

Χωρική ανάλυση της συμπεριφοράς του δείκτη βλάστησης NDVI πάνω από το δέλτα του ποταμού Πηνειού (Θεσσαλία), αξιοποιώντας δορυφορική εικόνα World View 2

Σκιάνης Γ. Αιμ.¹, Βαϊόπουλος Α. Δ.², Δρακόπουλος Π.³ και Πούλος Σ.⁴

¹Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας-Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωγραφίας-Κλιματολογίας, Εργαστήριο Τηλεανίχνευσης, Αθήνα 157 84, Ελλάδα, skianis@geol.uoa.gr

²Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, arisvaiopoulos@outlook.com

³Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας, Εργαστήριο Οπτικών Οργάνων, pdarak@teiath.gr

⁴Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας-Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωγραφίας-Κλιματολογίας, Αθήνα 157 84, Ελλάδα, poulos@geol.uoa.gr

Abstract

The present paper is part of a research project aiming to map the geology, land cover, land use and coast morphology of the Pinios delta formation (Thessaly). The whole research is carried out under the scope of the environmental consequences which may be produced by the evolving change in the climate.

The specific goal of this paper is to map the land cover of the area, calculating the Normalized Differences Vegetation Index (NDVI) and study its spatial variation using geostatistical methods. Satellite imagery provides the necessary data for such a study.

The NDVI image was produced by channels 7 (near infrared) and 5 (red) of a World 2 View multispectral image. In order to study the spatial variation of the vegetation index, various tools of Matlab and ILWIS software packages have been used, such as standard descriptive statistics, variograms, autocorrelograms, frequency spectra and standard deviation filters.

It was found that the NDVI has high values over almost all the area under study, except of the northeast region of the Pinios delta. The mean value of the NDVI was found to be quite high (equal to 0.561), which indicates the presence of vegetation at a great part of the area under study. A more careful observation shows that triangular area of the intermontane basin, where agricultural activities mainly take place, is expressed with a higher tonality than that of the mountain feet. This difference in the tonality is due to the fact that in cultivated land the vegetation is denser than in a natural land cover with not any anthropogenic activity.

The bidimensional variogram surface is particularly interesting, since it is expressed as an ellipse with its long axes oriented northeast-southwest. This shows that there is a certain spatial anisotropy in the behavior of the NDVI values. Therefore, at northeast-southeast direction the spatial variation of the NDVI is relatively moderate, meanwhile more rapid variations occur at the northwest-southeast direction.

The study of the behavior of the NDVI vegetation index has provided information about the orientation of surface formations at the geographical space. This information may be useful in making a reliable classification of land cover and land uses in Pinios delta formation.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια πρώτη χαρτογράφηση της φυτοκάλυψης της περιοχής του δέλτα του ποταμού Πηνειού (Θεσσαλία), μέσω του δείκτη βλάστησης NDVI, που υπολογίζεται από πολυφασματική εικόνα World View 2. Στη συνέχεια επιχειρείται μια μελέτη της χωρικής μεταβολής του δείκτη NDVI, αξιοποιώντας στατιστικές και γεωστατιστικές μεθόδους (περιγραφική στατιστική της μιας μεταβλητής, αυτοσυσχέτιση, ημιβαριόγραμμα, ανάλυση συχνότητων, φίλτρο τυπικής απόκλισης). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον

παρουσιάζει το δισδιάστατο βαριόγραμμα επιφανείας, στο οποίο που εκδηλώνεται χωρική ανισοτροπία στη συμπεριφορά των τιμών του δείκτη NDVI. Πιο συγκεκριμένα, κατα τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ έχουμε σχετικά ήπια μεταβολή της χωρικής αυτοσυσχέτισης, ενώ αντιθέτως κατά τη ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση παρουσιάζονται πιο απότομες χωρικές μεταβολές. Στην εικόνα του φάσματος πλατών που παράχθηκε από την ανάλυση συχνοτήτων των τιμών NDVI, παρατηρείται μια κανονική ζώνωση στις υψηλές συχνότητες, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Αυτό σχετίζεται με τη γεωμετρία της φυτοκάλυψης, όπως αυτή εκφράζεται στην εικόνα NDVI, όπου τα αγροτεμάχια είναι προσανατολισμένα προς τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, στο κεντρικό και νότιο τμήμα του λεκανοπεδίου. Η μελέτη της συμπεριφοράς του δείκτη βλάστησης NDVI έδωσε πληροφορίες για τον τρόπο που προσανατολίζονται στο γεωγραφικό χώρο οι διάφοροι εδαφικοί σχηματισμοί. Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας μπορούν να συμβάλουν σε μια αξιόπιστη ταξινόμηση των τύπων εδαφοκάλυψης και των χρήσεων γης στο δέλτα του Πηνειού.

Λέξεις Κλειδιά: Δείκτης βλάστησης NDVI, αυτοσυσχέτιση, βαριόγραμμα, ανάλυση συχνοτήτων, φίλτρο τυπικής απόκλισης, ανισοτροπία.

Key Words: NDVI vegetation index, autocorrelation, variogram, frequency analysis, standard deviation filter, anisotropy.

Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στα πλαίσια μιας ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας για την αποτύπωση της γεωλογίας, της εδαφοκάλυψης, των χρήσεων γης και της παράκτιας γεωμορφολογίας του δέλτα του ποταμού Πηνειού (Θεσσαλία), υπό το πρίσμα των περιβαλλοντικών συνεπειών που μπορούν να επέλθουν στην περιοχή εξαιτίας της εξελισσόμενης κλιματικής αλλαγής.

