

Αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης των στερεοεικόνων Cartosat-1 στο πλαίσιο εξαγωγής πληροφορίας για τα ύψη των δέντρων δασικών συστάδων

Π. Στουρνάρα¹, Π. Πατιάς¹, Γ. Μαλλίνης²

*1 Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών,
Τομέας Κτηματολογίου, Φωτογραμμετρίας και Χαρτογραφίας,
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης, ΑΠΘ*

2 Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, ΑΠΘ

Περίληψη: Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μια αυτοματοποιημένη μέθοδο για την εξαγωγή πληροφορίας όσον αφορά την παράμετρο του ύψους των δέντρων δασικών συστάδων. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στον Χολομώντα Χαλκιδικής. Τα δεδομένα ήταν ένα στερεοζεύγος Cartosat-1 και ένα DSM (Digital Surface Model), που είχε παραχθεί παλαιότερα με χρήση του στερεοζεύγους. Η εφαρμογή έγινε σε τμήμα της εικόνας Cartosat-1 με ήπιο ανάγλυφο. Πρώτα έγινε ο εντοπισμός των περιοχών ακάλυπτου εδάφους με χρήση αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθεί η υψομετρική πληροφορία των περιοχών ακάλυπτου εδάφους από το DSM και στη συνέχεια, να δημιουργηθεί μια προσεγγιστική επιφάνεια για το έδαφος. Η πληροφορία ύψους των δασικών συστάδων αποκτήθηκε μέσω της αφαίρεσης της προσεγγιστικής επιφάνειας από το DSM. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πεδίο για τα ύψη των δέντρων δασικών συστάδων από έμπειρο επιστημονικό προσωπικό. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την αυτοματοποιημένη μέθοδο και τα δεδομένα αναφοράς (δεδομένα πεδίου) κυμάνθηκε από 30% έως 40% κατ' απόλυτη τιμή.

1. Εισαγωγή

Το ύψος των δέντρων είναι μια από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση του δασικού ξυλώδους όγκου και της δασικής βιομάζας (Ackerman et al., 2010; Popescu et al., 2003). Η γνώση των δασικών παραμέτρων είναι απαραίτητη για τη σωστή διαχείριση των δασικών οικοσυστημάτων και την αειφόρο ανάπτυξη (Γκατζογιάννης, 2005). Τα δορυφορικά δεδομένα έχουν το πλεονέκτημα κάλυψης μεγάλων εκτάσεων με σχετικά χαμηλό κόστος συγκριτικά με τις αεροφωτογραφίες και τις μετρήσεις πεδίου (Eurisy, 2011). Αυτό αποτελεί, γενικότερα, ένα κίνητρο για την έρευνα απόκτησης πληροφορίας για δασικές παραμέτρους από τις δορυφορικές εικόνες.

Η απόκτηση πληροφορίας για τα ύψη των δέντρων σε δασικές συστάδες επιτυγχάνεται με τη χρήση του υψομετρικού μοντέλου επιφάνειας (DSM-Digital Surface

Model) και του υψομετρικού μοντέλου εδάφους (DTM-Digital Terrain Model) της περιοχής μελέτης. Βασίζεται στην αφαίρεση των δύο μοντέλων (Σχέση 1), οπότε και παράγεται το μοντέλο CHM (Canopy Height Model).

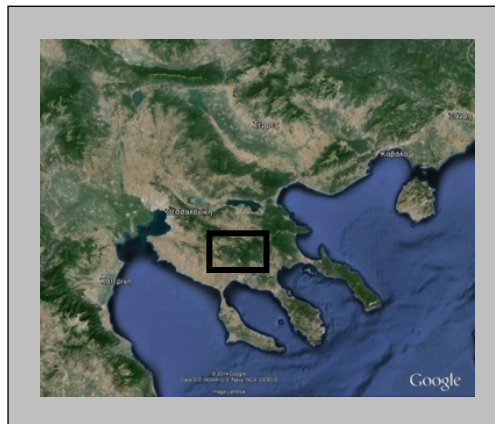
$$\text{CHM} = \text{DSM} - \text{DTM} \quad (1.1)$$

Στην παρούσα ερευνητική εργασία έγινε χρήση οπτικής φωτογραμμετρίας, με την οποία παράγονται υψομετρικά μοντέλα επιφάνειας στις δασικές περιοχές. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει η δυνατότητα διεξόδου στην κομοστέγη, όπως σε άλλους τύπους δεδομένων, δηλ. στα LIDAR (Popescu et al., 2003; Popescu et al., 2004; Van Aardt et al., 2006; St-Onge et al., 2008) και στα SAR (Holmström and Fransson, 2003; Gama et al., 2010).

