίνει το πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορούν να διακριθούν υλικά γειτονικής φασματικής συμπεριφοράς σε μια εικόνα. (π.χ. μπορεί ένα αντικείμενο γαλάζιας απόχρωσης να διακριθεί από ένα αντικείμενο μπλε απόχρωσης).

2.2.3 ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

Σήμερα, στις περιβαλλοντικές εφαρμογές, οι κυριότεροι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται είναι μετεωρολογικοί και περιβαλλοντικοί. Στους μετεωρολογικούς δορυφόρους ανήκουν οι γεωστάσιμοι δορυφόροι METEOSAT και οι πολικής τροχιάς NOAA, οι οποίοι λαμβάνουν συνεχώς πληροφορίες και εξασφαλίζουν κάλυψη της Γης μεταδίδοντας σε επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, παρέχοντας δεδομένα για την ατμόσφαιρα και για ολόκληρη την επιφάνεια της Γης.

Οι γεωστάσιμοι δορυφόροι βρίσκονται πάνω από ένα προκαθορισμένο σημείο της Γης, τοποθετημένοι σε απόσταση 36000 km από τον Ισημερινό και περιστρέφονται γύρω από τη Γη με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Μας δίνουν πληροφορίες σε τρεις περιοχές του φάσματος, το ορατό, το υπέρυθρο και το θερμικό υπέρυθρο.

Οι δορυφόροι πολικής τροχιάς βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της Γης σε απόσταση 800-900 km. Έχουν κλίση τροχιάς $90^{\circ} - 100^{\circ}$, εκτελούν 14 πλήρεις περιστροφές μέσα σε ένα 24ωρο, διάρκειας 102 λεπτών. Οι δορυφόροι NOAA μετονομάστηκαν έτσι από τους δορυφόρους της σειράς TIROS. Το AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), ένα πολύ υψηλής ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας ραδιόμετρο, αποτελεί ένα από τα βασικότερα συστήματα που μεταφέρεται στους δορυφόρους αυτούς.

Ο ανιχνευτής AVHRR μπορεί να σαρώσει ταυτόχρονα περιοχή 2400 km, η χωρική διακριτική του ικανότητα είναι 1,1 km και η χρονική του διακριτική ικανότητα είναι 6 ώρες. Επίσης, ο συγκεκριμένος δέκτης καταγράφει την ακτινοβολία που φτάνει σ' αυτόν σε πέντε φασματικές περιοχές.

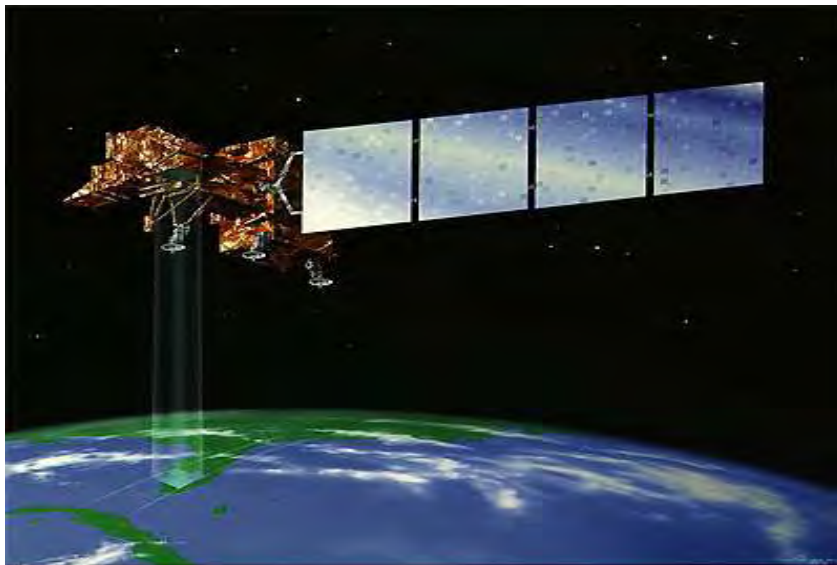


Εικόνα 2.1: Δορυφόρος NOAA (Wikipedia)

Οι περιβαλλοντικοί δορυφόροι μπορούν να συλλέξουν εικόνες και στοιχεία, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, την πρόληψη πυρκαγιών και τον εντοπισμό τους, την παρακολούθηση καλλιεργειών, την πρόγνωση μετεωρολογικών φαινομένων, την

αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, καθώς και για την έρευνα, με απώτερο στόχο τη βελτίωση της ζωής σε ολόκληρο τον πλανήτη. Στην κατηγορία αυτή, οι σημαντικότεροι δορυφόροι είναι οι Landsat, SPOT και Ikonos.

Οι πρώτοι περιβαλλοντικοί δορυφόροι που τέθηκαν σε τροχιά είναι οι δορυφόροι της γενιάς Landsat. Ο θεματικός χαρτογράφος (Thematic Mapper: TM), ο οποίος καταγράφει την ακτινοβολία σε ποικίλες περιοχές του φάσματος (τρεις στο ορατό, μια στο κοντινό υπέρυθρο, δύο στο μέσο υπέρυθρο και μια στο θερμικό υπέρυθρο) και έχει χωρική διακριτική ικανότητα 30 μέτρων, είναι ένα από τα όργανα που διαθέτουν. Κάθε 16 ημέρες γίνεται η λήψη των παρατηρήσεων. Οι δορυφόροι αυτοί έχουν ύψος τροχιάς 705 km.



Εικόνα 2.2: Περιβαλλοντικός δορυφόρος Landsat (Satellite Imaging Corporation)

Ο γαλλικός δορυφόρος SPOT έχει ρυθμό επαναλήψεων μιας παρατήρησης σε 26 ημέρες και παρουσιάζει χρονική διακριτική ικανότητα 3 έως 7 ημέρες. Αποτελείται από δύο συστήματα: το πολυφασματικό με 20 μέτρα χωρική ανάλυση

και το πανχρωματικό με 10 μέτρα χωρική διακριτική ικανότητα και καταγράφει την ακτινοβολία στο ορατό και στο κοντινό υπέρυθρο.

Ο δορυφόρος Ikonos αποτελεί τον πρώτο δορυφόρο που λάμβανε εμπορικά διαθέσιμα δεδομένα χωρικής ανάλυσης 1m. Τα δεδομένα του μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών, λόγω της υψηλής διακριτικής ικανότητας. Επιπλέον, μπορούν να συνδυαστούν τα παγχρωματικά με τα πολυφασματικά δεδομένα, δίνοντας έτσι έγχρωμα δεδομένα διακριτικής ικανότητας 1m. Λειτουργεί από τον Σεπτέμβριο του 1999 και το όνομα του προέρχεται από την ελληνική λέξη «εικόνα».

2.2.4 Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI)

Ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας βλάστησης. Είναι ένας απλός αριθμητικός δείκτης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των μετρήσεων τηλεπισκόπησης, οι οποίες συνήθως προέρχονται από δορυφόρους για να εκτιμήσει κατά πόσο η περιοχή που παρατηρείται αποτελείται από ζωντανή βλάστηση ή όχι.

Ο δείκτης βλάστησης αυτός εκφράζεται από την σχέση:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.26)$$

όπου NIR και RED είναι οι ψηφιακές τιμές του εικονοστοιχείου στο κανάλι του εγγύς υπέρυθρου και του κόκκινου ορατού αντίστοιχα.

Ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς στηρίζεται στην ιδιότητα των υγείων φυτών να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, στη φασματική περιοχή που ανήκει η φωτοσυνθετική ενεργός ακτινοβολία την οποία χρησιμοποιούν ως ενέργεια.

Από το σχεδιασμό του ο λόγος NDVI μπορεί να πάρει τιμές από -1 έως 1 και από τον ορισμό του συμπεραίνεται ότι η πυκνή βλάστηση θα παίρνει θετικές τιμές (περίπου 0.3 έως 0.8) ενώ τα σύννεφα και το χιόνι θα χαρακτηρίζονται από αρνητικές τιμές δείκτη. Αντίστοιχα τα υπόλοιπα στοιχεία που παρατηρούνται στην γη θα παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Για παράδειγμα το ελεύθερο νερό, το οποίο έχει χαμηλή ανακλαστικότητα και στα δύο κανάλια θα παίρνει τιμές κοντά στο (0) ή ελαφρώς αρνητικές, ενώ τα εδάφη που εκφράζουν γενικά μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο παρά στο κόκκινο παίρνουν τιμές μικρές θετικές (περίπου 0.1 με 0.2).

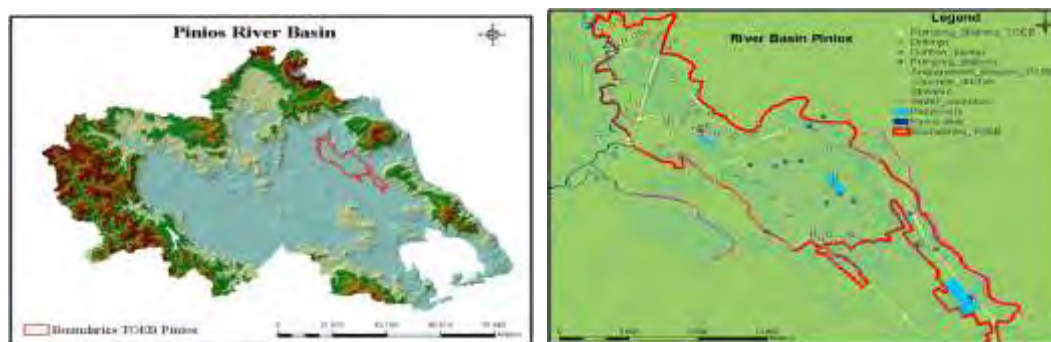
2.3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Περιφέρεια Θεσσαλίας καταλαμβάνει το κεντρικό – ανατολικό τμήμα του ηπειρωτικού κορμού της Ελλάδος. Αποτελείται από τους Νομούς Καρδίτσας, Λαρίσης, Μαγνησίας και Τρικάλων και καταλαμβάνει συνολική έκταση 14.036 χλμ² (10,6% της συνολικής έκτασης της χώρας). Συνορεύει προς Βορρά με τις Περιφέρειες Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας, προς Νότο με την Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδος, Δυτικά με την Περιφέρεια Ηπείρου, ενώ Ανατολικά βρέχεται από το Αιγαίο Πέλαγος.

Το 36,0% του εδάφους είναι πεδινό, το 17,1% ημιορεινό, ενώ το 44,9% είναι ορεινό. Η εδαφική της διαμόρφωση είναι τέτοια ώστε ψηλά βουνά περιβάλλουν το Θεσσαλικό κάμπο, ο οποίος αποτελεί τη μεγαλύτερη πεδιάδα της χώρας που

διαρρέεται δυτικά προς τα ανατολικά από τον ποταμό Πηνειό που είναι το τρίτο μεγαλύτερο ποτάμι της χώρας. Τα βουνά αυτά είναι ο Όλυμπος, το νότιο τμήμα της οροσειράς της Πίνδου, ο Ιταμός, το Πήλιο και η Όθρυς. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η τεχνητή λίμνη του Ταυρωπού, η οποία δημιουργήθηκε ύστερα από απόφραξη της κοίτης του Ταυρωπού, παραπόταμου του Αχελώου.

Το εργατικό δυναμικό του Θεσσαλίας ανέρχεται σε 299,3 χιλ. άτομα ενώ οι απασχολούμενοι είναι 273,9 χιλ. (1997). Η διαχρονική εξέλιξη του ενεργού πληθυσμού και της απασχόλησης τα τελευταία χρόνια (1993-97) παρουσιάζεται αύξουσα. Το 38,7% των απασχολουμένων εργάζεται στον πρωτογενή τομέα, το 17,4% στον δευτερογενή τομέα και το 43,9% στον τριτογενή τομέα, ενώ τα αντίστοιχα εθνικά ποσοστά είναι 19,8%, 22,5% και 57,7% (1997). Κατά την περίοδο 1993-1997 φαίνεται μια σαφής τάση ενίσχυσης του τριτογενή τομέα και μείωσης του δευτερογενή, ενώ ο πρωτογενής τομέας παραμένει στο ίδιο επίπεδο.



Εικόνα 2.3: Περιοχή μελέτης

Για το πειραματικό σχέδιο επιλέχθηκε ως πιλοτική περιοχή, η υπολεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού στην περιοχή του Πλατυκάμπου. Η Θεσσαλία, στην Κεντρική Ελλάδα, είναι περιοχή υψηλής γεωργικής παραγωγικότητας που παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας. Στην εν λόγω περιοχή, έντονη και εκτεταμένη καλλιέργεια, κυρίως των σοδειών που απαιτούν πολύ νερό, οδηγεί στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων. Καλλιέργεια επιλογής ήταν το βαμβάκι

που αποτελεί την κυρίαρχη καλλιέργεια της περιοχής και την πιο απαιτητική σε νερό. Κατά τη διάρκεια της Άνοιξης και του Φθινοπώρου, το κλίμα συνήθως δεν είναι σταθερό, πράγμα που επηρεάζει σημαντικά τον υδρολογικό κύκλο στην υπολεκάνη απορροής καθώς και οι δύο εποχές είναι κρίσιμες για τους υδατικούς πόρους στη γεωργία. Η βροχόπτωση είναι πολύ χαμηλή κατά την περίοδο ανάπτυξης του βαμβακιού (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) ώστε χρειάζεται άρδευση για να καλυφθούν οι απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό. Το νερό της άρδευσης προέρχεται από ποταμούς κατά 46% και από υπόγεια νερά κατά 54%. Όταν οι βροχοπτώσεις, κατά την διάρκεια του Χειμώνα του προηγούμενου έτους είναι περιορισμένες, υπάρχει εμφανής έλλειψη νερού προς άρδευση. Ο έλεγχος των αναγκών νερού για την γεωργία στην Θεσσαλία, απαιτεί τον συνδυασμό των παρατηρήσεων στην πιλοτική περιοχή, μικρό-μετεωρολογικά δεδομένα και ανάλυση δεδομένων δορυφόρου.

2.4. ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η παρακολούθηση των αναγκών νερού για τη γεωργία στη Θεσσαλία, απαιτεί έναν συνδυασμό παρατηρήσεων πεδίου στην πιλοτική περιοχή, τα μικρομετεωρολογικά στοιχεία και την ανάλυση των δορυφορικών στοιχείων.

Συμβατικά στοιχεία:

Τα εδαφικά στοιχεία βασίζονται σε μικρομετεωρολογικές μετρήσεις βάση εδάφους για την περίοδο αναφοράς στην πιλοτική περιοχή και περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία αέρα, την ταχύτητα ανέμου, την υγρασία και την βροχόπτωση, σε καθημερινή βάση, προκειμένου να εξαχθεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας και ο φυτικός συντελεστής K_c για τις καλλιέργειες βάμβακος για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010.

Δορυφορικά στοιχεία:

Τα στοιχεία τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της γεωργίας. Η χωρική κατανομή της εξατισμοδιαπνοής εκτιμάται με χρήση δορυφορικής απεικόνισης (Landsat-S TM), καλύπτοντας την περιοχή της υπολεκάνης απορροής του Πηνειού, η οποία ήταν διαθέσιμη για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 και 2010 κατά τις ημερομηνίες:

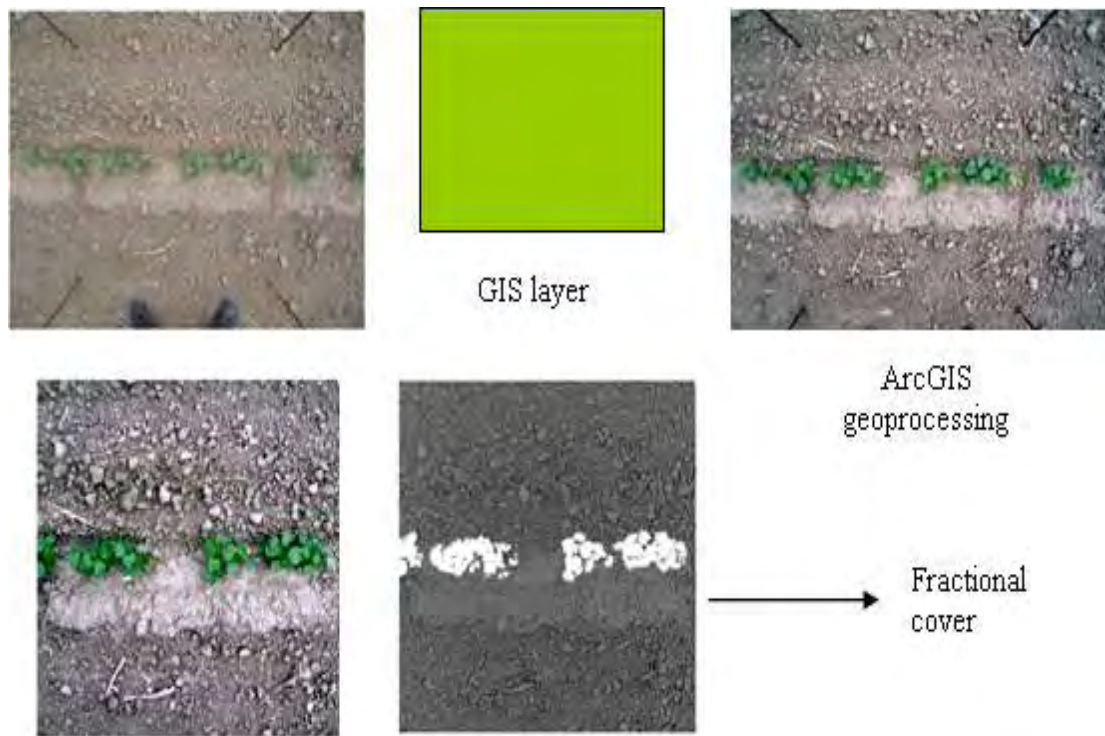
Πίνακας 2.1: Διαθέσιμες ημερομηνίες δορυφορικών δεδομένων

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
6-Μαϊ	9-Μαϊ	28-Μαϊ	7-Μαϊ	1-Μαϊ	20-Μαϊ	7-Μαϊ
22-Μαϊ	26-Ιουν	29-Ιουν	24-Ιουν	17-Μαϊ	5-Ιουν	28-Ιουν
23-Ιουν	12-Ιουλ	3-Οκτ	10-Ιουλ	2-Ιουν	21-Ιουν	27-Αυγ
9-Ιουλ	28-Ιουλ		26-Ιουλ	18-Ιουν	7-Ιουλ	28-Σεπ
25-Ιουλ	13-Αυγ		27-Αυγ	4-Ιουλ	23-Ιουλ	3-Οκτ
26-Αυγ			28-Σεπ	20-Ιουλ	24-Αυγ	
11-Σεπ				5-Αυγ		
				21-Αυγ		
				6-Σεπ		

Στοιχεία πεδίου:

Όσον αφορά τις παρατηρήσεις πεδίου, η τμηματική κάλυψη και τα φαινολογικά στάδια για τη καλλιέργεια βάμβακος για το 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 καταγράφηκαν. Χρησιμοποιήθηκε ένας πειραματικός αγρός. Η δειγματοληψία ξεκίνησε το Μάιο και επαναλήφθηκε δύο φορές την εβδομάδα, για το Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Σε όλες τις πιλοτικές περιοχές καταγράφηκαν και μετρήθηκαν τα ακόλουθα:

φωτογραφίες, εντοπισμός των αγρών, ύψος σοδειών, στοιχεία άρδευσης και μετεωρολογικά στοιχεία.



Εικόνα 2.4: Ανάπτυξη Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (ΓΣΠ)

2.5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.5.1 Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

2.5.1.1 Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ΕΤο

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς είναι η ένταση με την οποία νερό, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες αναφοράς, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς υπολογίζεται για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 και 2010 με δεδομένα εδάφους βασισμένα σε μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης σύμφωνα με την εξίσωση Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^\circ(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.27)$$

Όπου ET_o : η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm day^{-1}), R_n : η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια των καλλιεργειών ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G : η πυκνότητα ροής εδαφολογικής θερμότητας ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) T : η ημερήσια θερμοκρασία αέρος σε ύψος 2 m ($^{\circ}\text{C}$), u_2 : η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m (m s^{-1}), e_s : η πίεση ατμού κορεσμού (kPa), e_a : η πραγματική πίεση ατμού(kPa), $e_s - e_a$: το έλλειμμα πίεσης ατμού κορεσμού (kPa), Δ : η καμπύλη πίεσης ατμού κλίσεων ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

2.5.1.2 Υπολογισμός φυτικού συντελεστή K_c

Ο φυτικός συντελεστής υπολογίζεται για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 και 2010 με βάση τα επίγεια δεδομένα και τα μετεωρολογικά δεδομένα στην περιοχή μελέτης. Σύμφωνα με την εξίσωση Penman-Monteith υπολογίζεται:

$$K_{cmid} = K_{cmid(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (2.28)$$

Όπου $K_{cmid(Tab)}$ είναι η τιμή του φυτικού συντελεστή στο ενδιάμεσο στάδιο ανάπτυξης K_{cmid} , u_2 είναι η μέση τιμή για την καθημερινή ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 μ. κατά τη διάρκεια του ενδιάμεσου σταδίου ανάπτυξης, RH_{min} είναι η μέση τιμή για την καθημερινή ελάχιστη σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του ενδιάμεσου σταδίου

ανάπτυξης, h είναι το ύψος του βαμβακιού κατά τη διάρκεια του ενδιάμεσου σταδίου ανάπτυξης.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την εκτίμηση του $K_{c_{end}}$.

2.5.1.3 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c

Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας είναι η εξατμισοδιαπνοή από τις υγιές καλλιέργειες, είναι δηλαδή ελεύθερη από ασθένειες και οποιουσδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης και έχει στη διάθεση της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά και επιτυγχάνει το μέγιστο της ανάπτυξης και απόδοσης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται. Η ET_c υπολογίζεται ως εξής:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (2.29)$$

Όπου K_c και ET_o υπολογίζονται από επίγεια δεδομένα.

2.5.1.4 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c και φυτικού συντελεστή K_c βασιζόμενα σε δορυφορικά δεδομένα

Η επιλογή των δορυφορικών εικόνων, η διόρθωση και η εξαγωγή χαρτών της ανάκλασης, του NDVI, της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c και του φυτικού συντελεστή K_c εξήχθησαν για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 και 2010.

Προ-επεξεργασία δορυφορικών **δεδομένων**: η προ-επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων περιλαμβάνει την ατμοσφαιρική και γεωμετρική διόρθωση

των δεδομένων Landsat. Οι δορυφορικές εικόνες Landsat-5 TM αποκτούνται κάθε 15 μέρες (2 εικόνες το μήνα) για την καλλιεργητική περίοδο (Μάιος-Σεπτέμβριος) για τα έτη 2004 έως 2010. Το μέγεθος των pixel των εικόνων είναι 30 * 30 m. Η ατμοσφαιρική διόρθωση έγινε χρησιμοποιώντας το ATCORE2 μοντέλο του ERDAS IMAGINE 9.1. Η γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων εκτελέσθηκαν στο λογισμικό ArcGIS. Οι χάρτες κλίμακας 1:50000 καλύπτουν χωρικά την ευρεία περιοχή των δορυφορικών εικόνων. Πάνω από 80 σημεία επίγειου ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν για κάθε εικόνα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού για το γεωμετρικό μετασχηματισμό. Όλες οι εικόνες καταχωρήθηκαν στο ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (EGSA'87) χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS.

Η επεξεργασία εικόνας περιλαμβάνει τη λήψη της ανάκλασης, του NDVI και χάρτες φυτικού συντελεστή Kc και εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc.

Εξαγωγή ανάκλασης: Ο συντελεστής ανάκλασης στη γεωργία περιγράφει την αλληλεπίδραση του φωτός με το έδαφος και την καλλιέργεια. Οι δορυφορικές εικόνες παρέχουν τους συντελεστές ανάκλασης από τα διάφορα συστατικά μιας καλλιέργειας.

Εξαγωγή NDVI: Η ανάπτυξη των δεικτών βλάστησης από τις δορυφορικές εικόνες έχει διευκολύνει την διαδικασία και την βλάστηση με την παροχή των πολύτιμων πληροφοριών για τη δομή και τη σύνθεση. Ο NDVI εξάγεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED) \quad (2.30)$$

Το κανάλι 3 Landsat και το κανάλι 4 χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί ο NDVI.

Εξαγωγή φυτικού συντελεστή Kc: Ο φυτικός συντελεστής Kc ενσωματώνει την επίδραση των χαρακτηριστικών που διακρίνουν μια συγκεκριμένη καλλιέργεια από την αναφορά χλόης, η οποία έχει μια ομογενοποιημένη εμφάνιση και καλύπτει εντελώς το έδαφος. Οι τιμές των φυτικών συντελεστών επηρεάζονται από τον τύπο

της καλλιέργειας, το κλίμα, την εξάτμιση του εδάφους και τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών(Allen et al., 1998; Bailey, 1990). Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης είναι:

$$K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.2 \quad (2.31)$$

Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας E_{Tc} : Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας είναι η εξατμισοδιαπνοή από τις υγιείς καλλιέργειες, είναι δηλαδή ελεύθερη από ασθένειες και οποιουδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης και έχει στη διάθεση της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά και επιτυγχάνει το μέγιστο της ανάπτυξης και απόδοσης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται. Η E_{Tc} υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{Tc} = K_c * E_{T0} \quad (2.32)$$

Όπου K_c είναι δορυφορικά δεδομένα και E_{T0} επίγεια δεδομένα.