Απο πλευράς εδαφοκάλυψης και φυτοκάλυψης απαντώνται αγροτικές καλλιέργειες (μη αρδευόμενη και μόνιμα αρδευόμενη αρόσιμη γη, σύνθετες καλλιέργειες), φυσική βλάστηση, σκληροφυλλική βλάστηση, φυσικοί βοσκότοποι, βάλτοι και υδατορεύματα (ΥΠΕΧΩΔΕ 2004).

Ο σκοπός της εργασίας είναι να αποτυπωθεί, αξιοποιώντας δορυφορικά δεδομένα, η εδαφοκάλυψη, όπως αυτή εκφράζεται μέσω του δείκτη βλάστησης NDVI (Rouse et. al. 1973), και να μελετηθεί η χωρική μεταβολή του δείκτη αυτού, αξιοποιώντας μεθόδους της γεωστατιστικής. Η μελέτη αυτή της χωρικής μεταβολής του NDVI μπορεί να παράσχει στοιχεία για μια αξιόπιστη ταξινόμηση και χαρτογράφηση της εδαφοκάλυψης και των χρήσεων γης του ποτάμιου δέλτα, υλοποιώντας έτσι έναν από τους βασικούς στόχους του ερευνητικού προγράμματος.

Δεδομένα και μεθοδολογία έρευνας

Για τη μελέτη της εδαφοκάλυψης της περιοχής έρευνας αξιοποιήθηκε πολυφασματική δορυφορική εικόνα World View 2 (Ιούλιος 2013), στην οποία έγινε απόλυτη ατμοσφαιρική διόρθωση με το εργαλείο FLAASH του λογισμικού ENVI. Στην (Εικ. 1) εμφανίζεται ένα έγχρωμο σύνθετο φασματικών καναλιών σε φυσικά χρώματα. Ο δείκτης βλάστησης NDVI παράχθηκε από τις φασματικές ζώνες 7 (εγγύς υπέρυθρο) και 5 (ερυθρό) της πολυφασματικής εικόνας World View 2, ενώ για τη μελέτη της χωρικής μεταβολής του δείκτη χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία των λογισμικών Matlab και ILWIS και υπολογίστηκαν διάφορα στατιστικά μεγέθη, ημibaριογράμματα (Curran 1988, Liang 2004), διαγράμματα

αυτοσυσχέτισης (Swan & Sandilands 1995), φάσματα συχνοτήτων (Schowengerdt 1997, Nikolakopoulos et. al. 2001) και τιμές τυπικής απόκλισης ανά εικονοστοιχείο (Jensen 1996).



Εικ. 1: Έγχρωμο σύνθετο (R-G-B: 5-3-2) ατμοσφαιρικά διορθωμένης εικόνας WorldView-2, της υπό μελέτη περιοχής του Πηνειού.

Οπτική ερμηνεία δορυφορικών δεδομένων και εικόνας δείκτη βλάστησης

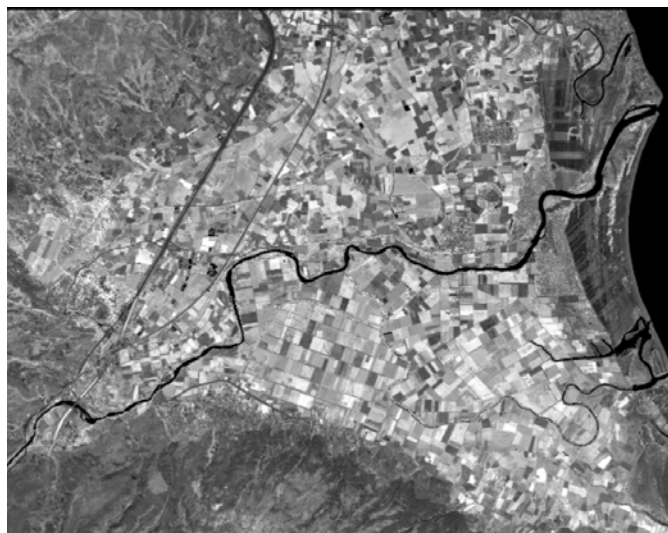
Από την (Εικ. 1) βλέπουμε ότι η υγιής βλάστηση κυριαρχεί στην περιοχή υπό τη μορφή καλλιεργειών, η οποία σχηματίζει τριγωνική περιοχή εντός του λεκανοπεδίου, το οποίο διασχίζεται περίπου στη μέση από τον Πηνειό ποταμό. Εντούτοις, στους πρόποδες των βουνών, που εμφανίζονται στα ΒΔ και ΝΔ περιθώρια της εικόνας, επικρατεί αραιή, φυσική βλάστηση.



Εικ. 2. Κανάλι 5 (Ερυθρό) της δορυφορικής εικόνας.