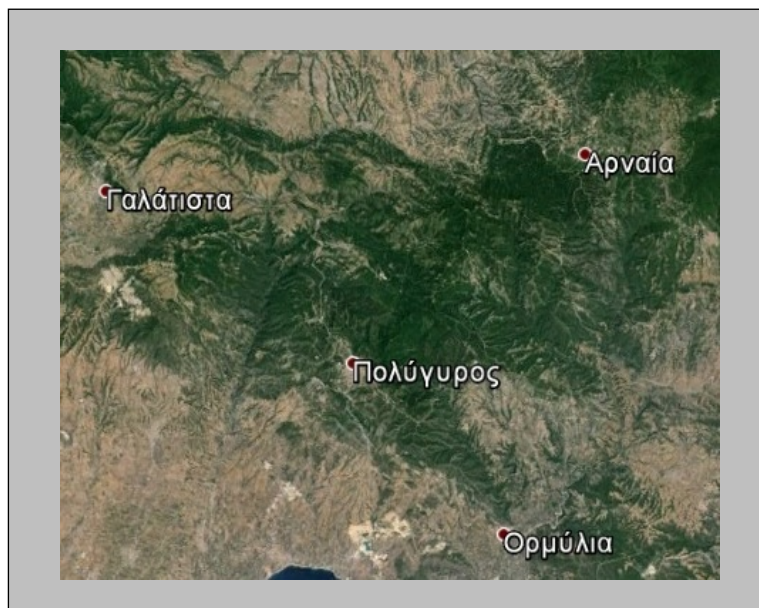
Γι' αυτό έγινε μια επιστημονική προσέγγιση για την αφαίρεση των δέντρων από το έδαφος με τη χρήση αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης. Εφαρμόστηκε σε μικρή περιοχή της δορυφορικής εικόνας, γιατί το έντονο ανάγλυφο, η πυκνή κομοστέγη και η μικρή χωρική ανάλυση κατέστησαν αδύνατη την εφαρμογή της σε ολόκληρη την έκταση της εικόνας.

2. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι η δασική έκταση του όρους Χολομόντα και βρίσκεται στην κεντρική Χαλκιδική, στη Βόρεια Ελλάδα (Εικόνες 1-2). Χαρακτηρίζεται από πυκνή δασική βλάστηση και κυριαρχείται από φυλλοβόλα δάση. Διαρθρώνεται σε ζώνες ανάλογα με τη χλωριδική σύνθεσή, το υπερθαλάσσιο ύψος, τις πετρολογικές και εδαφικές συνθήκες, την κλίση της περιοχής, τη θερμοκρασία αέρος καθώς και τη βροχόπτωση (Mallinis, 2006).



Εικόνα 1. Η περιοχή μελέτης (στο μαύρο πλαίσιο) Η γεωγραφική περιοχή της Χαλκιδικής, (πηγή: GoogleEarth, 2014).



Εικόνα 2. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης, (πηγή: GoogleEarth, 2014).