2.6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ

Για τον έλεγχο της πιστότητας των αποτελεσμάτων του φυτικού συντελεστή K_c και της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c χρησιμοποιούνται στατιστικοί δείκτες. Αυτοί είναι:

1. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας (Eff), ο οποίος έχει προταθεί από τους Nash και Sutcliffe (1970) και δίνεται από τον τύπο:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{cgr} - ET_{csat})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{cgr} - \overline{ET_{cgr}})^2} \quad (2.33)$$

όπου: ET_{cgr} : τα επίγεια δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

ET_{csat} : τα δορυφορικά δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας,

$\overline{ET_{cgr}}$: ο μέσος όρος των επίγειων δεδομένων της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

2. Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ($RMSE$), και δίνεται από τον τύπο:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (ET_{cgr} - \overline{ET_{cgr}})^2}{K}} \quad (2.34)$$

όπου: ET_{cgr} : τα επίγεια δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

$\overline{ET_{cgr}}$: ο μέσος όρος των επίγειων δεδομένων της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

K : ο αριθμός των παρατηρήσεων

3. Το συστηματικό σφάλμα ($BIAS$), το οποίο δίνεται από τον τύπο:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_{cgr} - ET_{csat}) \quad (2.35)$$

όπου: ET_{cgr} : τα επίγεια δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

ET_{csat} : τα δορυφορικά δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

N : ο αριθμός των παρατηρήσεων

4. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), και δίνεται από τον τύπο:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{cgr} - \overline{ET_{cgr}})(ET_{csat} - \overline{ET_{csat}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{cgr} - \overline{ET_{cgr}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{csat} - \overline{ET_{csat}})^2}} \right)^2 \quad (2.36)$$

όπου: ET_{cgr} : τα επίγεια δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

$\overline{ET_{cgr}}$: ο μέσος όρος των επίγειων δεδομένων

ET_{csat} : τα δορυφορικά δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

$\overline{ET_{csat}}$: ο μέσος όρος των δορυφορικών δεδομένων της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

Αντίστοιχα, για τον φυτικό συντελεστή K_c , οι δείκτες είναι:

1. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας (Eff), ο οποίος έχει προταθεί από τους Nash και Sutcliffe (1970) και δίνεται από τον τύπο:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (K_{cgr} - K_{csat})^2}{\sum_{i=1}^n (K_{cgr} - \overline{K_{cgr}})^2} \quad (2.37)$$

όπου: K_{cgr} : τα επίγεια δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

K_{csat} : τα δορυφορικά δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

$\overline{K_{cgr}}$: ο μέσος όρος των επίγειων δεδομένων του φυτικού συντελεστή

2. Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), και δίνεται από τον τύπο:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (Kcgr - \overline{Kcgr})^2}{K}} \quad (2.38)$$

όπου: $Kcgr$: τα επίγεια δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

\overline{Kcgr} : ο μέσος όρος των επίγειων δεδομένων του φυτικού συντελεστή,

K : ο αριθμός των παρατηρήσεων

3. Το συστηματικό σφάλμα (BIAS), το οποίο δίνεται από τον τύπο:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Kcgr - Kcsat) \quad (2.39)$$

όπου: $Kcgr$: τα επίγεια δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

$Kcsat$: τα δορυφορικά δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

N : ο αριθμός των παρατηρήσεων

4. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), και δίνεται από τον τύπο:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Kcgr - \overline{Kcgr})(Kcsat - \overline{Kcsat})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Kcgr - \overline{Kcgr})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Kcsat - \overline{Kcsat})^2}} \right)^2 \quad (2.40)$$

όπου: $Kcgr$: τα επίγεια δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

\overline{Kcgr} : ο μέσος όρος των επίγειων δεδομένων του φυτικού συντελεστή,

$Kcsat$: τα δορυφορικά δεδομένα του φυτικού συντελεστή,

\overline{Kcsat} : ο μέσος όρος των δορυφορικών δεδομένων του φυτικού συντελεστή

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας επεξεργάστηκαν και δημιουργήθηκαν χάρτες ανάκλασης, χάρτες NDVI, χάρτες εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (ETc), χάρτες φυτικού συντελεστή (Kc), για την υπολεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού στην περιοχή του Πλατυκάμπου για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς έγινε με την μέθοδο FAO Penman-Monteith. Η χρονοσειρά που χρησιμοποιήθηκε αφορούσε δεδομένα από δορυφορικές εικόνες του δορυφόρου Landsat, για την χρονική περίοδο από το 2004 έως το 2010.

Παρακάτω δίνονται οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc και του φυτικού συντελεστή Kc στις ημερομηνίες που ήταν διαθέσιμες οι δορυφορικές εικόνες.

Πίνακας 3.1: Τιμές της ΕΤε και του Κε για το έτος 2004

Έτος 2004				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ΕΤε	Κε	ΕΤε	Κε
6/5	0,09	0,14	0,06	0,11
22/5	0,11	0,14	0,18	0,23
23/6	0,48	0,42	0,62	0,53
9/7	0,76	0,75	0,76	0,76
25/7	0,6	1,09	0,5	0,85
26/8	1,62	1,14	1,14	0,9
11/9	0,58	0,67	0,46	0,53

Πίνακας 3.2: Τιμές της ΕΤε και του Κε για το έτος 2005

Έτος 2005				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ΕΤε	Κε	ΕΤε	Κε
9/5	0,29	0,14	0,46	0,22
26/6	0,36	0,48	0,44	0,5
12/7	1,46	0,83	1,3	0,75
28/7	2,3	1,14	2,11	0,99
13/8	2,8	1,13	2,56	0,9

Πίνακας 3.3: Τιμές της ETc και του Kc για το έτος 2006

Έτος 2006				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ETc	Kc	ETc	Kc
9/3			0,16	0,5
28/5	0,15	0,14	0,27	0,26
29/6	0,32	0,55	0,33	0,57
31/7			0,79	0,79
16/8			1,24	1,03
1/9			1,04	0,75
3/10	0,24	0,63	0,26	0,58

Πίνακας 3.4: Τιμές της ETc και του Kc για το έτος 2007

Έτος 2007				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ETc	Kc	ETc	Kc
7/5	0,09	0,14	0,22	0,36
24/6	1,67	0,53	1,62	0,51
10/7	0,95	0,86	0,79	0,72
26/7	2,78	1,17	2,27	0,94
27/8	3,98	0,72	5,52	0,9
28/9	0,29	0,67	0,3	0,71

Πίνακας 3.5: Τιμές της ΕΤε και του Κε για το έτος 2008

Έτος 2008				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ΕΤε	Κε	ΕΤε	Κε
1/5	0,12	0,14	0,01	0,06
17/5	0,17	0,14	0,09	0,09
2/6	0,37	0,14	0,13	0,03
18/6	0,31	0,32	0,48	0,38
4/7	0,9	0,68	0,93	0,63
20/7	1,7	1,04	1,25	0,79
5/8	1,14	1,16	0,81	0,84
21/8	1,62	1,15	0,91	0,62
6/9	0,89	0,7	0,41	0,32

Πίνακας 3.6: Τιμές της ΕΤε και του Κε για το έτος 2009

Έτος 2009				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ΕΤε	Κε	ΕΤε	Κε
20/5	0,12	0,14	0,19	0,21
5/6	0,14	0,14	0,31	0,3
21/6	1,31	0,64	0,43	0,21
7/7	0,55	1,07	0,37	0,71
23/7	2,01	1,16	1,69	0,34
24/8	1,09	0,68	0,96	0,2

Πίνακας 3.7: Τιμές της ΕΤε και του Κε για το έτος 2010

Έτος 2010				
Ημερομηνίες	Επίγεια δεδομένα		Δορυφορικά δεδομένα	
	ΕΤε	Κε	ΕΤε	Κε
21/4			0,14	0,19
7/5	0,11	0,14	0,32	0,35
28/6	0,73	0,857	0,76	0,12
27/8	0,95	0,67	1,2	0,78
28/9	0,84	0,67	0,36	0,24
3/10	0,61	0,65	0,99	0,97

Για τον έλεγχο της πιστότητας των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω στατιστικοί δείκτες. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε

είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας (Eff), ο οποίος έχει προταθεί από τους Nash και Sutcliffe (1970), το συστηματικό σφάλμα (BIAS), η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και τέλος ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2).

Το εύρος τιμών του Eff είναι από το $-\infty$ έως το 1.

Η βέλτιστη τιμή του συστηματικού σφάλματος (BIAS) είναι κοντά στο 0.

Το εύρος τιμών της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) κυμαίνεται από το 0 έως το $+\infty$.

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 πρέπει να κυμαίνεται από 0 έως +1. Όσο πιο κοντά είναι σε αυτές τις τιμές τόσο πιο στενά συνδέονται μεταξύ τους.

Πίνακας 3.8: Τιμές στατιστικών δεικτών

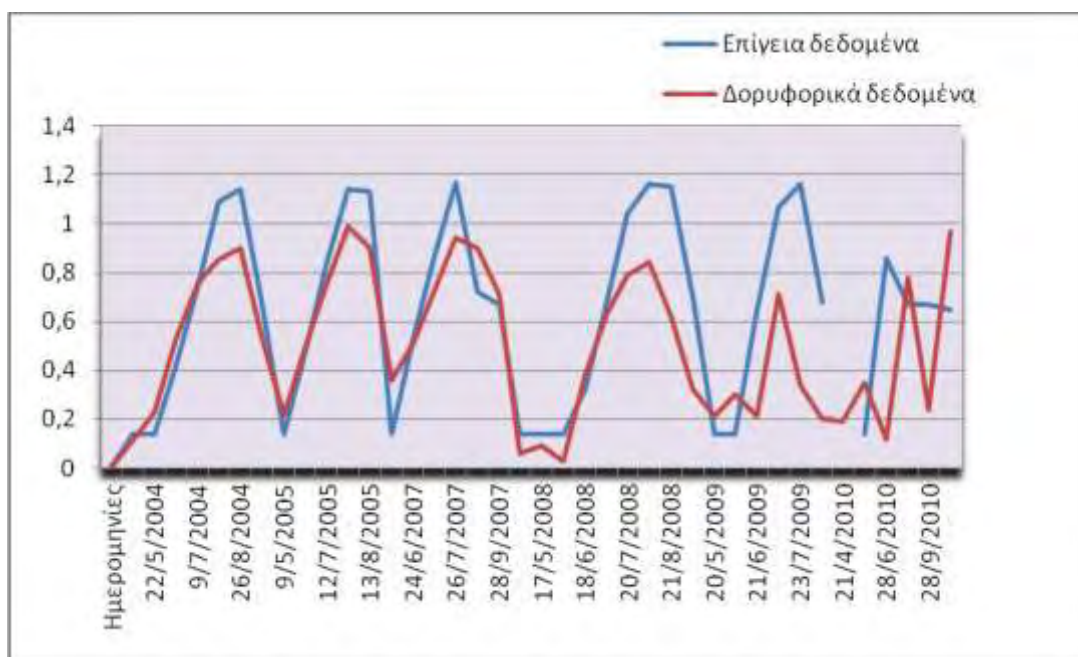
	kc		kc empirical		Etc		Etc empirical	
	field 1	field 2	field 1	field 2	field 1	field 2	field 1	field 2
Eff	0,37	0,43	0,42	0,48	0,75	0,86	0,73	0,83
RMSE	0,36	0,34	0,36	0,34	0,88	0,18	0,88	0,99
BIAS	0,12	0,1	0,06	0,04	0,17	0,11	0,07	0,03
R2	0,49	0,52	0,48	0,52	0,79	0,89	0,8	0,88

Οι τιμές τους κυμαίνονται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Τα αποτελέσματα μας θεωρούνται ικανοποιητικά και συμφωνούν με τις επίγειες παρατηρήσεις.

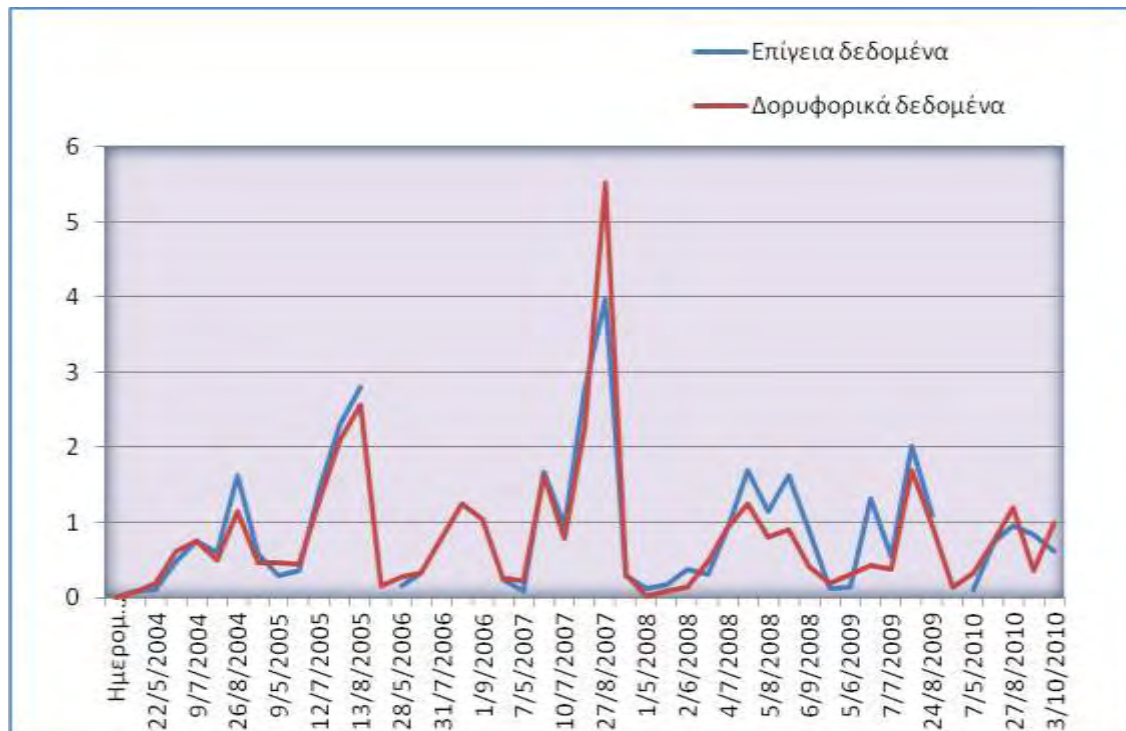
Αυτό είναι εμφανές και από τα παρακάτω διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα του φυτικού συντελεστή, φαίνεται ότι ο φυτικός συντελεστής παίρνει την μέγιστη τιμή του κατά το ενδιάμεσο στάδιο ανάπτυξης. Κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης, δηλαδή από την ημερομηνία σποράς ο φυτικός συντελεστής έχει χαμηλές

τιμές μέχρι το στάδιο της ανάπτυξης όπου αρχίζει να χαρακτηρίζεται από έντονη φυτοκάλυψη και κατά συνέπεια να αυξάνει και ο φυτικός συντελεστής. Στο τελικό στάδιο της ωρίμανσης, δηλαδή μέχρι την συγκομιδή της καλλιέργειας η τιμή του φυτικού συντελεστή μειώνεται όσο πλησιάζει το χρόνο της συγκομιδής. Το ίδιο παρατηρείται και με τα δορυφορικά δεδομένα.

Η διάρκεια των διαφόρων βλαστικών σταδίων ανάπτυξης των διαφόρων καλλιεργειών επηρεάζεται από τις διάφορες κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή.



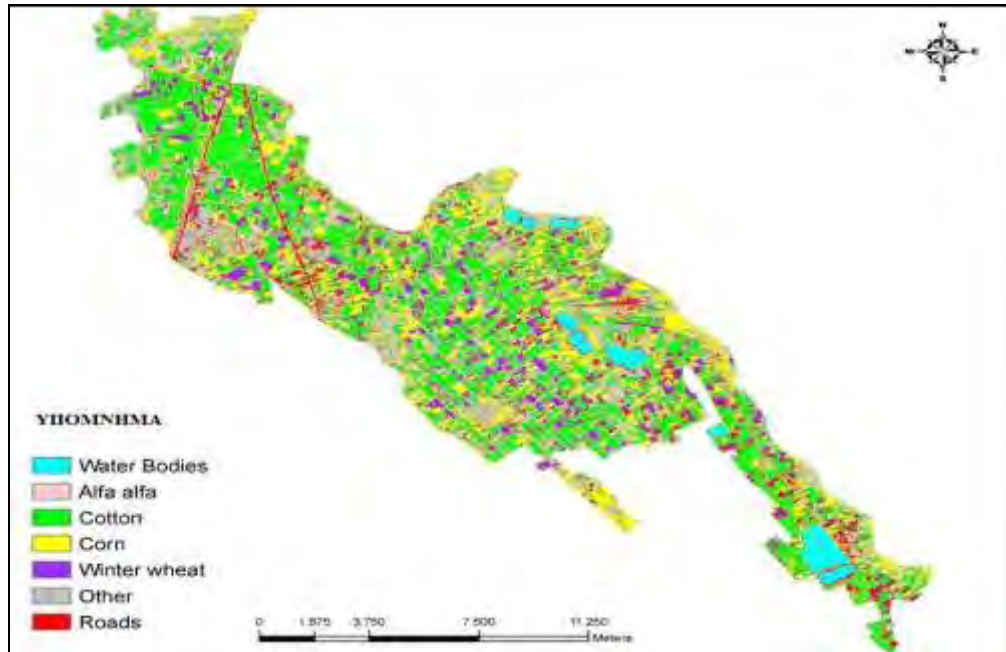
Σχήμα 3.1. : Διάγραμμα φυτικού συντελεστή Kc



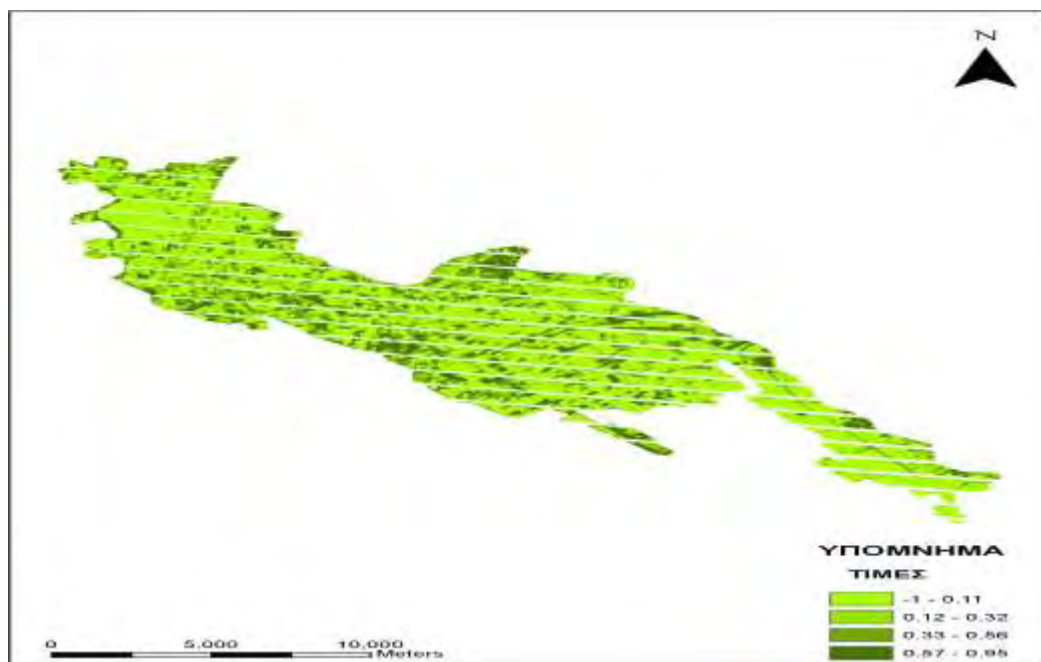
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc

Στη συνέχεια, οι χάρτες που δημιουργήθηκαν για την περιοχή μελέτης, μας δείχνουν ότι με την καλή αξιοποίηση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και με τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (ΓΣΠ), επιτυγχάνεται η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε ευρεία κλίμακα καλλιέργειες, καθώς προσφέρουν και καλή φασματική ανάλυση, έχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη, δεδομένου ότι τα δορυφορικά δεδομένα παρέχουν εκτιμήσεις σε μεγάλη χωρική και χρονική ανάλυση. Δηλαδή, παρουσιάζεται τόσο σε όλη την επιφάνεια της περιοχής μελέτης μας, όσο και για τα έτη που μελετάμε.

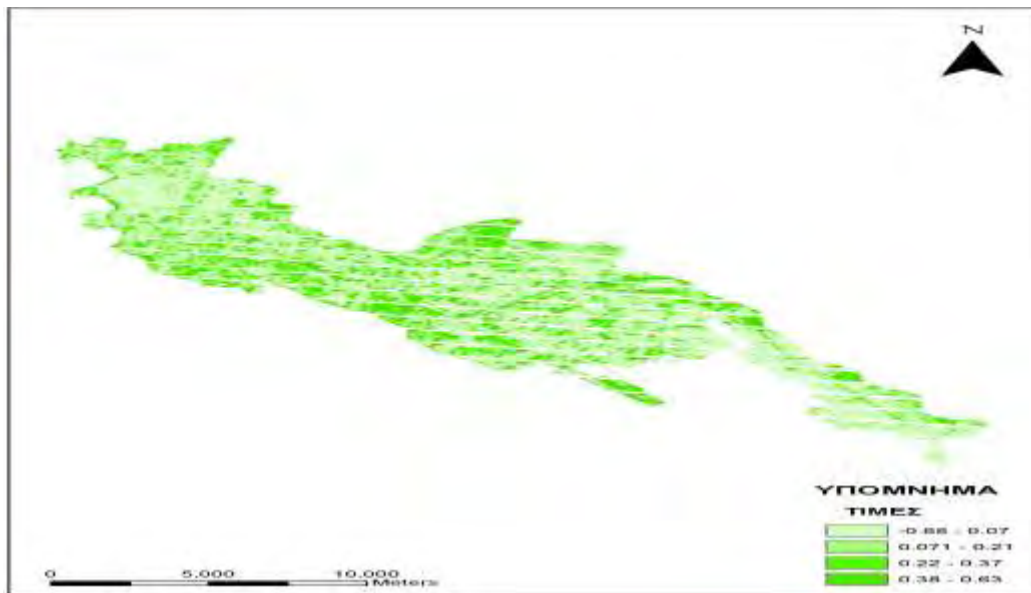
Αναλύοντας τα αποτελέσματα μας δημιουργήθηκαν οι παρακάτω χάρτες:



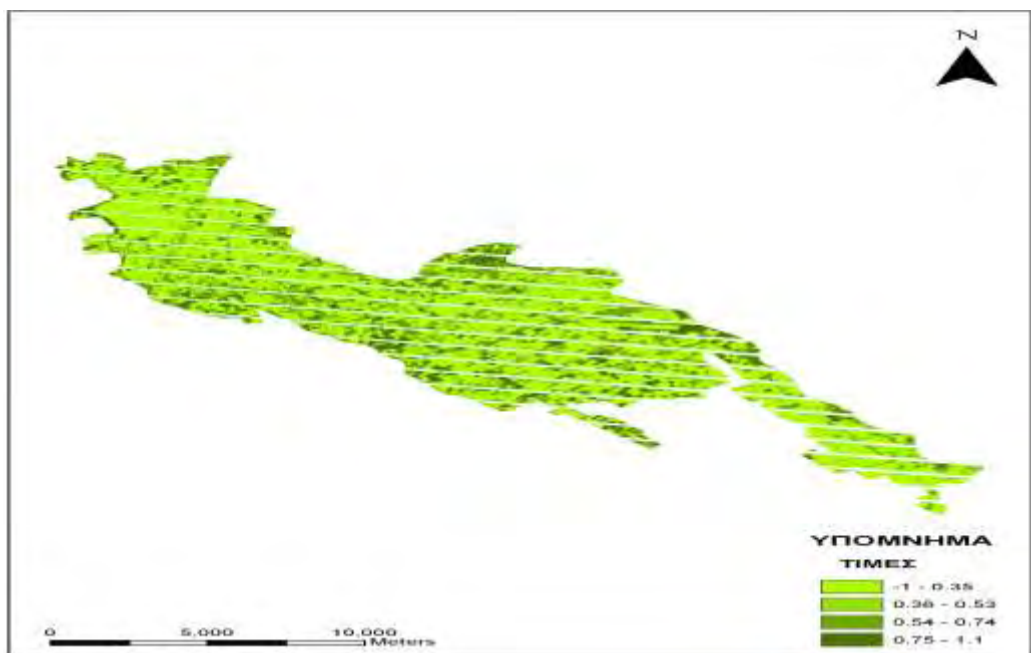
Εικόνα 3.1: Χάρτης ταξινόμησης καλλιεργειών της υπολεκάνης απορροής