Στην (Εικ. 2) (ερυθρή ακτινοβολία – κανάλι 5) είναι δύσκολη η διάκριση των ορίων του ποταμού και αυτών της βλάστησης, ενώ διαγράφονται σαφώς οι δρόμοι και οι χωματόδρομοι στα βουνά, καθώς και η ακτογραμμή. Το αντίθετο συμβαίνει στην (Εικ. 3) (εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία – κανάλι 7). Αυτό συμβαίνει διότι, ως γνωστόν, η βλάστηση ανακλά πολύ έντονα στην εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία, ενώ οι υδάτινες μάζες πολύ ασθενώς. Επομένως, λόγω της σημαντικής διαφοράς στην ανακλαστικότητα των 2 αντικειμένων (βλάστηση, νερό), τα περιθώρια και η γεωμετρία του ποταμού διαγράφονται σαφώς στο κανάλι 7. Οι

υδάτινες μάζες διακρίνονται ακόμα καλύτερα και από την εικόνα του έγχρωμου σύνθετου. Από την άλλη πλευρά, οι δρόμοι και τα ορεινά μονοπάτια στο ίδιο κανάλι, δεν διακρίνονται, επειδή υπάρχει διάχυτη βλάστηση και επομένως γενικά υψηλές τιμές φωτεινότητας και μικρή αντίθεση τονικότητας μεταξύ οδικού δικτύου και ορεινού όγκου.



Εικ. 3. Κανάλι 7 (Εγγύς υπέρυθρο-1) της δορυφορικής εικόνας.

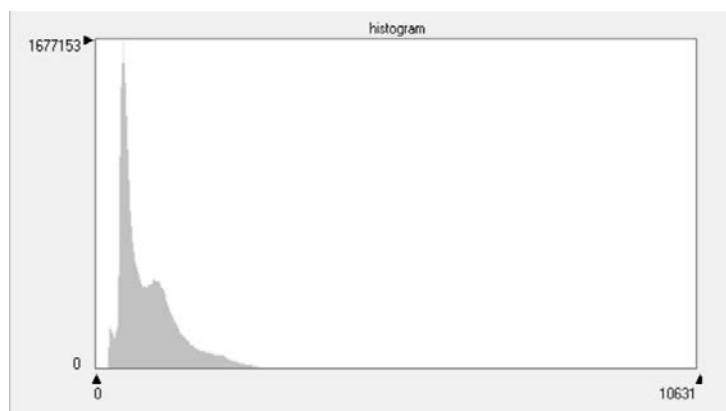
Ο δείκτης βλάστησης NDVI, που εμφανίζεται στην (Εικ. 4), συνδυάζει την πληροφορία και των δύο καναλιών, δίνοντας έμφαση στην ανάδειξη της βλάστησης και της ευρωστίας αυτής. Παρατηρούμε ότι έχουμε πληθώρα υψηλών τιμών δείκτη NDVI σχεδόν σ' όλη την εικόνα και επομένως η περιοχή βρίσκεται υγιούς βλάστησης. Εξαιρέση αποτελεί φυσικά η θάλασσα και η παραποτάμια περιοχή του δέλτα του Πηνειού στα ΒΑ. Με μια πιο προσεκτική ματιά, γίνεται αντιληπτό ότι η τριγωνική περιοχή του λεκανοπεδίου -που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργική χρήση- αντιπροσωπεύεται από πιο ισχυρές τιμές από ό,τι αυτές στους πρόποδες των βουνών. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό, διότι στις καλλιέργειες συγκεντρώνεται πυκνή βλάστηση σε μικρό χώρο, ενώ στη φύση, η ίδια ποσότητα βλάστησης απαντάται συνήθως σε μεγαλύτερη έκταση.



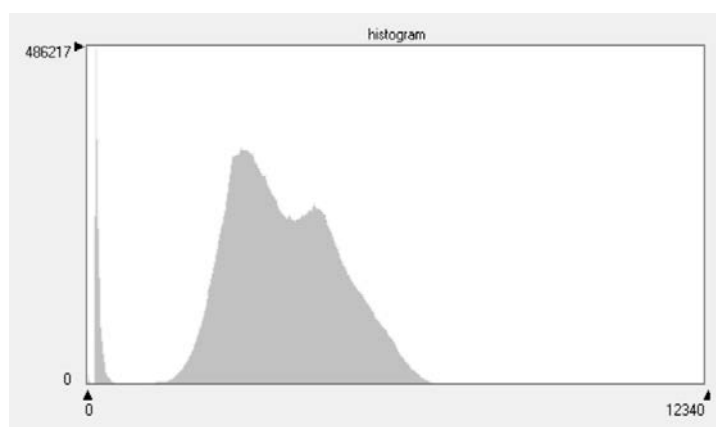
Εικ. 4. Εικόνα δείκτη βλάστησης NDVI.

Ιστογράμματα και βασικά στατιστικά μεγέθη

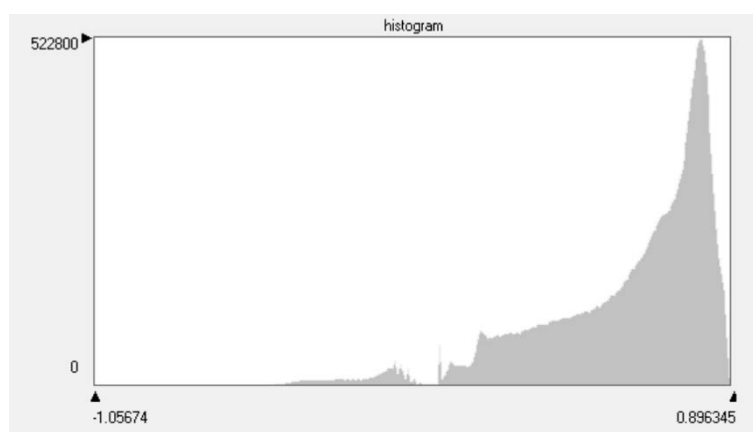
Στις (Εικ. 5), (Εικ. 6) και (Εικ. 7) εμφανίζονται τα ιστογράμματα του καναλιού 5, του καναλιού 7 και του δείκτη βλάστησης NDVI, αντίστοιχα.