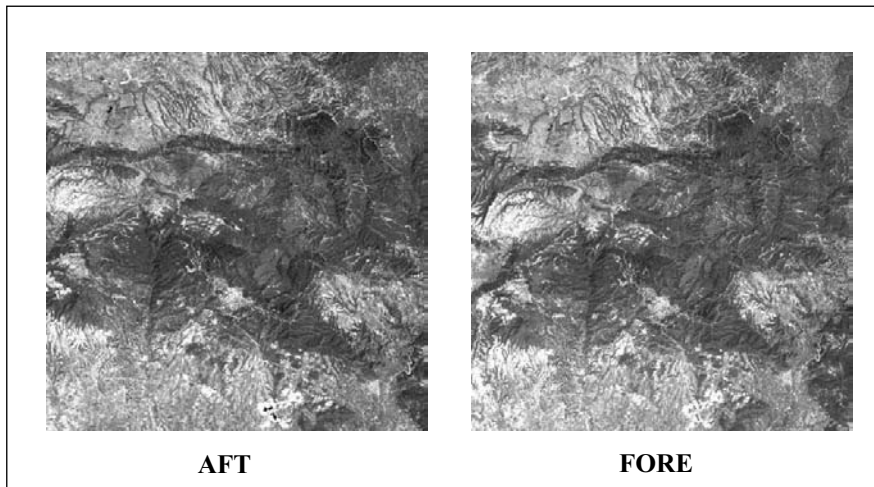
Τα κυριότερα είδη δέντρων που συναντώνται στην περιοχή είναι η μαύρη πεύκη (*Pinus nigra*), η τραχεία πεύκη (*Pinus brutia*), η χαλέπιος πεύκη (*Pinus halepensis*), η δρυς (*Quercus conferta* ή αλλιώς *frainetto*, *Quercus pubescens*, *Quercus dalechampii*) και η οξιά (*Fagus moesiaca*). Επίσης υπάρχει θαμνώδης βλάστηση. Το ανάγλυφο είναι μεταβλητό με υπερθαλάσσια υψόμετρα από 320 έως 1165m (Mallinis, 2006).

3. Δεδομένα

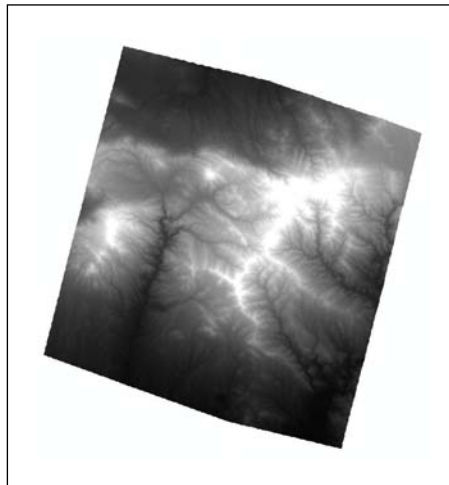
3.1. Τηλεπισκοπικά δεδομένα

Ένα στεροζεύγος εικόνων Cartosat-1 που αποκτήθηκε στις 18 Αυγούστου 2006 (Εικόνα 3). Οι εικόνες είναι παγχρωματικές με χωρική ανάλυση 2,5 μέτρα. Διακρίνονται στην εικόνα AFT (κλίση -5 μοίρες) και στην εικόνα FORE (κλίση +26 μοίρες) ανάλογα με την κλίση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης τους.

Επίσης, ένα DSM (Εικόνα 4), φωτογραμμετρικό προϊόν που παράχθηκε με τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας μετά από τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού του στεροζεύγους Cartosat-1. Έχοντας γνωστό τον εξωτερικό προσανατολισμό, υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες των σημείων της εικόνας στο έδαφος. Για τον εξωτερικό προσανατολισμό εφαρμόστηκε η μέθοδος της δέσμης. Η υψομετρική ακρίβεια του DSM εκτιμήθηκε ότι είναι 1,4m (RMSE-Root Mean Square Error) σε προηγούμενη εργασία των (Στουρνάρα και Πατιάς, 2013).



Εικόνα 3. Δορυφορικά δεδομένα: Ένα στεροζεύγος Cartosat-1, λήψης 18/8/2006.



Εικόνα 4. Δορυφορικά δεδομένα: Ένα DSM, προϊόν φωτογραμμετρικής παραγωγής από το στεροζεύγος Cartosat-1.

3.2. Δεδομένα πεδίου

Το σχέδιο δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε για τη διενέργεια των μετρήσεων πεδίου ήταν η δειγματοληψία gradsect. Η δειγματοληψία gradsect είναι μια παραλλαγή των στρωματοποιημένων δειγματοληπτικών σχεδίων, βασισμένη στην κατανομή των σχεδίων κατά μήκος των περιβαλλοντικών κλίσεων. Οι περιοχές δειγματοληψίας εντοπίζονται σκόπιμα για να ελαχιστοποιήσουν το χρόνο των ενδιάμεσων μετακινήσεων. Η μέθοδος έχει αποδειχθεί στατιστικά, ότι είναι δυνατόν να βοηθήσει στη συγκέντρωση περισσότερων πληροφοριών από τα τυποποιημένα σχέδια δειγματοληψίας (Mallinis et al., 2008).