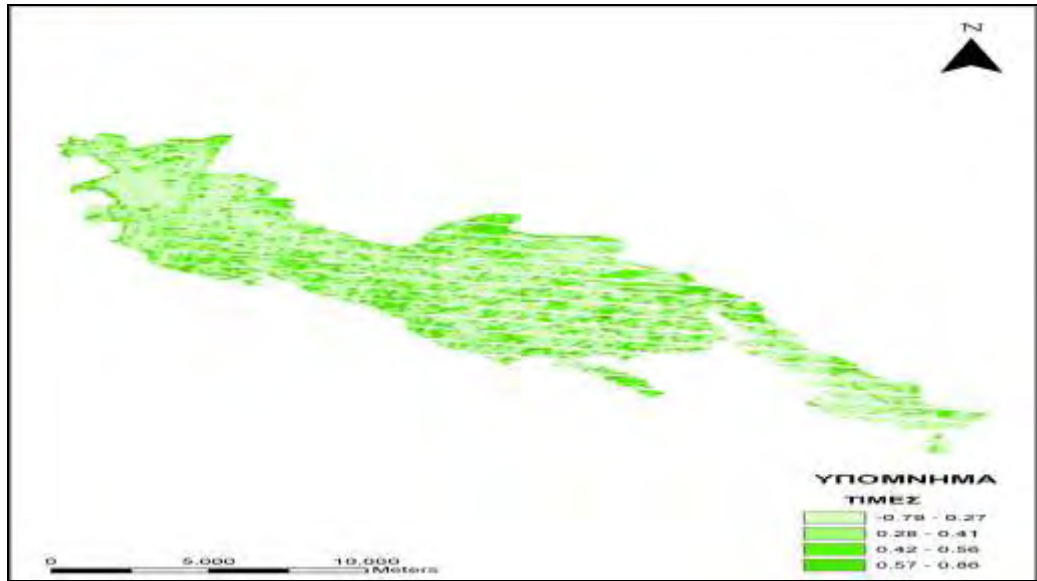
Εικόνα 3.2: Χάρτης φυτικού συντελεστή K_c της υπολεκάνης απορροής (06/05/2004)



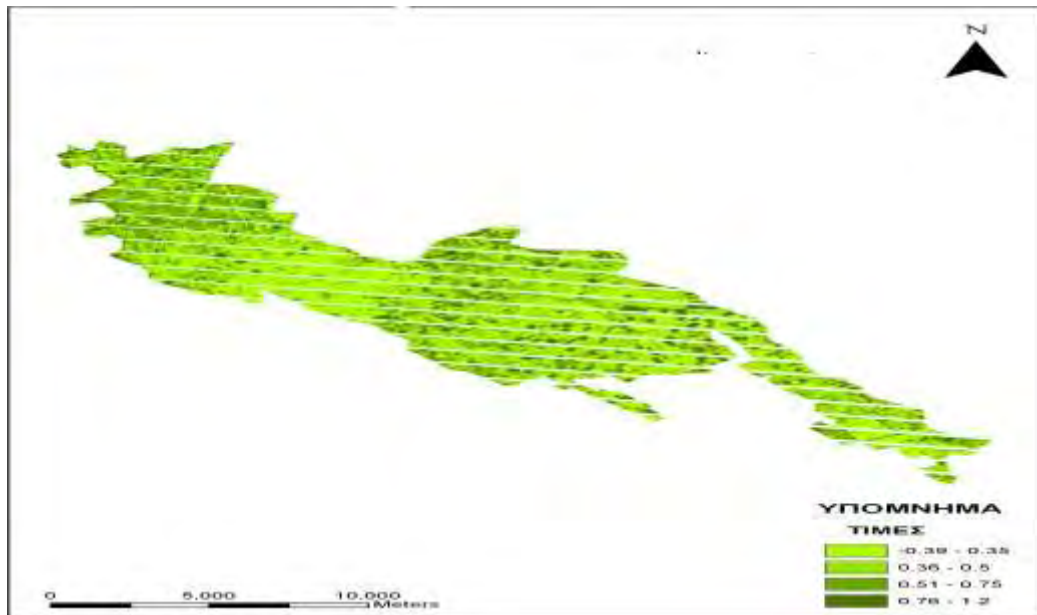
Εικόνα 3.3: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ΕΤc της υπολεκάνης απορροής (06/05/2004)



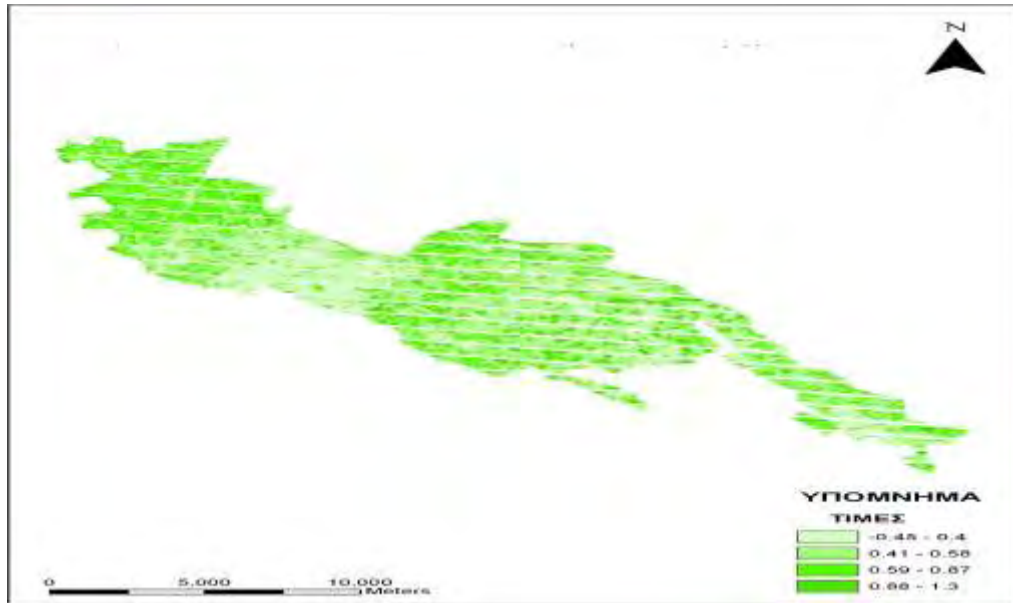
Εικόνα 3.4: Χάρτης φυτικού συντελεστή Κc της υπολεκάνης απορροής (22/05/2004)



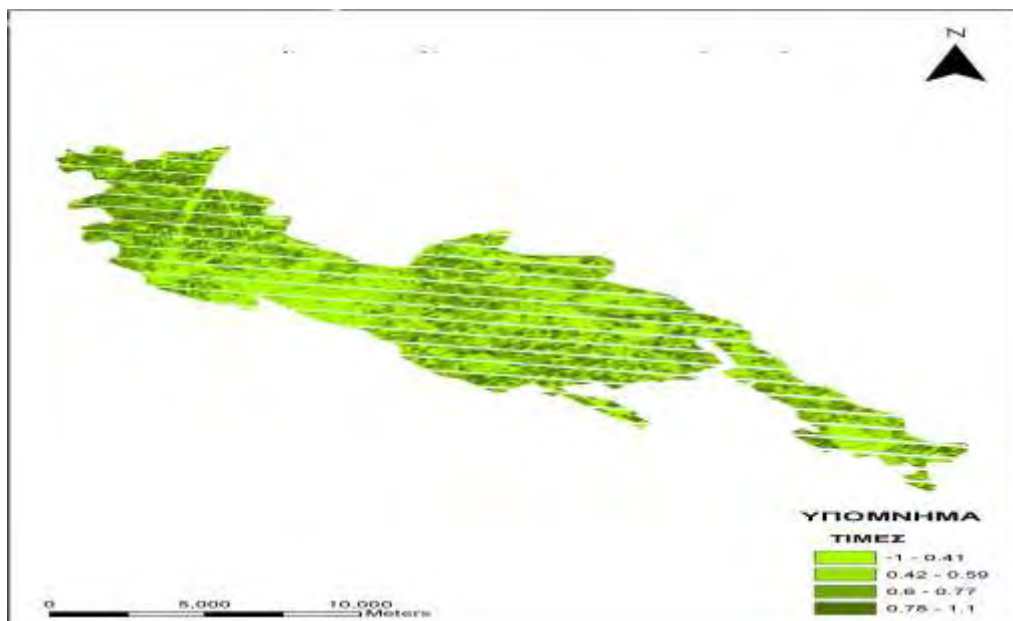
Εικόνα 3.5: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (22/05/2004)



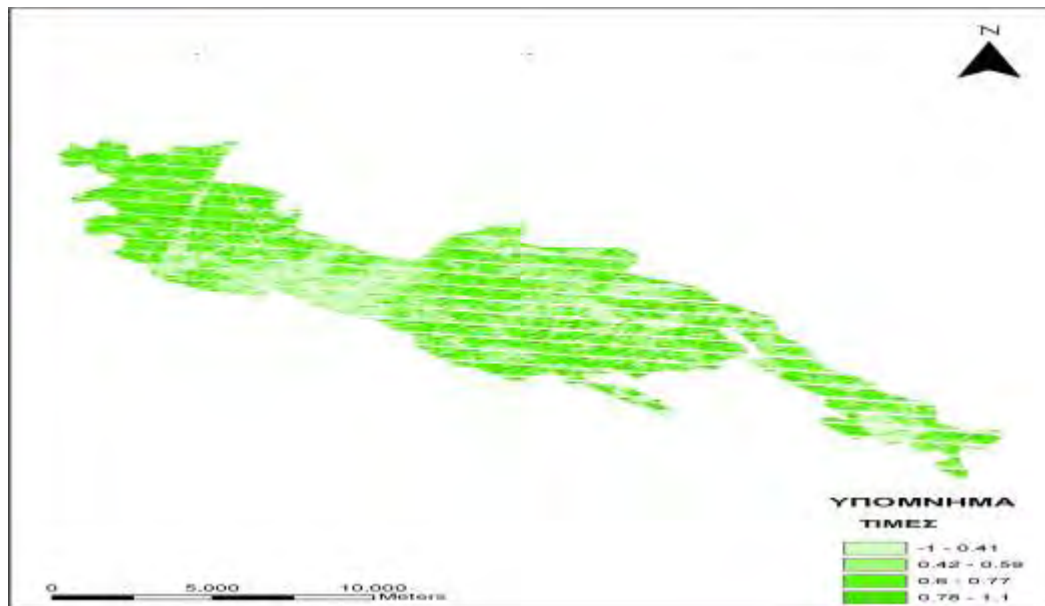
Εικόνα 3.6: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (23/06/2004)



Εικόνα 3.7: Χάρτης εξατμισοδιαπονοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (23/06/2004)



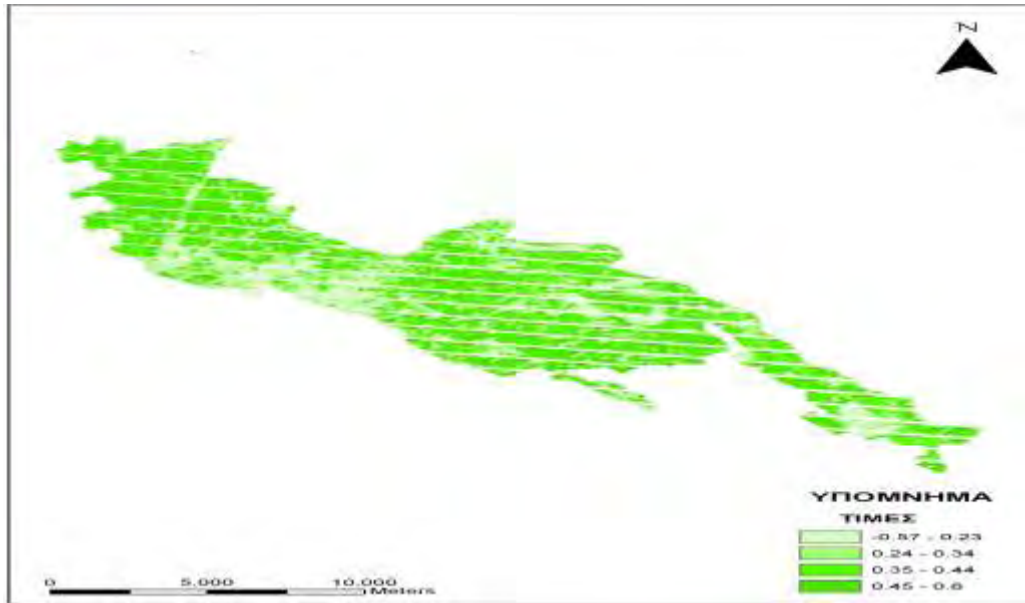
Εικόνα 3.8: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (09/07/2004)



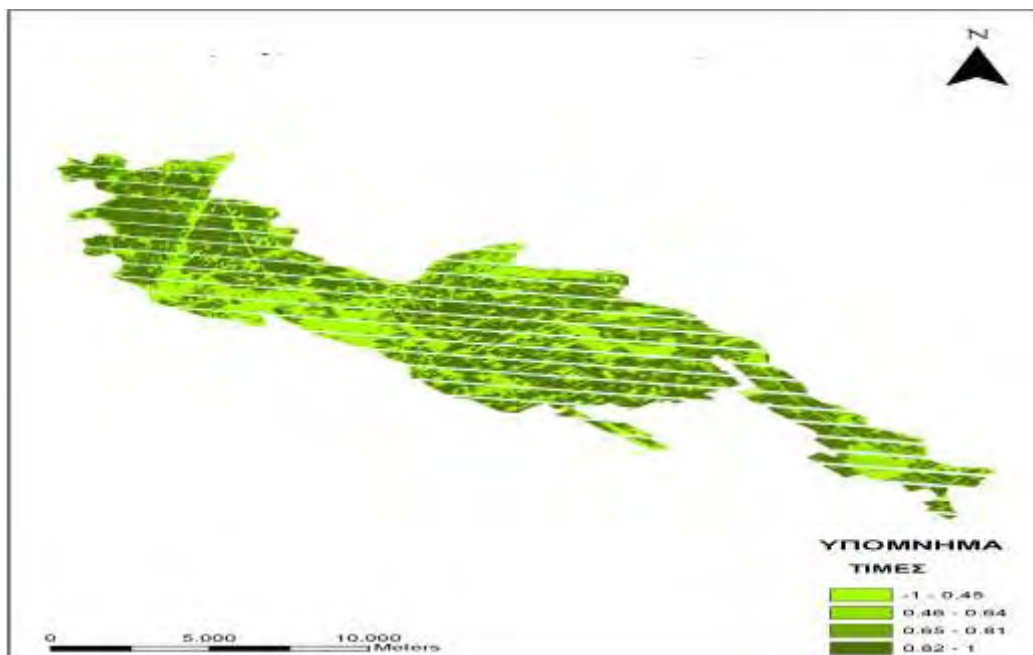
Εικόνα 3.9: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (09/07/2004)



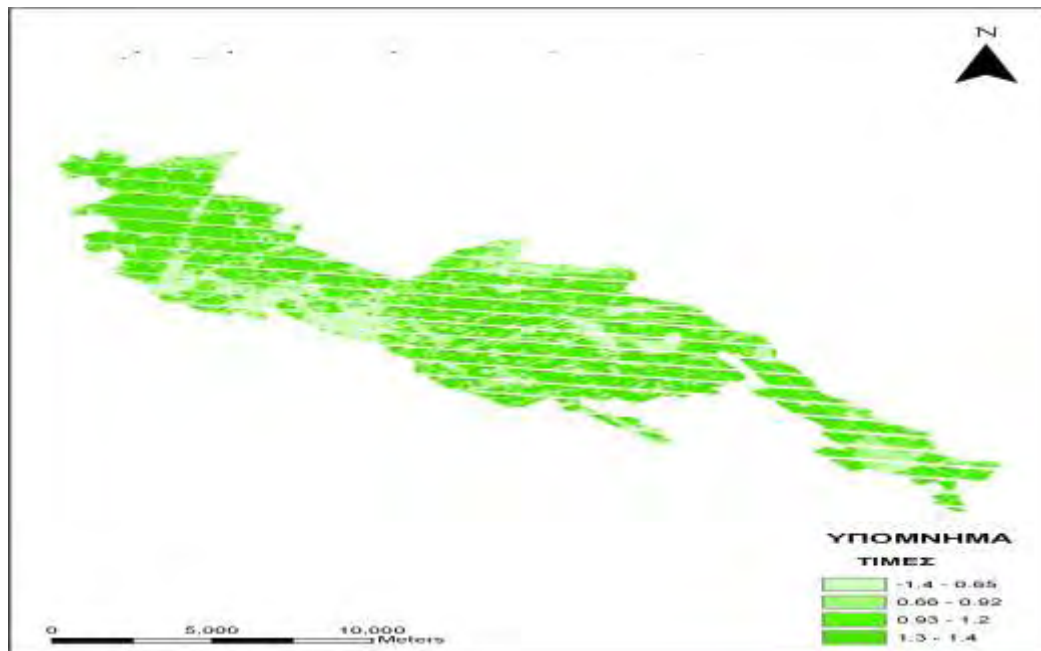
Εικόνα 3.10: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (25/07/2004)



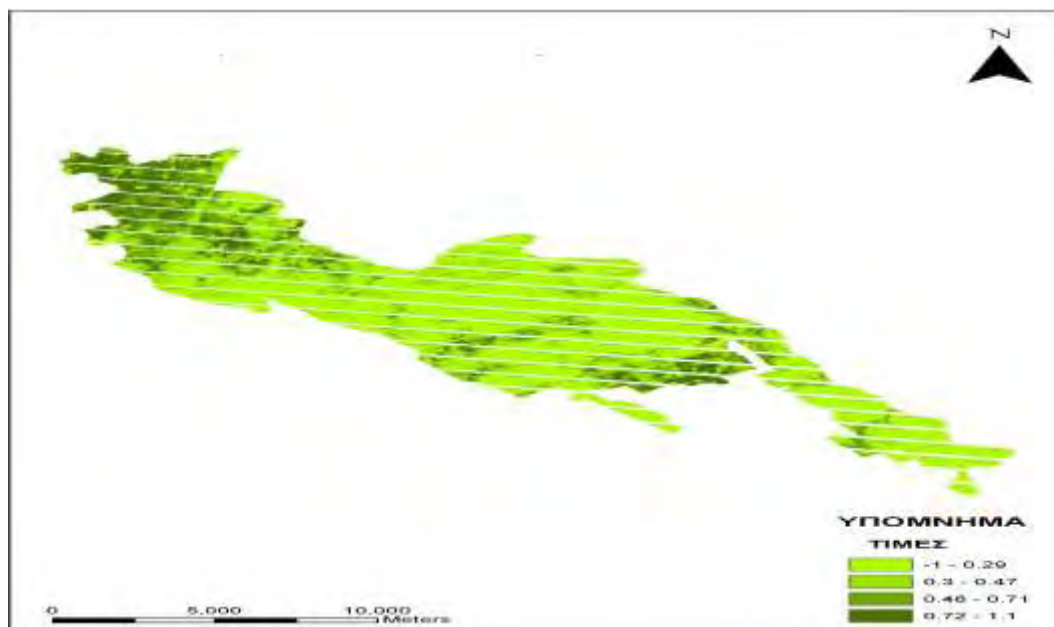
Εικόνα 3.11: Χάρτης εξαμισοδιαπολής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής
(25/07/2004)



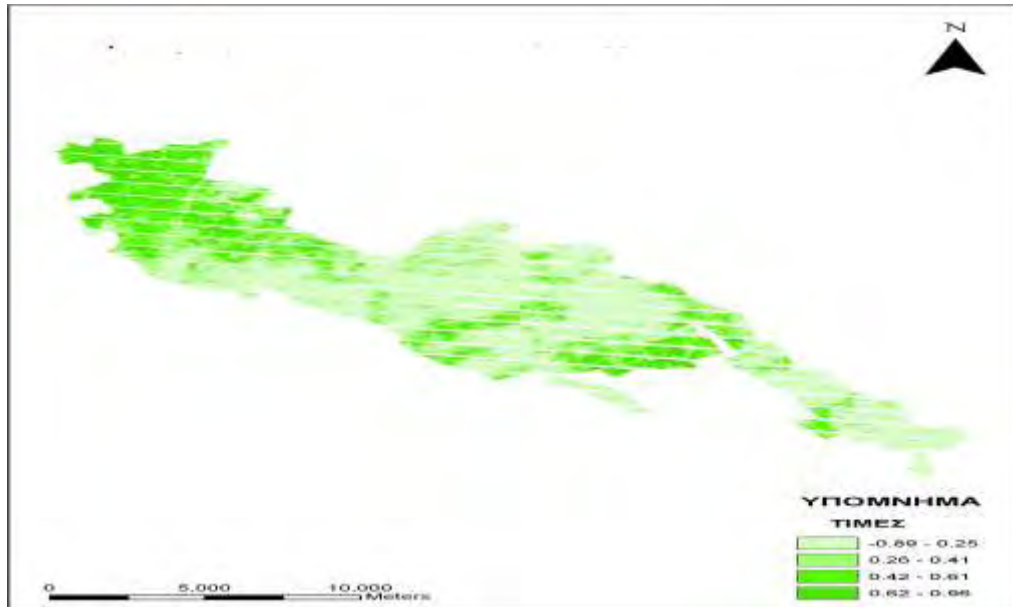
Εικόνα 3.12: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής
(26/08/2004)



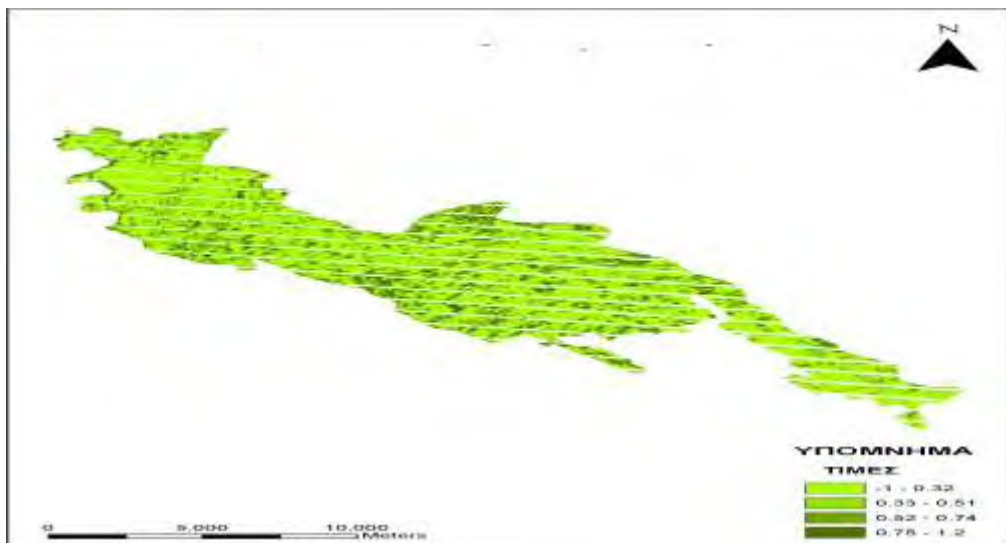
Εικόνα 3.13: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (26/08/2004)



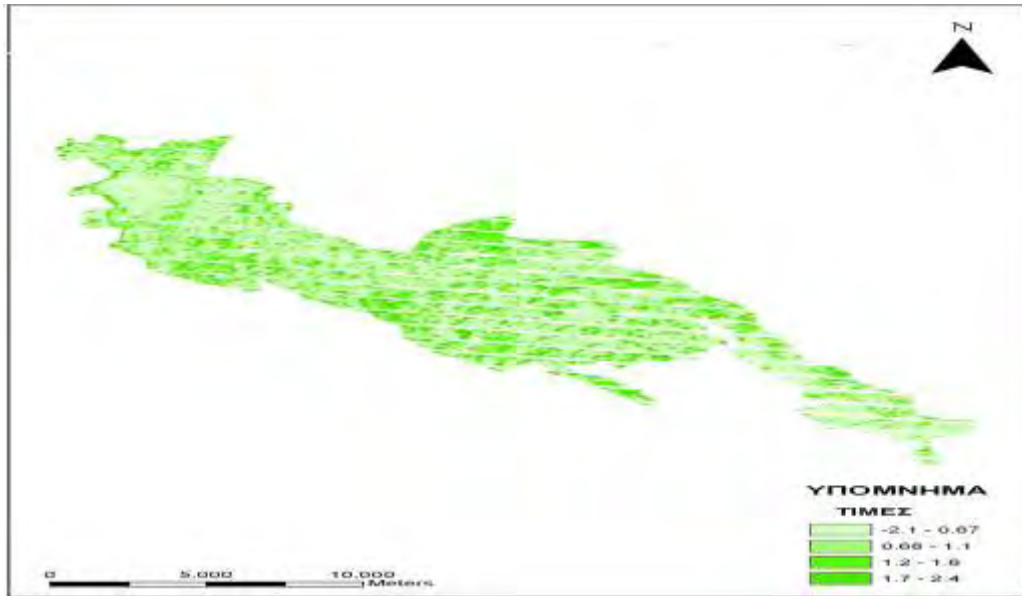
Εικόνα 3.14: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (11/09/2004)



