



ΕΡΓΟ ΑΠΘ: ΘΑΛΗΣ 85492



Χαρτογράφηση βλάστησης και εκτίμηση βιομάζας με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης στο πλαίσιο της σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή και του Πρωτοκόλλου του Κιότο

Παραδοτέο 3.δ

Ψηφιακός χάρτης κατηγοριών και ειδών βλάστησης βάση ανάλυσης υπερφασματικών εικόνων (με συνδυασμό δορυφορικών εικόνων Hyperion και QuickBird)

ΕΚΘΕΣΗ



Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2014

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Δρ. Ιωάννης Γήτας, Αναπλ. Καθηγητής Σχολής Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος Α.Π.Θ.

Τηλ: 2310992699

E-mail: igitas@for.auth.gr

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΠΑΡΑΔΟΤΕΟΥ

Δρ. Βασιλεία Καραθανάση, Αναπλ. Καθηγητής Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τηλ: 210 7722695

E-mail: karathan@survey.ntua.gr

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Δρ. Βασιλεία Καραθανάση

Δρ. Ιωάννης Γήτας

Δρ. Πολ Κολοκούσης

Δρ. Χρήστος Καρυδάς

Δρ. Δημήτριος Σταυρακούδης

Υποψ. Δρ. Χαρούλα Ανδρέου

1. Εισαγωγή

Η χαρτογράφηση των ειδών μίας δασικής περιοχής αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη μετέπειτα εκτίμηση του ποσού βιομάζας. Η ακριβής και λεπτομερής χαρτογράφηση δασικών ειδών μέσω τηλεσκοπικών προϊόντων παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, ιδιαίτερα σε μεσογειακά περιβάλλοντα, που χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό ποικιλομορφίας. Οι δυσκολίες αυτές οφείλονται στην πολυσχιδή μορφολογία των δασικών περιοχών, στην ύπαρξη διαφορετικών ειδών του ίδιου γένους σε μία ευρύτερη περιοχή, καθώς και στην αδυναμία προσέγγισης δύσβατων περιοχών προς απόκτηση δειγματοληπτικών μετρήσεων πεδίου.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω δυσκολίες, αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία χαρτογράφησης δασικών εκτάσεων, χρησιμοποιώντας σύγχρονες μεθόδους της τηλεπισκόπησης. Αξιοποιεί δε πληροφορία που παρέχεται από διαφορετικούς δορυφορικούς αισθητήρες, προκειμένου να αυξήσει την ακρίβεια χαρτογράφησης που προσφέρουν προηγούμενες μέθοδοι της διεθνούς μεθοδολογίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε προκειμένου η εφαρμογή της να είναι εύκολη και γρήγορη, χωρίς βέβαια αυτό να είναι σε βάρος της ακρίβειας χαρτογράφησης. Πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία δεν περιορίζεται σε δορυφορικούς μόνο αισθητήρες, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί με αντίστοιχα αποτελέσματα και σε εναέρια τηλεσκοπικά προϊόντα. Εντούτοις, η εφαρμογή της σε αυτή φάση αξιολογήθηκε σε υπάρχουσες δορυφορικές εικόνες, δεδομένου ότι το κόστος απόκτησης και επεξεργασίας δορυφορικών προϊόντων είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με αυτό αντίστοιχων εναέριων. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε επιτυχώς σε δορυφορικές εικόνες (όπως θα δειχθεί παρακάτω), η επέκταση της εφαρμογής της σε εναέρια τηλεσκοπικά δεδομένα αναμένεται να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα, καθώς οι εναέρια εικόνες προσφέρουν πληροφορία υψηλότερης ποιότητας.

2. Πιλοτική Περιοχή Μελέτης και Δορυφορικά Δεδομένα

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε πιλοτικά στο Πανεπιστημιακό Δάσος του Ταξιάρχη, που βρίσκεται στις νότιες και νοτιοδυτικές πλαγιές του Όρους Χολομώντα στη Χαλκιδική. Η δασική αυτή περιοχή επιλέχθηκε για διάφορους λόγους:

- Το δασικό σύμπλεγμα δημιουργεί ένα ποικιλόμορφο και πολυσχιδές μωσαϊκό, εμφανίζοντας μεγάλη χωρική επιμειξία μεταξύ των διαφόρων ειδών.
- Περιέχει ορισμένα από τα βασικότερα δασικά είδη που απαντώνται σε όλη σχεδόν την ελληνική επικράτεια.
- Περιλαμβάνει δύο από τα πλέον διαδεδομένα δασικά είδη του ίδιου γένους (Τραχεία και Μαύρη Πεύκη), οπότε καθίσταται εφικτή η αξιολόγηση της μεθοδολογίας σε εξ' ορισμού δύσκολα διαχωρίσιμες κατηγορίες.
- Έχουν διενεργηθεί στην περιοχή πολλές μελέτες τα προηγούμενα χρόνια, οπότε υπάρχει διαθέσιμος ένας μεγάλος όγκος αξιοποιήσιμων δεδομένων.
- Βρίσκεται κοντά στη Θεσσαλονίκη, διευκολύνοντας τη διενέργεια επιτόπιων επισκέψεων στην περιοχή μελέτης.

- Προϋπάρχει γνώση της δασικής περιοχής, καθιστώντας εφικτή την αξιόπιστη ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η περιοχή μελέτης εκτείνεται γεωγραφικά από 40°23'E ως 40°28'E και 23°28'N ως 23°34'N, καλύπτοντας μία περιοχή περίπου 60 km². Το Πανεπιστημιακό Δάσος του Ταξιάρχη είναι μέρος του δικτύου NATURA2000 (GR1270001-Oros Cholomontas). Η μορφολογία της περιοχής είναι ποικιλόμορφη και σε ορισμένα σημεία ιδιαίτερα δύσβατη, λόγω μεγάλων υψομετρικών διαφορών που κυμαίνονται από 320 ως 1200 m.

Το κυρίαρχο δασικό είδος της περιοχής είναι η Δρυς (*Quercus frainetto*), ενώ σε μικρότερο βαθμό απαντώνται η Οξιά (*Fagus sylvatica*), η Τραχεία Πεύκη (*Pinus brutia*) και η Μαύρη Πεύκη (*Pinus nigra*). Σε πολύ περιορισμένες περιοχές υπάρχουν διάφορες πειραματικές επιφάνειες του Τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, καθώς και η Φυτεία Ελάτης του τοπικού Δασαρχείου. Οι περιοχές αυτές αποτελούν ένα απειροελάχιστο ποσοστό της συνολικής επιφάνειας μελέτης και για το λόγω αυτό αγνοήθηκαν κατά τη χαρτογράφηση. Παράλληλα με τα δασικά είδη, στην περιοχή υπάρχουν και διάφορα είδη μακκίας (Maquis), κυρίως στα ανατολικά, με κυρίαρχα το Πουρνάρι (*Quercus coccifera*), τη Δρυς την αρία (*Quercus ilex*) και το Ρέικι το δενδρώδες (*Erica arborea*). Για τις ανάγκες της χαρτογράφησης τα διάφορα είδη μακκίας θεωρήθηκαν ως μία κατηγορία, καθώς ο επιμέρους διαχωρισμός τους δεν παρέχει κάποιο πλεονέκτημα στην εκτίμηση της βιομάζας.

Η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία αξιοποιεί την παρεχόμενη πληροφορία από δύο διαφορετικούς δορυφορικούς αισθητήρες, έναν πολυφασματικό και έναν υπερφασματικό, με διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα. Ως πηγή πολυφασματικής πληροφορίας χρησιμοποιήθηκε μία εικόνα QuickBird. Η εικόνα αυτή παρέχει τέσσερα φασματικά κανάλια που καλύπτουν το ορατό και το εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (0.4–0.9 μm) και χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα 2.4 m. Η λήψη της εικόνας έγινε στα μέσα Ιουλίου του 2004.