Εικ. 5. Ιστόγραμμα καναλιού 5.



Εικ. 6. Ιστόγραμμα καναλιού 7.



Εικ. 7. Ιστόγραμμα δείκτη βλάστησης NDVI.

Το ιστογράμμα του ερυθρού καναλιού χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές φωτεινότητας, εξαιτίας της χαμηλής ανακλαστικότητας της βλάστησης στο ερυθρό. Στο ιστογράμμα του καναλιού 7, παρατηρούνται 2 κορυφές που χονδρικά αντιπροσωπεύουν δύο αντικείμενα. Η πρώτη κορυφή, είναι πολύ απότομη και χαρακτηρίζεται από στενό εύρος τιμών και χαμηλές τιμές. Αναμφίβολα τα περισσότερα από αυτά τα εικονοστοιχεία αντιπροσωπεύουν νερό (τον

ποταμό και τη θάλασσα). Η δεύτερη κορυφή, που συνοδεύεται και από μια μικρότερη τρίτη, είναι σαφώς πιο αμβλεία και χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο εύρος τιμών και υψηλές τιμές. Τα περισσότερα από αυτά τα εικονοστοιχεία προφανώς αντιπροσωπεύουν τα ποικίλα είδη βλάστησης που απαντώνται στην εικόνα.

Στο ιστόγραμμα της εικόνας NDVI, παρατηρούνται:

α) μια περιοχή με λίγες χαμηλές τιμές δείκτη βλάστησης, μικρού ως μέτριου εύρους, η οποία αντιπροσωπεύει τις υδάτινες μάζες και τις γυμνές από βλάστηση περιοχές.

β) μια περιοχή με πολλές ενδιάμεσες τιμές, μεγάλου εύρους που αντιπροσωπεύει εδάφη με αυξημένη φυτοκάλυψη

γ) μια έντονη κορυφή, με πολυπληθείς τιμές δείκτη βλάστησης και με ενδιάμεσο εύρος τιμών, η οποία κατά βάση αντιπροσωπεύει τις καλλιέργειες με την πλέον πυκνή βλάστηση.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές στατιστικών μεγεθών των ζωνών 5 και 7, καθώς και του NDVI. Οι τιμές των ζωνών 5 και 7 είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένες και μετρώνται σε μια κλίμακα από 0 ως 10000. Διαιρώντας την κάθε τιμή δια 10000 λαμβάνεται η τιμή της ανακλαστικότητας που μπορεί να έχει το κάθε εικονοστοιχείο, ως δεκαδικός αριθμός μεταξύ 0 και 1. Το πεδίο τιμών NDVI είναι το διάστημα -1 ως +1.

Μελετώντας τον Πίνακα 1, αξίζει να σχολιάσουμε ότι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του καναλιού 5 είναι σαφώς μικρότερες από αυτές του 7. Αυτό πρέπει να οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός έχουμε εκτεταμένη βλάστηση στην μελετώμενη εικόνα και αφετέρου το κανάλι 7, όπως προαναφέρθηκε, καταγράφει πολύ ισχυρότερες τιμές φωτεινότητας στη βλάστηση απόσο το κανάλι 5 και χαμηλές τονικότητες στις υδάτινες μάζες από ό,τι το κανάλι 5. Έτσι εξηγούνται ταυτόχρονα και ο υψηλότερος μέσος όρος και η υψηλότερη τυπική απόκλιση.

Τα στατιστικά μεγέθη της εικόνας NDVI προφανώς δεν είναι συγκρίσιμα μ' αυτά των επιμέρους καναλιών, αφού το εύρος των τιμών είναι τελείως διαφορετικό. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι η μέση τιμή 0.561 είναι αρκετά υψηλή και υποδηλώνει μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από πυκνή βλάστηση.

Πίνακας 1. Στατιστικά μεγέθη εικόνων

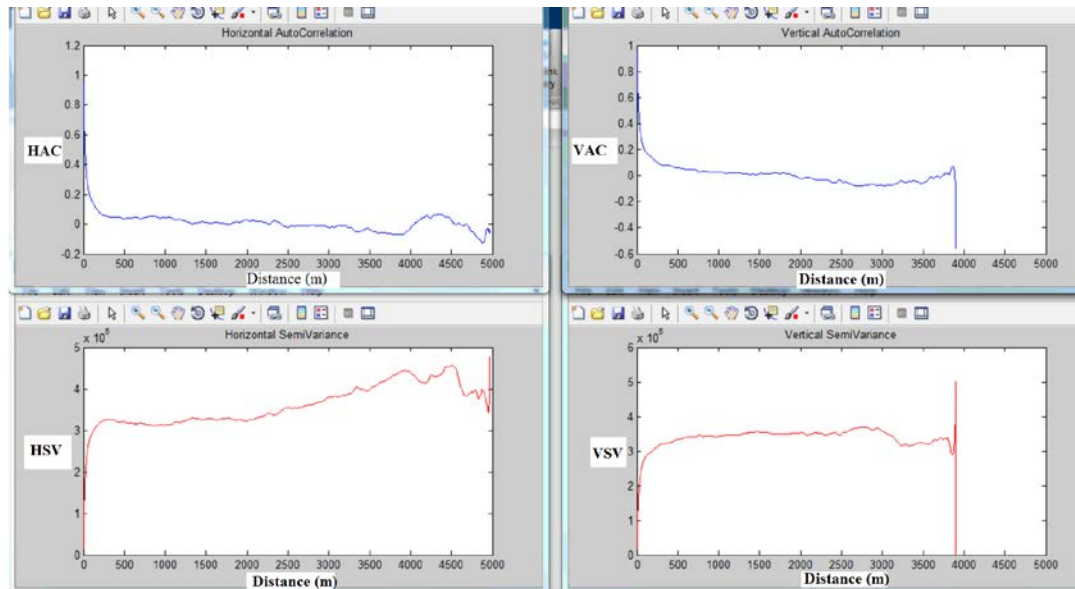
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Κανάλι 5	0	10000	932,8 5	588,93
Κανάλι 7	0	10000	3756, 92	1310,33
NDVI	-0,874	0,968	0,561	0,277