Για τις ανάγκες της έρευνας μετρήθηκαν δύο επιφάνειες (Εικόνα 5α). Το μέγεθος των επιφανειών αυτών ήταν 400m^2 ($20\text{m} \times 20\text{m}$). Ο εντοπισμός της κάθε επιφάνειας έγινε με χρήση συσκευής χειρός GPS, ενώ η οριοθέτησή της και ο προσδιορισμός των ορίων έγινε με ταινία σήμανσης και πυξίδα.

Για κάθε δέντρο εντός αυτής της επιφάνειας σημειώθηκε: (α) το είδος του, (β) η στηθαία διάμετρος του, (γ) ο όροφος (κοινωνική θέση) που ανήκει και (δ) μια οπτική εκτίμηση του μεγέθους της κόμης του.

Το ύψος των 10 κυρίαρχων δένδρων σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια μετρήθηκε με τη χρήση υψομέτρου Haga. Στη συνέχεια, εξήχθη ο μέσος όρος αυτών που αποτέλεσε το ύψος της δειγματοληπτικής επιφάνειας.

Οι μετρήσεις πεδίου έγιναν το καλοκαίρι του 2004, δύο χρόνια πριν τη λήψη της εικόνας, ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές στο ύψος των δέντρων μεταξύ των ημερομηνιών.

4. Εξαγωγή πληροφορίας για το ύψος δέντρων δασικών συστάδων με αυτοματοποιημένη μέθοδο