Σε αντίθεση με τις πολυφασματικές εικόνες υψηλής ευκρίνειας, οι υπερφασματικές δορυφορικές εικόνες παρέχουν μέτρια χωρική διακριτική ικανότητα. Παράλληλα, όμως, προσφέρουν υπερυψηλή φασματική διακριτική ικανότητα, καταγράφοντας την εκπεμπόμενη ενέργεια της γης σε πολλά μικρά και στενά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ανά περίπου 10 nm). Έτσι παρέχουν σχεδόν συνεχείς υπογραφές της ανακλώμενης ενέργειας των αντικειμένων της περιοχής, από το ορατό ως το υπέρυθρο βραχέων κυμάτων τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (0.4–2.5 μm). Η μοναδική αυτή ιδιότητα των υπερφασματικών δεδομένων τα καθιστά κατάλληλα για το διαχωρισμό διαφορετικών ειδών του ίδιου γένους, κάτι που δεν είναι εν γένει εφικτό μέσω πολυφασματικών δεδομένων [1–3]. Αυτή τη στιγμή, ο μοναδικός δορυφορικός υπερφασματικός αισθητήρας είναι ο Hyperion, που εκτοξεύτηκε στα πλαίσια της αποστολής Earth Observing-1 (EO-1) της NASA [4]. Ο Hyperion προσφέρει συνολικά 242 φασματικά κανάλια, καλύπτοντας το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από τα 400 έως τα 2500 nm, ενώ χαρακτηρίζεται από μέτρια χωρική διακριτική ικανότητα 30 m. Από τα κανάλια αυτά 196 είναι βαθμονομημένα, ενώ άλλα 41 εμφανίζουν υψηλά ποσοστά θορύβου ή επηρεάζονται από τα ατμοσφαιρικά χαρακτηριστικά της απορρόφησης του νερού. Έτσι, στα

πλαίσια της παρούσας μελέτης αξιοποιήθηκαν τα υπόλοιπα 155 κανάλια, χρησιμοποιώντας μία εικόνα της περιοχής που λήφθηκε τον Οκτώβριο του 2008.

Ένα χρονικό διάστημα τεσσάρων ετών παρατηρείται μεταξύ των χρονολογιών λήψης των δύο εικόνων. Εντούτοις, το καθεστώς ειδικής προστασίας της περιοχής (πανεπιστημιακό δάσος, περιοχή NATURA2000), καθώς και το γεγονός ότι δεν παρουσιάστηκαν καταστρεπτικές πυρκαγιές ή άλλες φυσικές καταστροφές στο διάστημα αυτό, πιστοποιούν το γεγονός απουσίας σημαντικών αλλαγών κατά την περίοδο που μελετήθηκε. Στο Σχήμα 1 παρέχονται ψευδοέγχρωμες απεικονίσεις των δύο δορυφορικών εικόνων, ενώ το Σχήμα 2 παρουσιάζει την τοποθεσία τους στην ευρύτερη περιοχή. Και οι δύο εικόνες αποκόπηκαν στα διαχειριστικά όρια του Πανεπιστημιακού Δάσους του Ταξιάρχη.

3. Περιγραφή της Μεθοδολογίας

Το Σχήμα 3 παρέχει μία διαγραμματική σύνοψη της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Οι δύο δορυφορικές εικόνες υπόκεινται αρχικά την απαραίτητη προεπεξεργασία, που εν πολλοίς έγκειται στη σωστή γεωγραφική ορθοαναγωγή τους. Για τις ανάγκες της χαρτογράφησης χρησιμοποιήθηκε μία από τις πλέον εξελιγμένες μεθοδολογίες ταξινόμησης και συγκεκριμένα ο ταξινομητής που βασίζεται στη θεωρία των *μηχανών διανυσμάτων ταξινόμησης* (support vector machines, SVM). Η εκπαίδευση ενός μοντέλου SVM διενεργείται αξιοποιώντας την πληροφορία από κάποια δειγματοληπτικά σημεία της περιοχής, η κατηγορία των οποίων εξακριβώνεται μέσω επισκέψεων στο πεδίο. Τα σημεία αυτά ονομάζονται *πρότυπα αναφοράς* και η μεθοδολογία αυτή δημιουργίας του μοντέλου ταξινόμησης είναι γνωστή ως *επιβλεπόμενη εκμάθηση* (supervised learning).

Εκπαιδεύονται δύο μοντέλα SVM, ένα για τον κάθε αισθητήρα, τα οποία και εφαρμόζονται σε όλα τα σημεία των αντίστοιχων εικόνων, με αποτέλεσμα την παραγωγή δύο θεματικών χαρτών. Η κεντρική ιδέα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο συγκερασμός των δύο αυτών ανεξάρτητων θεματικών χαρτών, με σκοπό την παραγωγή ενός νέου χάρτη υψηλότερης ακρίβειας. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται μέσω μίας μεθόδου που ονομάζεται *συνδυασμός αποφάσεων* (decision fusion). Ένας κατάλληλα ορισμένος τελεστής συνδυασμού αποφάσεων επιτελεί τη σύνθεση της παρεχόμενης από τους δύο επιμέρους θεματικούς χάρτες πληροφορίας, αξιοποιώντας αποτελεσματικά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε αισθητήρα. Ο τελικός θεματικός χάρτης της περιοχής προκύπτει εφαρμόζοντας ένα φίλτρο εξομάλυνσης θορύβου. Το απλό αυτό φίλτρο διορθώνει τις τοπικά εσφαλμένες ταξινομήσεις που τυπικά εμφανίζονται κατά τη χαρτογράφηση κάλυψης χρήσεων γης μέσω εικόνων πολύ υψηλής ευκρίνειας. Το υπόλοιπο της παρούσας ενότητας περιγράφει αναλυτικότερα τα διάφορα στάδια της μεθοδολογίας.

3.1. Δεδομένα αναφοράς και Μέτρα Εκτίμησης Ακρίβειας

Η δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου μοντέλου ταξινόμησης προϋποθέτει τη γνώση της κάλυψης γης σε ορισμένα δειγματοληπτικά σημεία της περιοχής μελέτης. Το σχήμα ταξινόμησης περιλαμβάνει έξι συνολικά κλάσεις. Συγκεκριμένα, συμπεριελήφθησαν τα κυρίαρχα δασικά είδη της περιοχής (Δρυς, Οξιά, Τραχεία και Μαύρη Πεύκη) και τα διάφορα είδη μακκίας ως μία ενιαία

κλάση. Οι υπόλοιπες χρήσεις γης ενοποιήθηκαν σε μία κλάση, που περιλαμβάνει άγονες και βραχώδεις εκτάσεις, καθώς και τις γεωργικές εκτάσεις της περιοχής (πολλές από τις οποίες είναι εγκαταλελειμμένα αγροτεμάχια). Το παραπάνω σχήμα ταξινόμησης κρίθηκε κατάλληλο και επαρκές για τις ανάγκες της συνεπακόλουθης εκτίμησης της βιομάζας.

Τα πρότυπα αναφοράς συλλέχθηκαν μέσω επαναλαμβανόμενων επισκέψεων στο πεδίο καθ' όλη τη διάρκεια του 2013, σε συγκεκριμένες δειγματοληπτικές περιοχές. Παράλληλα αξιοποιήθηκαν και δεδομένα πεδίου παλαιότερων ερευνών και, συγκεκριμένα, εξορμήσεων που διενεργήθηκαν το καλοκαίρι του 2006 και το Αύγουστο με Οκτώβριο του 2010. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τον εμπλουτισμό του συνόλου αναφοράς, όσο και για την επιβεβαίωση ότι οι δασικές εκτάσεις δεν μεταβλήθηκαν στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ των ημερομηνιών λήψης των δύο εικόνων. Συνολικά συγκεντρώθηκαν 407 πρότυπα αναφοράς, τα οποία διαμοιράστηκαν σε δύο σύνολα: το *σύνολο εκπαίδευσης* και το *σύνολο επαλήθευσης*. Το μεν πρώτο χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση των ταξινομητών SVM, ενώ το δεύτερο αξιοποιείται από τον αλγόριθμο συνδυασμού αποφάσεων, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Η κατανομή των προτύπων αναφοράς στις κλάσεις του προβλήματος δίνεται στον Πίνακα 1.

Ένα ιδιάζων πρόβλημα κατά την εφαρμογή της διαδικασίας αποτέλεσε η ύπαρξη σκιών στην εικόνα Hyperion, η οποία έχει ληφθεί φθινοπωρινή εποχή και περίπου ώρα 10 το πρωί. Ως εκ τούτου, κάποιες περιοχές καλύπτονται από πυκνές σκιές. Αντίθετα, η εικόνα QuickBird δεν παρουσιάζει έντονα αντίστοιχα φαινόμενα, καθώς λήφθηκε μεσημβρινές ώρες και στα μέσα του καλοκαιριού. Από την πλευρά της εφαρμογής, οι σκιές θεωρούνται ως περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχει πληροφορία και επομένως δεν απαιτείται η συμπερίληψή τους στο θεωρούμενο σχήμα ταξινόμησης. Κατά την εφαρμογή όμως ενός ταξινομητή, η μη συμπερίληψή τους στα δεδομένα εκπαίδευσης θα οδηγήσει σε τυχαίες εσφαλμένες αναθέσεις των αντίστοιχων εικονοστοιχείων σε κάποια άλλη κλάση. Για το λόγο αυτό αναγνωρίστηκαν μέσω φωτοερμηνείας 30 επιπλέον σημεία στην εικόνα Hyperion, τα οποία εισήχθησαν στο σύνολο εκπαίδευσης (βλ. Πίνακα 1). Τα σημεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την εκπαίδευση του ταξινομητή SVM στην εικόνα Hyperion, ενώ αγνοήθηκαν στην περίπτωση της εικόνας QuickBird. Το σύνολο επαλήθευσης δε συμπεριλαμβάνει πρότυπα που ανήκουν στην κατηγορία σκιές. Όπως είναι διαισθητικά λογικά, τα εικονοστοιχεία που χαρακτηρίζονται ως σκιές κατά την ταξινόμηση της εικόνας Hyperion θεωρούνται αυτομάτως εσφαλμένες ταξινομήσεις.