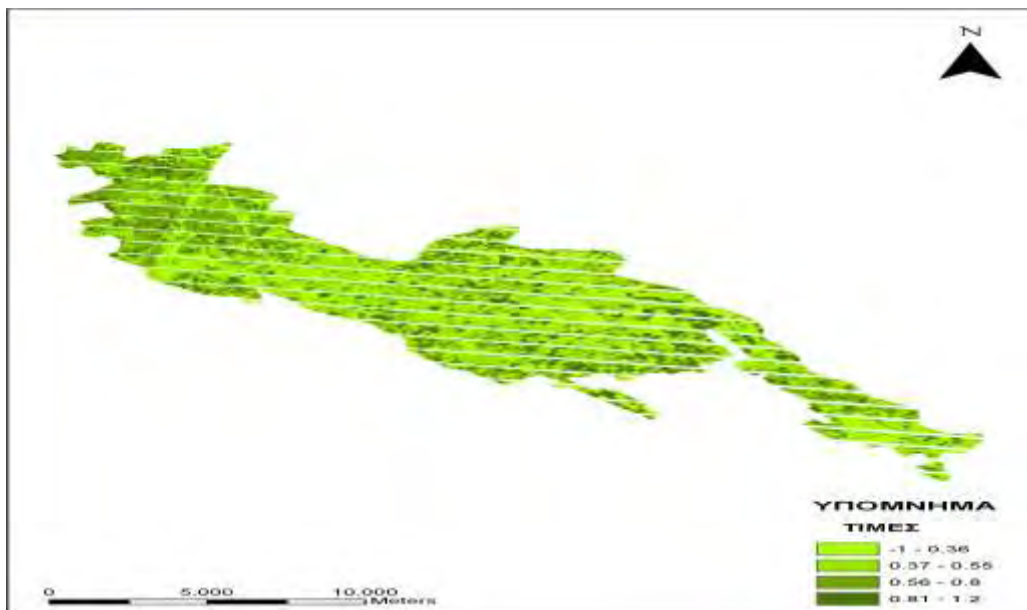
Εικόνα 3.15: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (11/09/2004)



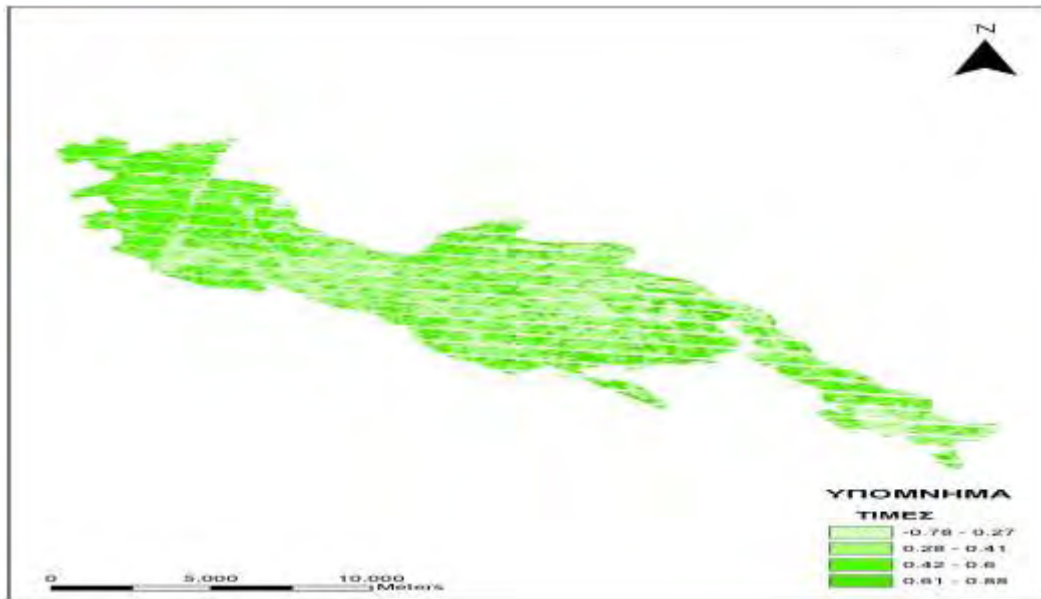
Εικόνα 3.16: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (09/05/2005)



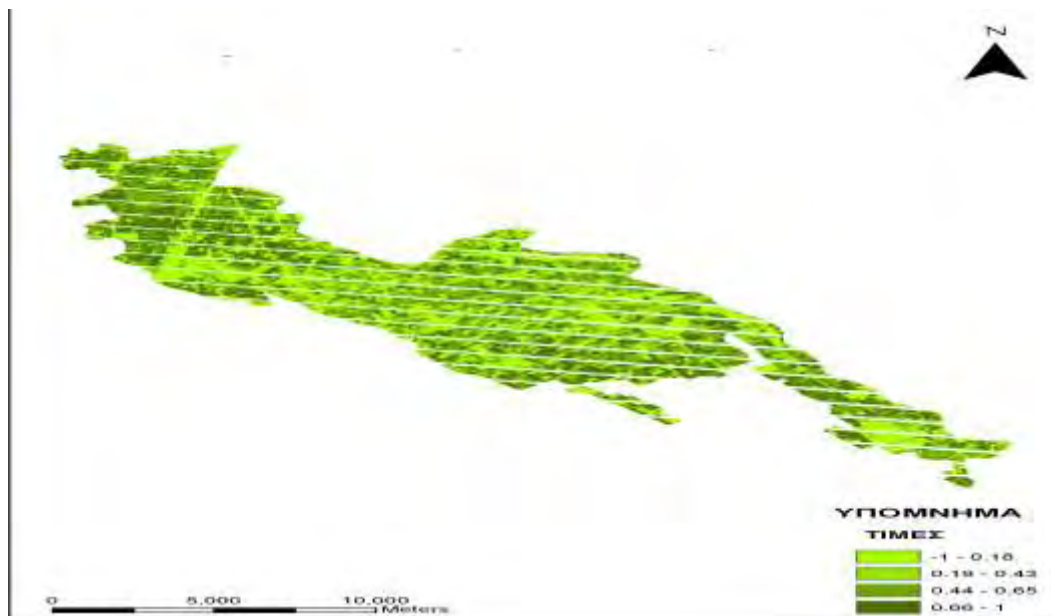
Εικόνα 3.17: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (09/05/2005)



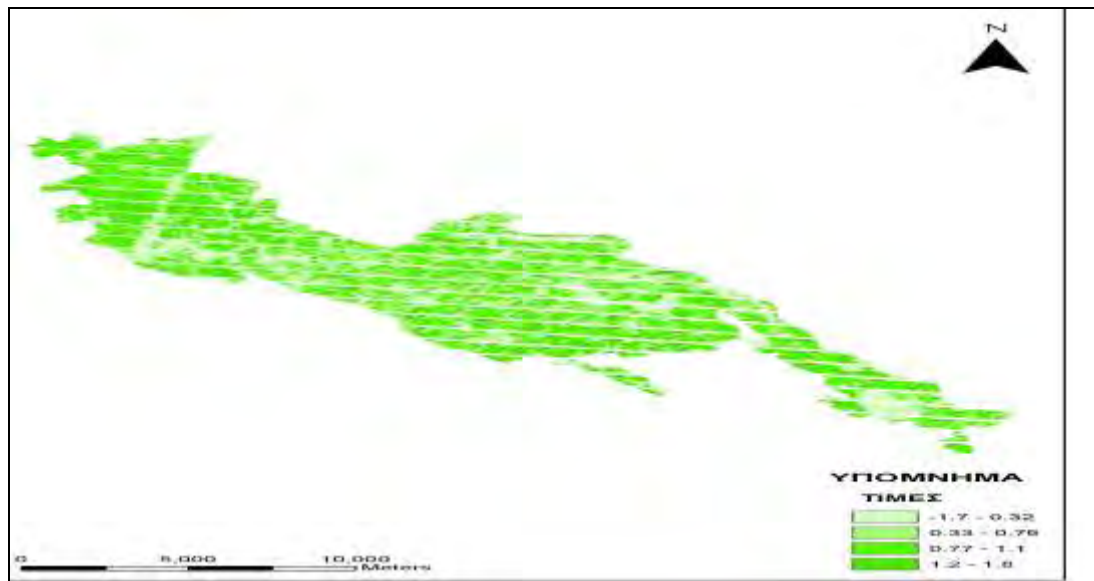
Εικόνα 3.18: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (26/06/2005)



Εικόνα 3.19: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ΕΤc της υπολεκάνης απορροής (26/06/2005)



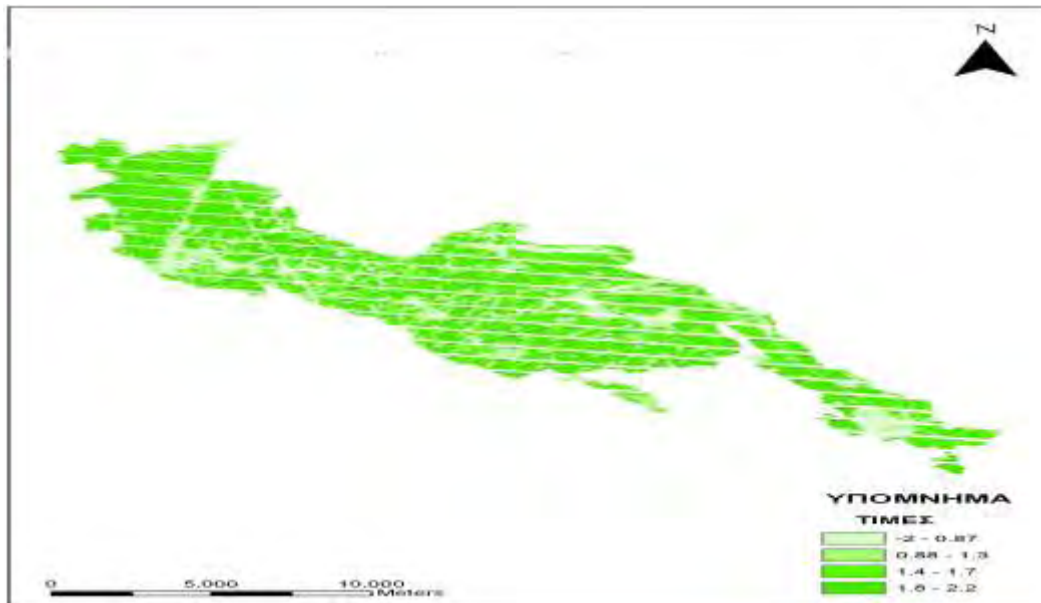
Εικόνα 3.20: Χάρτης φυτικού συντελεστή K_c της υπολεκάνης απορροής (12/07/2005)



Εικόνα 3.21: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (12/07/2005)



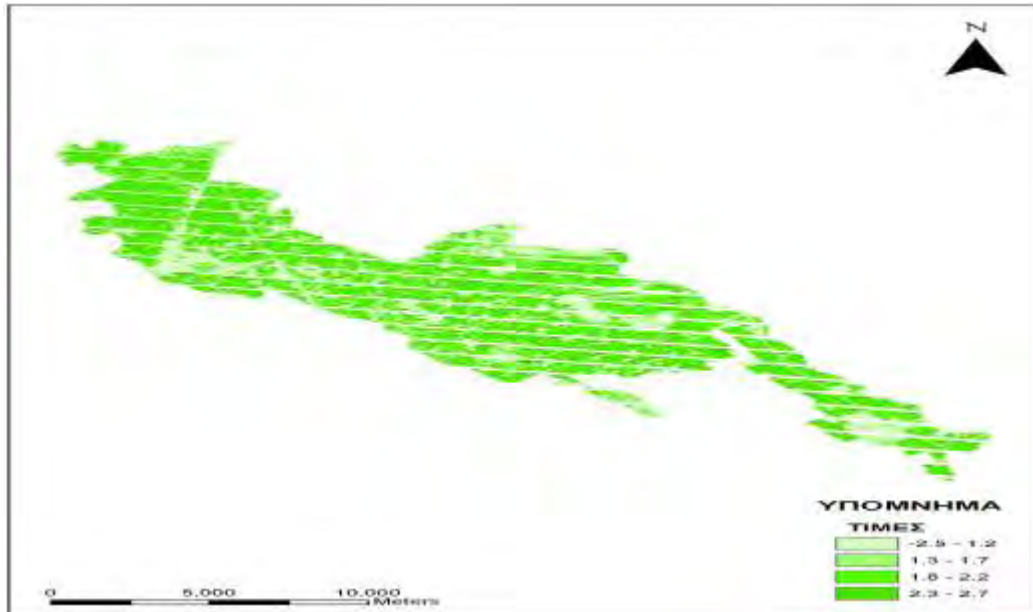
Εικόνα 3.22: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (28/07/2005)



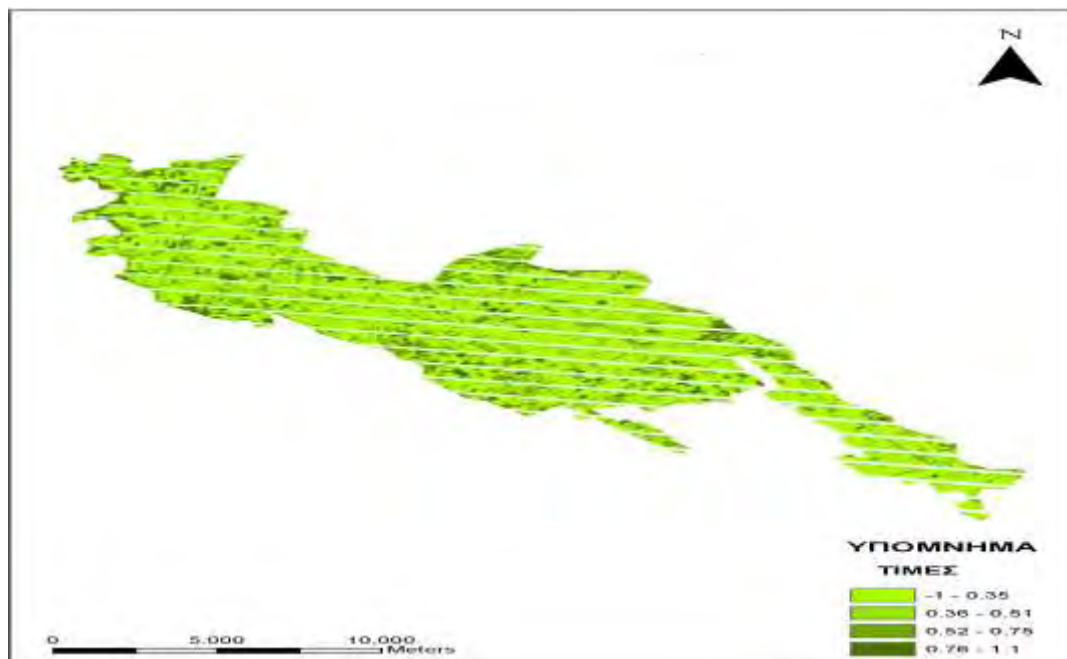
Εικόνα 3.23: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (28/07/2005)



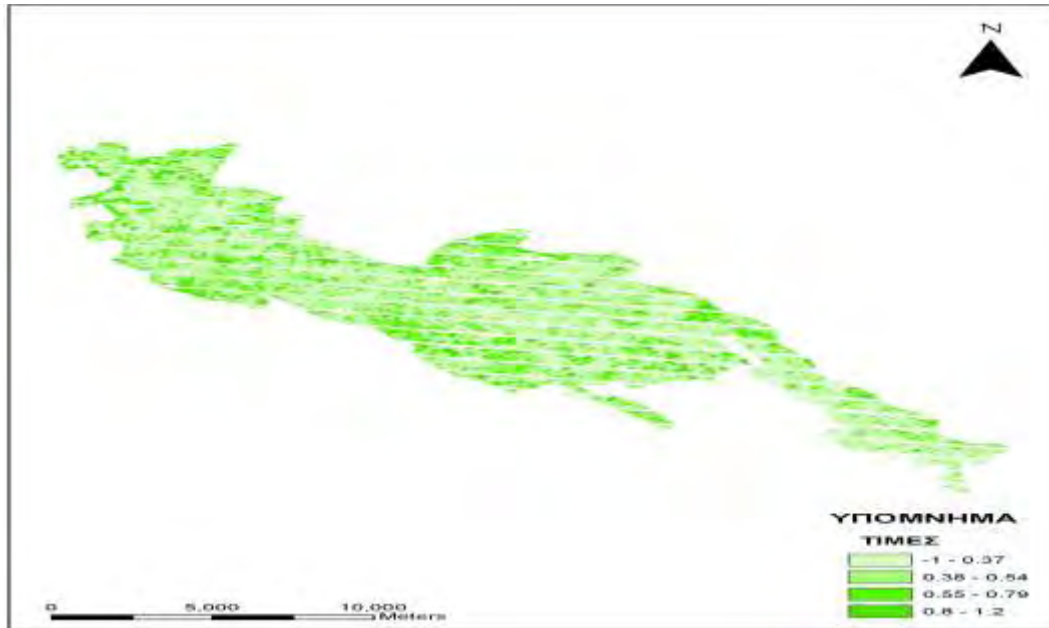
Εικόνα 3.24: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (13/08/2005)



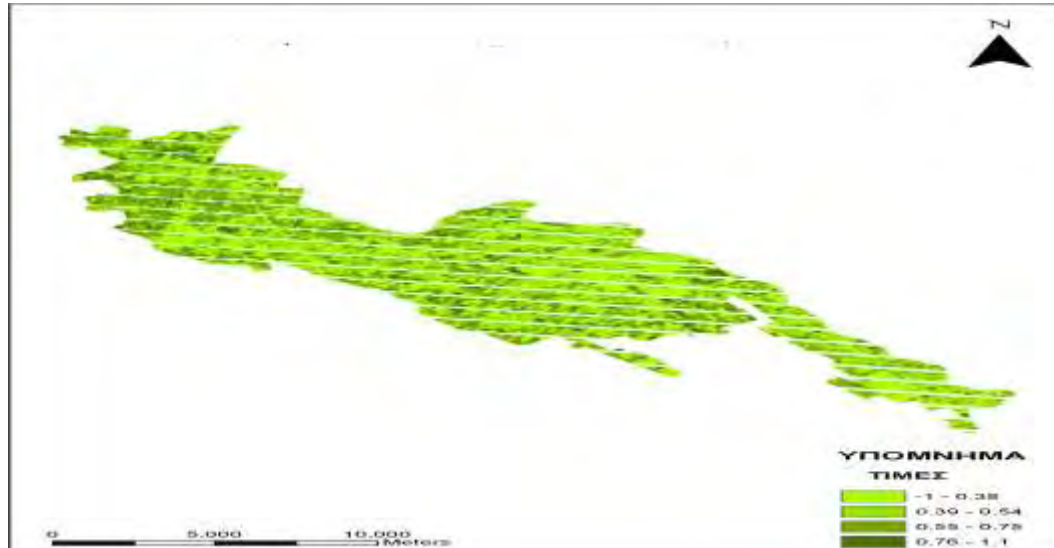
Εικόνα 3.25: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (13/08/2005)



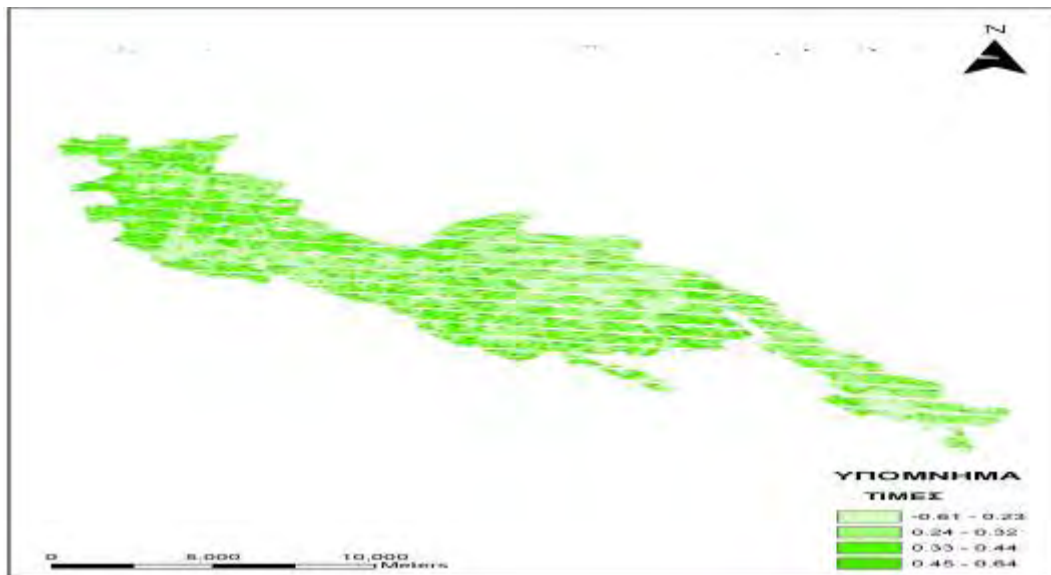
Εικόνα 3.26: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (28/05/2006)



Εικόνα 3.27: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (28/05/2006)



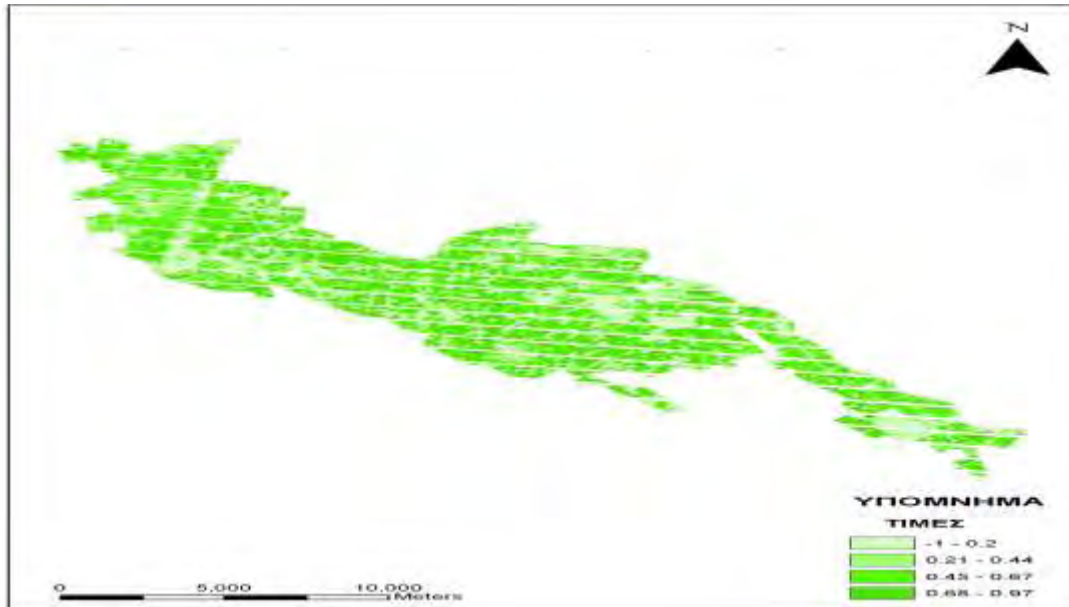
Εικόνα 3.28: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (29/06/2006)



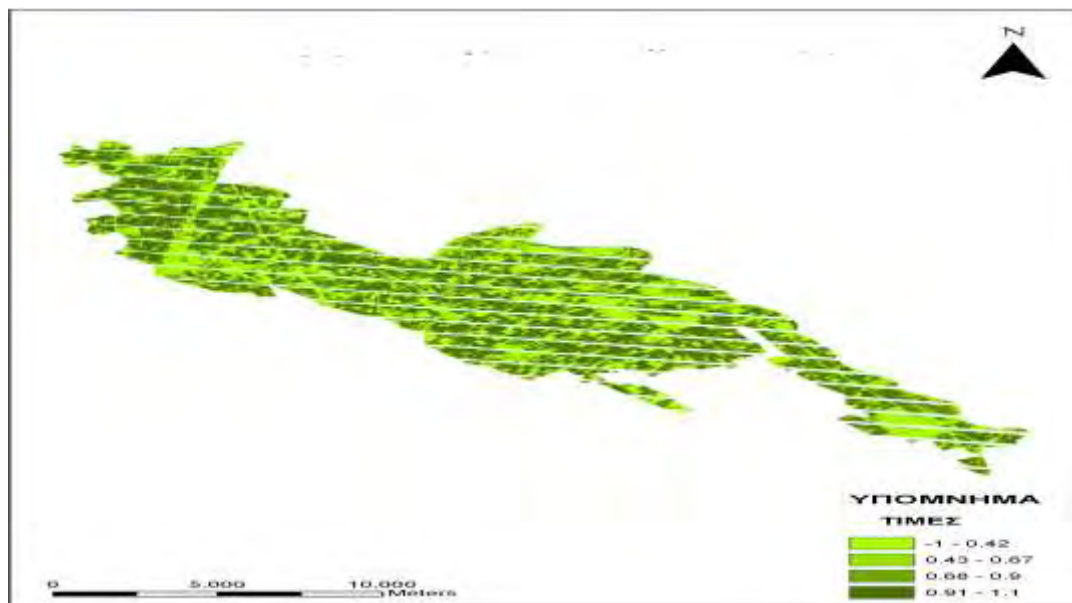
Εικόνα 3.29: Χάρτης εξαμυσοδιαπονοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (29/06/2006)