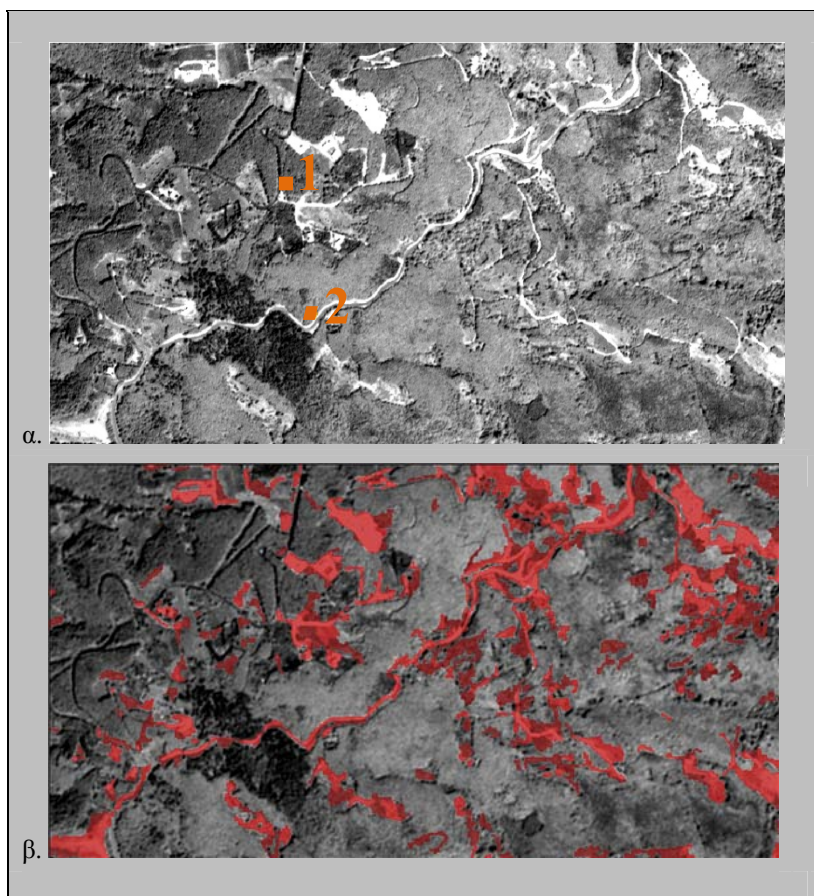
4.1. Προεπεξεργασία δεδομένων

Η ορθοαναγωγή της εικόνας Cartosat-1 έγινε μετά τον αεροτριγωνισμό του στερεοζεύγους, κατά τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν 35 φωτοσταθερά, (20 σημεία control και 15 check), μετρημένα με GPS και ακρίβεια 0,6-6,7cm. Το σφάλμα ήταν (RMSE-Root Mean Square Error) 0,5m οριζοντιογραφικά και 0,5 κατά τον άξονα Z. Αξιολογήθηκε βάσει των σημείων check (Στουρνάρα και Πατιάς, 2013).

Η ορθοαναγωγή της εικόνας έγινε με χρήση του DSM, που είχε παραχθεί από τον αεροτριγωνισμό. Χρησιμοποιήθηκε η εικόνα του διαύλου a, γιατί σφάλμα 1m στο DSM επιφέρει οριζοντιογραφικό σφάλμα 4,3cm, ενώ στην περίπτωση χρήσης της εικόνας του διαύλου f έχει ως αποτέλεσμα οριζοντιογραφικό σφάλμα 48cm (Rao et al., 2007). Η γωνία λήψης της εικόνας a ήταν σχεδόν ναδιρική.

Επιλέχθηκε ένα τμήμα από την ορθοεικόνα (Εικόνα 5), που χαρακτηρίζεται από σχετικά πιο ήπιες υψομετρικές μεταβολές σε σχέση με άλλες περιοχές. Αυτό έγινε, γιατί το έντονο ανάγλυφο σε συνδυασμό με τη μικρή σχετικά χωρική ανάλυση της εικόνας κατέστησαν αδύνατη την εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας για το ακάλυπτο έδαφος σε μεγάλο τμήμα της εικόνας.

Για τη δημιουργία πιο ομοιογενών περιοχών στην εικόνα εφαρμόστηκε φίλτρο υφής μέσης τιμής. Αυτό έγινε, ώστε κατά το στάδιο κατάτμησης της εικόνας, τα αντικείμενα που δημιουργούνται να είναι πιο “κατάλληλα” για την ταξινόμηση. Χρησιμοποιήθηκε παράθυρο 3x3, ώστε ακόμα και μικρές περιοχές του ακάλυπτου εδάφους να διατηρηθούν ευδιάκριτες.



Εικόνα 5. (α) Η ορθοεικόνα και η θέση των επιφανειών, στις οποίες διενεργήθηκε η λήψη των δεδομένων πεδίου το 2004.

(β) Η ίδια εικόνα μετά την εφαρμογή του φίλτρου υψής. Επάνω στην εικόνα, διακρίνονται τα αποτελέσματα της αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης για την κατηγορία του ακάλυπτου εδάφους.

4.2. Επεξεργασία δεδομένων

4.2.1. Εξαγωγή πληροφορίας ακάλυπτου εδάφους

Για την αφαίρεση των δέντρων από το έδαφος, με σκοπό την εκτίμηση ύψους των δασικών συστάδων, είναι απαραίτητη η εξαγωγή πληροφορίας του ακάλυπτου εδάφους της περιοχής μελέτης. Ο εντοπισμός του ακάλυπτου εδάφους βασίστηκε στην αντικειμενοστραφή ταξινόμηση της ορθοεικόνας Cartosat-1. Η επεξεργασία έγινε στο περιβάλλον του λογισμικού eCognition Developer 8.7.

Για την κατάτμηση της εικόνας εφαρμόστηκε η μέθοδος πολλαπλής ανάλυσης (multiresolution segmentation). Η παράμετρος της κλίμακας είναι μια αφηρημένη