Παράλληλα με τα δύο προαναφερθέντα σύνολα αναφοράς, δημιουργήθηκε ένα πολύ πιο πλήρες *σύνολο δοκιμής*, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ακρίβειας χαρτογράφησης και τη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων ταξινομήσεων που εξετάστηκαν. Το σύνολο αυτό δημιουργήθηκε επιλέγοντας συμπαγείς περιοχές στην εικόνα QuickBird μέσω πολυγώνων. Η επιλογή έγινε μέσω προσεκτικής φωτοερμηνείας, γύρω από σημεία όπου είχαν διενεργηθεί επιτόπιες επιθεωρήσεις. Παράλληλα αξιοποιήθηκε και μία ενδεικτική χαρτογράφηση ολόκληρης της περιοχής, που επιμελήθηκε το τοπικό Δασαρχείο του Ταξιάρχη. Η χωρική κατανομή των πολυγώνων αυτών και η κατηγορία στην οποία αναφέρονται απεικονίζονται στο Σχήμα 4. Όλα τα εικονοστοιχεία εντός των πολυγώνων διαμορφώνουν το σύνολο δοκιμής, που τελικά απαρτίζεται από περίπου 2.6 εκατομμύρια πρότυπα αναφοράς

(βλ. Πίνακα 1). Όπως και στην περίπτωση του συνόλου επαλήθευσης, το σύνολο δοκιμής δε συμπεριλαμβάνει πρότυπα για την κατηγορία των σκιών.

Ένα φαινόμενο που εμφανίζεται κατά την ταξινόμηση εικόνων πολύ υψηλής ευκρίνειας είναι η εισαγωγή θορύβου στον τελικό θεματικό χάρτη, κάτι που στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζεται *φαινόμενο αλατιού–πιπεριού* (salt-and-pepper effect). Η ονομασία αυτή απορρέει από το γεγονός ότι εμφανίζονται εσφαλμένες ταξινομήσεις μεμονωμένων εικονοστοιχείων εντός συμπαγών περιοχών μίας άλλης κλάσης, λόγω του γεγονότος ότι ο εφαρμοζόμενος ταξινομητής δεν αξιοποιεί κάποια χωρική πληροφορία. Η δημιουργία του συνόλου δοκιμής με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω αποσκοπεί ακριβώς στην ικανοποιητικότερη ποσοτικοποίηση φαινομένων αλατιού–πιπεριού. Ταυτόχρονα, όμως, ο χαρακτηρισμός συμπαγών περιοχών ως μία και μοναδική χρήση γης αγνοεί πιο σύνθετες περιπτώσεις που εμφανίζονται στη φύση, όπως διάκενα μεταξύ δασικών περιοχών, αραιή βλάστηση και ούτω καθεξής. Αντίθετα, το σύνολο επαλήθευσης εμπεριέχει μόνο σημεία η κλάση των οποίων είναι αδιαμφισβήτητη και έχει εξακριβωθεί μέσω επιτόπιας επισκόπησης. Δε μπορεί όμως να περιγράψει επαρκώς χωρικά φαινόμενα θορύβου στον τελικό θεματικό χάρτη.

Για τους παραπάνω λόγους, η εκτίμηση της ακρίβειας χαρτογράφησης και η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων ταξινομήσεων γίνεται τόσο στο σύνολο επαλήθευσης, όσο και στο σύνολο δοκιμής. Το πρώτο τείνει να υπερεκτιμήσει την ακρίβεια της χαρτογράφησης, ενώ το δεύτερο τείνει να την υποεκτιμήσει. Η πραγματική ποιότητα της χαρτογράφησης βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα και, σε κάθε περίπτωση, αξιολογείται και ποιοτικά, μέσω της εποπτείας του παραγόμενου θεματικού χάρτη. Ως μέτρα ακρίβειας εφαρμόζονται τόσο η ακρίβεια ταξινόμησης ανά κλάση, όσο και η συνολική ακρίβεια ταξινόμησης σε όλα τα πρότυπα αναφοράς του εκάστοτε συνόλου.

3.2. Μοντέλο Ταξινόμησης

Ως μοντέλο ταξινόμησης επιλέχθηκε ο ταξινομητής που βασίζεται στις αρχές των *μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης* (support vector machines, SVM). Ο SVM στηρίζεται σε ένα εύρωστο θεωρητικό πλαίσιο που προτάθηκε από τον V. Vapnik [5,6] και εξελίχθηκε από τον ίδιο και την ερευνητική του ομάδα. Τα τελευταία χρόνια έχει βρει ευρεία αποδοχή σε προβλήματα ταξινόμησης με μεθόδους της τηλεπισκόπησης [7] και, ειδικότερα, σε προβλήματα που διαχειρίζονται υπερφασματικά δεδομένα [8,9]. Σε πολλές περιπτώσεις ο ταξινομητής SVM παρέχει απaráμιλλη ακρίβεια, ενώ δεν επηρεάζεται σημαντικά από το μεγάλο αριθμό εισόδων που χαρακτηρίζουν τα υπερφασματικά δεδομένα, σε αντίθεση με παλαιότερα στατιστικά μοντέλα ταξινόμησης.

Η αρχική μορφή του ταξινομητή SVM παρέχει ως έξοδο την κατηγορία ανάθεσης του εκάστοτε διανύσματος εισόδου που ζητείται να ταξινομηθεί. Η μεθοδολογία συνδυασμού αποφάσεων που περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα προϋποθέτει τη δυνατότητα παροχής και ασαφούς εξόδου (fuzzy output) από το σύστημα ταξινόμησης. Η *ασαφής έξοδος* ενός ταξινομητή ορίζεται από ένα διάνυσμα μ με M στοιχεία, όπου M ο αριθμός των κλάσεων (έξι στην προκειμένη περίπτωση). Κάθε στοιχείο $\mu_j \in [0,1]$ ονομάζεται *βαθμός συμμετοχής* (membership grade) και αντιπροσωπεύει το βαθμό βεβαιότητας το δείγμα εισόδου να ανήκει στην αντίστοιχη κλάση,

σύμφωνα με τον ταξινομητή. Η ασαφής έξοδος μπορεί να περιέχει μη μηδενικούς βαθμούς για περισσότερες από μία κλάσεις, κάτι που αντιπροσωπεύει την επιμειξία που εμφανίζεται μεταξύ των κλάσεων στη φύση ή την αβεβαιότητα του ταξινομητή για την κλάση ορισμένων εικονοστοιχείων ή και τα δύο ταυτόχρονα.

Βάσει των παραπάνω, στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μία τροποποιημένη μορφή του SVM, ο επονομαζόμενος ταξινομητής *SVM ασαφούς εξόδου* (fuzzy output SVM, FO-SVM). Μεταξύ των διαφόρων εκδοχών της διεθνούς βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε η υλοποίηση που έχει προταθεί στην εργασία [10] και αξιοποιεί αποτελεσματικά τη συνάρτηση απόφασης του πρωταρχικού SVM, προκειμένου να εξάγει ασαφείς βαθμούς στο διάστημα $[0,1]$. Η εφαρμογή του FO-SVM σε ολόκληρη την εικόνα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή M ασαφών χαρακτηρισμών, έναν για κάθε κλάση. Η ακριβής κατηγορία ανάθεσης κάθε εικονοστοιχείου ορίζεται ως η κλάση που εμφανίζει τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής.

3.3. Συνδυασμός Αποφάσεων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, για κάθε μία από τις δύο δορυφορικές εικόνες εκπαιδεύεται ένα ανεξάρτητο μοντέλο FO-SVM, έχοντας ως τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή ενός ασαφούς θεματικού χάρτη. Στην περίπτωση της εικόνας Hyperion, το στοιχείο του ασαφούς χάρτη που αντιστοιχεί στην κλάση σκιές αγνοείται. Συνεπακόλουθα, ο χάρτης της ταξινόμησης Hyperion υπόκειται υποδειγματοληψία στη χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα QuickBird. Για κάθε στοιχείο της εικόνας διατίθενται λοιπόν δύο διανύσματα ασαφών βαθμών, ένα από την (υποδειγματοληπτημένη) ταξινόμηση του Hyperion (μ^{hyp}) και το αντίστοιχο από την ταξινόμηση QuickBird (μ^{qck}).