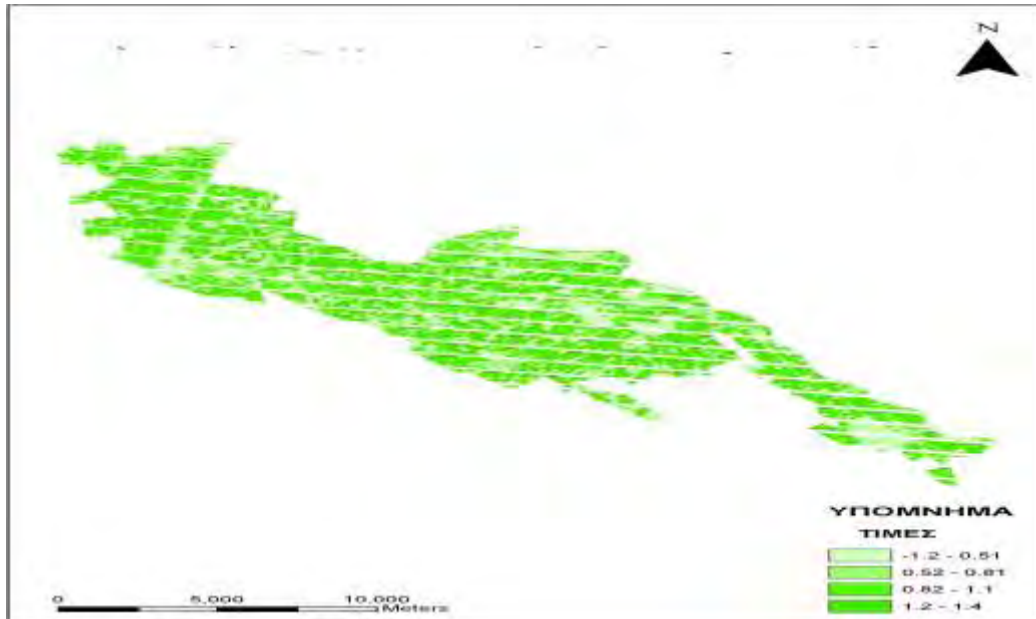
Εικόνα 3.30: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (31/07/2006)



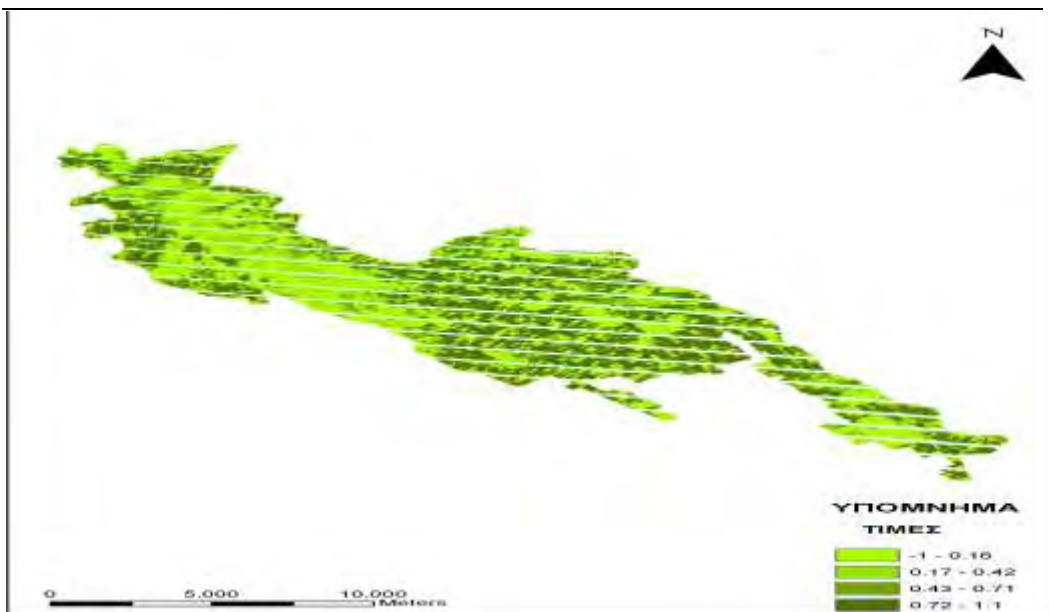
Εικόνα 3.31: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (31/07/2006)



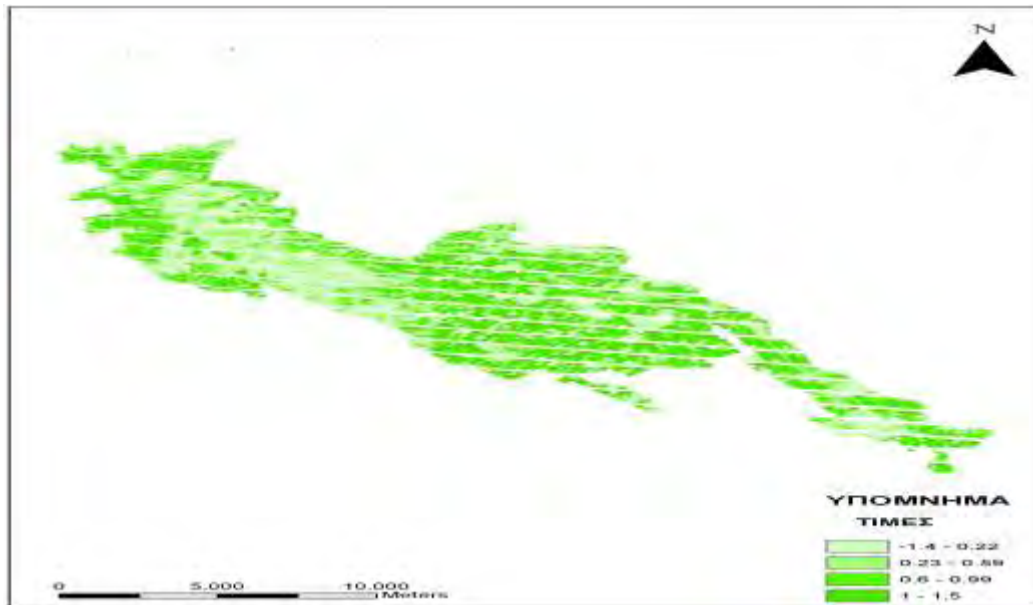
Εικόνα 3.32: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (16/08/2006)



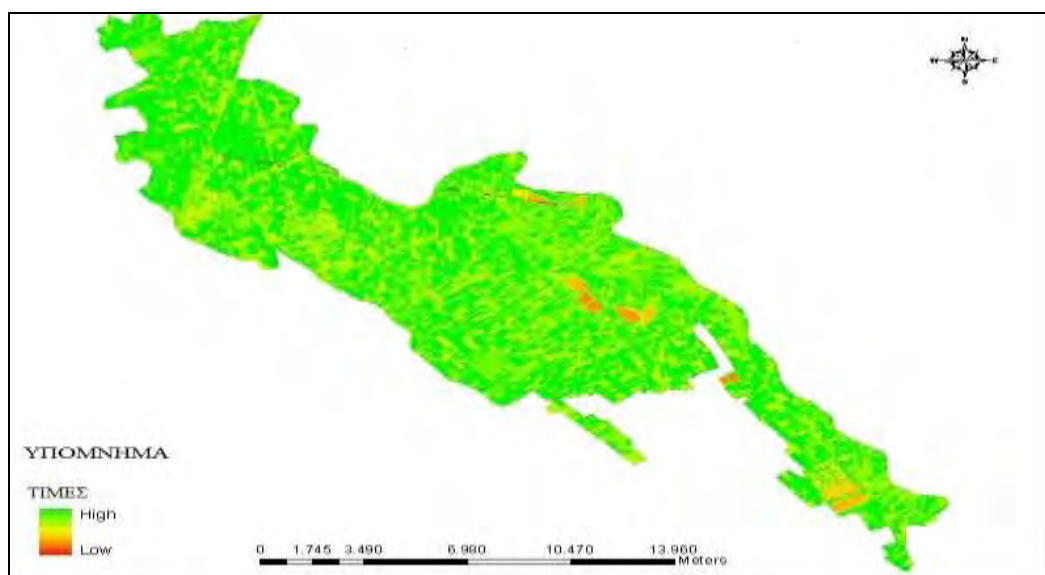
Εικόνα 3.33: Χάρτης εξατισμοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (16/08/2006)



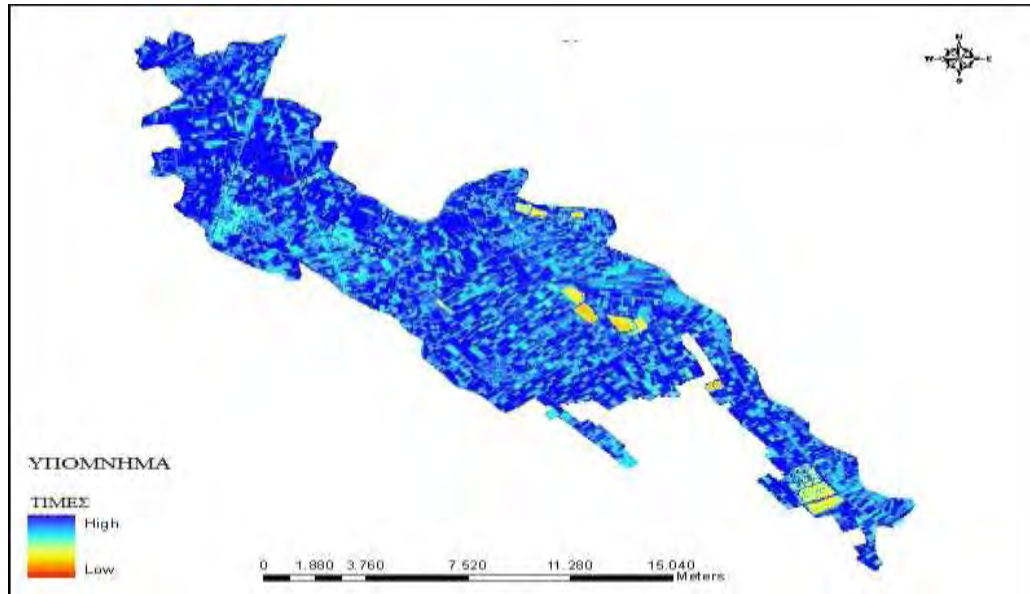
Εικόνα 3.34: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (01/09/2006)



Εικόνα 3.35: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (01/09/2006)



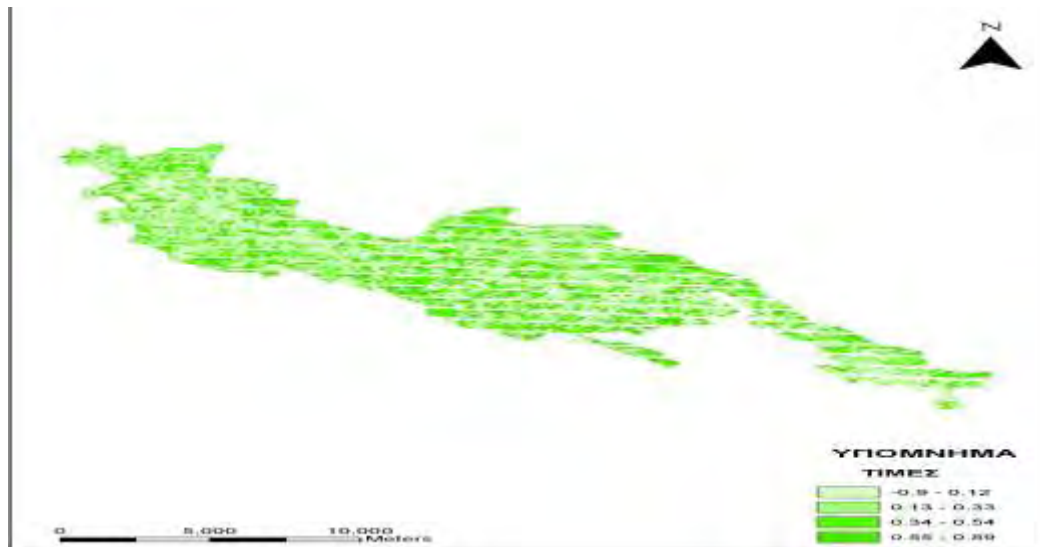
Εικόνα 3.36: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (10/07/2007)



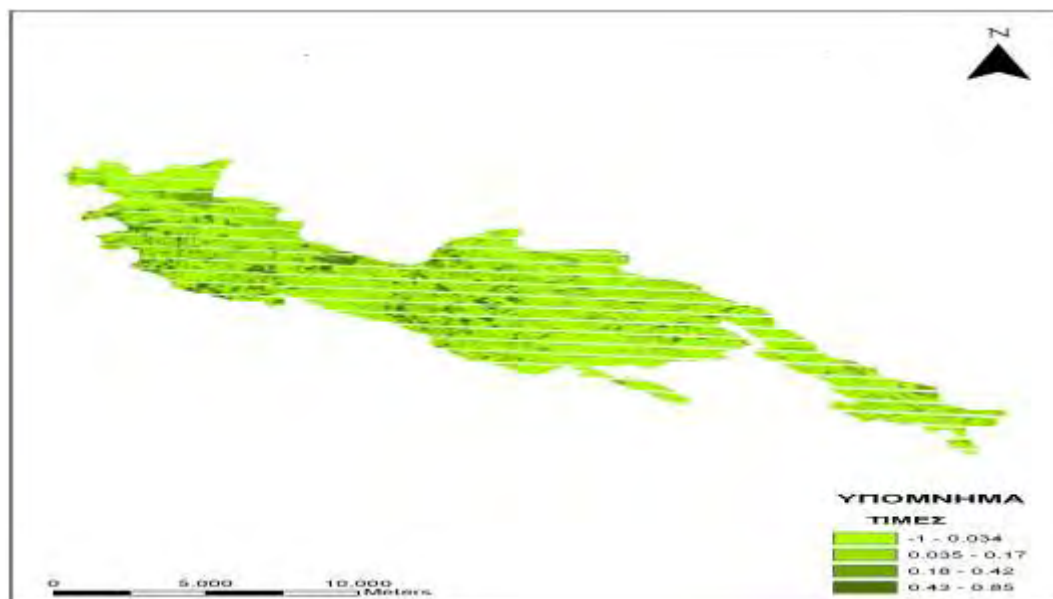
Εικόνα 3.37: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ΕΤε της υπολεκάνης απορροής (10/07/2007)



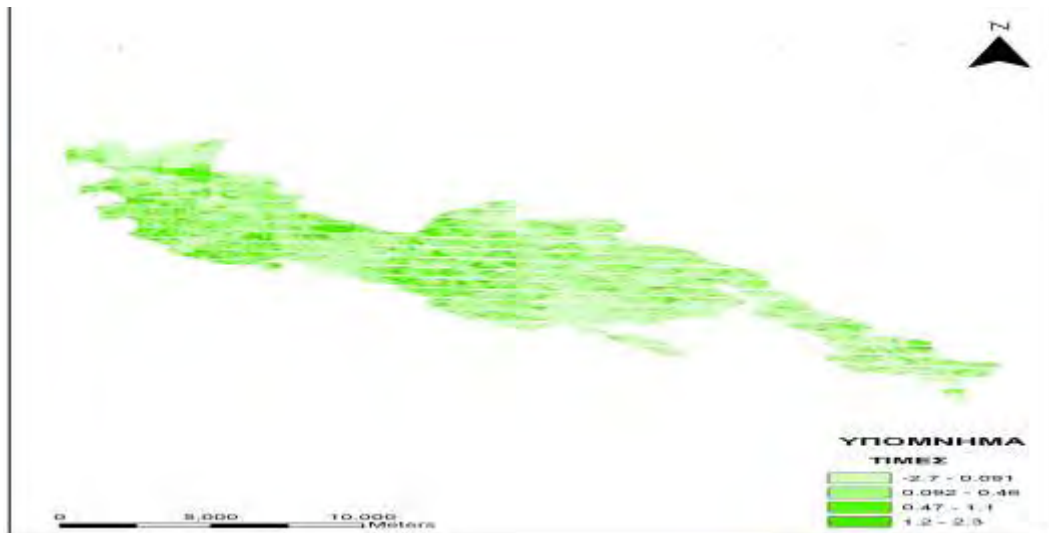
Εικόνα 3.38: Χάρτης φυτικού συντελεστή Κc της υπολεκάνης απορροής (01/05/2008)



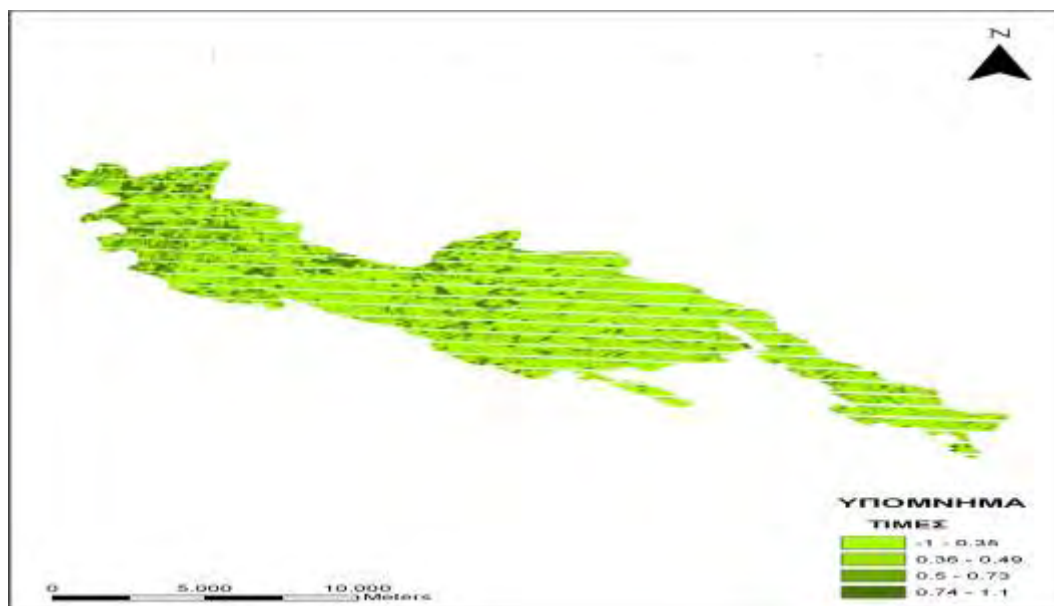
Εικόνα 3.39: Χάρτης εξαμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (01/05/2008)



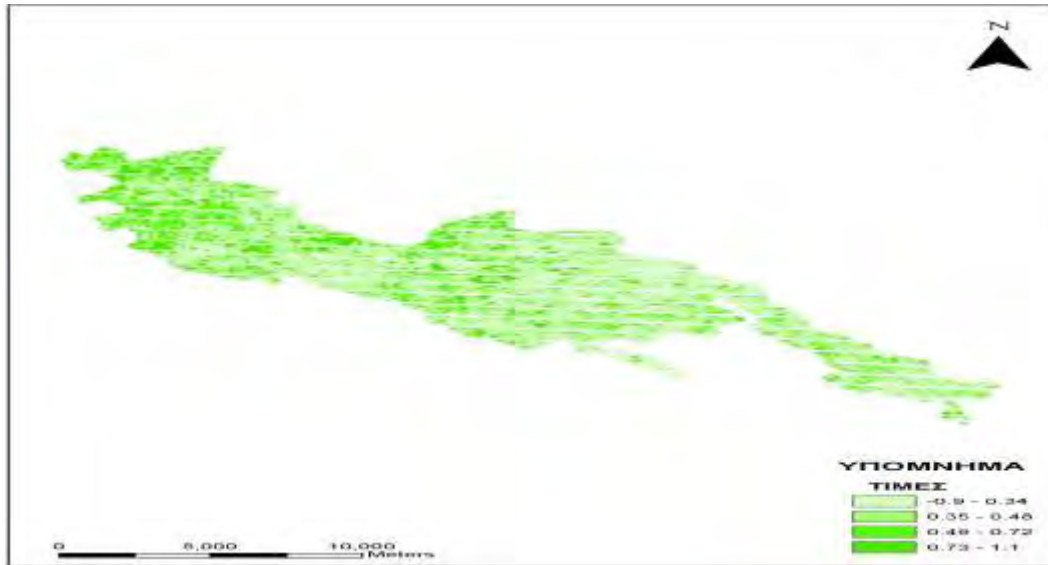
Εικόνα 3.40: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (02/06/2008)



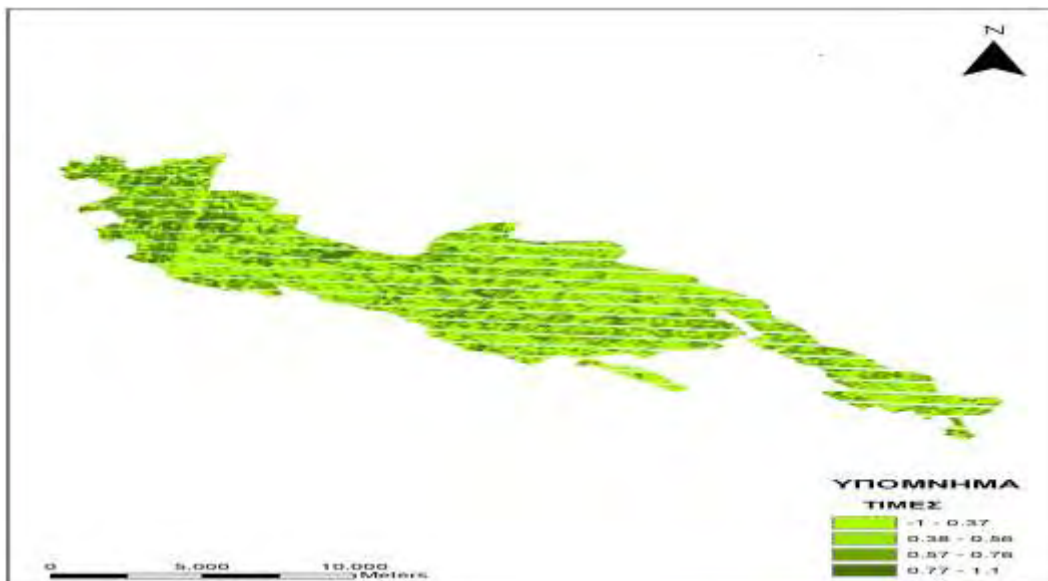
Εικόνα 3.41: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (02/06/2008)



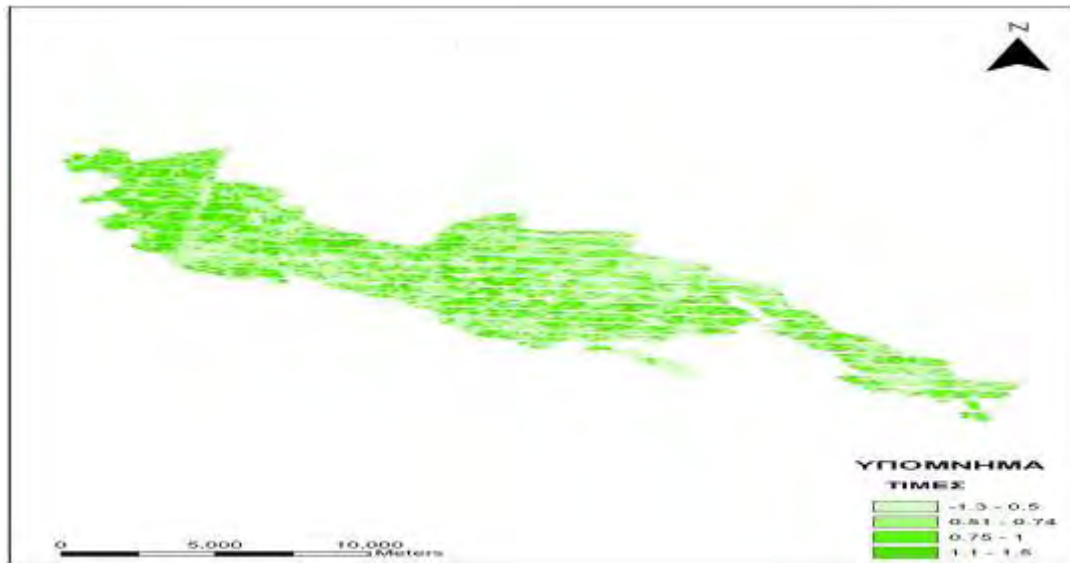
Εικόνα 3.42: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (18/06/2008)



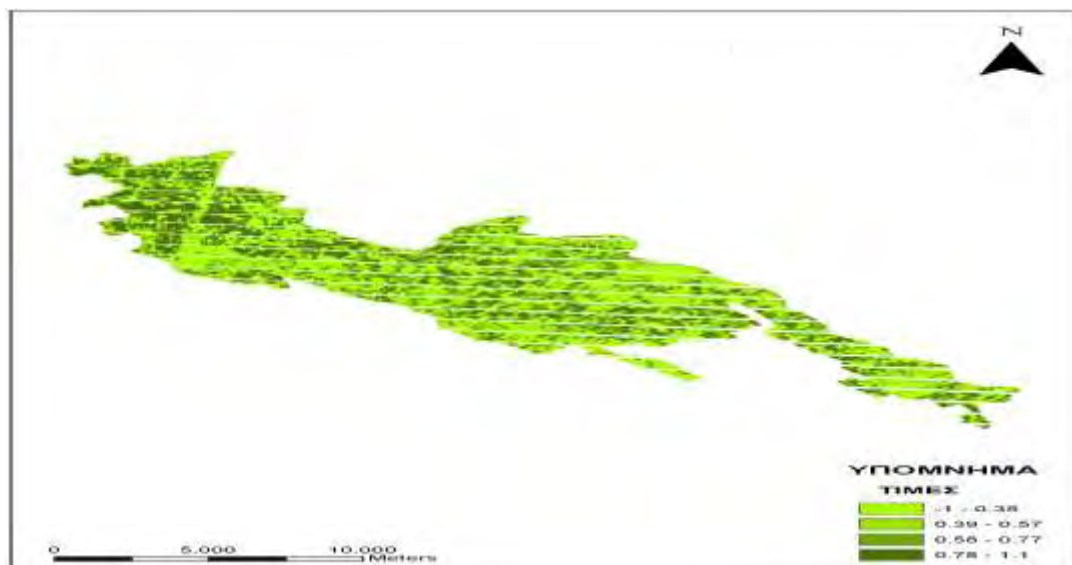
Εικόνα 3.43: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (18/06/2008)



