

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ

Μήτση Τερψιχόρη^{*1}, Βασιλάκος Χρήστος², Τζωράκη Ουρανία³, Dietrich Jörg⁴

¹ Τελειόφοιτος Γεωγράφος, Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Λόφος Πανεπιστημίου, 81100, Μυτιλήνη, geo12100@geo.aegean.gr

² ΕΔΙΠ, Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Λόφος Πανεπιστημίου, 81100, Μυτιλήνη, chvas@aegean.gr

³ Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Λόφος Πανεπιστημίου, 81100, Μυτιλήνη, rania.tzoraki@marine.aegean.gr

⁴ Ερευνητής, Institute of Water Resources Management, Hydrology and Agricultural Hydraulic Engineering, Leibniz University of Hannover, dietrich@iww.uni-hannover.de

Τηλ: 6989886397 e-mail : geo12100@geo.aegean.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Λόγω της κλιματικής αλλαγής προβλέπονται σημαντικές μεταβολές στα υδάτινα σώματα με πολλαπλές επιπτώσεις σε πολλές υδρολογικές, βιολογικές και βιοχημικές διεργασίες. Η υγρασία του εδάφους (Soil moisture) είναι η βασική μεταβλητή της επιστήμης της υδρολογίας απαραίτητη για τη μοντελοποίηση διαδικασιών που περιλαμβάνουν την ανταλλαγή νερού και ενέργειας σε συνάρτηση με τις κλιματικές μεταβολές. Η διατάραξη του υδρολογικού κύκλου έχει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Ιδιαίτερα στη γεωργία, όπου μπορεί να προκληθεί χαμηλή απόδοση ή και καταστροφή των καλλιέργειών. Ως εκ τούτου η παρακολούθηση και διαχείρισή της είναι βασικός παράγοντας ενίσχυσης της γεωργικής παραγωγής. Συνεπώς η εδαφική υγρασία είναι ένα φαινόμενο άξιο μελέτης και η τηλεπισκόπηση προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης μεγάλων εκτάσεων σε σύντομα και τακτικά χρονικά διαστήματα. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μοντελοποίηση της εδαφικής υγρασίας με τη χρήση των τηλεπισκοπικών δεικτών NDWI (Normalized Difference Water Index), NDMI (Normalized Difference Moisture Index) και TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index). Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε λεκάνη απορροής του ποταμού Ilmenau στη Βόρεια Σαξονία της Γερμανίας για το χρονικό διάστημα 2002-2012. Ο ποταμός Ilmenau, παραπόταμος του Έλβα, είναι ο μεγαλύτερος παραπόταμος της περιοχής με μήκος 107 χλμ και εκβάλλει στην Βόρεια Θάλασσα. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από γεωργικές εκτάσεις με κύριες τις καλλιέργειες σιταριού, πατάτας και ενεργειακή καλλιέργεια καλαμποκιού. Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι εικόνες που ελήφθησαν από τους δορυφόρους Landsat 5 TM και Landsat 7 ETM, ενώ χρονοσειρές εδαφικής υγρασίας εξήχθησαν από το υδρολογικό μοντέλο AMBETI. Η προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων περιλαμβάνει τη ραδιομετρική διόρθωση, καθώς και αφαίρεση νεφών και σκιάσεων των νεφών. Ο δείκτης TVDI υπολογίστηκε βασιζόμενος στη θερμοκρασία εδάφους (Ts) και το δείκτη βλάστησης NDVI. Η διαδικασία υπολογισμού του απαιτεί την εύρεση εμπειρικών παραμέτρων που προέρχονται από τα διασποροδιαγράμματα (scatter plots) των τιμών των pixels στο δισδιάστατο χώρο Ts/NDVI. Για την βαθμονόμηση των

μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τιμές υγρασίας προερχόμενες από το υδρολογικό μοντέλο AMBETI, το οποίο εφόσον έχει βαθμονομηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, υπολογίζει σε ημερήσια βάση την εδαφική και ατμοσφαιρική υγρασία μέσα από διάφορες διεργασίες όπως τη διαπνοή και εξάτμιση του εδάφους και τις μικροκλιματικές συνθήκες του χώματος. Η συσχέτιση μεταξύ δορυφορικών δεδομένων και δεδομένων του μοντέλου AMBETI εξετάστηκε με τη μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, όπου ως εξαρτημένη μεταβλητή τέθηκαν οι τιμές του μοντέλου AMBETI, ενώ ως ανεξάρτητες οι τηλεπισκοπικοί δείκτες όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Για τον υπολογισμό του TVDI εξετάστηκαν 2 διαφορετικοί τρόποι δημιουργίας των διασποροδιαγραμμάτων. Εξετάστηκε η προτεινόμενος βιβλιογραφικά μέθοδος όπου για κάθε εικόνα ξεχωριστά δημιουργήθηκε το διασπορόγραμμα της, ενώ εξετάστηκε και η περίπτωση όπου από όλα τα διαθέσιμα δεδομένα θα δημιουργηθεί ένα κοινό διασπορόγραμμα. Επίσης, εξετάστηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητων μεταβλητών σε δύο διαφορετικά σημεία εντός της λεκάνης απορροής με διαφορετικό τύπο εδαφοκάλυψης, ένα για δασικές εκτάσεις (Wendish) και ένα για αγροτικές καλλιέργειες (Uelzen). Τέλος, εξετάστηκε αν η εκτιμώμενη υγρασία επηρεάζεται από τον τύπο του δέκτη. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η συσχέτιση του μοντέλου AMBETI παρουσιάζει θετική σχέση και συσχετίζεται καλύτερα με το δείκτη TVDI ($R^2=0.6847$) και τη θερμοκρασία εδάφους ($R^2=0.6813$). Όσον αφορά στη συσχέτιση της υγρασίας AMBETI με τις δασικές εκτάσεις (Wendish) η σχέση είναι μέτρια με δείκτη TVDI ($R^2=0.558$) ενώ οι γεωργικές εκτάσεις παρουσιάζουν καλύτερη συσχέτιση ($R^2=0.7738$). Και οι δύο τύποι δεκτών παρουσίασαν θετική συσχέτιση με καλύτερη αυτή του Landsat 5 ($R^2=0.7815$) έναντι του Landsat 7 ($R^2=0.7129$). Τέλος, από τα διαγράμματα της χρονικής διακύμανσης του μοντελοποιημένου AMBETI και του πραγματικού παρουσιάζεται η σύγκληση των τάσεων. Συμπερασματικά, η χρήση της τηλεπισκόπησης στην επιστήμη της υδρολογίας και ιδιαίτερα στην εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας είναι σημαντική. Σε αντίθεση με σημειακά μοντέλα ή με επίγειες μετρήσεις, η τηλεπισκόπηση δίνει τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η χωρική διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στη διαχείριση των υδάτινων πόρων στη γεωργία.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Τηλεπισκόπηση, εδαφική υγρασία, γραμμική παλινδρόμηση, δείκτης TVDI

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εδαφική υγρασία (Soil Moisture) αποτελεί έναν από τους κυριότερους οικολογικούς παράγοντες για την ανάπτυξη της βλάστησης (Wang & Qu, 2009). Η ύπαρξη υγρασίας εδάφους εξαρτάται από το κλίμα, τις εδαφικές ιδιότητες, τη βλάστηση και την τοπογραφία μίας περιοχής, αλλά η ποσότητά της επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, τον αερισμό, τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών στο έδαφος, την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και τη συγκέντρωση τοξικών ουσιών. Η έλλειψή της περιορίζει την ανάπτυξη των φυτών, διότι για την εκτέλεση των διεργασιών τους, τα φυτά απαιτούν νερό. Κάθε είδους φυτό χρειάζεται διαφορετική ποσότητα, η οποία ανανεώνεται από τις βροχοπτώσεις. Σε περίπτωση που οι βροχοπτώσεις στην περιοχή είναι χαμηλές απαιτείται ανανέωση με την άρδευση (Βαμβακούλας, 2011).