έννοια, η οποία καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ετερογένεια των αντικειμένων που θα δημιουργηθούν με την κατάτμηση. Η ομοιογένεια ή ετερογένεια των αντικειμένων καθορίζεται, επίσης, από το κριτήριο ομοιογένειας. Το κριτήριο αυτό αξιολογεί πόσο ομοιογενές ή ετερογενές είναι ένα αντικείμενο. Λαμβάνει υπόψη τόσο τη φασματική όσο και τη σχηματική ομοιογένεια του κάθε αντικειμένου. Το κριτήριο ομοιογένειας καθορίζεται με τη χρήση των παραμέτρων σχήματος (shape factor) και πυκνότητας (compactness). Το άθροισμά των παραμέτρων για το σχήμα και το φάσμα ενός αντικειμένου είναι ίσο με τη μονάδα, οπότε επιλέγοντας την τιμή της πρώτης καθορίζεται η τιμή της άλλης αυτόματα. Η παράμετρος της πυκνότητας έχει σχέση με το πόσο συμπαγές είναι ένα αντικείμενο σε αντίθεση με το πόσο ομαλό είναι. Το άθροισμα των παραμέτρων πυκνότητας και ομαλότητας είναι ίσο με την παράμετρο του σχήματος (Definiens Reference Guide, 2011). Δημιουργήθηκαν δύο επίπεδα κατάτμησης με τιμή κλίμακας 10 για το πρώτο και 20 για το δεύτερο. Για τη δημιουργία και των δύο επιπέδων κατάτμησης οι τιμές των παραμέτρων σχήματος και πυκνότητας ήταν 0,7 και 0,5 αντίστοιχα.

Η αντικειμενοσταφής ταξινόμηση εφαρμόστηκε στο δεύτερο επίπεδο και έγινε με τη χρήση δύο κανόνων: α) ορισμός κατωφλίου μέσης τιμής της εικόνας ≥ 153 και β) ορισμός κατωφλίου υψής κατά Haralick (κριτήριο ομοιογένειας) $\leq 0,08$ για τα αταξινόμητα αντικείμενα με μέση τιμή ≥ 120 (Σχήμα 1). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5β.

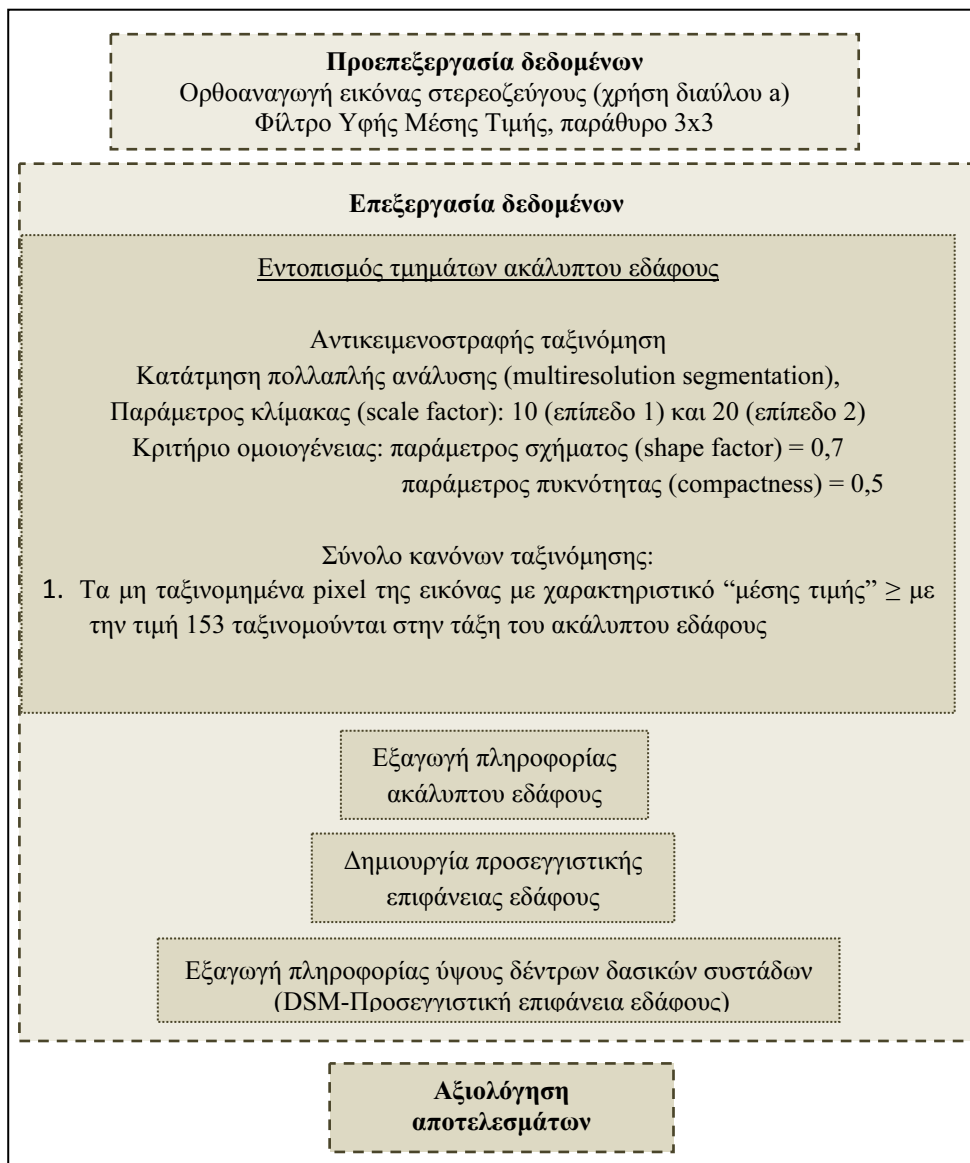
Στη συνέχεια, η τάξη του ακάλυπτου εδάφους εξήχθη από την ταξινομημένη εικόνα υπό τη μορφή πολυγώνων. Με τη χρήση των πολυγώνων έγινε αποκοπή των ίδιων περιοχών από το DSM. Οι περιοχές που αποκόπηκαν από το DSM χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία μιας ενιαίας προσεγγιστικής επιφάνειας του εδάφους, κατ' αναλογία ενός DTM, αφού με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε δελήφθηκαν υπόψη οι περιοχές της γήινης επιφάνειας που είχαν αντικείμενα (κυρίως δέντρα). Για την παραγωγή της εφαρμόστηκε η μέθοδος της παρεμβολής. Η επεξεργασία έγινε στο περιβάλλον του λογισμικού Erdas Imagine 9.2.