Αυτοσυσχέτιση και μεταβλητότητα

Στις (Εικ. 8), (Εικ. 9) και (Εικ. 10) παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης (autocorrelograms) και ημιβαριογράμματα (semivariograms) του καναλιού 5, του καναλιού 7 και του δείκτη NDVI, αντίστοιχα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ημιβαριογράμματα, καθότι αφενός υπάρχει αρκετή επικάλυψη σε ό,τι αφορά την πληροφορία που μας δίνει το ημιβαριόγραμμα με την αυτοσυσχέτιση και αφετέρου το πρώτο εκφράζεται με τιές που παραπέμπουν άμεσα στις διαφορές τονικότητας μεταξύ εικονοστοιχείων που απέχουν μεταξύ τους διάφορες αποστάσεις.

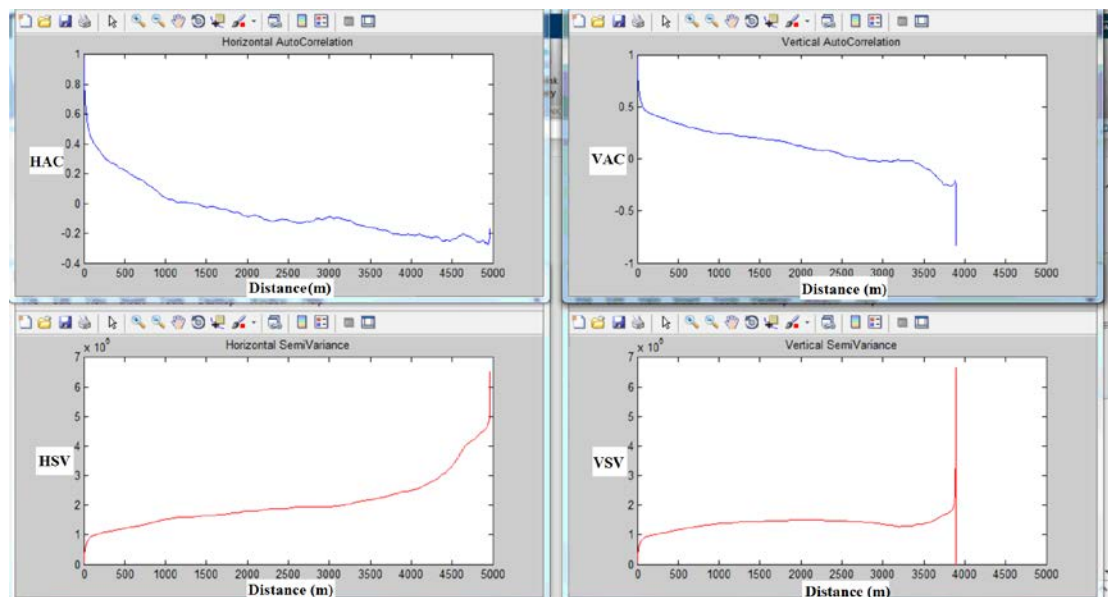
Από τα διαγράμματα ημιμεταβλητότητας, μπορεί να παρατηρηθεί ότι:

Α) Στο κανάλι 5, το οριζόντιο ημιβαριόγραμμα παρουσιάζει αυξητικές τάσεις και ανώμαλη συμπεριφορά, για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ εικονοστοιχείων. Αυτό δεν παρατηρείται στο κατακόρυφο ημιβαριόγραμμα. Αυτή η διαφορά στη χωρική διαφοροποίηση αποδίδεται στη θαλάσσια περιοχή στο ανατολικό τμήμα της εικόνας.



Εικ. 8. Οριζόντια αυτοσυσχέτιση καναλιού 5 (πάνω αριστερά), κατακόρυφη αυτοσυσχέτιση καναλιού 5 (πάνω δεξιά), οριζόντια ημιμεταβλητότητα καναλιού 5 (κάτω αριστερά) και κατακόρυφη ημιμεταβλητότητα καναλιού 5 (κάτω δεξιά).