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την εκτίμησή της, άμεσες και έμμεσες, οι οποίες όμως δεν θεωρούνται πολύ ακριβείς. Για να υπάρξει ακρίβεια στον προσδιορισμό της πρέπει να γίνονται τακτικές μετρήσεις σε πολλές θέσεις. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι άμεση αλλά είναι δύσκολη και χρονοβόρα, για αυτό ο ερευνητής επιλέγει εναλλακτικές μεθόδους υπολογισμού της, μία από αυτές είναι η χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης. Μέσα από την τηλεπισκόπηση υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η εδαφική υγρασία και όχι μόνο, σε μεγάλες εκτάσεις με ελάχιστο κόστος και λιγότερος χρόνος από ότι μία μέτρηση στο πεδίο (Zang & Zhou, 2016).

Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να μοντελοποιηθεί η συσχέτιση μεταξύ της υγρασίας εδάφους και της ανακλαστικότητάς του. Οι περισσότερες βασίζονται στον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) και στην θερμοκρασία εδάφους (Ts) (Zhang and Zhou, 2016). Η κλίση της καμπύλης Ts/NDVI μπορεί να δώσει αξιόλογη πληροφορία σχετικά με την υγρασία του εδάφους και της βλάστησης (Goetz, 1997). Η πιο διαδεδομένη μεθοδολογία αναπτύχθηκε από τον Sandholt et. al. (2002) και είναι ο Δείκτης Ξηρασίας Θερμοκρασίας Βλάστησης (Temperature Vegetation Dryness Index/TVDI). Ο TVDI βασίζεται σε μια εμπειρική παραμετροποίηση της συσχέτισης μεταξύ Ts και NDVI η οποία προκύπτει από την τριγωνική ή τραπεζοειδής μορφή του διασκορπισμού Ts/NDVI (Carlson et. al. 1994, Moran et. al. 1994, Xin et. al. 2006). Έπειτα οι παραγόμενοι δείκτες συσχετίζονται συνήθως με μετρήσεις υγρασίας που πραγματοποιούνται στο πεδίο.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να συσχετίσει τα τηλεπισκοπικά δεδομένα και συγκεκριμένα εικόνες του δέκτης Landsat με την εδαφική εργασία και να παρέχει εξισώσεις που θα μπορούν να χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων. Από την επεξεργασία των τηλεπισκοπικών δεδομένων εξάγονται ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Νερού (Normalized Difference Water Index/NDWI), ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (Normalized Difference Moisture Index/NDMI) και ο TVDI και συσχετίζονται με τιμές υγρασίας που προέρχονται από το ατμοσφαιρικό και υδρολογικό μοντέλο AMBETI (Braden H., 1995). Ως μέθοδος συσχέτισης επιλέχθηκε η γραμμική παλινδρόμηση που αναδεικνύει το βαθμό της συσχέτισής τους και τη σχέση τηλεπισκόπησης και υδρολογίας (Schmugge et al, 2002).

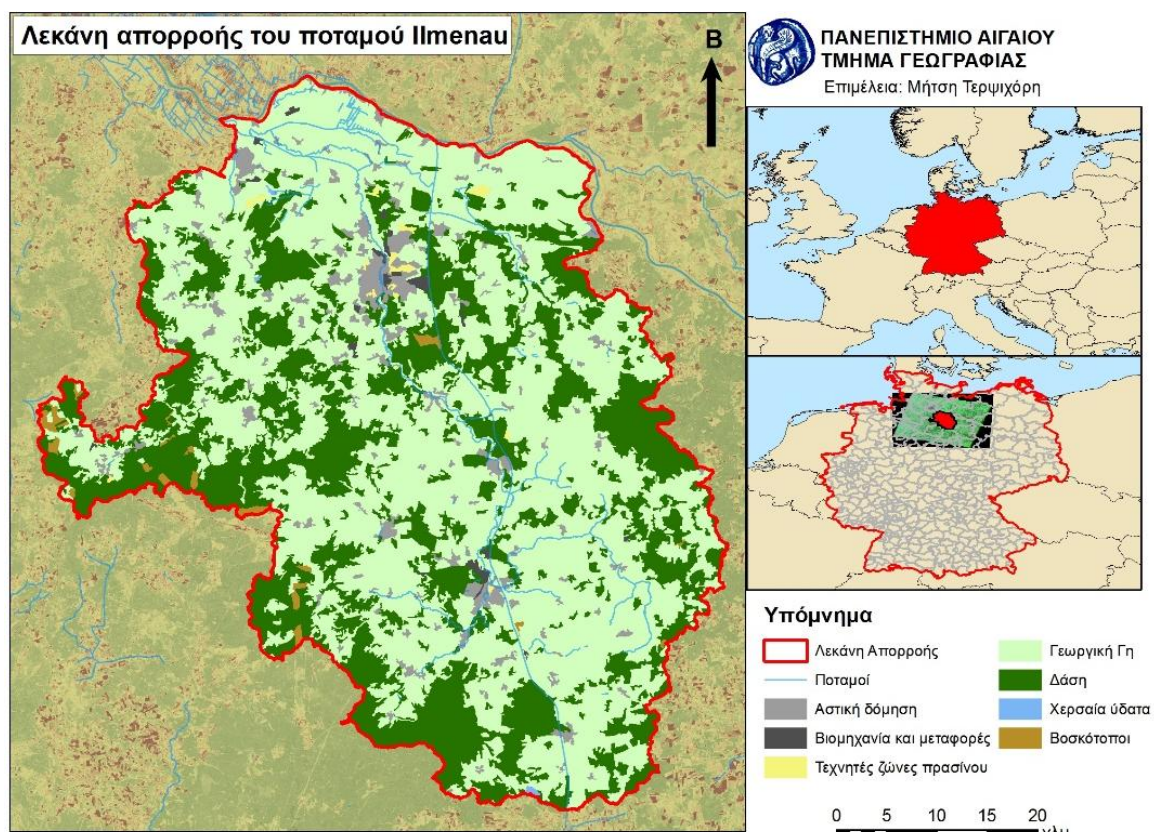
Περιοχή μελέτης της εργασίας αποτελεί η λεκάνη απορροής του ποταμού Ilmenau, στην Κάτω Σαξονία της Γερμανίας (Εικόνα 1). Ο ποταμός Ilmenau είναι παραπόταμος του Έλβα, έχει μήκος 107 χλμ και εκβάλλει στη Βόρεια Θάλασσα. Είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της συγκεκριμένης περιοχής και γύρω του υπάρχουν κυρίως αγροτικές καλλιέργειες. Η φυσική ροή του ποταμού στη βόρεια πλευρά του έχει αντικατασταθεί από μία τεχνητή κοίτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του καναλιού με το ίδιο όνομα. Η περιοχή καλύπτεται κυρίως από κωνοφόρα δάση, και αγροτικές εκτάσεις (οπωρώνες και καλλιέργειες) σύμφωνα με τις χρήσεις γης CORINE της περιοχής. Οι βασικές καλλιέργειες είναι το σιτάρι, οι πατάτες και ενεργειακές καλλιέργειες καλαμποκιού. Οι αγρότες της περιοχής εκμεταλλεύονται το κανάλι για την άρδευση στα χωράφια τους, όμως η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιούν διαφέρει κάθε εποχή. Αυτό γίνεται, διότι λαμβάνουν υπόψιν τις εποχιακές βροχοπτώσεις και τη θερμοκρασία (Wittenberg, 2015). Όσο αφορά στη θερμοκρασία η