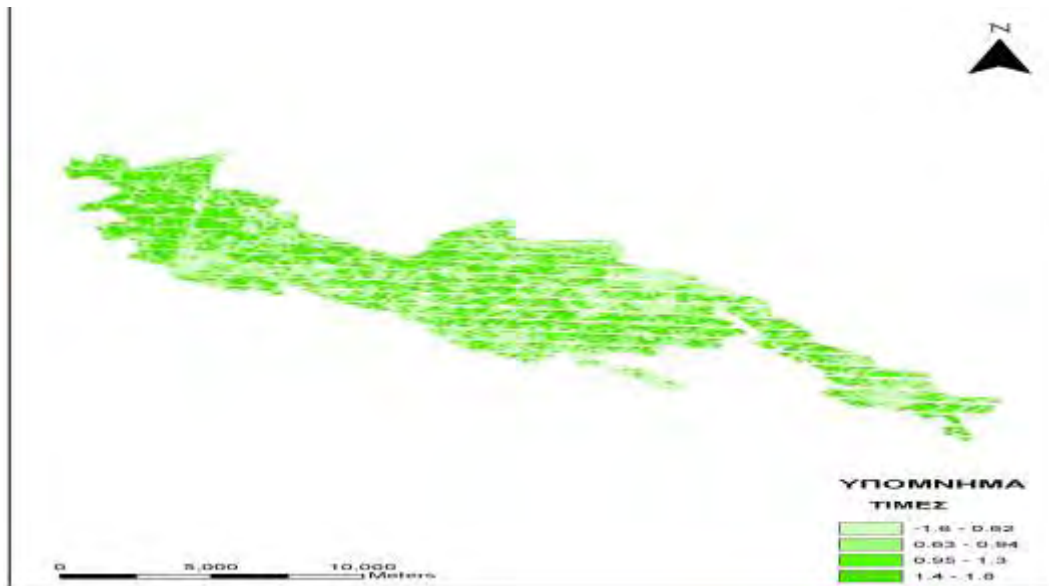
Εικόνα 3.44: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (04/07/2008)



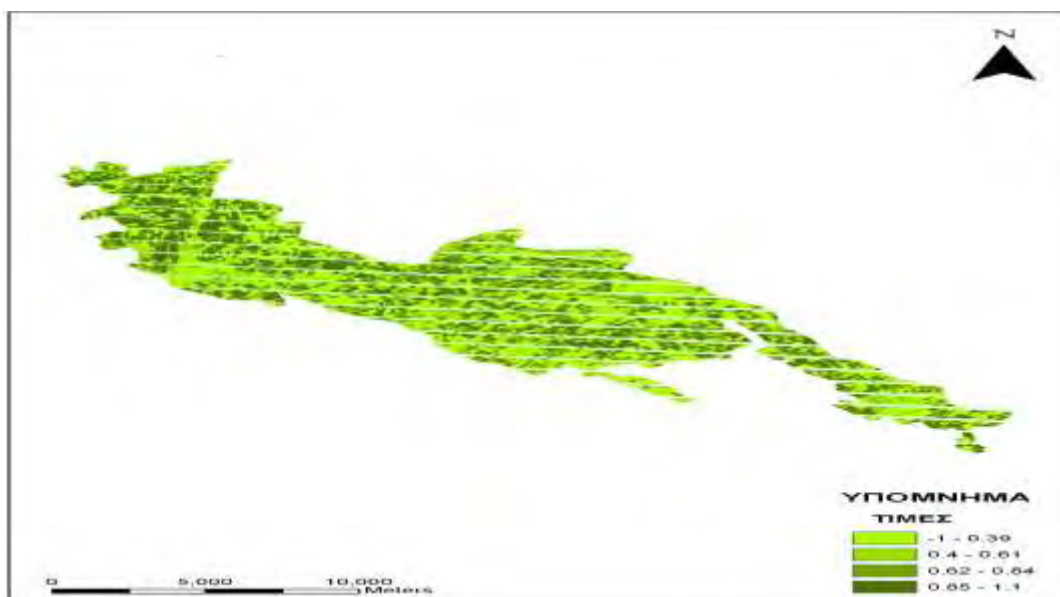
Εικόνα 3.45: Χάρτης εξαμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (04/07/2008)



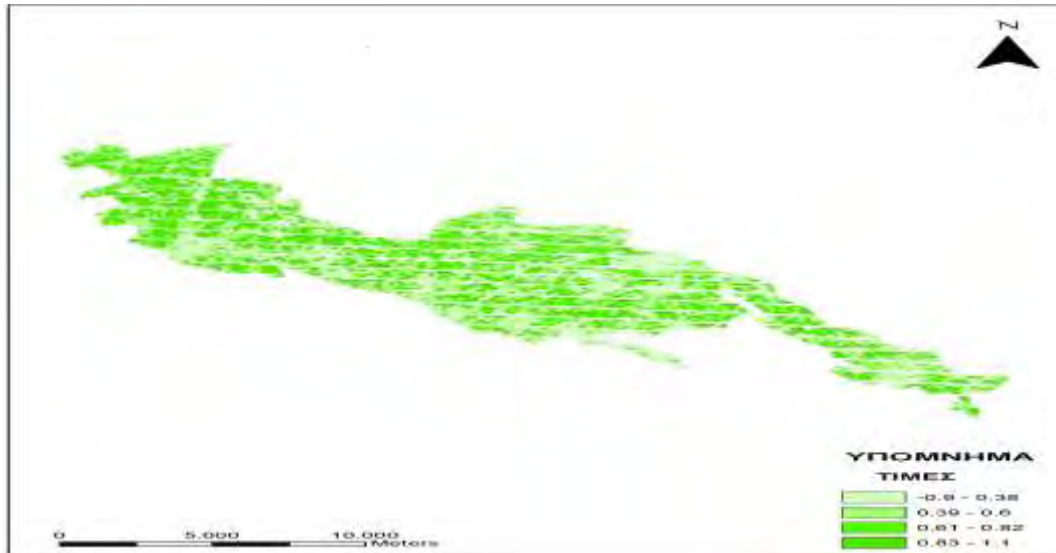
Εικόνα 3.46: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (20/07/2008)



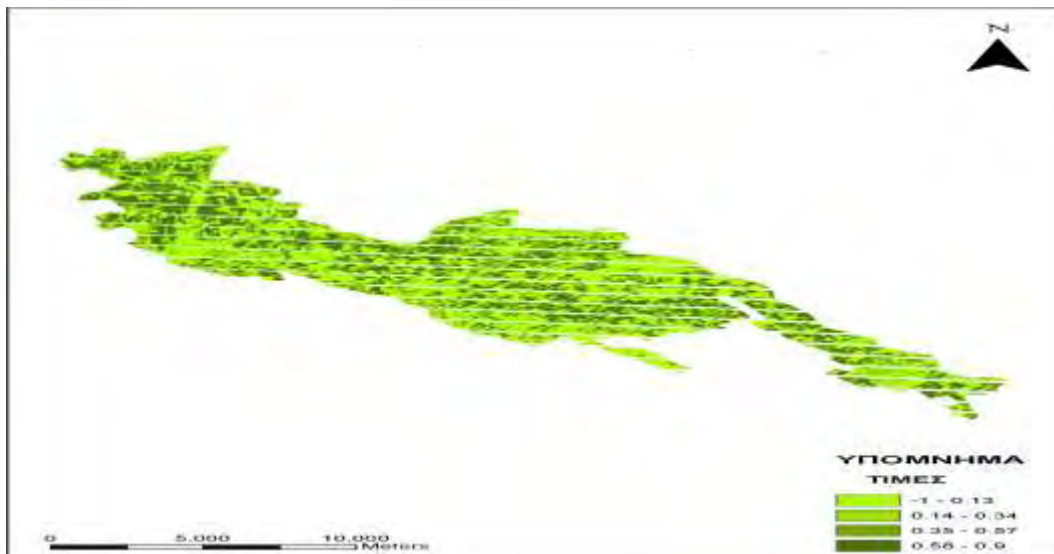
Εικόνα 3.47: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (20/07/2008)



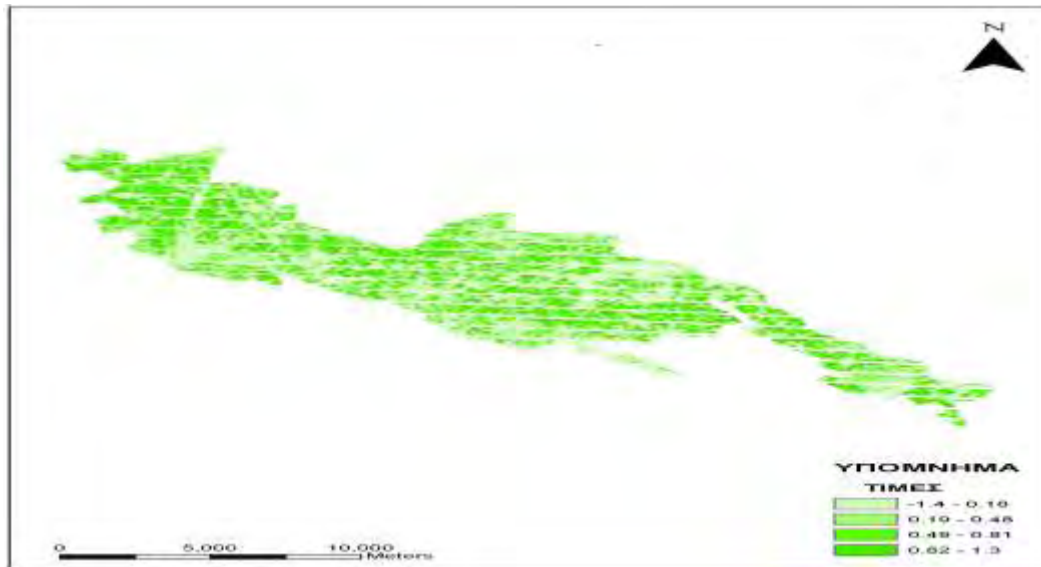
Εικόνα 3.48: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (05/08/2008)



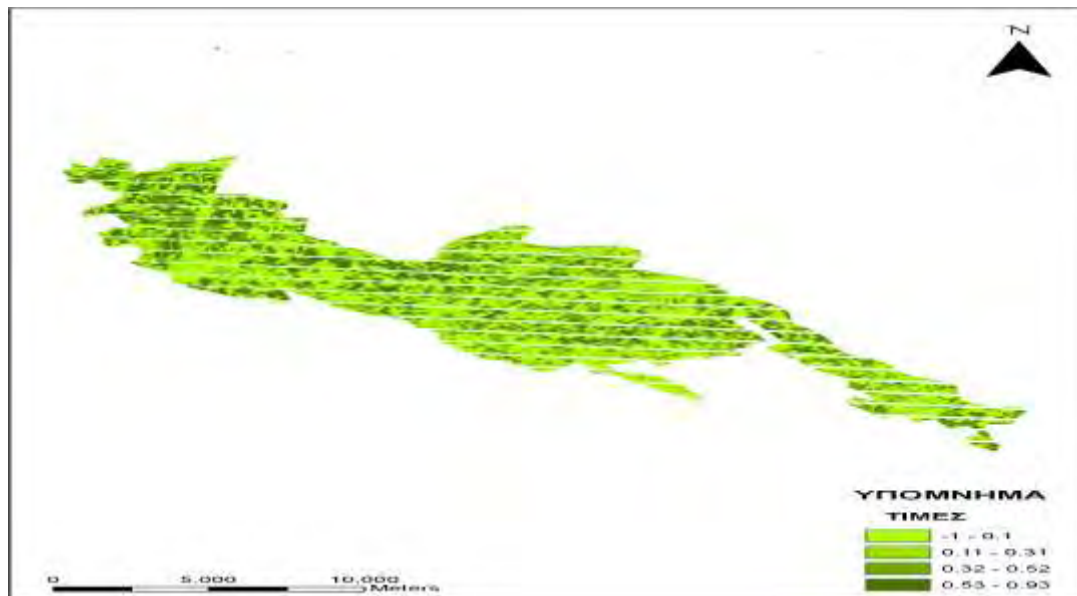
Εικόνα 3.49: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (05/08/2008)



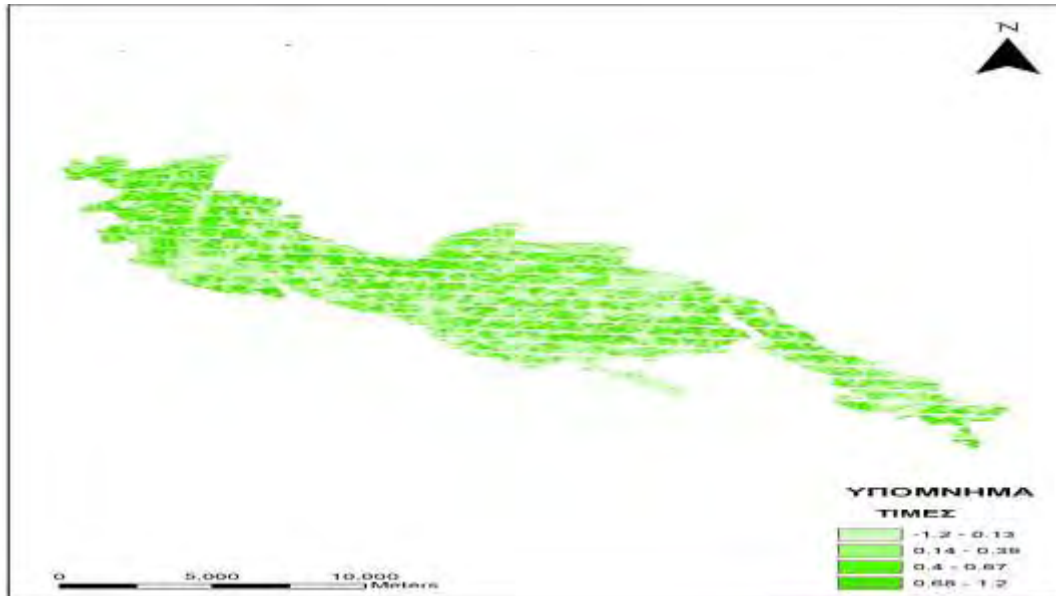
Εικόνα 3.50: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (21/08/2008)



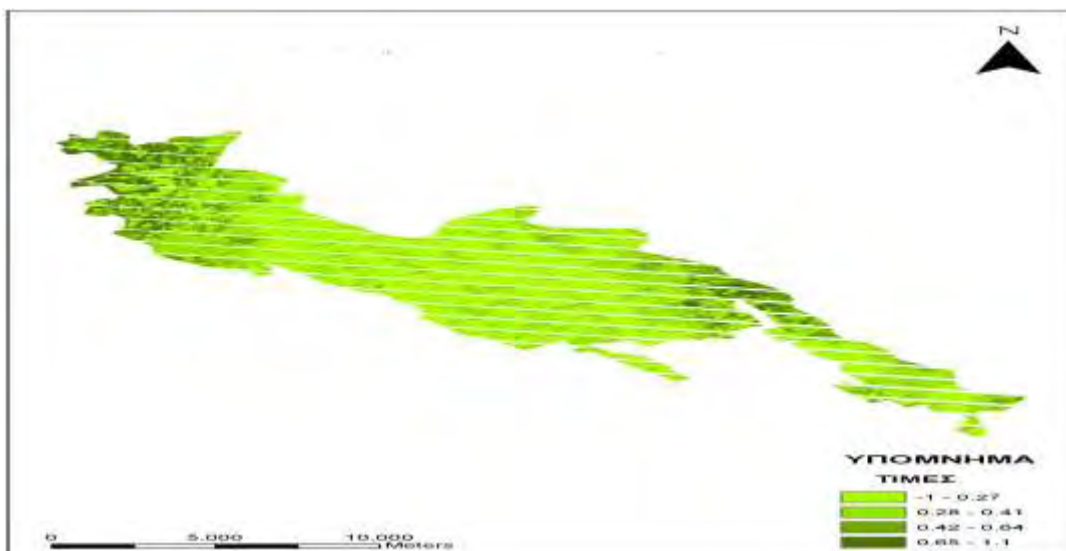
Εικόνα 3.51: Χάρτης εξαμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (21/28/2008)



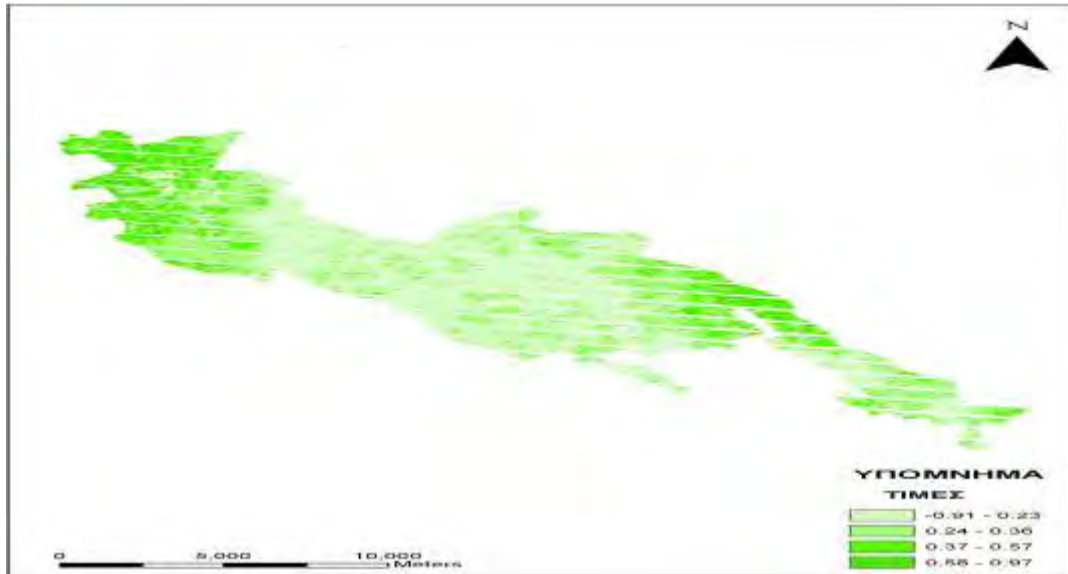
Εικόνα 3.52: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (06/09/2008)



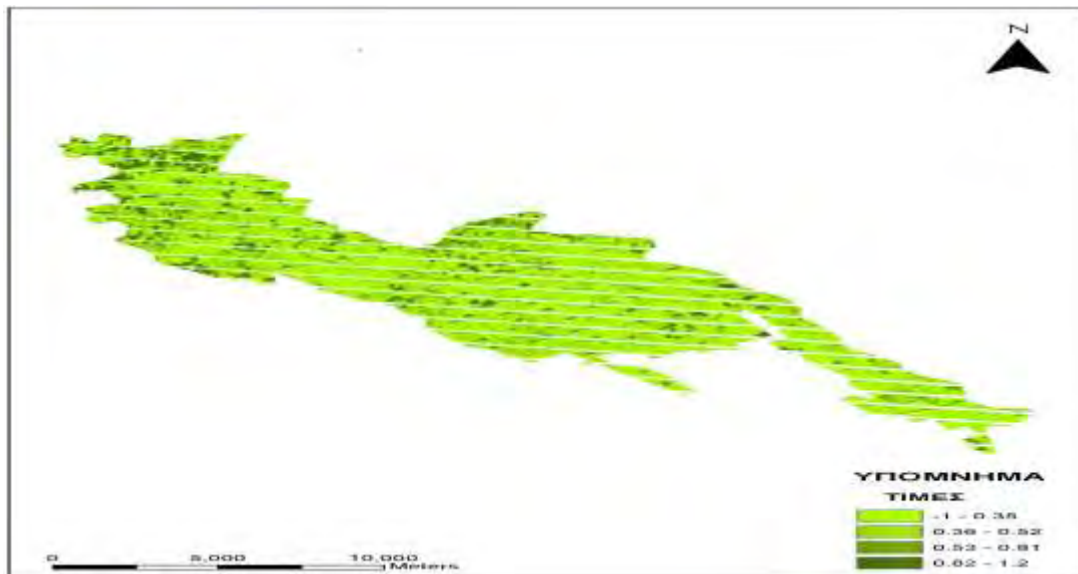
Εικόνα 3.53: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (06/09/2008)



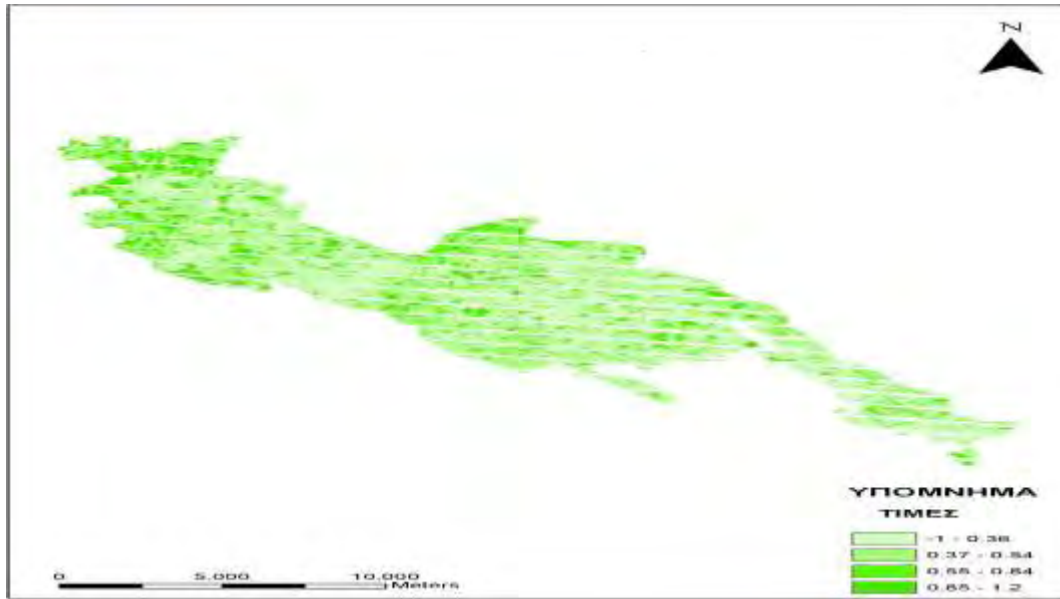
Εικόνα 3.54: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (20/05/2009)



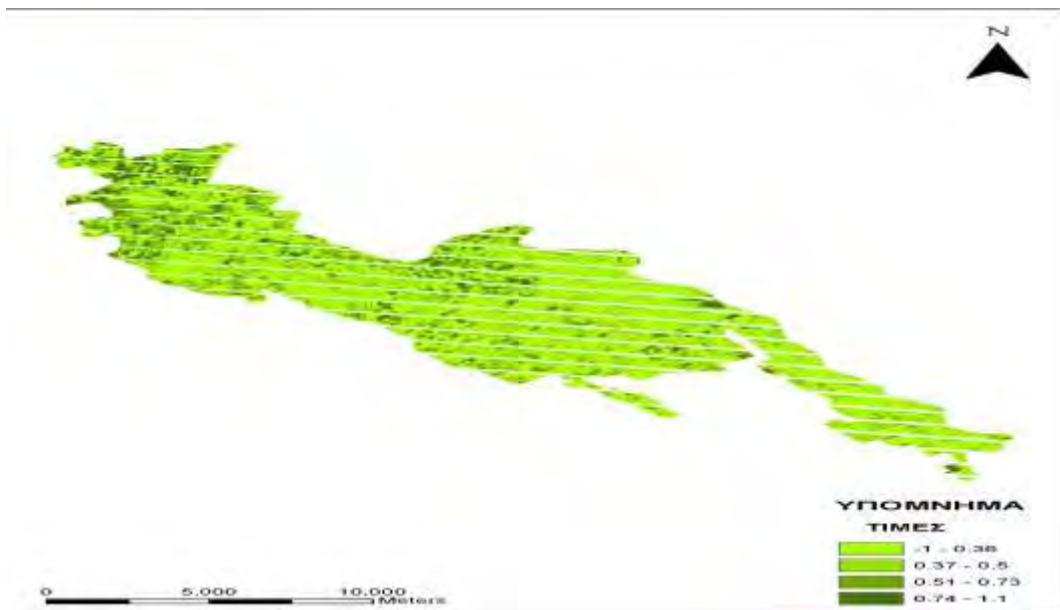
Εικόνα 3.55: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (20/05/2009)