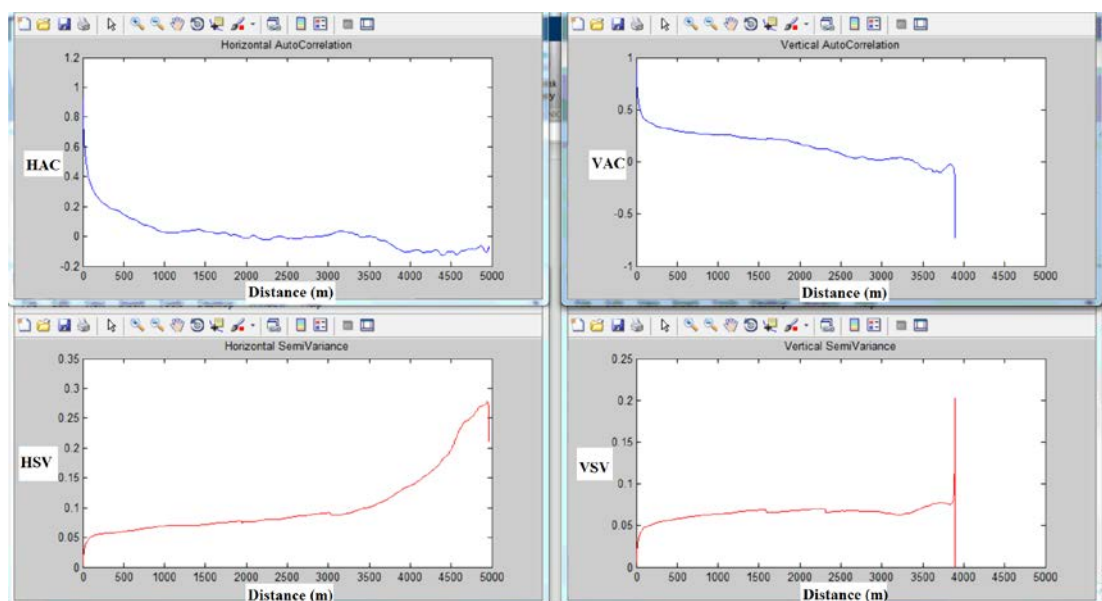
Β) Στο κανάλι 7, το οριζόντιο ημιβαριόγραμμα έχει μια διαρκή αυξητική τάση, ενώ σε μεγάλες αποστάσεις οι τιμές του αυξάνονται ραγδαία. Αυτό πάλι δεν συμβαίνει στο κατακόρυφο ημιβαριόγραμμα. Και εδώ η αιτία είναι η παρουσία θάλασσας με εικονοστοιχεία χαμηλής τονικότητας. Μόνο που εδώ οι διαφορές είναι ισχυρότερες, διότι είναι και εντονότερη η διαφορά τονικότητας μεταξύ βλάστησης και υδάτινων μαζών.



Εικ. 9. Οριζόντια αυτοσυσχέτιση καναλιού 7 (πάνω αριστερά), κατακόρυφη αυτοσυσχέτιση καναλιού 7 (πάνω δεξιά), οριζόντια ημιμεταβλητότητα καναλιού 5 (κάτω αριστερά) και κατακόρυφη ημιμεταβλητότητα καναλιού 5 (κάτω δεξιά).

Γ) Οι τιμές του ημιβαριογράμματος (οριζόντιου και κατακόρυφου), για τις κοντινές αποστάσεις, είναι τρεις φορές μεγαλύτερες στο κανάλι 5 από ό,τι στο κανάλι 7. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε ισχυρότερη χωρική διαφοροποίηση στις γειτονικές περιοχές στο κανάλι 5, παρά στο κανάλι 7. Το γεγονός αυτό μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθεί οπτικά, από τις Εικόνες 2 και 3. Πράγματι, το κανάλι 5 έχει υψηλή χωρική αντίθεση φωτεινότητας, ενώ το κανάλι 7 παρουσιάζει μια πιο φωτεινή και σαφώς πιο ομοιόμορφη εικόνα.

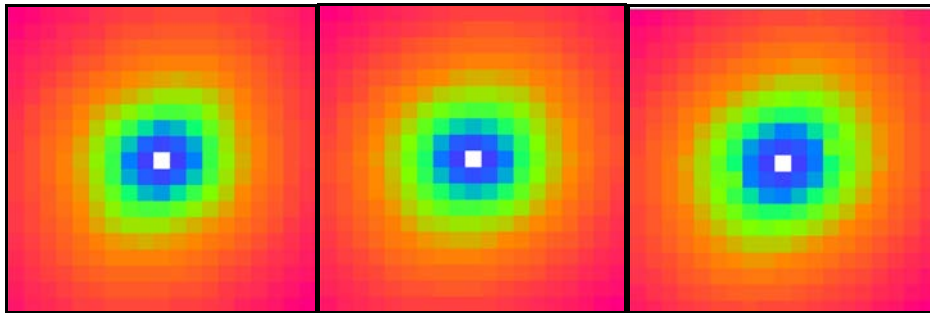
Δ) Η μορφή των ημιβαριογραμμάτων της εικόνας NDVI είναι παρόμοια με αυτή των αντίστοιχων γραφημάτων του καναλιού 7, ως εκ τούτου η συμπεριφορά της χωρικής διαφοροποίησης της εικόνας NDVI ομοιάζει περισσότερο μ' αυτή του καναλιού 7, παρά μ' αυτή του 5, γεγονός το οποίο πάλι μπορεί να επαληθευθεί με την εξέταση των οπτικών αποτελεσμάτων.