μέση τιμή της για την περιοχή είναι περίπου 9 °C και οι ετήσιες βροχοπτώσεις περίπου 700 mm. Γενικά, το κλίμα της λεκάνης είναι εύκρατο και υγρό.

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι δορυφορικές εικόνες των δορυφορικών δεκτών Landsat 5 και Landsat 7 (Level 1T) και οι τιμές του ατμοσφαιρικού μοντέλου AMBETI. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την ιστοσελίδα της Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) και ανήκουν στην διαδρομή (path) 196 και γραμμή (row) 23. Επιλέχθηκαν εικόνες για το χρονικό διάστημα 2002-2012 και συγκεκριμένα για τους μήνες Απρίλιο έως Σεπτέμβριο (Πίνακας 1). Κατά τους μήνες αυτούς αφενός υπήρχαν οι λιγότερες νεφοσκεπείς περιοχές, αφετέρου, οι μήνες αυτοί σύμφωνα με τη γερμανική υδρολογική χρονιά αντικατοπτρίζουν την εποχή βλάστησης (Wittenberg, 2015).



Εικόνα 1: Ο χάρτης της περιοχής μελέτης και οι χρήσεις γης της

Το μοντέλο AMBETI συνδυάζει στοιχεία της ατμόσφαιρας, του εδάφους και της βλάστησης. Είναι βαθμονομημένο και υπολογίζει τη διαπνοή και εξάτμιση του εδάφους αλλά και τις μικροκλιματικές συνθήκες στο χώμα και στα φύλλα. Σκοπός του είναι ο καθορισμός ημερήσιων τιμών εξατμισοδιαπνοής για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού σε μικρές λεκάνες απορροής σε διάστημα μεγαλύτερο από ένα χρόνο. Στο ίδιο

μοντέλο περιλαμβάνεται ένα εξελιγμένο υπο-μοντέλο το οποίο υπολογίζει τα συστατικά των φυτών και των καθαρών ροών ακτινοβολίας. Οι υπολογισμοί εντός του μοντέλου δείχνουν την ευαισθησία του στις αντίστοιχες μετεωρολογικές συνθήκες (Braden, 2011). Σαν δεδομένα εισόδου δέχεται τη θερμοκρασία του εδάφους, την ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος, τη θερμοκρασία των πεσμένων στο έδαφος φύλλων, το χρόνο που τα φύλλα έχουν υγρασία, τα συστατικά της εξάτμισης, την υγρασία της φυτικής γης και την περίοδο που το έδαφος ήταν καλυμμένο από χιόνι. Το AMBETI παράγει μια σειρά παραμέτρων, μία εκ των οποίων είναι η υγρασία εδάφους για τα πρώτα 10 εκατοστά. Οι υπολογισμοί είναι ημερήσιοι και σημειακοί, δηλαδή οι παράμετροι παράγονται καθημερινά για συγκεκριμένα σημεία σε όλη τη Γερμανία. Δύο από τα σημεία αυτά (Wendish Evern: δασικές εκτάσεις North 53°12'36.00", East 10°28'12.00" και Uelzen: γεωργικές καλλιέργειες, North 52° 56' 24.000" B, 10°31'48.00" East) βρίσκονται στην υπό εξέταση λεκάνη απορροής και χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν οι τιμές εδαφικής υγρασίας των 10 εκατοστών ως τιμές αναφοράς στα υπό ανάπτυξη μοντέλα παλινδρόμησης. Τα προϊόντα του μοντέλου AMBETI είναι διαθέσιμα ελεύθερα στο διαδίκτυο (ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/derived_germany/soil/daily/recent/) και μπορούν να προσδιορίσουν σε ένα βαθμό την αβεβαιότητα των προβλεπόμενων κλιματικών δεδομένων.

Πίνακας 1: Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου

Ημερομηνία	Δορυφορικός Δέκτης
03/09/2002	Landsat 7
15/04/2003	Landsat 7
14/09/2003	Landsat 5
15/06/2005	Landsat 5
15/04/2006	Landsat 5
04/07/2006	Landsat 5
14/09/2006	Landsat 5
26/04/2007	Landsat 7
15/04/2009	Landsat 7
01/05/2009	Landsat 7
18/04/2010	Landsat 7
07/07/2010	Landsat 7
28/09/2011	Landsat 7
25/05/2012	Landsat 7
29/08/2012	Landsat 7

2.2 Μεθοδολογία

Πρώτο βήμα της μεθοδολογίας ήταν η σύνθεση των απαραίτητων καναλιών για κάθε δέκτη σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η αποκοπή των νεφών. Μελετήθηκαν τα ιστογράμματα του κοντινού υπέρυθρου καναλιού για κάθε εικόνα και εντοπίστηκαν κατώφλια τιμών τα οποία οριοθετούσαν τις περιοχές με νέφη. Έπειτα ακολούθησε η ραδιομετρική διόρθωση (radiometric correction) δηλαδή η προεπεξεργασία και διόρθωση των τιμών ακτινοβολίας που δέχεται ο δορυφόρος, διότι δεν καταγράφεται η ακριβή τιμή της. Κατά τη ραδιομετρική διόρθωση μετατράπηκαν οι ψηφιακές τιμές (DN)

σε τιμές ανακλαστικότητας (Top of Atmosphere/TOA reflectance) (Chander et al, 2009) για τα ορατά και τα κοντινά και μέσα υπέρυθρα, ενώ τα θερμικά μετατράπηκαν σε φαινόμενη θερμοκρασία. Σημειώνεται ότι δεν υπήρξε καμία επεξεργασία στις εικόνες του Landsat 7 που χρονολογούνται μετά το 2003, όπου προέκυψε το πρόβλημα στον σαρωτή του δορυφόρου με αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων στις άκρες κάθε σκηνικού, καθώς δεν επηρέαζαν την μεθοδολογία και το τελικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 2: Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν και οι ανάλογες σταθερές για Landsat 5 και 7 (πηγές: Chander G. et al, 2009, NASA Landsat 7 user's handbook)