Η μεθοδολογία *συνδυασμού αποφάσεων* (decision fusion) αποσκοπεί στον αποτελεσματικό συγκερασμό των ασαφών εξόδων που παρέχονται από τις δύο ταξινομήσεις, σε μια προσπάθεια να αξιοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο η πληροφορία που παρέχεται από τις δύο επιμέρους πηγές. Μεταξύ της πληθώρας επιλογών που παρέχονται στη διεθνή βιβλιογραφία, στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε ένας απλός τελεστής συνδυασμού αποφάσεων, ο επονομαζόμενος τελεστής *σταθμισμένου μέσου όρου* (weighted average combiner). Ο τελεστής αυτός χρησιμοποιείται πολύ συχνά, λόγω της απλότητάς του και της σταθερά υψηλής απόδοσης που παρουσιάζει σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών [11].

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού στο εκάστοτε στοιχείο της εικόνας είναι ένα νέο διάνυσμα βαθμών συμμετοχής μ^{fus} . Κάθε στοιχείο του νέου αυτού διανύσματος προκύπτει εφαρμόζοντας τον τελεστή σταθμισμένου μέσου όρου, που ορίζεται ως εξής:

$$\mu_j^{\text{fus}} = w_j^{\text{hyp}} \cdot \mu_j^{\text{hyp}} + w_j^{\text{qck}} \cdot \mu_j^{\text{qck}}, \quad (1)$$

όπου w_j^i , $j=1, \dots, M$, $i = \{\text{hyp}, \text{qck}\}$, είναι ένα βάρος που αντιστοιχείται στην κλάση j και τον ταξινομητή i . Τελικά το εκάστοτε εικονοστοιχείο ανατίθεται στην κλάση που εμφανίζει τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής μ_j^{fus} . Τα δε βάρη w_j^i υπολογίζονται μέσω ενός μέτρου ακρίβειας κάθε κλάσης και κάθε ταξινομητή, που προκύπτει από τα δεδομένα αναφοράς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το σύνολο επαλήθευσης και όχι το σύνολο εκπαίδευσης, που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση των επιμέρους ταξινομητών. Για τον υπολογισμό των βαρών ακολουθήθηκε η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην εργασία [12] και αξιοποιεί το λεγόμενο *μέτρο-F* (F-measure), που προέρχεται από τη θεωρία του πίνακα σφαλμάτων (error confusion matrix) [13]:

$$w_j^i = \frac{F^i(j)}{F^{\text{hyp}}(j) + F^{\text{qck}}(j)}, \quad j=1, \dots, M, \quad i = \{\text{hyp}, \text{qck}\}. \quad (2)$$

Βάσει της παραπάνω σχέσης, το άθροισμα των βαρών για κάθε κλάση ισούται με τη μονάδα ($w_j^{\text{hyp}} + w_j^{\text{qck}} = 1$) και επομένως οι τελικοί βαθμοί συμμετοχής μ_j^{fus} λαμβάνουν τιμές στο διάστημα [0,1].

3.4. Εξομάλυνση Θορύβου

Το τελευταίο βήμα της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας (βλ. Σχήμα 3) αποσκοπεί στην ελάττωση του φαινομένου αλατιού–πιπεριού που τυπικά εμφανίζεται σε ταξινομήσεις μέσω εικόνων υψηλής ευκρίνειας. Η εξομάλυνση θορύβου επιτελείται μέσω μίας απλής αλλά αποτελεσματικής μεθοδολογίας της διεθνούς βιβλιογραφίας, που ονομάζεται *μετα-διευθέτηση* (post-regularization, PR) [14]. Το φίλτρο PR εφαρμόζεται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, θεωρώντας σε κάθε βήμα διαφορετικά κυλιόμενα παράθυρα γύρω από κάθε εικονοστοιχείο. Αν η πλειοψηφία των γειτονικών εικονοστοιχείων εντός του παραθύρου συνηγορεί σε κάποια άλλη κλάση, η κατηγορία του κεντρικού εικονοστοιχείου μεταβάλλεται. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η σημαντική μείωση του θορύβου που εμφανίζεται στο τελικό προϊόν, παρέχοντας ένα πιο ομογενές αποτέλεσμα. Περισσότερες πληροφορίες για τις λεπτομέρειες υλοποίησης της μεθόδου παρέχονται στην εργασία [14].

4. Αποτελέσματα

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης του Πανεπιστημιακού Δάσους του Ταξιάρχη, ακολουθώντας τα βήματα που αναλύθηκαν παραπάνω. Το Σχήμα 5 απεικονίζει τους παραχθέντες θεματικούς χάρτες τόσο των αρχικών ταξινομήσεων, όσο και αυτόν της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Οι αντίστοιχες ακρίβειες ταξινόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, τόσο για το σύνολο δοκιμής, όσο και για το σύνολο επαλήθευσης. Εστιάζοντας στο σύνολο δοκιμής, γίνεται πασιφανές ότι ο συνδυασμός αποφάσεων αυξάνει σημαντικά την ακρίβεια της ταξινόμησης. Η διαφορά συνολικής ακρίβειας είναι μεγαλύτερη από 12% ως προς την ταξινόμηση Hyperion και περίπου 8% ως προς την ταξινόμηση QuickBird. Όλες οι επιμέρους ακρίβειες ανά κλάση είναι αισθητά αυξημένες και σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερες και από τις δύο επιμέρους ταξινομήσεις.

Όσον αφορά το σύνολο επαλήθευσης, ένα πρώτο σχόλιο που πρέπει να γίνει είναι ότι οι αντίστοιχες ακρίβειες είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που παρατηρούνται στο σύνολο δοκιμής. Όπως εξηγήθηκε στο στην ενότητα 3.1, η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς τα πρότυπα του συνόλου επαλήθευσης αναφέρονται σε σημειακές μετρήσεις πεδίου. Συνεπώς, δε λαμβάνουν υπόψη το θόρυβο του θεματικού χάρτη στην περίπτωση των ταξινομήσεων μέσω QuickBird και συνδυασμού αποφάσεων, ενώ από την άλλη δεν περιγράφουν επαρκώς τα σφάλματα της ταξινόμησης μέσω Hyperion, που οφείλονται στη χαμηλή ευκρίνεια της εικόνας. Υπό αυτήν την έννοια, η πραγματική ποιότητα χαρτογράφησης βρίσκεται κάπου μεταξύ των τιμών ακρίβειας στα δύο σύνολα. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι πολύ υψηλότερη από αυτές των επιμέρους ταξινομήσεων και στο σύνολο επαλήθευσης, από όπου συνάγονται παρόμοια συμπεράσματα.

Δεδομένης της μεγάλης έκτασης της περιοχής μελέτης, τα Σχήματα 6 και 7 απεικονίζουν λεπτομέρειες των θεματικών χαρτών σε μικρότερες υποπεριοχές. Η δεύτερη σειρά εικόνων στα σχήματα αυτά παρουσιάζει τους «χάρτες σφαλμάτων», που απεικονίζουν τις αντίστοιχες

ταξινομήσεις μόνο εντός των περιοχών που διαμορφώνουν το σύνολο δοκιμής, ενώ τα εσφαλμένως ταξινομημένα εικονοστοιχεία (ως προς οποιαδήποτε κλάση) αναπαρίστανται με μαύρο χρώμα.

Συγκεκριμένα, το Σχήμα 6 παρουσιάζει μία υποπεριοχή στα νότια της περιοχής μελέτης, όπου κυριαρχούν η Τραχεία Πεύκη και η Δρυς. Η χαρτογράφηση μέσω QuickBird χαρακτηρίζει εσφαλμένως πολλά σημεία που καλύπτονται από Τραχεία Πεύκη ως Μακκία. Η περίπτωση αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου αλατιού–πιπεριού, που εμφανίζεται κατά τη χαρτογράφηση μέσω εικόνων υψηλής ευκρίνειας. Σημειωτέων ότι όλοι οι χάρτες που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5 έως 7 έχουν υποστεί τη διαδικασία εξομάλυνσης θορύβου. Παρόλα αυτά, ένα ποσοστό του θορύβου παραμένει, καθώς ο αρχικός θόρυβος είναι πολύ μεγάλος. Η μεθοδολογία συνδυασμού αποφάσεων αξιοποιεί την πιο ομοιογενή εικόνα της ταξινόμησης Hyperion, διατηρώντας ταυτόχρονα (όπου χρειάζεται) τη λεπτομερή χαρτογράφηση που παρέχει η εικόνα υψηλής ευκρίνειας QuickBird.

Η διεργασία αποτελεσματικού συγκερασμού αποφάσεων γίνεται ακόμη πιο εμφανής στο Σχήμα 7, όπου παρουσιάζεται μία υποπεριοχή στα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης. Το σημείο αυτό είναι το πλέον πολυσχιδές της περιοχής, όπου οξιές, βελανιδιές και Μαύρη Πεύκη περιπλέκονται στις απότομες πλαγιές του Όρους Χολομώντα. Μέσω των χαρτών σφαλμάτων γίνεται εμφανές ότι ο συνδυασμός αποφάσεων (Σχήμα 7(στ)) μειώνει τις εσφαλμένες ταξινομήσεις τόσο στις περιοχές που καλύπτονται με Μαύρη Πεύκη (στις οποίες η ταξινόμηση Hyperion παρέχει καλύτερα αποτελέσματα) όσο και στις περιοχές με Δρύες και Οξιές, στις οποίες η ταξινόμηση QuickBird υπερτερεί.