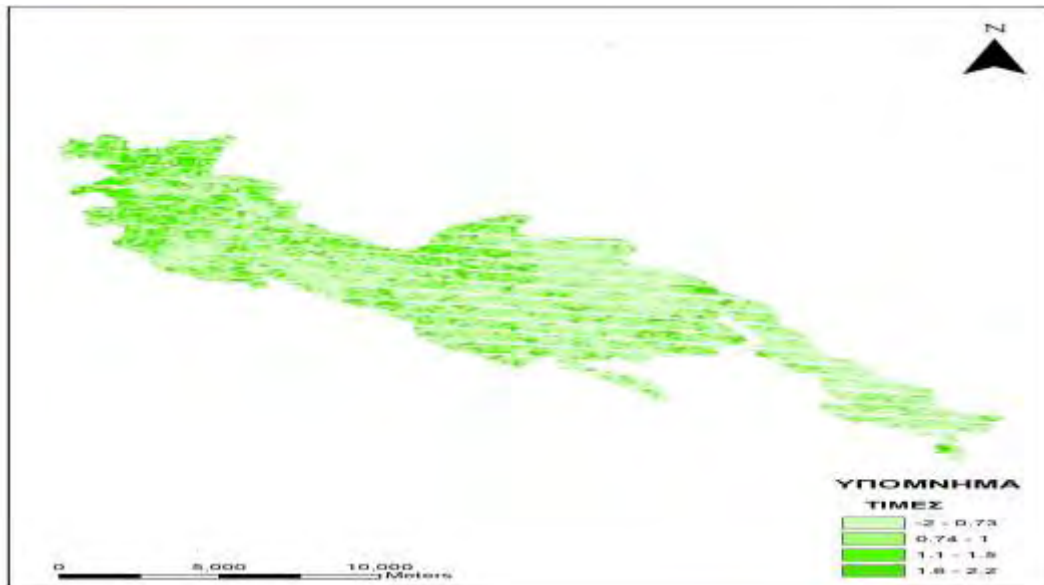
Εικόνα 3.56: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (05/06/2009)



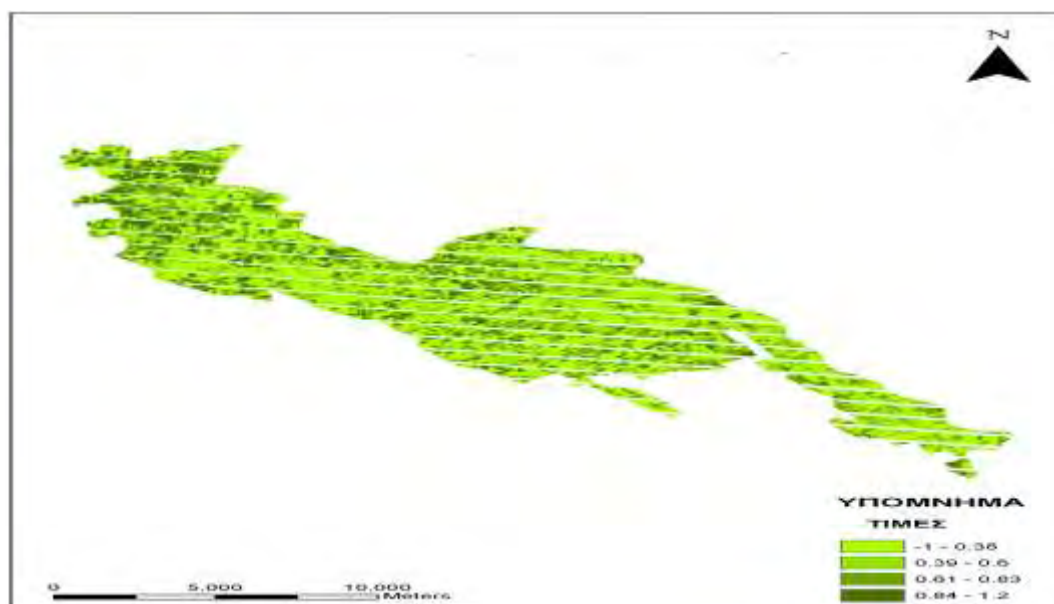
Εικόνα 3.57: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (05/06/2009)



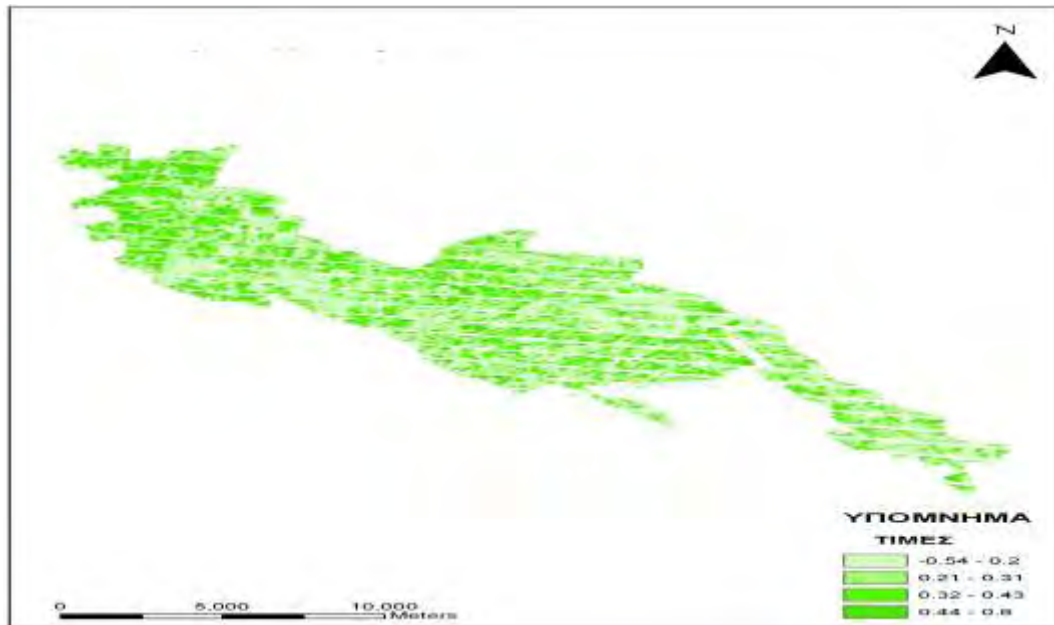
Εικόνα 3.58: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (21/06/2009)



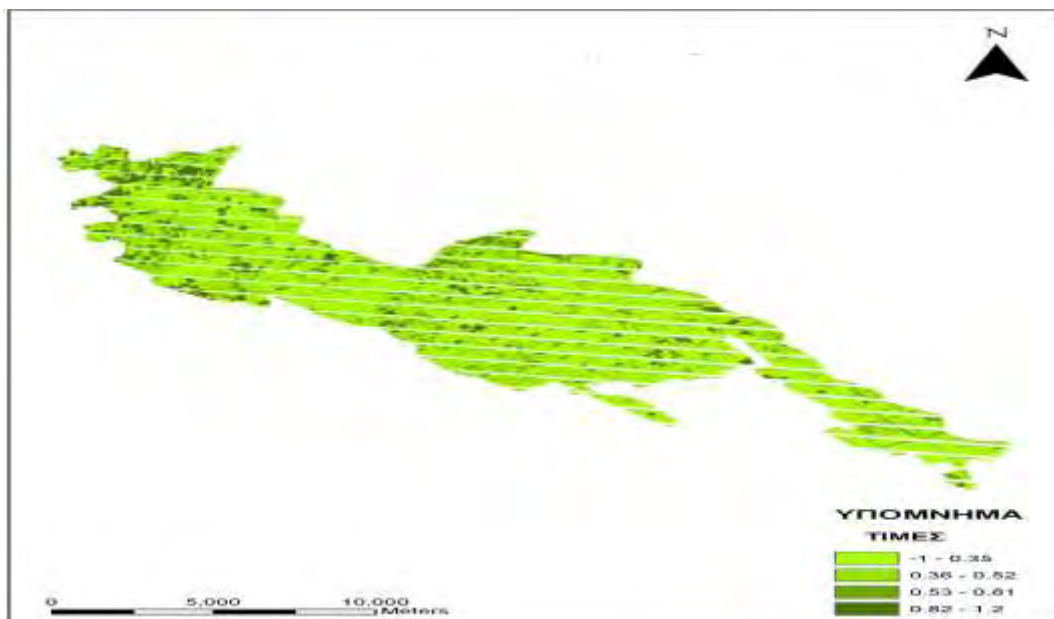
Εικόνα 3.59: Χάρτης εξατισμοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (21/06/2009)



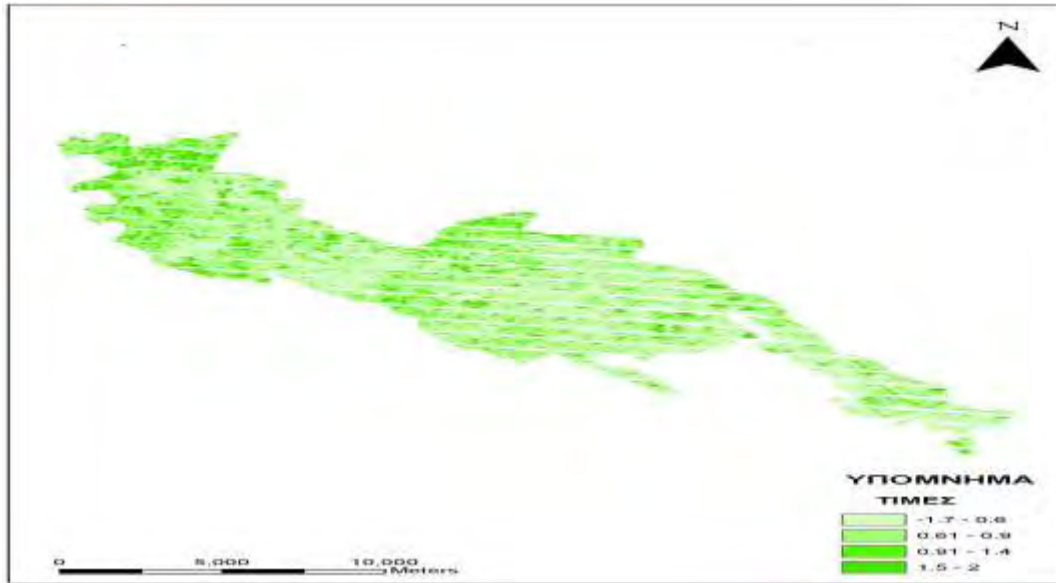
Εικόνα 3.60: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (07/07/2009)



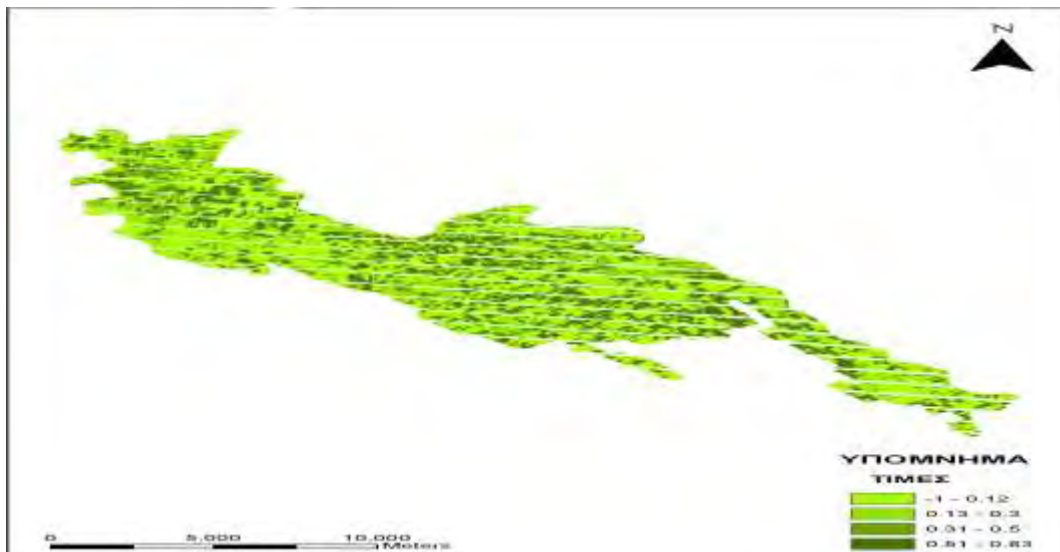
Εικόνα 3.61: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ΕΤc της υπολεκάνης απορροής (07/07/2009)



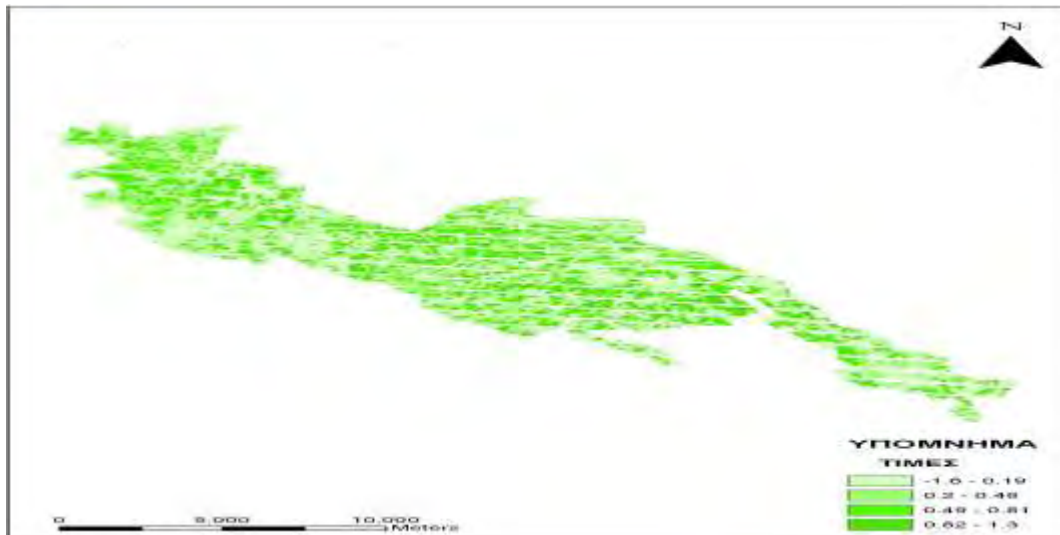
Εικόνα 3.62: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (23/07/2009)



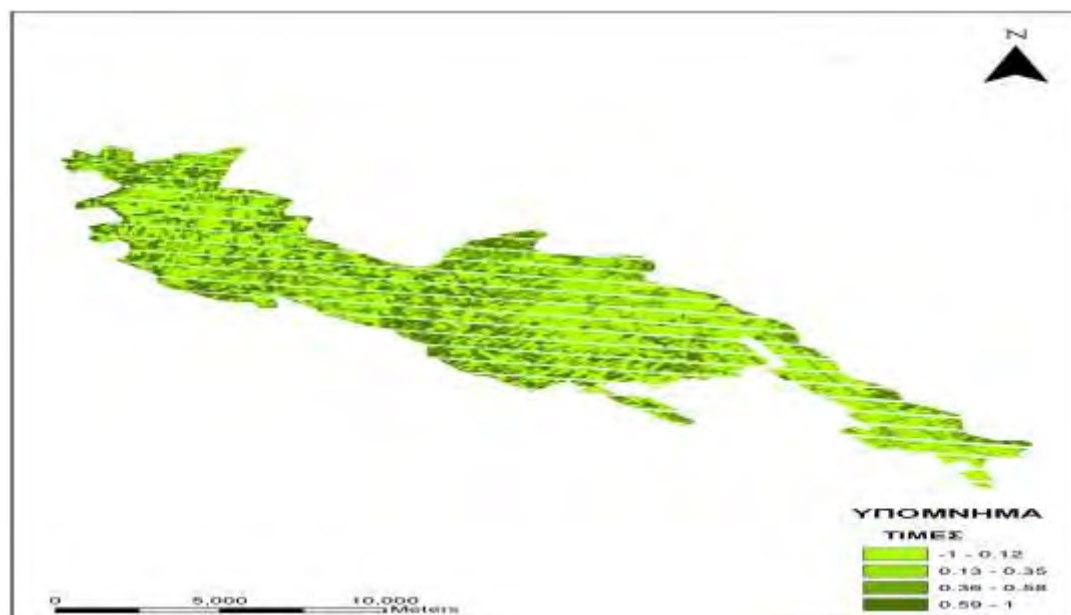
Εικόνα 3.63: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (23/07/2009)



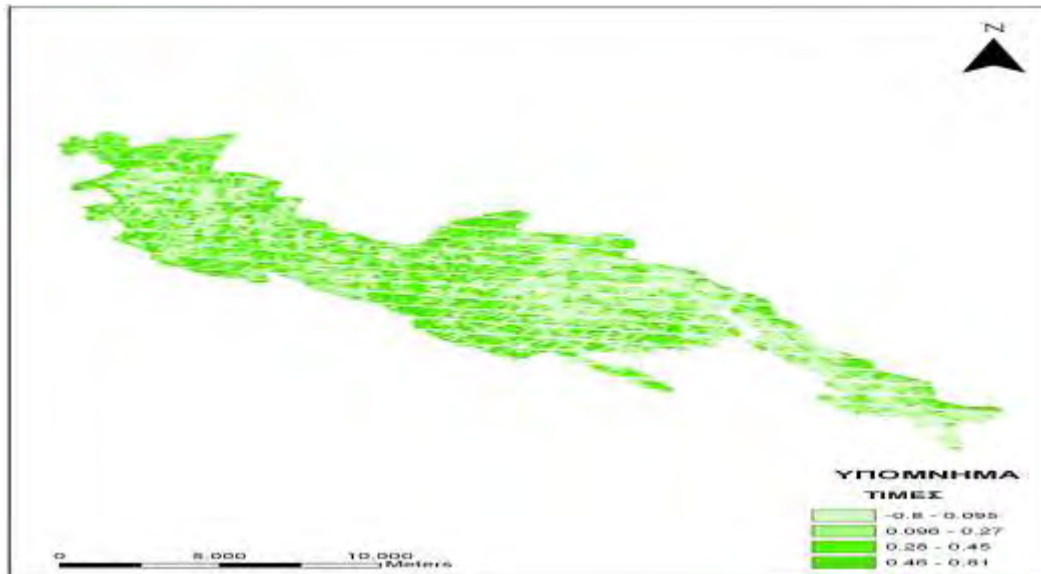
Εικόνα 3.64: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (24/08/2009)



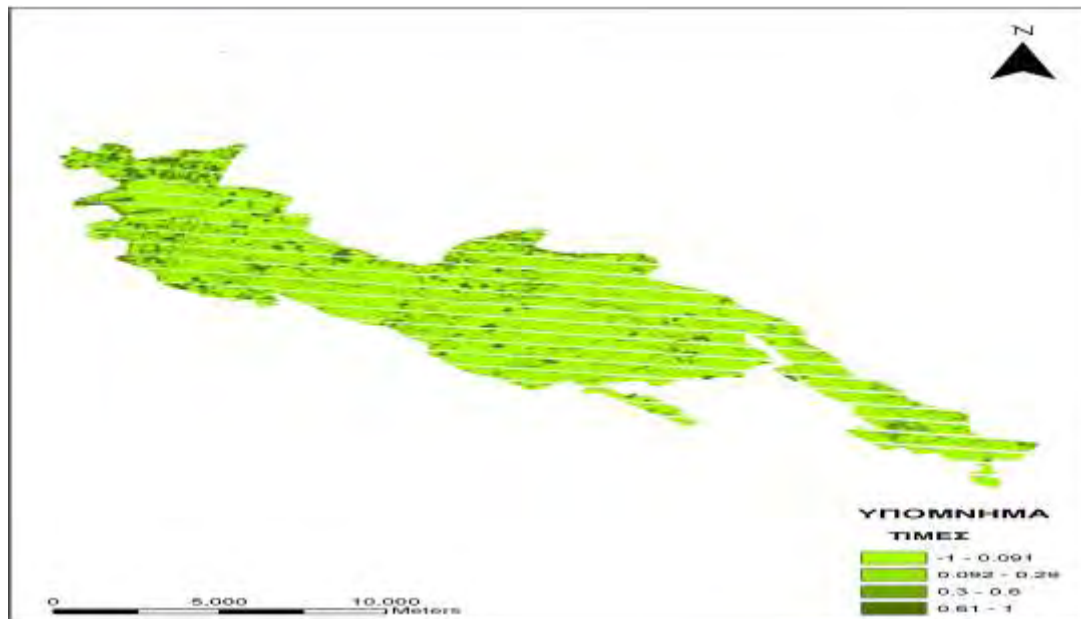
Εικόνα 3.65: Χάρτης εξαμυσοδιαπολής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (24/28/2009)



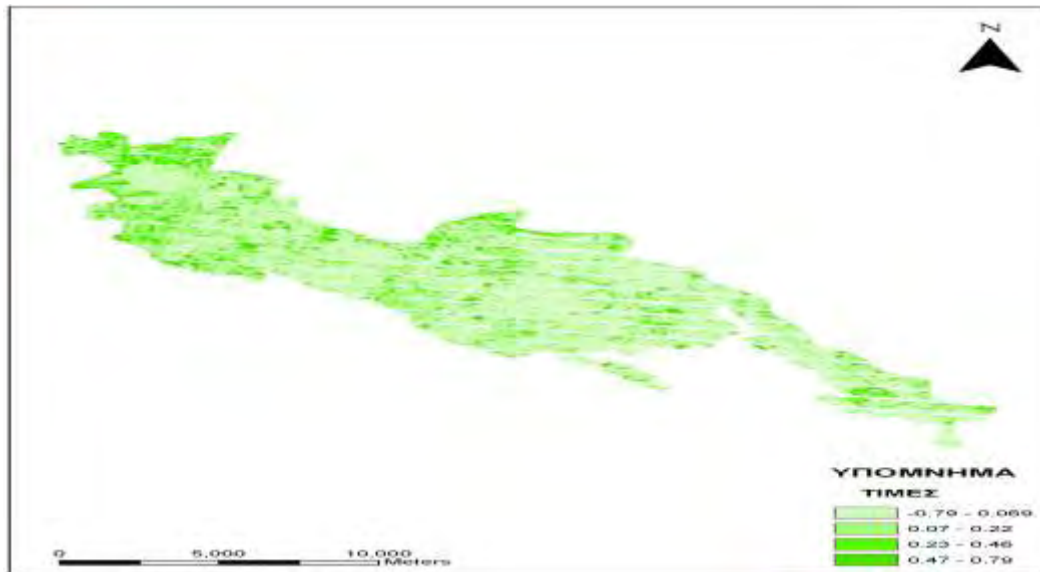
Εικόνα 3.66: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (07/05/2010)



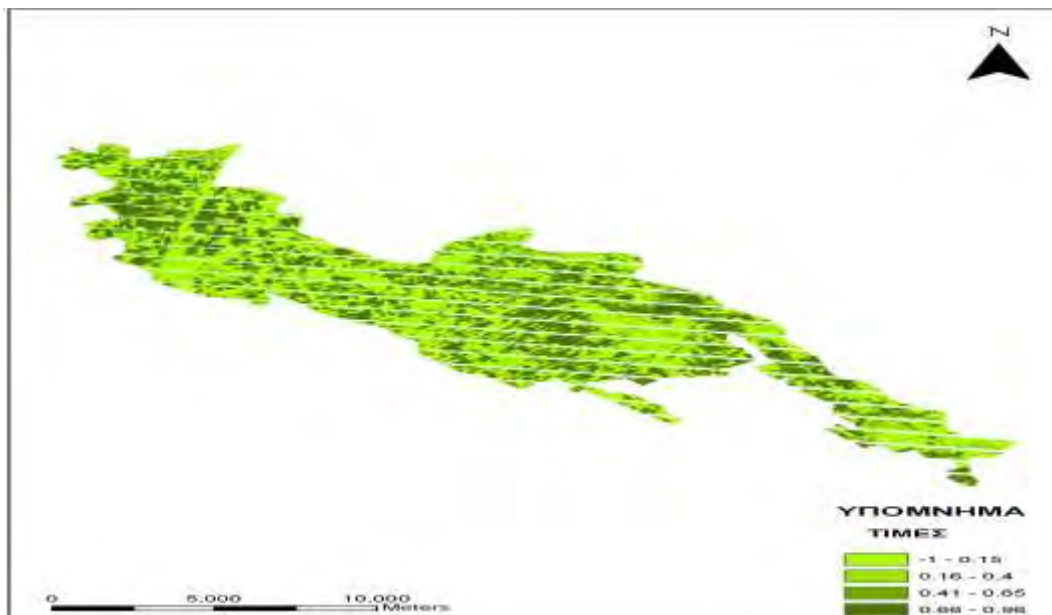
Εικόνα 3.67: Χάρτης εξαμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (07/05/2010)