Κανάλι	Φασματικό Εύρος (μm)	Gain	Bias	E _{sun}	K ₁	K ₂
Landsat 5						
GREEN	0.528 – 0.609	1.322205	-4.16	1796	-	-
RED	0.626 – 0.693	1.043976	-2.21	1536	-	-
NIR	0.776 – 0.904	0.876024	-2.39	1031	-	-
SWIR	1.567 – 1.784	0.120354	-0.49	220.0	-	-
TIRS	10.45 – 12.42	0.055376	1.18	-	607.76	1260.56
Landsat 7						
GREEN	0.519 – 0.601	0.798819	-7.20	1842	-	-
RED	0.631 – 0.692	0.621654	-5.62	1547	-	-
NIR	0.772 – 0.898	0.639764	-5.74	1044	-	-
SWIR	1.547 – 1.748	0.126220	-1.13	225.7	-	-
TIRS_1	10.31 – 12.36	0.067087	-0.07	-	666.09	1287.71
TIRS_2	10.31 – 12.36	0.037205	3.16	-	666.09	1287.71

Έπειτα, ακολούθησε ο υπολογισμός των δεικτών NDVI, NDWI, NDMI και TVDI. Ο δείκτης NDVI υποδεικνύει την παρουσία της βλάστησης σε μία περιοχή και είναι ο πλέον διαδεδομένος δείκτης βλάστησης με εύρος τιμών στο διάστημα [-1,1], όπου το 0 είναι το όριο απουσίας βλάστησης. Δίνεται από τον τύπο (Rouse et al, 1973):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Ο δείκτης NDMI αξιολογεί το επίπεδο της περιεχόμενης υγρασίας στα διάφορα στοιχεία του τοπίου. Ο υπολογισμός του γίνεται με το λόγο της διαφοράς του κοντινού υπέρυθρου (NIR) και του βραχυκυματικού (shortwave) υπέρυθρου (SWIR) προς το άθροισμά τους (Hardisky et al, 1983). Το εύρος των τιμών του είναι ίδιο με του NDVI, δηλαδή από [-1,1], όπου -1 σημαίνει χαμηλή υγρασία, 0 καθόλου υγρασία και τιμές από 0.1 – 1 υψηλή υγρασία. Ο NDMI υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

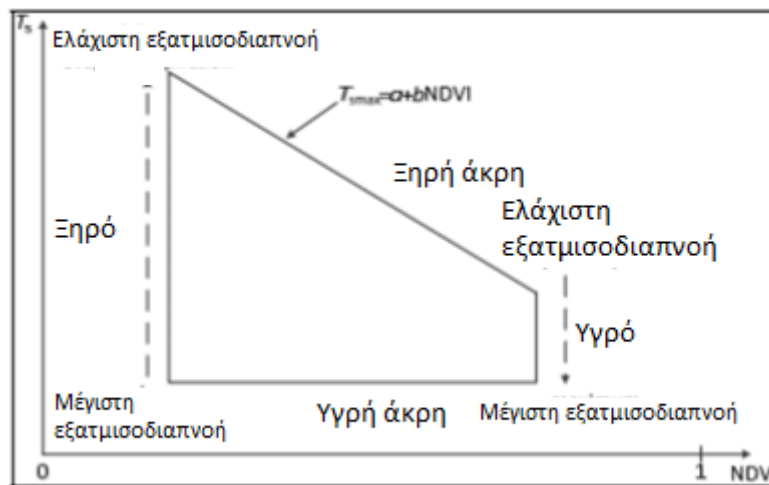
$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Ο δείκτης NDWI εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία, τον τύπο και το ποσοστό κάλυψης της βλάστησης. Για να υπολογισθεί γίνεται χρήση του λόγου της διαφοράς του πράσινου καναλιού (GREEN) με το κοντινό υπέρυθρο (NIR) προς το άθροισμά τους (Gao, 1996). Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ [-1,1], όπου -1 έως 0 είναι ξηρή γη, ενώ από 0.1

έως 1 είναι γη με έντονη υγρασία. Ο συγκεκριμένος δείκτης θεωρείται ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία χαρτογράφησης υγρασίας και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος. Μαθηματικά υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Ο δείκτης TVDI αντικατοπτρίζει την επιφανειακή υγρασία εδάφους. Ο υπολογισμός του σχετίζεται άμεσα με τον NDVI και τη θερμοκρασία και τις μεταξύ τους αλλαγές. Η κατανομή των τιμών Ts/NDVI ακολουθεί συνήθως μια τραπεζοειδής ή τριγωνική μορφή (Εικόνα 2). Η κατανομή αυτή οροθετείται από δύο άκρα την ξηρή άκρη όπου παρατηρείται η ελάχιστη εξατμισοδιαπνοή και την υγρή άκρη όπου παρατηρείται η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή. Το μοντέλο υπολογισμού του TVDI, περιλαμβάνει τον εμπειρικό προσδιορισμό των δύο ευθειών που οριοθετούν τα δύο άκρα. (Meng et al, 2008).



Εικόνα 2: Η μορφή του διασπορογράμματος Ts/NDVI

Ο δείκτης TVDI δίνεται από την σχέση (Sridhar et al., 2008):

$$TVDI = \frac{T_{smax} - T_s}{T_{smax} - T_{smin}}$$

Όπου Ts η θερμοκρασία του pixel για το οποίο υπολογίζεται ο δείκτης TVDI, ενώ οι τιμές Tsmax και Tmin είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας αντίστοιχα για συγκεκριμένη τιμή NDVI και δίνονται από τις σχέσεις:

$$Tsmax = (a1 * NDVI) + b1$$

$$Tsmin = (a2 * NDVI) + b2$$

Τέλος, για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ τηλεπισκοπικών δεικτών και μοντέλου εφαρμόστηκε η στατιστική μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς είναι η απλούστερη συναρτησιακή σχέση μεταξύ 2 παραμέτρων (Zar, 1996). Η απλή γραμμική παλινδρόμηση προβλέπει τη δημιουργία ενός μαθηματικού σχεσιακού μοντέλου