Τέλος, αξίζει να συγκριθεί ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η διαδικασία εξομάλυνσης θορύβου (PR) στις ταξινομήσεις QuickBird και συνδυασμού αποφάσεων. Η εποπτική αυτή σύγκριση παρέχεται στο Σχήμα 8 μέσω χαρτών σφαλμάτων, σε μία υποπεριοχή στα ανατολικά της περιοχής μελέτης, όπου επικρατούν τα διάφορα είδη μακκίας. Η αρχική ταξινόμηση QuickBird (Σχήμα 8(α)) εμφανίζει εξαιρετικά υψηλό ποσοστό θορύβου, καθώς η περιοχή καλύπτεται από αραιή χαμηλή βλάστηση (εν πολλοίς θαμνώδη). Η εφαρμογή του φίλτρου PR έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του θορύβου (Σχήμα 8(β)), εντούτοις ένας μεγάλος αριθμός εσφαλμένων ταξινομήσεων παραμένει. Αντίθετα, η αρχική ταξινόμηση μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Σχήμα 8(γ)) εμφανίζει μικρά ποσοστά θορύβου, τα οποία εξομαλύνονται ακόμη περισσότερο μετά την εφαρμογή της διαδικασίας PR (Σχήμα 8(δ)).

5. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια του παρόντος πακέτου εργασίας αναπτύχθηκε μία αποτελεσματική μεθοδολογία χαρτογράφησης δασικών εκτάσεων. Κεντρική της ιδέα είναι η ταυτόχρονη αξιοποίηση τηλεσκοπικών προϊόντων διαφορετικού τύπου (πολυφασματικών και υπερφασματικών) στο επίπεδο της θεματικής πληροφορίας, μέσω δηλαδή του συγκερασμού επιμέρους θεματικών χαρτών που παράγονται ανεξάρτητα. Η αναπτυχθείσα μεθοδολογία εφαρμόστηκε πιλοτικά στο Πανεπιστημιακό Δάσος του Ταξιάρχη, χρησιμοποιώντας μία δορυφορική υπερφασματική εικόνα Hyperion με μία πολυφασματική δορυφορική εικόνα QuickBird πολύ υψηλής ευκρίνειας.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη είναι ιδιαίτερως ικανοποιητικά. Τα ποσοστά ακρίβειας της χαρτογράφησης αυξήθηκαν σημαντικά, μειώνοντας σε πολύ μεγάλο βαθμό το θόρυβο που εμφανίζεται στον αρχικό χαρακτηρισμό μέσω της εικόνας QuickBird. Τα προκύπτοντα αριθμητικά αποτελέσματα, συνδυαζόμενα με την οπτική παρατήρηση της ποιότητας του παραγόμενου θεματικού χάρτη, αλλά λαμβάνοντας υπόψη και την καλή προσωπική γνώση της περιοχής από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία παρέχει υψηλής ακρίβειας χαρακτηρισμούς, ικανούς για την ακριβή εκτίμηση της βιομάζας σε επόμενο επίπεδο.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε δεν περιορίζεται σε δορυφορικά μόνο προϊόντα. Η εφαρμογή της σε δεδομένα σύγχρονων υπερφασματικών αισθητήρων, που λαμβάνουν εικόνες από εναέρια μέσα, θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια της ταξινόμησης ακόμη περαιτέρω. Τα αποτελέσματα όμως της παρούσας μελέτης είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Ο Hyperion αποτελεί αυτή τη στιγμή το μόνο δορυφορικό υπερφασματικό αισθητήρα που υπάρχει. Η ποιότητα των εικόνων του είναι μέτρια, καθώς αποτέλεσε πιλοτικό ερευνητικό πρόγραμμα της NASA [15]. Εντούτοις, έχουν προγραμματιστεί για το άμεσο μέλλον μία σειρά από εκτοξεύσεις δορυφόρων που θα φέρουν εξελιγμένους υπερφασματικούς αισθητήρες [16,17]. Υπό αυτούς τους όρους, η μεθοδολογία που προτείνεται εδώ θα μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρεία κλίμακα, με πολύ μικρότερο κόστος από αυτό που απαιτείται από τους υπερφασματικούς αισθητήρες που φέρονται από εναέρια μέσα.

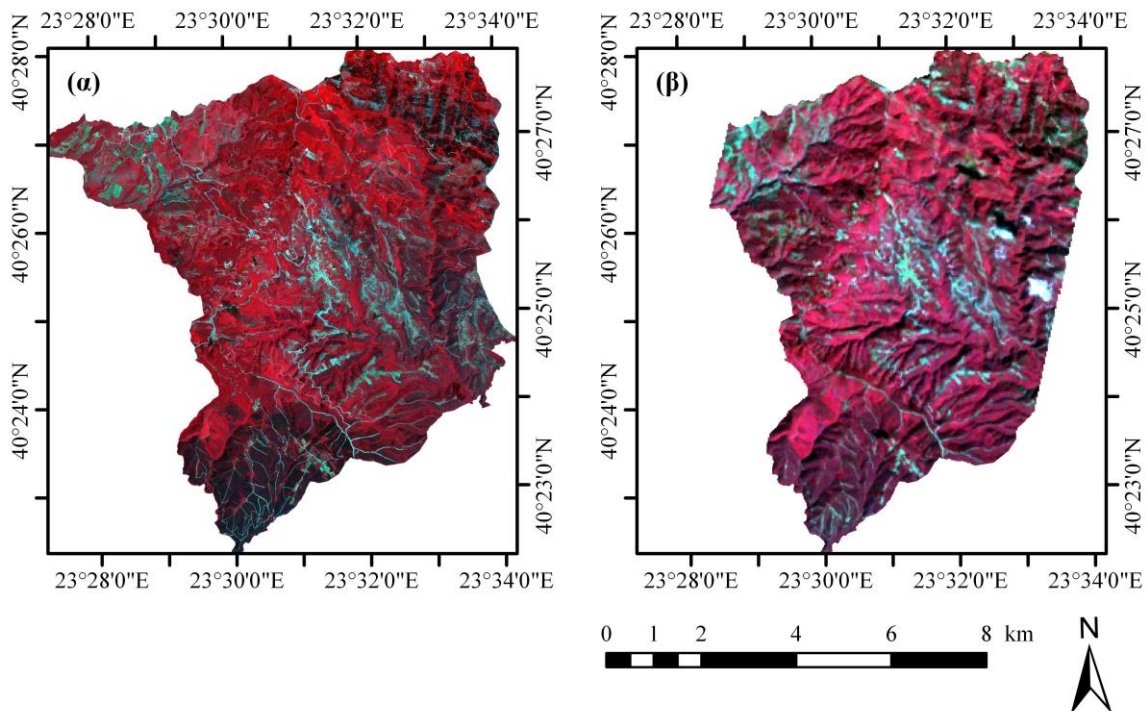
Αναφορές

1. Govender, M.; Chetty, K.; Naiken, V.; Bulcock, H. A comparison of satellite hyperspectral and multispectral remote sensing imagery for improved classification and mapping of vegetation. *Water SA* **2008**, *34*, 147–154.
2. Goodenough, D. G.; Dyk, A.; Niemann, K. O.; Pearlman, J. S.; Chen, H.; Han, T.; Murdoch, M.; West, C. Processing Hyperion and ALI for forest classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2003**, *41*, 1321–1331.
3. Stavrakoudis, D. G.; Galidaki, G. N.; Gitas, I. Z.; Theocharis, J. B. A Genetic Fuzzy-Rule-Based Classifier for Land Cover Classification From Hyperspectral Imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2012**, *50*, 130–148.
4. Ungar, S. G.; Pearlman, J. S.; Mendenhall, J. A.; Reuter, D. Overview of the Earth Observing One (EO-1) mission. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2003**, *41*, 1149–1159.
5. Vapnik, V. N. *Statistical learning theory*; Wiley: New York, 1998.
6. Cortes, C.; Vapnik, V. Support-vector networks. *Mach. Learn.* **1995**, *20*, 273–297.
7. Mountrakis, G.; Im, J.; Ogole, C. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2011**, *66*, 247–259.
8. Camps-Valls, G.; Bruzzone, L. Kernel-based methods for hyperspectral image classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2005**, *43*, 1351–1362.
9. Dalponte, M.; Bruzzone, L.; Vescovo, L.; Gianelle, D. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas. *Remote Sens. Environ.* **2009**, *113*, 2345–2355.