Εικ. 10. Οριζόντια αυτοσυσχέτιση τιμών NDVI (πάνω αριστερά), κατακόρυφη αυτοσυσχέτιση τιμών NDVI (πάνω δεξιά), οριζόντια ημιμεταβλητότητα τιμών NDVI (κάτω αριστερά) και κατακόρυφη ημιμεταβλητότητα τιμών NDVI (κάτω δεξιά).

Στην (Εικ. 11) εμφανίζονται τα βαριογράμματα επιφανείας (surface variograms) του καναλιού 5, του καναλιού 7 και του δείκτη NDVI. Και τα τρία βαριογράμματα επιφανείας παρουσιάζουν ελλείψεις, με το μεγάλο άξονα προσανατολισμένο κατά τη ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση. Επομένως, οι εικόνες παρουσιάζουν χωρική ανισοτροπία. Κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ έχουμε σχετικά ήπια μεταβολή της χωρικής αυτοσυσχέτισης. Αντίθετα, κατά τη ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση παρουσιάζονται πιο απότομες χωρικές μεταβολές.

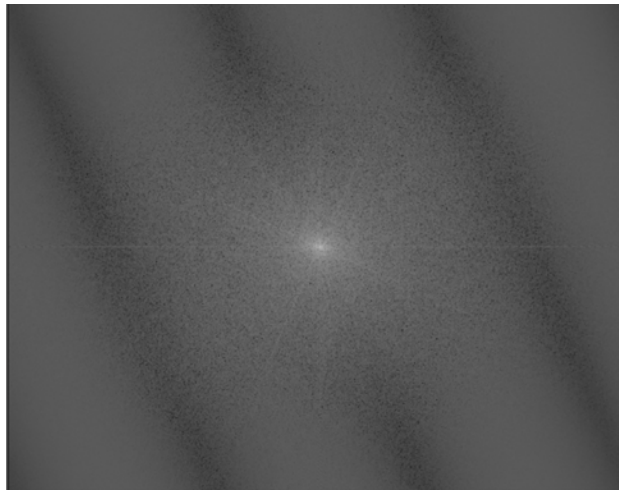
Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι το επιφανειακό βαριόγραμμα του καναλιού 7 είναι πιο αποστρωγγυλωμένο από τα άλλα δύο, διατηρώντας ωστόσο το μεγάλο άξονα στη ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση. Αυτό αποδίδεται στο ότι η εικόνα του καναλιού 7 είναι πιο ομοιόμορφη και παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις στην τονικότητα.



Εικ. 11. Βαριογράμματα επιφανείας καναλιού 5 (αριστερά), καναλιού 7 (κέντρο) και τιμών NDVI (δεξιά).

Ανάλυση συχνοτήτων

Οι εικόνες των καναλιών 5 και 7, καθώς και η εικόνα NDVI, αναλύθηκαν κατά Fourier και παράχθηκαν τα φάσματα πλατών (amplitude spectrums). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το φάσμα πλατών του δείκτη NDVI, που εμφανίζεται στην (Εικ. 12).



Εικ. 12. Φάσμα πλατών του δείκτη NDVI.

Παρατηρούμε ότι στο φάσμα πλατών του δείκτη NDVI, εκδηλώνεται μια περιοδική ζώνωση, με διεύθυνση από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά. Αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στην ενίσχυση της γεωμετρίας της βλάστησης που επιφέρει η εικόνα NDVI και ειδικότερα των αγροτεμαχίων με καλλιέργειες, που ως επί το πλείστον έχουν διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (πάνω δεξιά προς κάτω αριστερά), όπως μπορεί κανείς να δει στο κεντρικό και νότιο τμήμα του λεκανοπεδίου, στην (Εικ. 4). Η ερμηνεία αυτή της ζώνωσης στο φάσμα πλατών βασίζεται στο ότι γραμμώσεις σε μια ορισμένη διεύθυνση στο χώρο της εικόνας εκδηλώνονται ως ζώνωση με κάθετη διεύθυνση στο χώρο των συχνοτήτων (Σκιάνης κ.α. 2012).

Εφαρμογή φίλτρου τυπικής απόκλισης

Στις (Εικ. 13), (Εικ. 14) και (Εικ. 15) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής φίλτρου τυπικής απόκλισης (παράθυρο διαστάσεων 5x5) στο κανάλι 5, στο κανάλι 7 και στο δείκτη βλάστησης NDVI, αντίστοιχα.



Εικ. 13. Αποτέλεσμα εφαρμογής φίλτρου τυπικής απόκλισης στο κανάλι 5.



Εικ. 14. Αποτέλεσμα εφαρμογής φίλτρου τυπικής απόκλισης στο κανάλι 7.



Εικ. 15. Αποτέλεσμα εφαρμογής φίλτρου τυπικής απόκλισης στο δείκτη NDVI.

Και οι τρεις εικόνες εφαρμογής φίλτρου τυπικής απόκλισης (ΕΦΤΑ) αναδεικνύουν όρια επιφανειακών σχηματισμών, καθώς το φίλτρο τυπικής απόκλισης ενισχύει τις περιοχές που έχουν πολύ έντονη χωρική διαφοροποίηση (άρα μεγάλη τυπική απόκλιση). Για παράδειγμα, η θάλασσα που έχει μικρές τιμές ανακλαστικότητας και είναι ομοιόμορφη, έχει μικρή τυπική απόκλιση και άρα εμφανίζεται μαύρη. Στην ακτογραμμή όμως, η θάλασσα (μικρές τιμές) εφάπτεται με την ξηρά (υψηλές τιμές), οπότε έχουμε μεγάλη τυπική απόκλιση. Για το λόγο αυτό η ακτογραμμή διακρίνεται σαφώς και στις τρεις εικόνες, με λευκή τονικότητα.