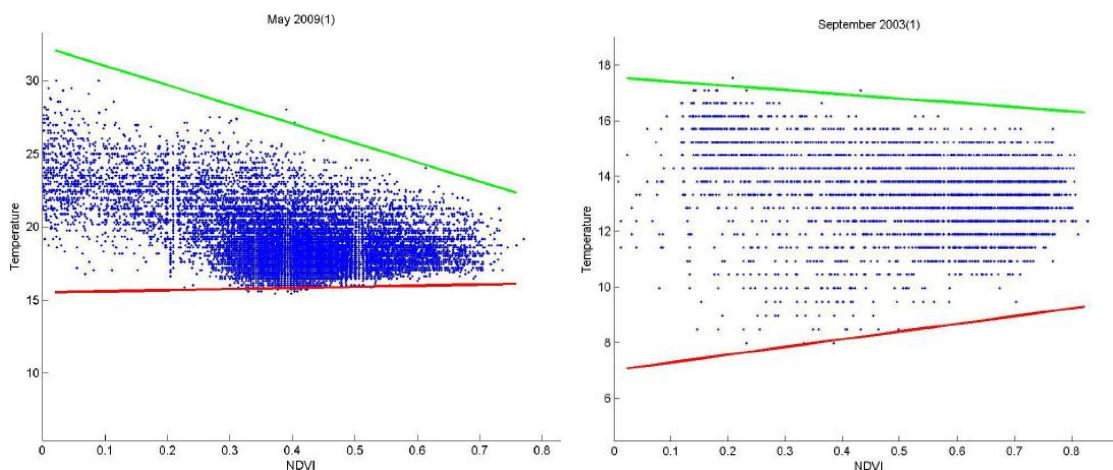
(παλινδρομικό μοντέλο) με ίδιο εύρος τιμών με στόχο τη διερεύνηση της συναρτησιακής εξάρτησης μίας ανεξάρτητης και μίας εξαρτημένης μεταβλητής. Ως εξαρτημένη μεταβλητή τέθηκαν οι τιμές του μοντέλου AMBETI και ως ανεξάρτητη τα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Κατά τον υπολογισμό του TVDI και συγκεκριμένα ο προσδιορισμός των ευθείων T_{smax} και T_{smin} πραγματοποιήθηκε για κάθε εικόνα ξεχωριστά, δηλαδή υπολογίστηκε ένα διασπορόγραμμα $T_s/NDVI$ για κάθε ημερομηνία ξεχωριστά. Η μη ομοιόμορφη κατανομή των σημείων στο χώρο ανάμεσα στις δύο (2) άκρες μεταξύ των εικόνων, αλλά και το γεγονός ότι ο δείκτης είναι ένας σχετικός δείκτης για κάθε εικόνα, δηλαδή λαμβάνει την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή NDVI για τη συγκεκριμένη εικόνα, οδηγεί σε μη συγκρίσιμα αποτελέσματα δηλαδή ίδια τιμή TVDI για 2 εικόνες δεν σημαίνει ότι στο συγκεκριμένο pixel επικρατεί η ίδια ξηρασία (Εικόνα 3). Έτσι δημιουργήθηκε κοινό διασπορόγραμμα για όλες τις εικόνες και προσδιορίστηκε το κοινό ξηρό και υγρό άκρο (Εικόνα 4). Οι εξισώσεις T_{smax} και T_{smin} δίνονται από τις σχέσεις:

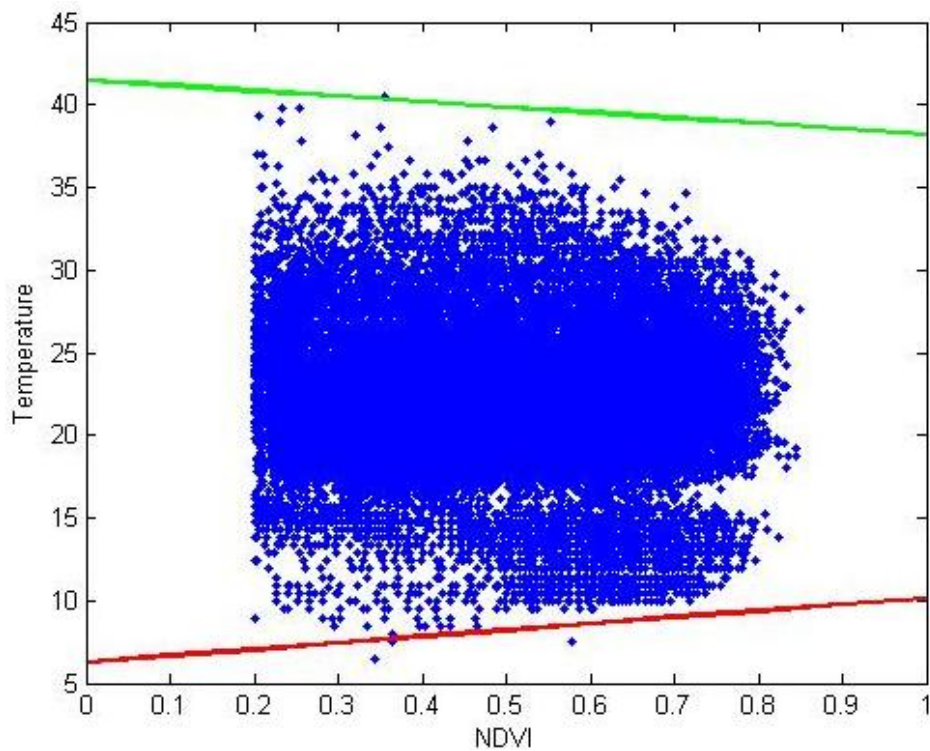
$$T_{smax} = (-3.274 * NDVI) + 41.4836$$

$$T_{smin} = (3.8921 * NDVI) + 6.2528$$

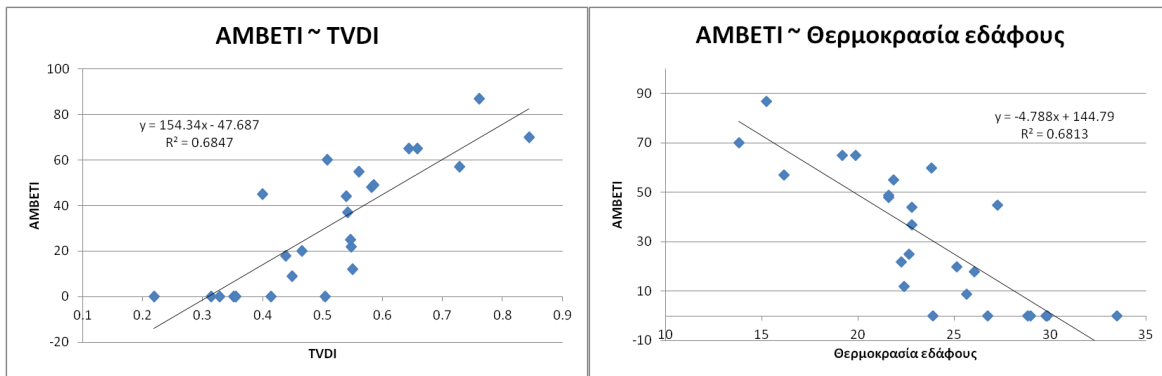


Εικόνα 3: Διασπορογράμματα της ίδιας περιοχής για δύο διαφορετικές ημερομηνίες

Στη συνέχεια, διερευνήθηκαν οι γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ του AMBETI και των δεικτών. Η μεγαλύτερη συσχέτιση παρουσιάστηκε μεταξύ AMBETI με TVDI ($R^2 = 0.6847$) και AMBETI με επιφανειακή θερμοκρασία ($R^2 = 0.6813$), με τους υπόλοιπους δείκτες η σχέση να είναι αμελητέα (Εικόνα 5).