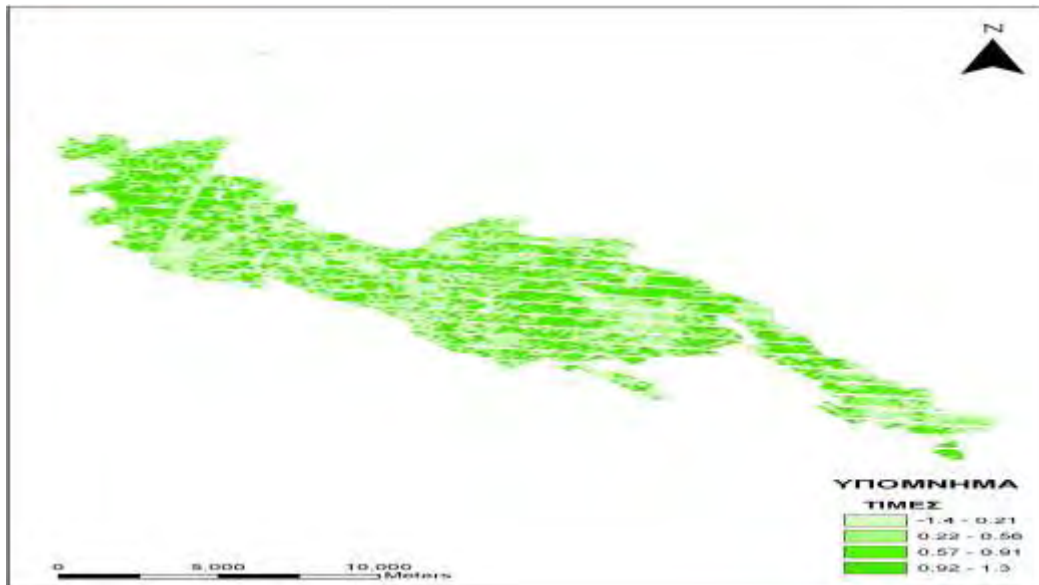
Εικόνα 3.68: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (28/06/2010)



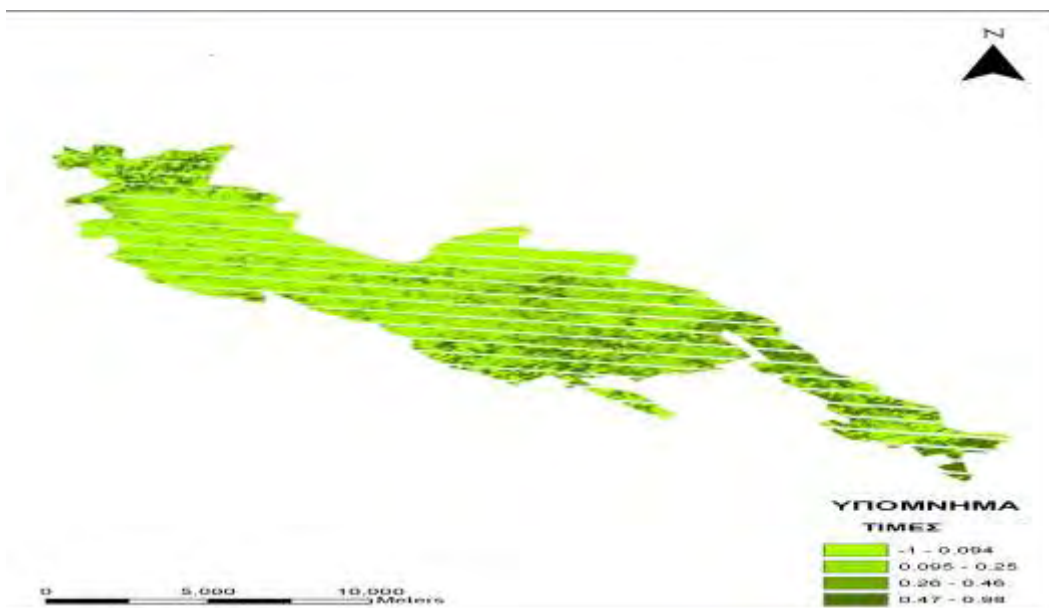
Εικόνα 3.69: Χάρτης εξαμυσοδιαπονοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (28/06/2010)



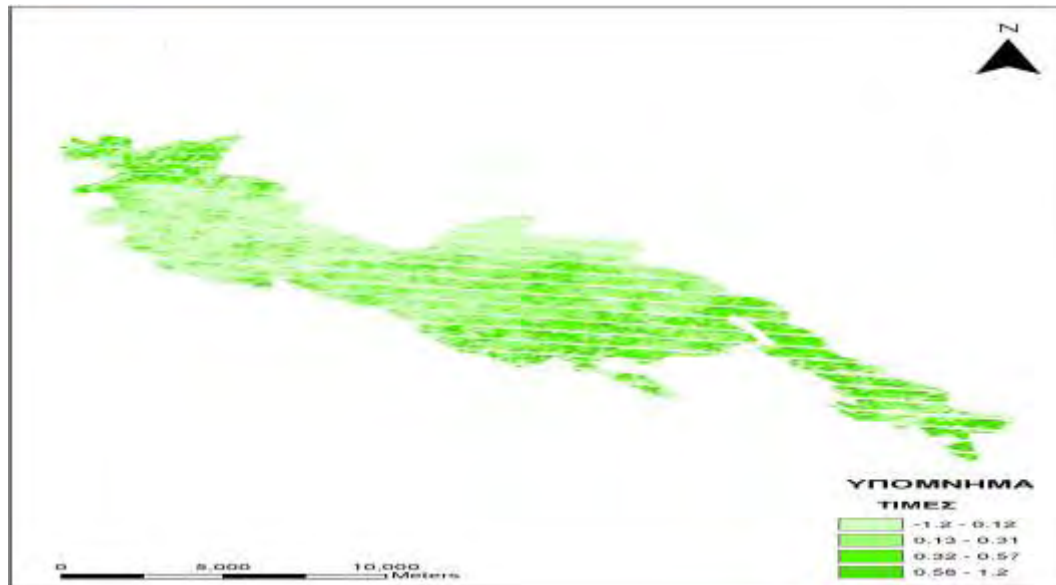
Εικόνα 3.70: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (27/08/2010)



Εικόνα 3.71: Χάρτης εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής (27/08/2010)



Εικόνα 3.72: Χάρτης φυτικού συντελεστή Kc της υπολεκάνης απορροής (28/09/2010)



Εικόνα 3.73: Χάρτης εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ETc της υπολεκάνης απορροής
(28/09/2010)

Στην παρούσα εργασία η διαδικασία που περιγράφεται είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων συνδυάζοντας επίγεια και δορυφορικά δεδομένα.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας εκτιμήθηκε η εξαμυσοδιαπνοή σε υπολεκάνη του Πηνειού ποταμού, στην περιοχή του Πλατυκάμπου, για τα έτη 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 και 2010. Χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα για όσες ημερομηνίες ήταν διαθέσιμα και μετά από την απαραίτητη επεξεργασία, σε συνδυασμό με επίγεια δεδομένα.

Οι εικόνες Landsat επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν, προκειμένου να υπολογιστεί ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI) και στη συνέχεια και ο φυτικός συντελεστής Kc, ο οποίος χρησιμοποιείται στην εξίσωση της εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας (ETc). Η μέθοδος επικυρώνεται με τη σύγκριση της εκτίμησης της εξαμυσοδιαπνοής καλλιέργειας χρησιμοποιώντας τα συμβατικά μετεωρολογικά στοιχεία. Τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών θεωρούνται ικανοποιητικά, κυμαίνονται σε αποδεκτά επίπεδα και είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις εδάφους.

Για την εκτίμηση της εξαμυσοδιαπνοής, οι συμβατικές μέθοδοι που στηρίζονται σε επίγεια δεδομένα, παρέχουν μετρήσεις για μικρής κλίμακας περιοχές, όχι όμως και για μεγάλης κλίμακας.

Η συλλογή δεδομένων με τη χρήση της Τηλεπισκόπησης προσφέρει μια ποικιλία πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με άλλες μορφές απόκτησης δεδομένων. Η Τηλεπισκόπηση καθιστά δυνατή τη μέτρηση της ενέργειας, όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, η υπέρυθη ακτινοβολία, κ.α., σε μήκη κύματος που δεν μπορεί να επιτευχθεί με την ανθρώπινη όραση.

Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα της Τηλεπισκόπησης είναι ότι:

- Παρέχουν τη δυνατότητα εκτίμησης της χωροχρονικής διαφοροποίησης της υπό εξέταση μεταβλητής,
- βοηθά να ληφθούν πληροφορίες έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η επανεξέταση μιας περιοχής υπό μελέτη,
- προσφέρει ακριβή στοιχεία για την ανάλυση των δεδομένων,
- το κόστος πρόσβασης στα δεδομένα είναι χαμηλό έναντι του κόστους για την συλλογή των επίγειων δεδομένων με τα απαιτούμενα μέσα,

Με την καλή αξιοποίηση της δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), επιτυγχάνεται η εκτίμηση της εξαμυσοδιαπνοής σε μεγάλης κλίμακας καλλιέργειες έχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη, δεδομένου ότι τα δορυφορικά δεδομένα παρέχουν εκτιμήσεις σε μεγάλη χρονική και χωρική ανάλυση.

Η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μεθόδων ποσοτικής εκτίμησης της εξαμυσοδιαπνοής. Η τηλεπισκόπηση επιτρέπει να ληφθούν χωρικές πληροφορίες της επιφάνειας της Γης εύκολα και μειώνει το απαιτούμενο ανθρώπινο δυναμικό για επιτόπιες παρατηρήσεις.

Ένας μεγάλος αριθμός από εμπειρικές και ημιεμπειρικές μεθόδους έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της εξαμυσοδιαπνοής αναφοράς από μετεωρολογικά δεδομένα.

Η μέθοδος FAO Penman-Monteith προτείνεται ως η δεδομένη μέθοδος για την εκτίμηση της εξαμυσοδιαπνοής αναφοράς ETo. Κάτω από τυπικές συνθήκες, η εξαμυσοδιαπνοή καλλιέργειας ETc, μπορεί να υπολογισθεί από κλιματικά δεδομένα .

Η εξίσωση της μεθόδου FAO Penman-Monteith χρησιμοποιεί κλιματολογικές καταγραφές της θερμοκρασίας του αέρα, της υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου, με ωριαίες, εβδομαδιαίες και μηνιαίες μετρήσεις. Για την

διασφάλιση της ακεραιότητας των υπολογισμών, οι καιρικές μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Η διαθεσιμότητα όμως των παραπάνω παραμέτρων δεν είναι πάντοτε δυνατή για διαφόρους τύπους καλλιεργειών και κάτω από συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες, γι' αυτό και η χρήση του φυτικού συντελεστή K_c σε συνδυασμό με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς E_{To} , θα μπορούσε να οδηγήσει στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας E_{Tc} .

Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς E_{To} με το K_c . Στην εκτίμηση της E_{To} , οι περισσότερες επιρροές από τις μετεωρολογικές συνθήκες είναι ενσωματωμένες. Επομένως, ο K_c διαφοροποιείται με τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε καλλιέργειας και επηρεάζεται μόνο από την περίπτωση ακραίων κλιματικών συνθηκών. Έτσι παρέχει την δυνατότητα, ο φυτικός συντελεστής να χρησιμοποιείται σε διαφορετικές περιοχές και κλίματα. Αυτός είναι και ο λόγος για την αποδοχή του και την χρησιμότητα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας.

Ο φυτικός συντελεστής επηρεάζεται από τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά που τον διαφοροποιούν από την καλλιέργεια αναφοράς. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι: το ύψος της καλλιέργειας, η ανακλαστικότητα, η αντίσταση της φυτοκόμης στην μεταφορά των υδρατμών και η εξάτμιση από το έδαφος.

Ο φυτικός συντελεστής K_c που χρησιμοποιείται σε εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής με συμβατικά στοιχεία αποτελεί στην ουσία μία μέση τιμή ανά γεωγραφικό πλάτος. Αντίθετα με τη χρήση τηλεπισκόπησης παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης του K_c ανά εικονοστοιχείο (pixel), και έτσι επιτυγχάνεται χωρική διαφοροποίηση του K_c με αντίστοιχη εκτίμηση της E_{Tc} ανά εικονοστοιχείο και συνεπώς η χωρική της διαφοροποίηση.

Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας που προκύπτει με τη χρήση τηλεπισκόπησης (Landsat) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον προγραμματισμό των αρδεύσεων, καθώς επίσης μπορεί να απαντήσει στο πόσο νερό πρέπει να προστεθεί στο έδαφος για να γίνει μια άρδευση.

Ο φυτικός συντελεστής διαφέρει σύμφωνα με την καλλιέργεια, το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και τις καλλιεργητικές πρακτικές. Ποικίλλει ευρέως, από έναν μικρό συντελεστή στα πρώτα στάδια της καλλιέργειας, μέχρι έναν μεγάλο συντελεστή όταν η καλλιέργεια βρίσκεται σε πλήρη κάλυψη, μέσα στην καλλιεργητική περίοδο.

Για τον έλεγχο της πιστότητας των αποτελεσμάτων, έγινε αξιολόγηση με στατιστικούς δείκτες και τα αποτελέσματα που προέκυψαν θεωρούνται πολύ ικανοποιητικά και κυμαίνονται μέσα στα αποδεκτά όρια.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με δεδομένο την αυξανόμενη αξιοπιστία των συστημάτων και μεθόδων τηλεπισκόπησης είναι δυνατή πλέον η αξιόπιστη ποσοτική εκτίμηση της υπό εξέταση μεταβλητής.

Στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με συμβατικά στοιχεία, ο φυτικός συντελεστής K_c που χρησιμοποιείται αποτελεί ουσιαστικά μία μέση τιμή ανά γεωγραφικό πλάτος. Αντίθετα με τη χρήση τηλεπισκόπησης παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης του K_c ανά εικονοστοιχείο (pixel) και έτσι επιτυγχάνεται χωρική διαφοροποίηση του K_c με αντίστοιχη εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας E_Tc ανά εικονοστοιχείο και συνεπώς η χωρική της διαφοροποίηση.

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί αντιπροσωπεύουν σημειακές τιμές, αν και έχουν την δυνατότητα να μετρούν με ακρίβεια διάφορες μεταβλητές. Οι μετρήσεις εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιορισμένο αριθμό σημείων αφού ο πολλαπλασιασμός των σταθμών είναι αδύνατος να γίνει πρακτικά έτσι ώστε να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται επαρκής κάλυψη.

Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης όταν συνδυάζονται με επίγεια και συμβατικά δεδομένα είναι ακόμα πιο σημαντικά ειδικότερα σε περιοχές με ανύπαρκτο ή ανεπαρκές δίκτυο σταθμών εδάφους.

Η μέθοδος FAO Penman-Monteith, θεωρείται ως η πιο αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής με συμβατικά στοιχεία.

Ο συνδυασμός της Τηλεπισκόπησης με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), αποτελεί ένα πολύ καλό μέσο επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων καθώς επίσης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

Είναι αδιαμφισβήτητα σημαντική η συμβολή των στατιστικών μεθόδων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δαλέζιος, P.N. (1994). Σημειώσεις Εξαμυσοδιαπνοής, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
2. Δαλέζιος, P.N. (1999). Περιβαλλοντική εκπαίδευση. Πρόγραμμα επιμόρφωσης εκπαιδευτικών της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
3. Δαλέζιος, P.N. (2002). Περιβαλλοντική Τηλεπισκόπηση. Πανεπιστημιακές εκδόσεις. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
4. Κανέλλου, Ε. (2006). Εκτίμηση περιοχικής δυνητικής εξαμυσοδιαπνοής με χρήση Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Μεταπτυχιακή διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
5. Λιβιεράτος Ε., (1985), Γενική χαρτογραφία και εισαγωγή στη θεματική χαρτογραφία. Εκδόσεις ΖΗΤΗ
6. Μερτίκας Σ.Π., (1999), Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας (Αθήνα ΙΩΝ)
7. Μιμίκου, Μ., (2005), Σημειώσεις Μαθήματος: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
8. Μπλάντα, Α., (2007). Μεταπτυχιακή διατριβή «Παρακολούθηση Υδατικού Ισοζυγίου με Μεθόδους Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.)» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Αγρομετεωρολογίας, 175 pp.

9. Παπαζαφειρίου, Ζ. (1984). Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 471 p.
10. Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., (1999). Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 335p.
11. Παπαϊωάννου, Γ. (1995). Εξάτμιση και Διαπνοή. Στο: Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Τσακίρης, 1995, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, pp. 167-221.
12. Πουλοβασίλης Α., Σημειώσεις Γεωργικής Υδραυλικής-Αρδεύσεις Ι, ΑΓΣΑ, Αθήνα 1983
13. Τολίκας Π., Εξατμισοδιαπνοή, Σεμινάριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής Πολυτεχνικής Σχολής Θεσσαλονίκης, 14-17 Μαΐου 1979, σελ. 95-118.
14. Τσίρος, Ε. (2009). Δορυφορικές μεθοδολογίες αγροκλιματικής – υδροκλιματικής ζωνοποίησης για γεωργική παραγωγή. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
15. Φειδάς, Χ. (1999). Συμβολή στη ραδιομετρική ανίχνευση καταιγιδοφόρων νεφικών συστημάτων και στην ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση των χαρακτηριστικών τους με τη χρήση δορυφορικών εικόνων και επίγειων δεδομένων. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anna Blanta, Dalezios R. Nicolas, Aglaia Maliara, Nicos Spyropoulos, 2011. Monitoring cotton crop evapotranspiration based on satellite data, 8-11 September 2011, Skiathos, Greece
2. Avery T.E., Berlin G.L., 1992, Fundamentals of Remote Sensing and airphoto Interpretation (New York: Mc Millan).
3. Bastiaanssen, W.G.M., 1998: *Remote Sensing in water resources management: The state of the art*. International Water Management Institute, Colombo, 118pp.
4. Biswas AK. 1990. Monitoring and evaluation of irrigation project. *Journal of irrigation and drainage Engineering (ASCE)* 116(2):227-242.
5. Calera, A., A.M. Jochum, A.Cuesta, A. Montoro, and P. López Fuster, 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrig. Drain. Systems*, 19: 337-353.
6. Calera, A., J. Medrano, A. Vela, and S. Castaño, 1999. *GIS tools applied to the sustainable management of water resources. Application to aquifer system 08-29, Agricultural Water Managemen*, 40: 207-220.
7. Calera, A., Jochum. A.M. and Cuesta, A., 2003. *Space-assisted irrigation management: Towards user-friendly products*. ICID Workshop on Remote Sensing of Crop Evapotranspiration, Montpellier, 17 Sep 2003, 12 pp.
8. Calera, A; Martinez, C. and Meliá, J.; 2001. A procedure for obtaining green plant cover. Its relation with NDVI in a case study for barley. *International Journal of Remote Sensing*.

9. Domenikiotis, C., Blanta, A., Dalezios, N., 2006. *Transferability of the DEMETER Methodology*. Proceedings of International Conference on: Information systems in sustainable agriculture, agroenvironment and food technology, 20-23 September 2006, Volos, Greece, 963-972 pp.
10. D'Urso, G. and M.Menenti, 1996 a. Mapping crop coefficients in irrigated areas *from* Landsat TM images. Proc. European Symposium on Satellite Remote Remote Sensing. Optical Engineering, Bellingham USA, vol. 2585: 41-47.
11. D'Urso, G., E.P. Querner and J.A. Morabito, 1992. Integration of hydrological simulation models with remotely sensed data: An application to irrigation management. Proc. Intern. Conf. Advances in Planning, Design and Management of Irrigation Systems as related to sustainable land use. Catholic University; Leuven; Belgium: 463-472.
12. Gore, A., 1993: *Earth in the Balance: Ecology and the Human Spirit*. Plume, New York, 407 pp.
13. Jochum, A.M., Calera, A., and co-authors, 2006. Operational Space-assisted Irrigation Advisory Services: Overview and lessons learned from the DEMETER project. In Proceedings International Conference on Earth Observation for vegetation monitoring and water management. Napoli, 9-11 November 2005. American Institute of Physics: 3-13.
14. Jochum, A.M., Calera, A., and co-authors, 2006. Operational Space-assisted Irrigation Advisory Services: Overview and lessons learned from the DEMETER project. *In Proceedings International Conference on Earth Observation for vegetation monitoring and water management*. Napoli, 9-11 November 2005. American Institute of Physics: 3-13.

15. Menenti M., T.N.M. Visser, J.A. Morabito and A. Drovandi, 1989. Appraisal of irrigation performance with satellite data and georeferenced information. in:-J.R. Rydzewski and C.F. Ward (eds.). Irrigation Theory and Practice. Inst. of Irrigation Studies, Southampton Univ., UK: 785-801.
16. Menenti M., Visser T. and Chambouleyron J.L, 1990. The role of remote sensing in irrigation management: a case study on allocation of irrigation water. World Bank Technical Paper. No. 128: 67-81.
17. Menenti, M.(ed.), 1990. Remote sensing in evaluation and management of irrigation. INCYTH-CRA, Mendoza, Argentina. 337 pp.
18. Mplanta, A., C. Domenikiotis and N. Dalezios (2007), "Pleiades-EO-Assisted Tools For Water Management in Agriculture and Agricultural Decision Support", Greece Association Agricultural Engineers, 5th National Congress Agricultural Engineering, 18-20 October 2007, Larisa, Greece, 345-352 pp.
19. Seckler, D., U. Amarasinghe, D. Molden, R. De Silva and R. Barker, 1998. *World water demand and supply 1990 to 2025: Scenarios and issues*. Research Report 19. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka
20. Wang, J.M., K. Sahashi, E. Ohtaki, T. Maitani, O. Tsukamoto, Y. Mitsuta, T. Khobayashi, H. Zheng, I. Li and Z. Xie, 1993. Energy and mass transfer characteristics of soil-vegetation atmosphere system in oasis area. Outline of the biometeorological observation period (BOP). Proc.Int. Symposium on HEIFE. Natural Disaster Research Institute, Kyoto, Japan: 507-514.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. http://itia.ntua.gr/courses/hydrometeo/EMP_SATEL_2011.pdf (9-6-2011)
2. <http://www.iacm.forth.gr/docs/pubs/4/EMTE98.pdf> (9-6-2011)
3. <http://www.neo.gr/website/ergasiamathiti/75.htm> (11-6-2011)
4. <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/landsat.html> (6-5-2011)
5. [http://www.moa.gov.cy/moa/da/da.nsf/All/A903BAC069EF9E9BC225780F005113A1/\\$file/ArdevomenesKaliergies.pdf?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/da/da.nsf/All/A903BAC069EF9E9BC225780F005113A1/$file/ArdevomenesKaliergies.pdf?OpenElement) (6-5-2011)
6. <http://www.fao.org/ag> (17-5-2011)
7. http://www.fao.org/waicent/index_en.asp (17-5-2011)
8. <http://www.fao.org/landandwater/aglw/index.stm> (17-5-2011)
9. <http://www.fao.org/docrep/W4367E/W4367E00.htm> (17-5-2001)
10. <http://www.fao.org/docrep/W7320B/W7320B00.htm> (17-5-2011)
11. <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/webpub/financing.htm> (17-5-2001)
12. <http://ec.europa.eu/environment/> (18-5-2011)
13. <http://www.nationalacademies.org/nrc/> (18-5-2011)
14. www.minagric.gr (18-5-2011)
15. www.bayercropscience.gr (19-5-2011)
16. www.agriculture.gr (23-5-2011)
17. www.thessalia.gov.gr (25-5-2011)
18. National Research Council, 1991.
<http://www.cnr.it/sitocnr/Englishversion/Englishversion.html> (7-6-2011)

ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the main components of the hydrological cycle, thus its estimation and assessment is very significant. However, it turns out to be very difficult because the computation cannot be done directly, because it is affected by several factors and varies considerably in space and time. The knowledge and assessment of evapotranspiration's assessment is of great importance because, as mentioned above, it is one of the main components of the hydrological cycle and it is an integral part of the hydrological and climatological processes of the ground and the atmosphere. Moreover it allows the monitoring of crop production with the maximum possible water savings, provided that for the agricultural production is the main limiting factor. The subject of this work is to investigate the contribution of satellite data in estimating the evapotranspiration in a sub-basin of the Pinios river. It is known the importance of the assessment of evapotranspiration in the rational management of water resources and the difficulty of computing it with conventional ground data collected in basins. During the last years has been developed several methods for the estimation of evapotranspiration by combining conventional meteorological measurements, with remote sensing data, since remote sensing data provide estimations at high spatial and temporal resolution, the estimation of evapotranspiration is feasible on a regional scale. In this paper the requirements of irrigation water are evaluated through the assessment and control of crop evapotranspiration E_{Tc} in a sub-basin of the Pinios river, near Platykampos. The remote sensing data are used to delineate the spatial and temporal variability of crop coefficient K_c and the crop production in the basin is examined for the years 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 and 2010. The ground-based observations made during

the growing season and satellite images (Landsat TM) for those dates that were available, were processed for the corresponding period. The maps which were created for the study area, show that with the proper use of satellite remote sensing and geographic information systems (GIS), estimation of the evapotranspiration is achieved in a wide range of crops. While also offering in particular the images of satisfactory spectral resolution and having significant economic benefits. This is accomplished because satellite data provide estimations on a large spatial and temporal coverage with good resolution, on the entire study area. More explicitly, it is shown for the entire area and for the years under study. The validation of the results accuracy, with statistical indices and the results were are considered satisfactory utilized to conduct an assessment. The results came out and are considered to be satisfactory. The values of the indices vary within accepted limits and are consistent with the ground observations. The satellite data provide the ability to cover large areas and control the crops during the growing season. Collecting data using remotely sense data allows continuous data acquisition throughout the year, repetitive observations, which provide accurate information for the data analysis, offering a wide regional coverage and the cost of data accessing is low compared to the cost of the collection of surface data with the available tools. The methodology can be applied to broad areas for the computation of the crop coefficient K_c and crop evapotraspiration Etc can be extended to other crops with the use of satellite data.

Keywords: crop evapotranspiration, remote sensing, crop coefficient