4.2.2 Εξαγωγή πληροφορίας ύψους δέντρων δασικών συστάδων

Η εξαγωγή της πληροφορίας ύψους δέντρων δασικών συστάδων βασίστηκε στην (1.1). Όπως προαναφέρθηκε, η πληροφορία ακάλυπτου εδάφους που εξήχθη, χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή μιας προσεγγιστικής επιφάνειας για το έδαφος κατ' αναλογία ενός DTM, που δεν υπήρχε διαθέσιμο για την περιοχή μελέτης.

4.3. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση των δεδομένων πεδίου. Παρατηρείται διαφορά $\pm 40\%$ κατ' απόλυτη τιμή ανάμεσα στα αποτελέσματα της αυτοματοποιημένης μεθόδου που αναπτύχθηκε και του ύψους των επιφανειών, που μετρήθηκαν στο πεδίο (Πίνακας 1).



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής εργασιών για την εξαγωγή πληροφορίας ύψους δέντρων δασικών συστάδων με αυτοματοποιημένη μέθοδο.

Τα σφάλματα οφείλονται εν μέρει στην ακρίβεια του υψομετρικού μοντέλου επιφάνειας (DSM) που παράχθηκε με τα δεδομένα Cartosat-1 και εν μέρει στην ακρίβεια της προσεγγιστικής επιφάνειας του εδάφους που δημιουργήθηκε στη συνέχεια.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα της αυτοματοποιημένης μεθόδου για το ύψος των δέντρων και αξιολόγηση με χρήση μετρήσεων πεδίου σε επιφάνειες 400 m² (20 m × 20 m).

| Αριθμός Επιφάνειας | Εξαγόμενο ύψος (m) | Ύψος αναφοράς (m) | Διαφορά μεταξύ των δύο υψών (m) | % Διαφορά ύψους δέντρων |
|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1 | 10,6 | 15 | -4,4 | -30% |
| 2 | 7,7 | 5,5 | 2,2 | +40% |

5. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα αυτού του τεστ δείχνουν, ότι σε περιπτώσεις πιο ήπιου αναλύφου και με περισσότερα τμήματα ακάλυπτου εδάφους (π.χ. ξέφωτα, δρόμοι) στην περιοχή μελέτης, η παραπάνω μεθοδολογία έχει δυνατότητες να δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση ανομήλικων συστάδων (συστάδων με δέντρα διαφορετικής ηλικίας) απαιτούνται δεδομένα μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης, για να υπάρξει περισσότερη λεπτομέρεια στην υψομετρική πληροφορία του DSM (πιο πυκνά σημεία στο πλέγμα του DSM). Η εκτίμηση του ύψους σε ατομικό επίπεδο αυξάνει πολύ τις απαιτήσεις για υψηλότερη χωρική ανάλυση.