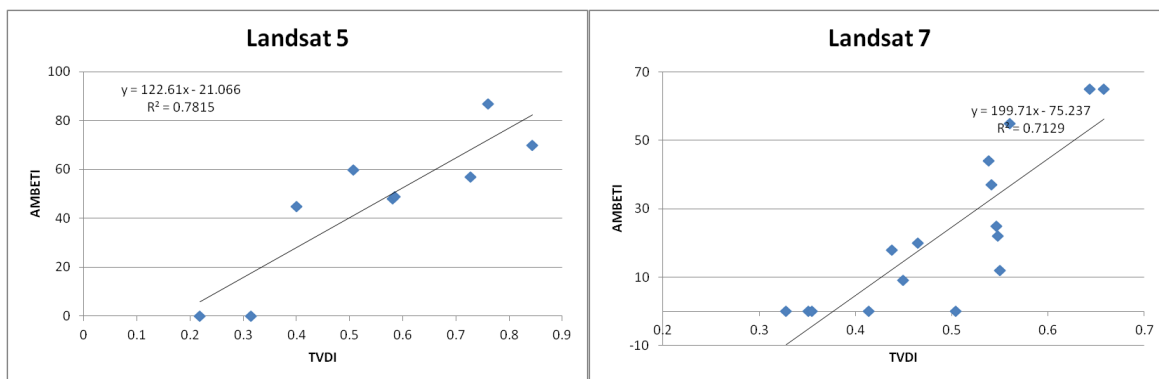


Εικόνα 4: Το κοινό για όλες τις εικόνες διασπορόγραμμα



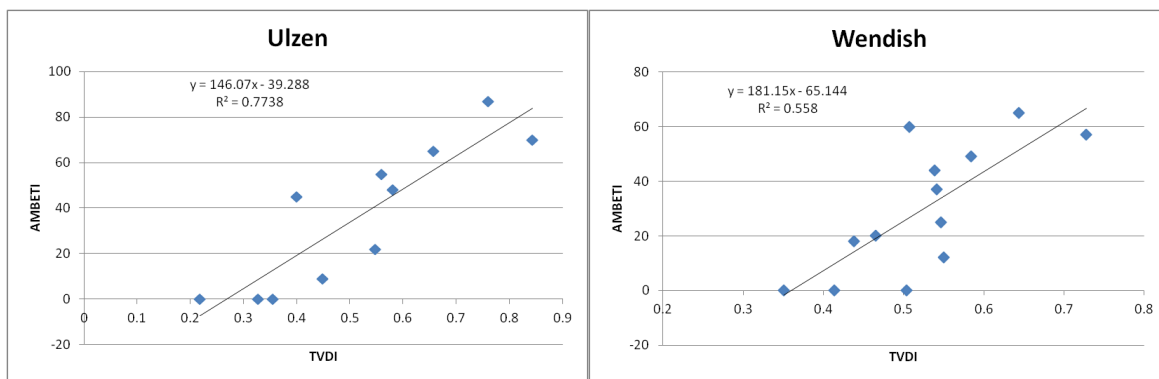
Εικόνα 5: Γραμμική συσχέτιση μεταξύ *AMBETI* και δείκτη *TVDI* (αριστερά) και *AMBETI* και θερμοκρασίας εδάφους (δεξιά)

Επίσης, διερευνήθηκε η πιθανότητα να αλλάζει η δύναμη της συσχέτισης των μεταβλητών *AMBETI* και δείκτη *TVDI* ανάλογα με τον δέκτη. Η υπόθεση αυτή όντως ισχύει καθώς η συσχέτιση *AMBETI* με τα δεδομένα Landsat 5 είναι μεγαλύτερη ($R^2 = 0,7815$) συγκριτικά με αυτά του Landsat 7 ($R^2 = 0,7129$) χωρίς ωστόσο να υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Γραφήματα της σχέσης AMBETI με τον TVDI για Landsat 5 (αριστερά) και 7 (δεξιά)

Τέλος, έγινε έλεγχος εάν ο τύπος εδαφοκάλυψης επηρεάζει τη σχέση μεταξύ AMBETI και δείκτη TVDI. Συνεπώς, το δείγμα διαχωρίστηκε με βάση το σημείο του μοντέλου AMBETI δηλαδή αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για τα δάση (σταθμός Wendish) και ένα μοντέλο για τις γεωργικές εκτάσεις (σταθμός Uelzen). Από την παλινδρόμηση διαπιστώθηκε ότι στις δασικές εκτάσεις το μοντέλο AMBETI έχει μέτρια συσχέτιση με το δείκτη TVDI ($R^2=0.558$) ενώ στις γεωργικές εκτάσεις ο δείκτης TVDI συσχετίζεται σημαντικά με την υγρασία εδάφους σε βάθος 10 εκατοστών όπως παράγεται από το μοντέλο AMBETI ($R^2=0.7738$) (Εικόνα 7).

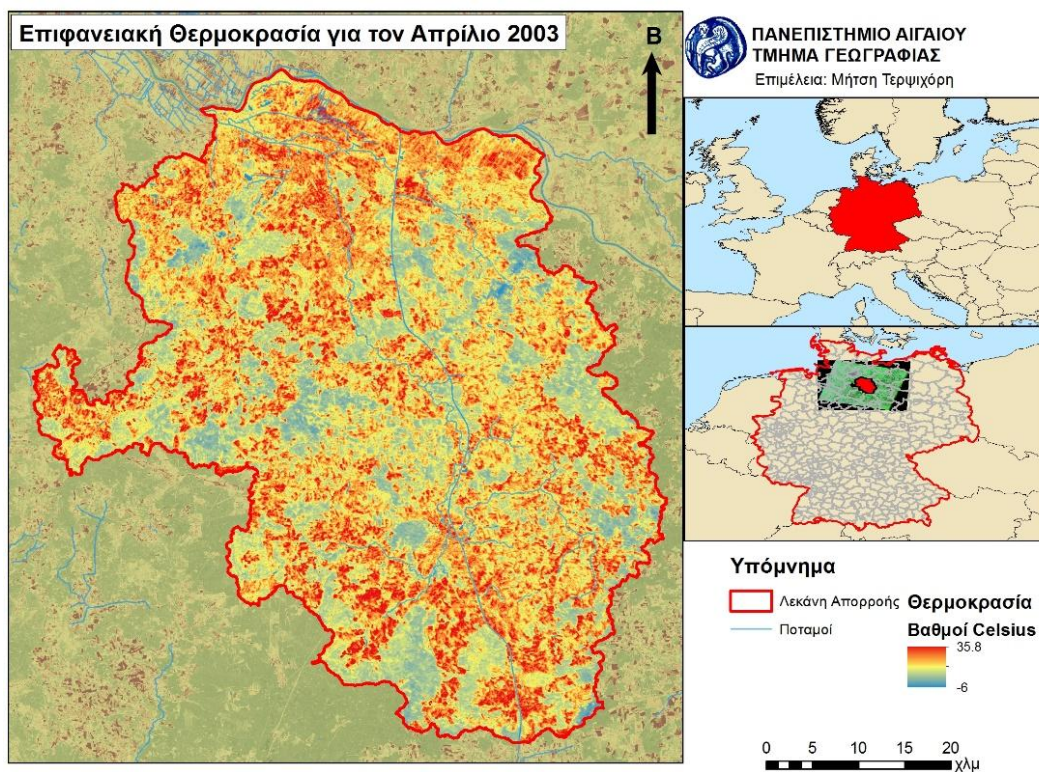


Εικόνα 7: Γραφήματα της σχέσης AMBETI με τον TVDI για Landsat 5 και 7 αντίστοιχα

Μετά την αξιολόγηση των συσχετίσεων, επιλέχθηκε το τελικό μοντέλο το οποίο συσχετίζει την υγρασία εδάφους σε βάθος 10 εκατοστών του AMBETI και το δείκτη NDVI (Εικόνα 5-αριστερά) και εφαρμόστηκε για μια ημερομηνία. Η σχέση αυτή είναι η:

$$AMBETI = (154.34 * TVDI) - 47.687$$

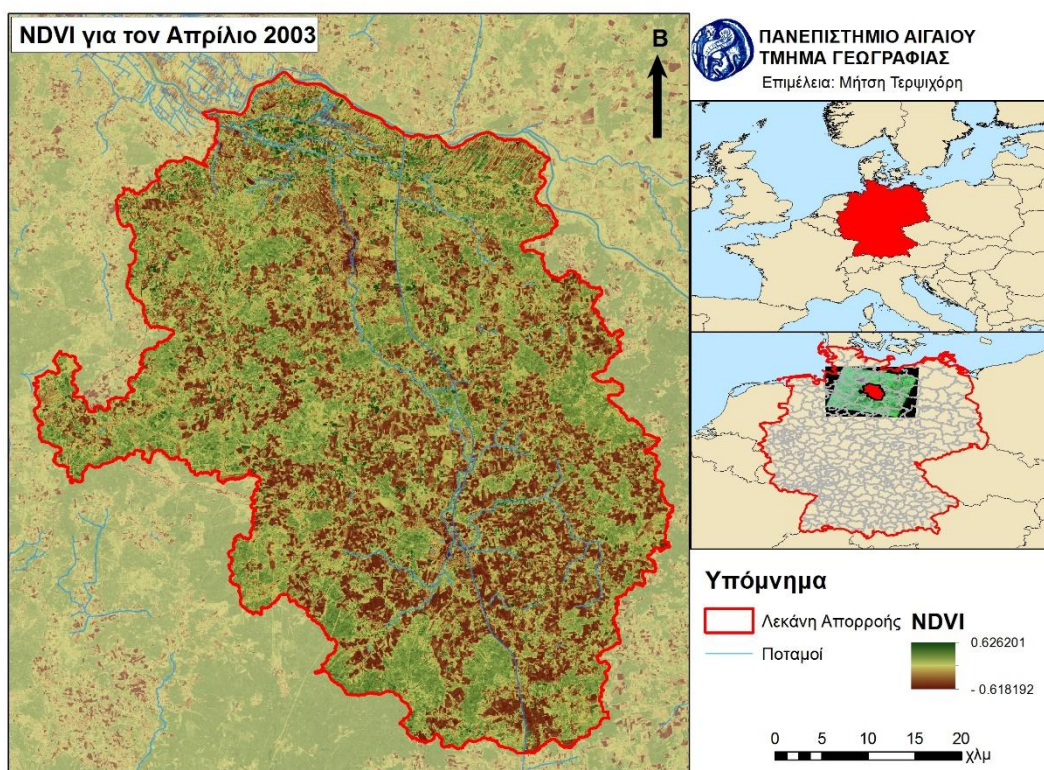
Συνεπώς, για τον Απρίλιο του 2003, η θερμοκρασία εδάφους σύμφωνα με τα τηλεπισκοπικά δεδομένα του δέκτη Landsat 7 παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



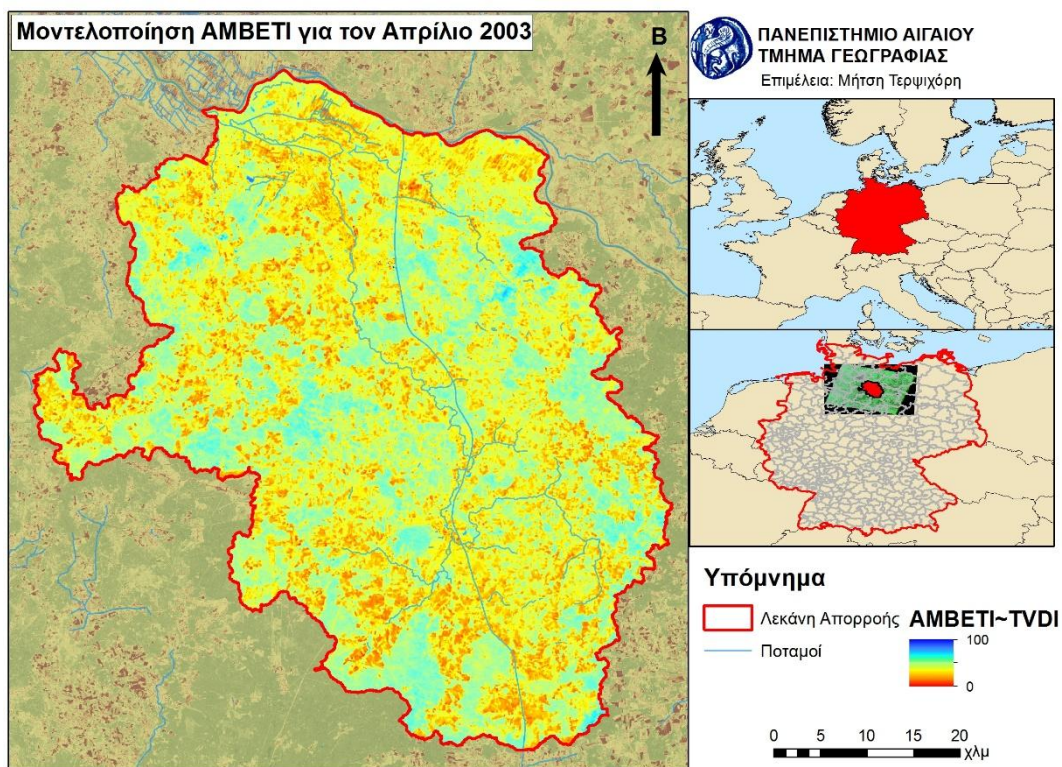
Εικόνα 8: Χάρτης θερμοκρασίας εδάφους για τον Απρίλιο 2003

Επίσης, ο δείκτης βλάστησης NDVI για την ίδια ημερομηνία παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Αφού υπολογίστηκε πρώτα ο δείκτης TVDI για την παραπάνω ημερομηνία, εφαρμόστηκε το επιλεγμένο μοντέλο και δημιουργήθηκε ο χάρτης κατανομής της εκτιμώμενης υγρασίας εδάφους των 10 εκατοστών AMBETI για όλη την περιοχή μελέτης (Εικόνα 10).