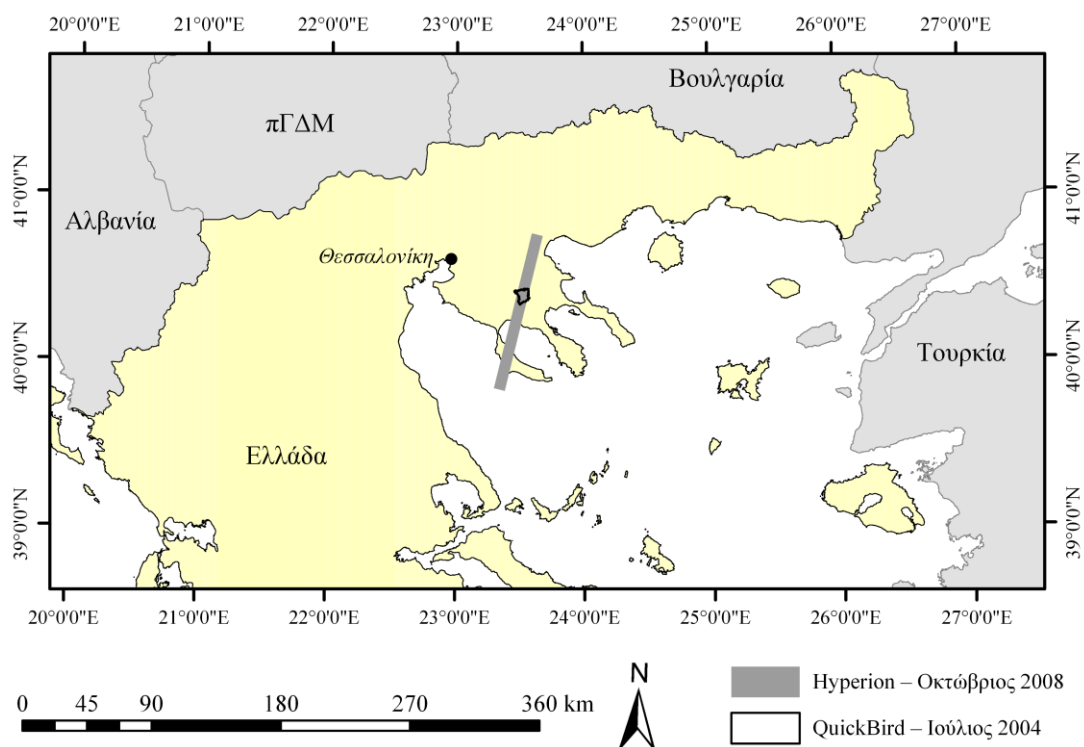
10. Moustakidis, S.; Mallinis, G.; Koutsias, N.; Theocharis, J. B.; Petridis, V. SVM-Based Fuzzy Decision Trees for Classification of High Spatial Resolution Remote Sensing Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2012**, *50*, 149–169.
11. Kuncheva, L. I. *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*; John Wiley & Sons, 2004.
12. Huang, X.; Zhang, L. A multilevel decision fusion approach for urban mapping using very high-resolution multi/hyperspectral imagery. *Int. J. Remote Sens.* **2012**, *33*, 3354–3372.
13. Congalton, R. G.; Green, K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*; 2nd ed.; CRC Press, 2008.
14. Tarabalka, Y.; Benediktsson, J. A.; Chanussot, J. Spectral–Spatial Classification of Hyperspectral Imagery Based on Partitional Clustering Techniques. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2009**, *47*, 2973–2987.
15. Middleton, E. M.; Ungar, S. G.; Mandl, D. J.; Ong, L.; Frye, S. W.; Campbell, P. E.; Landis, D. R.; Young, J. P.; Pollack, N. H. The Earth Observing One (EO-1) Satellite Mission: Over a Decade in Space. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2013**, *6*, 243–256.
16. Stuffer, T.; Kaufmann, C.; Hofer, S.; Förster, K. P.; Schreier, G.; Mueller, A.; Eckardt, A.; Bach, H.; Penné, B.; Benz, U.; Haydn, R. The EnMAP hyperspectral imager—An advanced optical payload for future applications in Earth observation programmes. *Acta Astronaut.* **2007**, *61*, 115–120.
17. Stefano, P.; Angelo, P.; Simone, P.; Filomena, R.; Federico, S.; Tiziana, S.; Umberto, A.; Vincenzo, C.; Acito, N.; Marco, D.; Stefania, M.; Giovanni, C.; Raffaele, C.; Roberto, D. B.; Giovanni, L.; Cristina, A. The PRISMA hyperspectral mission: Science activities and opportunities for agriculture and land monitoring. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*; 2013; pp. 4558–4561.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-ΣΧΗΜΑΤΑ

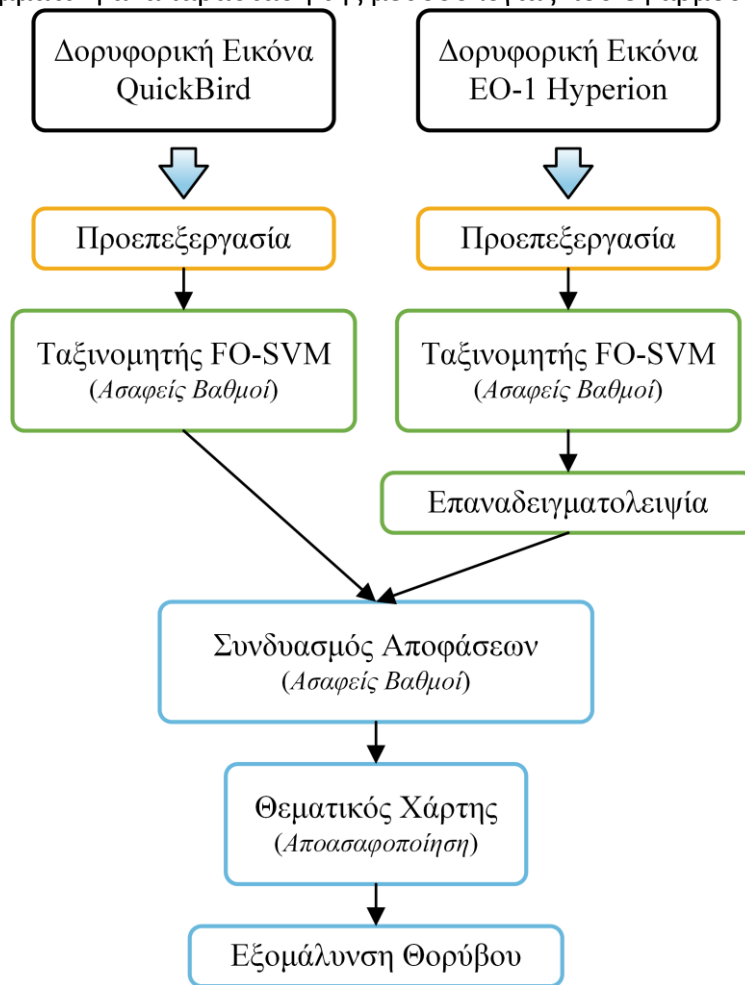
Σχήμα 1. Ψευδοέγχρωμη απεικόνιση (α) της δορυφορικής εικόνας QuickBird και (β) της δορυφορικής εικόνας Hyperion που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.



Σχήμα 2. Τοποθεσία της περιοχής μελέτης, όπου φαίνονται και τα χωρικά όρια των εικόνων Hyperion και QuickBird που χρησιμοποιήθηκαν.