Για την εκτίμηση του ύψους των δασικών δέντρων σε μεγαλύτερη περιοχή μελέτης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι στερεοεικόνες για την παραγωγή DSM σε συνδυασμό με δεδομένα LIDAR, τα οποία διαπερνούν τη βλάστηση και δίνουν πληροφορία για το ανάγλυφο του εδάφους στη βάση των δέντρων (DTM).

Βιβλιογραφία

- Ackermann, N., Thiel, C., Borgeaud, M., Schmullius, C., 2010. *Potential of fusion of SAR and optical satellite imagery for biomass estimation in temperate forested area*. Proc. ESA living planet symposium, Bergen, Norway.
- Γκατζογιάννης, Σ., 2005. *Αειφορία και σύγχρονες τάσεις (αειφορικής) διαχείρισης των δασών*. Ημερίδα με θέμα "Πιστοποίηση της Αειφορικής Διαχείρισης των Παραγόμενων δασικών Προϊόντων", Αθήνα: WWF – Ελλάς.
- Definiens Professional Software Reference Guide, 2011, pp. 37-38.
- Eurisy, 2011. *Forest and biomass management using satellite information and services*. Eurisy.
- Gama, F.F., Santos, J.R., Mura, J.C., 2010. *Eucalyptus biomass and volume estimation using interferometric and polarimetric SAR data*. Remote Sensing, 2(4): 939–956.
- Holmström, H. and Fransson, J.E., 2003. *Combining remotely sensed optical and radar data in kNN-estimation of forest variables*. Forest Science, 49(3): 409–418.

- Mallinis, G., Koutsias, N., Tsakiri-Strati, M., Karteris, M., 2008. *Object-based classification using Quickbird imagery for delineating forest vegetation polygons in a Mediterranean test site*. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 63: 237–250.
- Μαλλίνης, Γ., 2006. *Αξιολόγηση δυνατότητας χρησιμοποίησης δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής ευκρίνειας και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στα πλαίσια σύνταξης του Δασολογίου*. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 35-37.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F., 2003. *Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass*. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(5): 564-577.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Scrivani, J.A., 2004. *Fusion of smallfootprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA*. Forest Science, 50(4): 551-565.
- Rao, C.V., Sathyanarayana, P., Jain, D.S., Manjunath, A.S., 2007. *Topographic Map Updation using Cartosat-1 Data*. Proc. RSPSoc Annual Conf., Newcastle upon Tyne, UK.
- St-Onge, B., Hu, Y., Vega, C., 2008. *Mapping the height and above-ground biomass of a mixed forest using lidar and stereo Ikonos images*. International Journal of Remote Sensing, 29(5): 1277-1294.
- Στουρνάρα, Π. και Πατιάς, Π., 2013. *Αξιολόγηση υψομετρικού μοντέλου επιφάνειας που παράχθηκε από στερεοεικόνες Cartosat-1 για την περιοχή του Χολομώντα Χαλκιδικής*. Στο Κ.Β. Κατσάμπαλος, Δ. Ρωσσικόπουλος, Σ. Σπαταλάς, Κ. Τοκμακίδης (Επιμ.), Περί μετρήσεων γαιών και κατασκευών, Τιμητικός τόμος αφιερωμένος στον Ομότιμο Καθηγητή Δημήτριο Γ. Βλάχο, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Θεσσαλονίκη, σελ. 165-176.
- van Aardt, J.A.N., Wynne, R.H., Oderwald, R.G., 2006. *Forest volume and biomass estimation using small-footprint lidar-distributional parameters on a per-segment basis*. Forest Science, 52(6): 636–649.