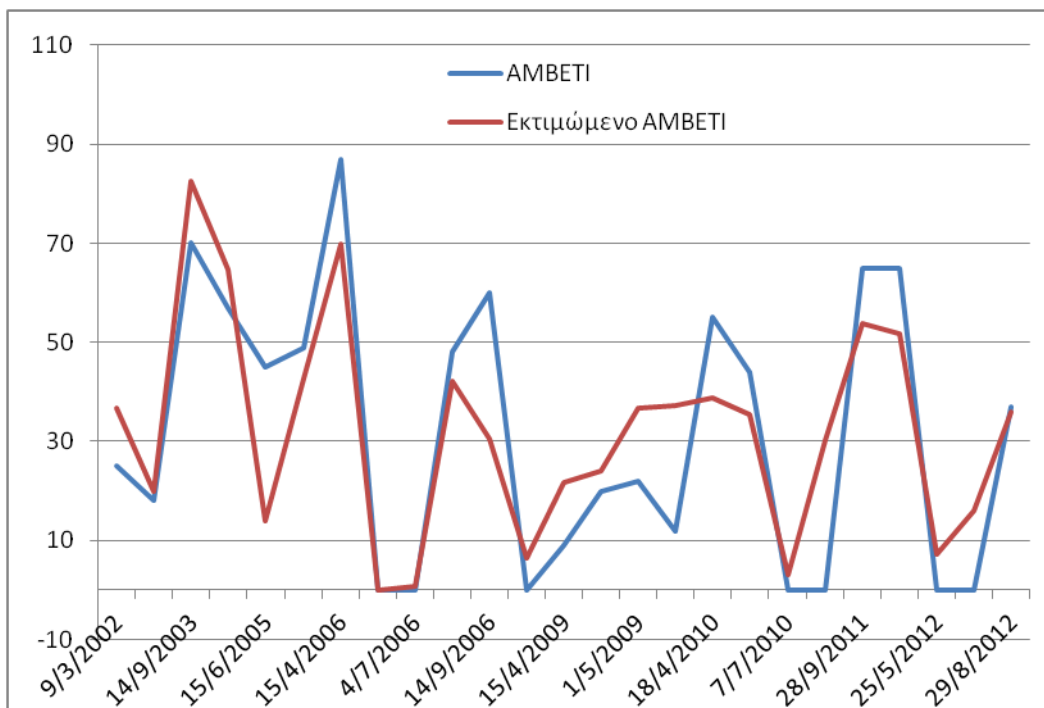
Τέλος, από το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας όπως υπολογίζεται από το AMBETI και όπως εκτιμάται από τα δορυφορικά δεδομένα προκύπτει ότι ταυτίζεται η χρονική διακύμανση που σημαίνει ότι η εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας μέσω της Τηλεπισκόπησης μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για τη διερεύνηση γενικότερων κλιματικών τάσεων σε χωρικό επίπεδο λεκανών απορροής. Επίσης μέσω της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης TVDI υπολογίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την εδαφική υγρασία κατά τη θερινή περίοδο που παρατηρείται μικρό ύψος βροχόπτωσης. Ο δείκτης αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την εδαφική υγρασία και κατ'έκταση την ανάγκη άρδευσης των καλλιεργειών κατά την θερινή περίοδο και να βοηθήσει στη λήψη διαχειριστικών μέτρων.



Εικόνα 9: Χάρτης δείκτη NDVI για τον Απρίλιο 2003



Εικόνα 10: Χάρτης εκτιμώμενου AMBETI για τον Απρίλιο 2003



Εικόνα 11: Σύγκριση της χρονικής διακύμανσης υγρασιών εδάφους (%)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από αυτή την εργασία γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας με τη χρήση τηλεπισκόπησης. Το επιστημονικό ερώτημα που προσεγγίζεται αφορά το κατά πόσο υπάρχει συσχέτιση των τιμών ανακλαστικότητας που καταγράφονται από ένα δορυφορικό δέκτη με τις τιμές ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου που παράγει εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας. Η κύρια επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων είχε ως στόχο την παραγωγή ορισμένων δεικτών που εκφράζουν έμμεσα την υγρασία εδάφους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ των προτεινόμενων βιβλιογραφικά δεικτών και των εκτιμώμενων τιμών υγρασίας από το ατμοσφαιρικό μοντέλο AMBETI. Το μεγάλο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι πλέον με την εφαρμογή του τελικού μοντέλου είναι δυνατή η εκτίμηση της χωρικής κατανομής της εδαφικής υγρασίας, η οποία αποτελεί σημαντική παράμετρο στη διαχείριση των αγροτικών εκτάσεων και κυρίως στον τομέα της άρδευσης.

Παρόλα αυτά, προτείνεται η περεταίρω διερεύνηση της μεθοδολογίας λαμβάνοντας υπόψη και πραγματικές μετρήσεις υγρασίας εδάφους. Η διερεύνηση αυτή μπορεί να περιλαμβάνει και τη διαφοροποίηση των τύπων εδαφοκάλυψης δεδομένου ότι, όπως διαπιστώθηκε και από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, ο τύπος εδαφοκάλυψης επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει εφαρμογή για περιοχές με ομοιογενή τύπο εδαφοκάλυψης, όσο είναι το μέγεθος του pixel του Landsat

(30m) και κυρίως όταν το έδαφος δεν καλύπτεται από την κόμη των δέντρων ή το φύλλωμα των καλλιεργειών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βαμβακούλας Χ.(2011), Προσδιορισμός υδραυλικών ιδιοτήτων δασικών εδαφών σύμφωνα με το πρωτόκολλο ISO 11274/1998, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

Braden H. (1995), The model AMBETI, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 195

Braden H. (2011), Sensitivity of the agrometeorological model AMBETI/BEKLIMA to modified meteorological boundary conditions, *Meteorologische Zeitschrift*, 20(5), 471-477

Carlson, T.N., Gillies, R.R., Perry, E.M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing*, 9, 161–173.

Chander G., Markham B., Helder D., (2009), Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI Sensors, *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903

Gao B.-C., (1996), NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 58, 267-266

Goetz, S.J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 71–94

Hardisky MA, Klemas V, Smart RM (1983) The influence of soil-salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina-alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77–83.

Meng L., Li J., Chen Z., Xie W., Chen D., Duan H., (2008), The calculation of TVDI based on the composite time of pixel and drought analysis, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 518-524

Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface–Air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 49, 246–263.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.

Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213–224.

Schmugge T., Kustos W., Ritchie J., Jackson T., Rango A., (2002), Remote Sensing in Hydrology, *Advances in water resources*, 25, 1367-1385

Sridhar V., Hubbard K.G., You J., Hunt E.D. (2008), Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its “user friendliness” in severity-area-duration assessment, *Journal of Hydrometeorology*, 9, 660–676

Wang L., Qu J., (2009), Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review, *Frontiers of Earth Science*, 3, 237-247

Wittenberg H. (2015), Ground Water Abstraction for irrigations and it’s impacts on low flows in a watershed in Northern Germany, *Resources*, 4, 566-576

Xin, J.F., Tian, G.L., Liu, Q.H., Chen, L.F. (2006). Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 2071–2075.

Zar, J.H. (1996) *Biostatistical Analysis* Prentice-Hall, Eryelwood Cliffs, N.J. 663pp.

Zhang, D. and Zhou, G. (2016). Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing: A Review. *Sensors*, 16(8), 1308.