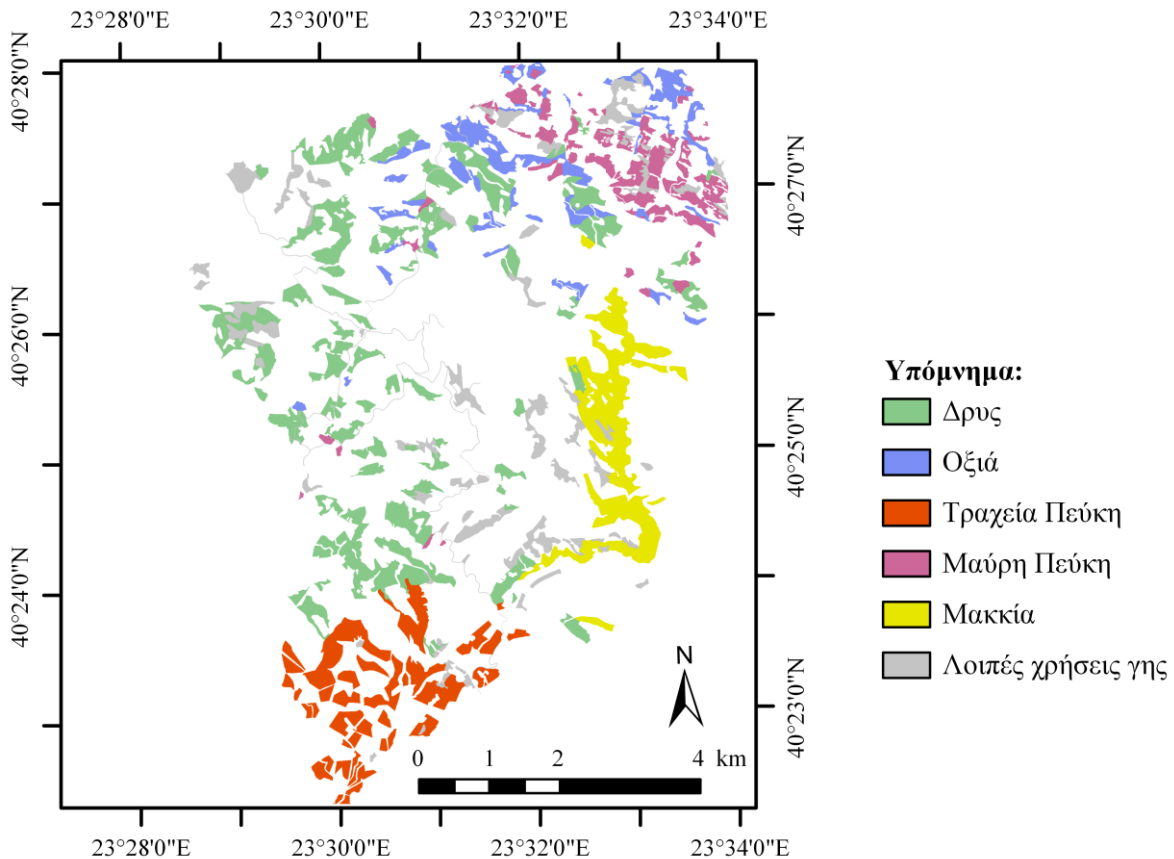
Σχήμα 3. Διαγραμματική αναπαράσταση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.



Πίνακας 1. Σχήμα ταξινόμησης και αριθμός προτύπων αναφοράς των συνόλων δεδομένων.

	Σύνολο εκπαίδευσης	Σύνολο επαλήθευσης	Σύνολο δοκιμής
Δρυς	55	61	895,859
Οξιά	30	11	281,253
Τραχεία Πεύκη	30	21	370,182
Μαύρη Πεύκη	30	20	265,134
Μακκία	30	31	366,072
Λοιπές χρήσεις γης	60	28	433,566
Σκιά	30		
Σύνολο	265	172	2,612,066

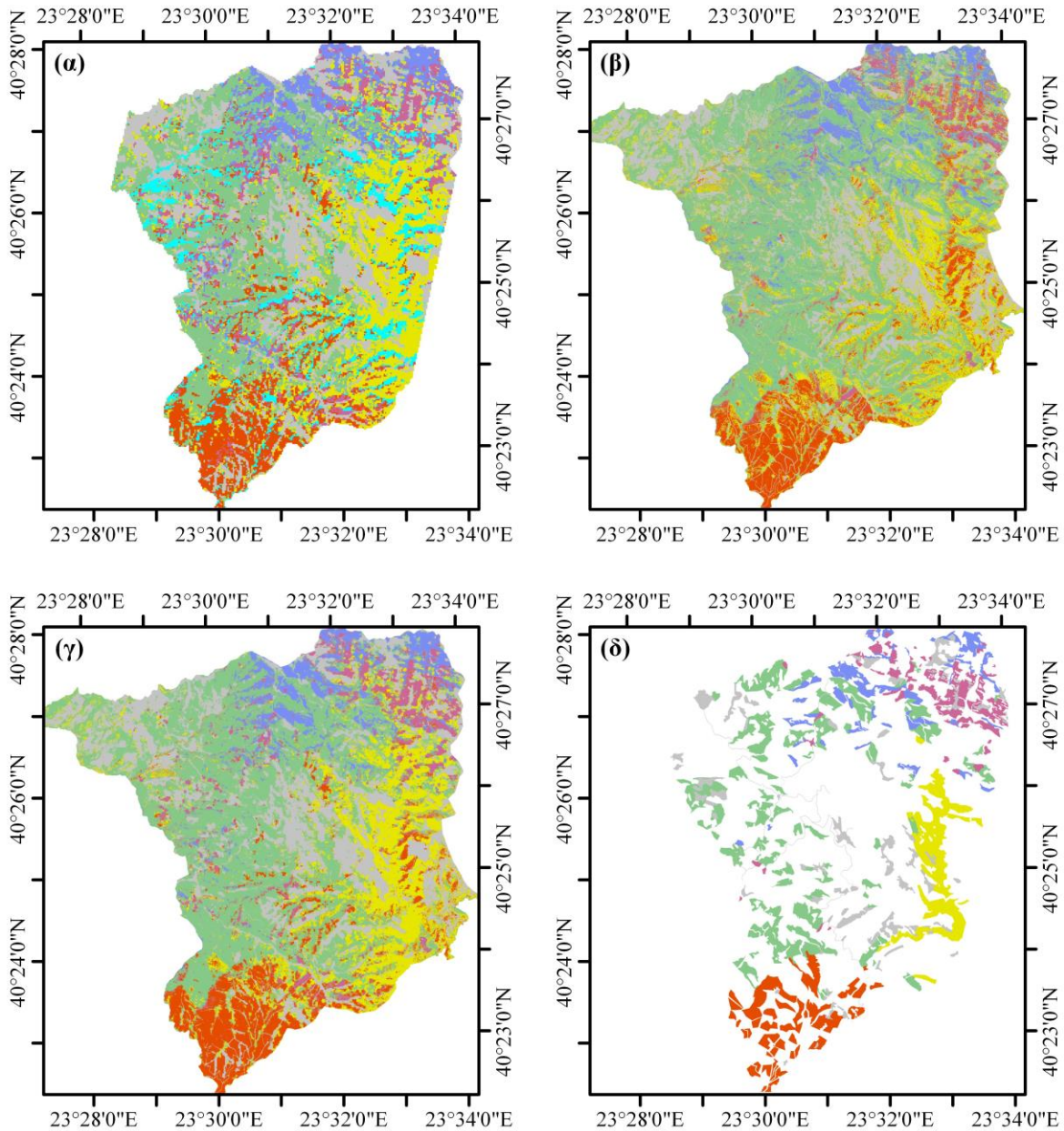
Σχήμα 4. Χωρική κατανομή των περιοχών που θεωρήθηκαν για το σύνολο δοκιμής.



Πίνακας 2. Ακρίβεια χαρτογράφησης (%) μέσω των επιμέρους ταξινομήσεων Hyperion και QuickBird, καθώς και μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

	Σύνολο Δοκιμής			Σύνολο Επαλήθευσης		
	Hyperion	QuickBird	Συνδυασμός	Hyperion	QuickBird	Συνδυασμός
Δρυς	77.85	74.08	83.03	83.61	90.16	93.44
Οξιά	63.56	81.62	82.51	72.73	72.73	81.82
Τραχεία Πεύκη	62.41	66.59	76.05	95.24	80.95	85.71
Μαύρη Πεύκη	60.90	64.89	70.59	85.00	95.00	100.00
Μακκία	58.18	63.53	70.84	80.65	58.06	77.42
Λοιπές χρήσεις γης	74.85	54.79	80.25	100.00	100.00	100.00
Συνολική ακρίβεια	66.52	70.84	78.89	76.16	84.30	90.70

Σχήμα 5. Χαρτογράφηση της περιοχής μελέτης μέσω **(α)** της εικόνας Hyperion, **(β)** της εικόνας QuickBird και **(γ)** της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμού αποφάσεων. Το σχήμα **(δ)** απεικονίζει τις περιοχές αναφοράς του συνόλου δοκιμής.