Οι διαφορές μεταξύ των τριών ΕΦΤΑ σχετίζονται με την ένταση των χωρικών διαφοροποιήσεων στην ανακλαστικότητα των αντικειμένων. Με άλλα λόγια, τα αντικείμενα

στα οποία διαγράφονται τα όριά τους σαφώς σε μια ΕΦΤΑ, εξαρτώνται από το εάν η ανακλαστικότητα των αντικειμένων είναι αρκετά διαφορετική από αυτή των γειτονικών αντικειμένων, στο συγκεκριμένο κανάλι της αρχικής εικόνας. Ακριβώς γι' αυτό το λόγο μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα στοιχεία του αστικού ιστού στην ΕΦΤΑ του καναλιού 5, ενώ οι όχθες του Πηνειού διαφαίνονται σαφώς καλύτερα στην ΕΦΤΑ του καναλιού 7, λόγω της έντονης αντίθεσης στην ανακλαστικότητα μεταξύ βλάστησης και υδάτινων μαζών.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι η εικόνα NDVI συνδυάζει επιτυχώς την πληροφορία των δύο επιμέρους καναλιών. Το πιο κατανοητό παράδειγμα είναι ότι στην ΕΦΤΑ της NDVI διακρίνονται και τα όρια των ορεινών δρόμων και τα όρια του ποταμού, ενώ στην ΕΦΤΑ του καναλιού 5 μόνο τα πρώτα και στην ΕΦΤΑ του καναλιού 7, μόνο τα δεύτερα.

Συμπεράσματα

Η μελέτη της συμπεριφοράς του δείκτη βλάστησης NDVI έδωσε πληροφορίες για τον τρόπο που προσανατολίζονται στο γεωγραφικό χώρο οι διάφοροι εδαφικοί σχηματισμοί.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το δισδιάστατο βαριόγραμμα επιφανείας, στο οποίο εμφανίζεται μια ελλειπτική κατανομή τιμών, με μεγάλο άξονα κατά την ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση, γεγονός που υποδηλώνει χωρική ανισοτροπία στη συμπεριφορά των τιμών του δείκτη NDVI. Έτσι, κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ έχουμε σχετικά ήπια μεταβολή της χωρικής αυτοσυσχέτισης, ενώ αντίθετως κατά τη ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση παρουσιάζονται πιο απότομες χωρικές μεταβολές.

Στην εικόνα του φάσματος πλατών που παράχθηκε από την ανάλυση συχνοτήτων των τιμών NDVI, παρατηρείται μια κανονική ζώνωση στις υψηλές συχνότητες, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Αυτό σχετίζεται με τη γεωμετρία της βλάστησης, όπως αυτή εκφράζεται στην εικόνα NDVI, όπου τα αγροτεμάχια είναι προσανατολισμένα προς τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, στο κεντρικό και νότιο τμήμα του λεκανοπεδίου.

Στην εικόνα που παράχθηκε από εφαρμογή φίλτρου τυπικής απόκλισης στις τιμές NDVI διακρίνονται τα όρια των ορεινών δρόμων, τα όρια του ποταμού καθώς και τα περιγράμματα των αγροτεμαχίων, στα οποία επίσης φαίνεται ο προσανατολισμός στο γεωγραφικό χώρο, σε συμφωνία με το βαριόγραμμα επιφανείας και το φάσμα πλατών της ανάλυσης συχνοτήτων.

Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας μπορούν να συμβάλουν σε μια αξιόπιστη ταξινόμηση των τύπων εδαφοκάλυψης και των χρήσεων γης στο δέλτα του Πηνειού.

Ευχαριστίες

Η προμήθεια της δορυφορικής εικόνας έγινε στο πλαίσιο υλοποίησης του Ερευνητικού Έργου ΘΑΛΗΣ (MIS 375908) που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων (ΕΣΠΑ 2007-2013).

Βιβλιογραφία

Curran P. J., 1988. The semivariogram in remote sensing: An introduction. *Remote Sens. Environ.*, 24(3), 493-507.

Jensen J. R., 1996: *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. Second Edition. Prentice Hall. 316p.

Liang S., 2004: *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Wiley. 534p.

Nikolakopoulos K. G., Vaiopoulos D. A., Skianis G. Aim., 2001: A comparative study of resolution merge techniques and their efficiency in processing images of urban areas. *Proceedings of the IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Rome, 8-9 November 2001*, 270-274.

Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., 1973: Monitoring Vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings 3rd ERTS Symposium, Vol. 1, 48-62.

Schowengerdt R. A., 1997: Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Second Edition. Academic Press. 522p.

Swan A. R. H., Sandilands M., 1995: Introduction to Geological Data Analysis. Blackwell Science. 446p.

Σκιάνης Γ. Αιμ., Νικολακόπουλος Κ. Γ., Βαϊόπουλος Δ. Α., 2012: Τηλεπισκόπηση. Αρχές, Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Εφαρμογές. Ίων, 336 σ.

ΥΠΕΧΩΔΕ 2004: Ενημέρωση της βάσης δεδομένων κάλυψης γης Corine Land Cover για το έτος 2000.