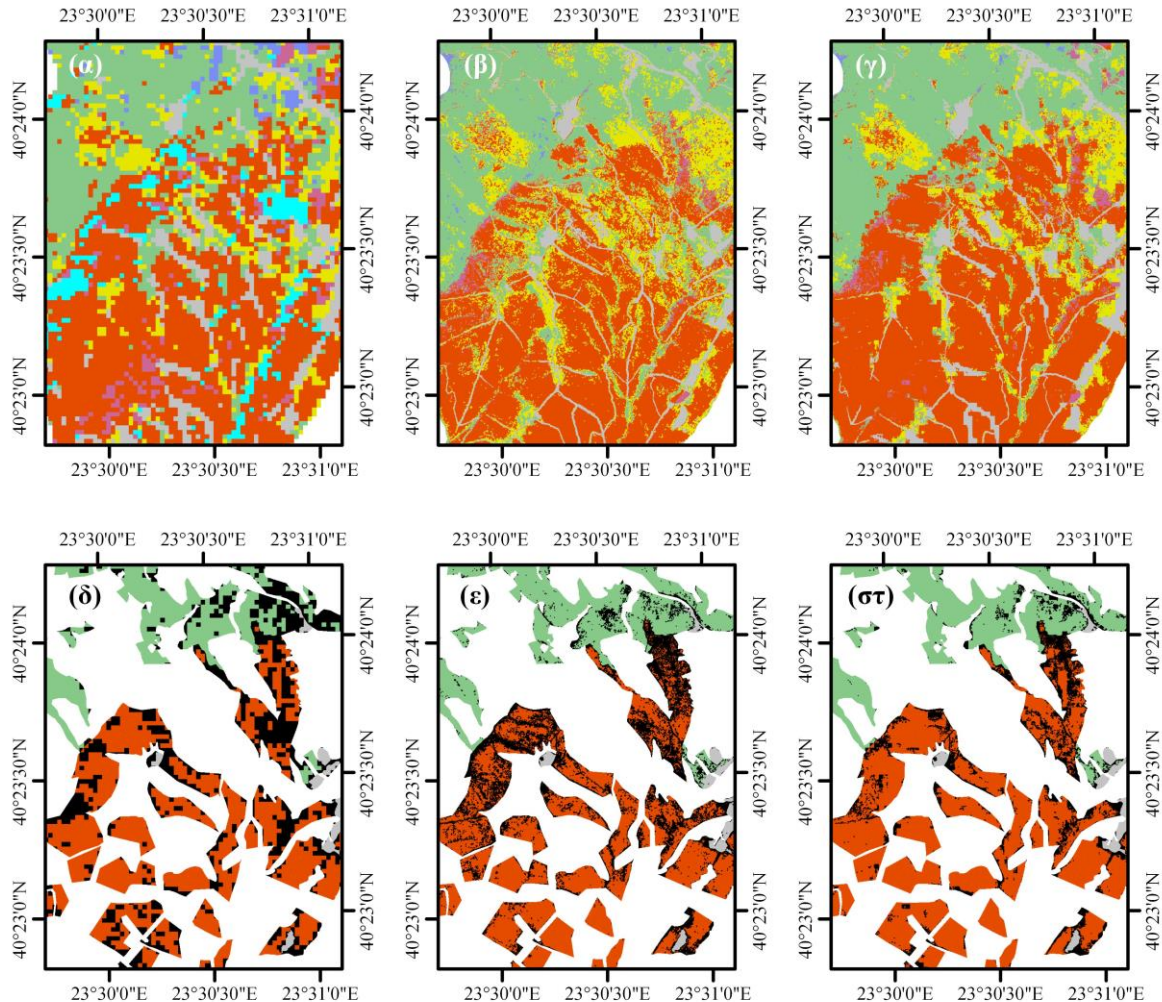
Υπόμνημα:

- | | | |
|---|--|--|
|  Δρυς |  Οξιά |  Τραχεία Πεύκη |
|  Μαύρη Πεύκη |  Μακκία |  Λοιπές Χρήσεις |
| |  Σκιές | |

0 1 2 4 km



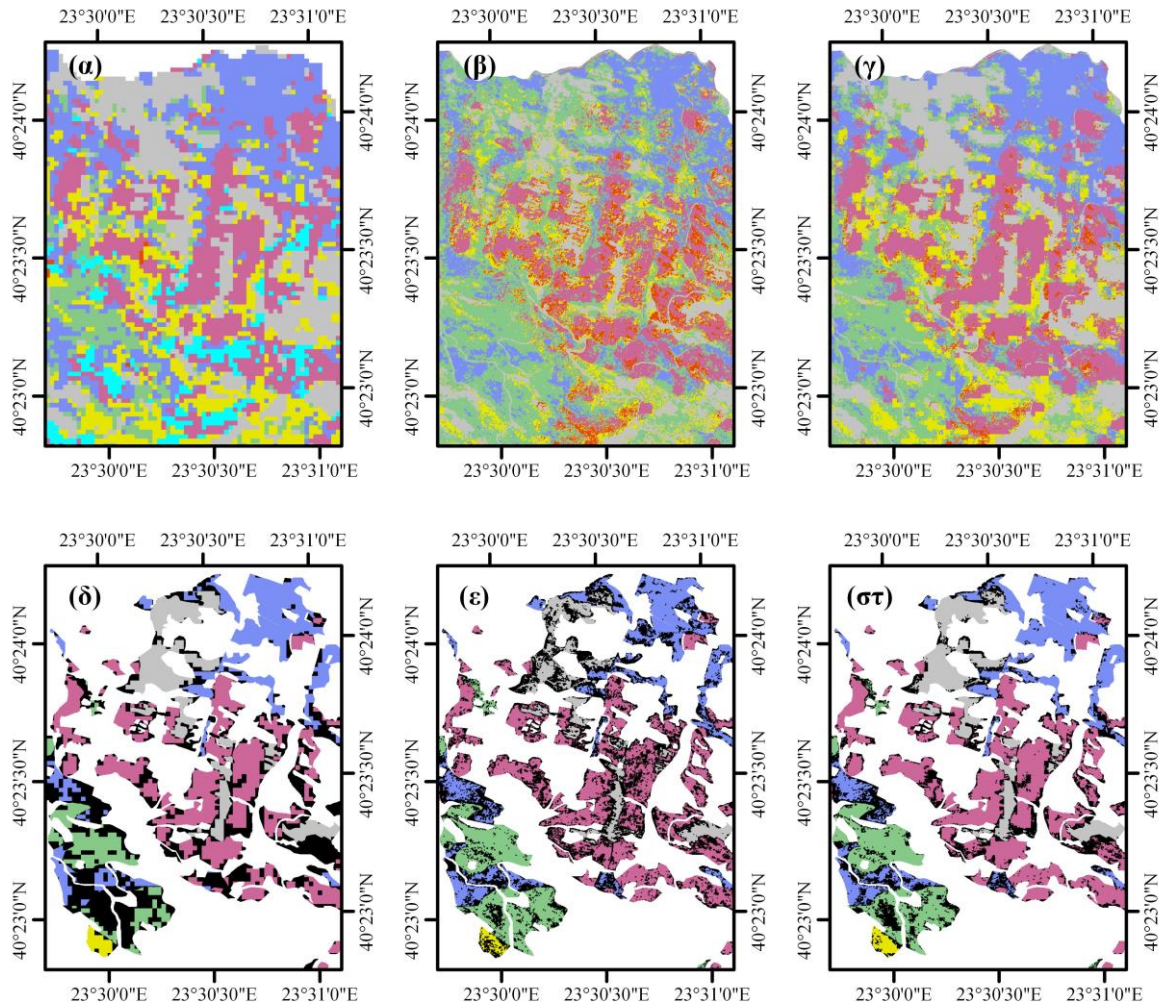
Σχήμα 6. Λεπτομέρεια του θεματικού χάρτη σε μία περιοχή στα νότια της περιοχής μελέτης που προέκυψε **(α)** από την ταξινόμηση μέσω Hyperion, **(β)** την ταξινόμηση μέσω QuickBird και **(γ)** μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμού αποφάσεων. Τα σχήματα **(δ)**–**(στ)** απεικονίζουν τους αντίστοιχους (ανά στήλη) χάρτες σφαλμάτων, όπου φαίνονται οι ταξινομήσεις μόνο στις περιοχές του συνόλου δοκιμής, ενώ οι εσφαλμένες ταξινομήσεις αναπαρίστανται με μαύρο χρώμα.



Υπόμνημα:



Σχήμα 7. Λεπτομέρεια του θεματικού χάρτη σε μία περιοχή στα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης που προέκυψε **(α)** από την ταξινόμηση μέσω Hyperion, **(β)** την ταξινόμηση μέσω QuickBird και **(γ)** μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμού αποφάσεων. Τα σχήματα **(δ)**–**(στ)** απεικονίζουν τους αντίστοιχους (ανά στήλη) χάρτες σφαλμάτων, όπου φαίνονται οι ταξινομήσεις μόνο στις περιοχές του συνόλου δοκιμής, ενώ οι εσφαλμένες ταξινομήσεις αναπαρίστανται με μαύρο χρώμα.



Υπόμνημα:

- | | | | |
|--------|----------------|---------------|-------------------------|
| Δρυς | Οξιτά | Τραχεία Πεύκη | Μαύρη Πεύκη |
| Μακκία | Λοιπές Χρήσεις | Σκιές | Εσφαλμένες ταξινομήσεις |



Σχήμα 8. Χάρτες σφαλμάτων για την ταξινόμηση μέσω QuickBird (α) πριν και (β) μετά την εξομάλυνση θορύβου PR και αντίστοιχοι χάρτες μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας συνδυασμού αποφάσεων (γ) πριν και (δ) μετά την εξομάλυνση θορύβου PR, σε μία υποπεριοχή στα νότια της περιοχής μελέτης που καλύπτεται κυρίως από είδη μακκίας.

