

PANTEION UNIVERSITY OF SOCIAL AND POLITICAL SCIENCES



ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
<<ΕΦΗΡΜΟΣΜΕΝΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ>>
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Υπολογισμός απορρόφησης CO₂ σε δενδροκαλλιέργειες με την χρήση 3δ ΓΣΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΣΥΝΟΛΑΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2018

Τριμελής επιτροπή

Άγγελος Μιμής, Επίκουρος Καθηγητής Παντείου Πανεπιστημίου (Επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Μπίθας, Καθηγητής Παντείου Πανεπιστημίου

Αντώνης Ροβολής, Αναπληρωτής Καθηγητής Παντείου Πανεπιστημίου



Copyright © Αθανάσιος Συνολάκης, 2018

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της διπλωματικής εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Πάντειον Πανεπιστήμιο Κοινωνικών και Πολιτικών Επιστημών δεν δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

στους γονείς μου

Συντομογραφίες

LiDAR:	Light Detection And Ranging
SfM:	Structure from Motion
MVS:	Multi – View Stereo
GNSS:	Global Navigation Satellite System
DEM:	Digital Elevation Model
TIN:	Triangulated Irregular Network
ALS:	Airborne Laser Scanning
GPS:	Global Positioning System
IMU:	Inertial Measurement Unit
TLS:	Terrestrial Laser Scanner
SIFT:	Scale Invariant Feature Transform
SURF:	Speeded Up Robust Features
DBH:	Diameter Breast Height
SAR:	Synthetic Aperture Radar

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή.....	10
Μεθοδολογία.....	11
Κεφάλαιο 1: Εκτίμηση της Βιομάζας.....	12
1.1 Το διοξείδιο του άνθρακα ως συστατικό της βιομάζας.....	12
1.2 Μέθοδοι υπολογισμού της βιομάζας.....	14
1.2.1 Μέθοδοι παραδοσιακής δενδρομετρίας.....	15
1.2.2 Μέθοδοι τηλεπισκόπησης.....	16
Κεφάλαιο 2: Κατασκευή Τρισδιάστατου Μοντέλου.....	24
2.1 Μέθοδοι δημιουργίας τρισδιάστατης αναπαράστασης.....	24
2.2 Τρισδιάστατη αναπαράσταση μέσω ενεργών σαρωτών – LiDAR.....	25
2.2.1 Τεχνικές εύρεσης απόστασης ενεργών σαρωτών.....	28
2.3 Τρισδιάστατη αναπαράσταση μέσω Δομής από Κίνηση – SfM.....	29
2.3.1 Απόκτηση Κατάλληλων Δεδομένων.....	30
2.3.2 Δημιουργία σύννεφου σημείων μέσω Δομής από Κίνηση (SfM) και Multi View Stereo (MVS).....	31
2.4 Δημιουργία επιφάνειας σε τρισδιάστατο σύννεφο σημείων.....	33
Κεφάλαιο 3: Εκτίμηση Παραμέτρων Δέντρου μέσω SFM – MVS.....	34
3.1 Συνολική προσέγγιση.....	34
3.2 Απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων.....	34
3.3 Σύγκριση τρισδιάστατων μοντέλων.....	35
3.4 Τρισδιάστατα μοντέλα για χρήση σε αλλομετρικές εξισώσεις.....	37
3.5 Εύρεση όγκου μέσω τρισδιάστατου μοντέλου.....	41
Συμπεράσματα.....	47
Βιβλιογραφία.....	49

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα1: Μέτρηση διαμέτρου σε ύψος 1.30m ανάλογα με το σχήμα το δέντρου.....	15
Εικόνα2: Όργανα υπολογισμού χαρακτηριστικών δέντρου.....	16
Εικόνα3: Υπολογισμός βιομάζας σε δασική περιοχή του Καναδά.....	19
Εικόνα4: Δημιουργία σύννεφου σημείων διαφορετικών δομών δέντρων μέσω SfM	21
Εικόνα5: Δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης δέντρων.....	22
Εικόνα6: Αποτύπωση ενός σύννεφου σημείων.....	24
Εικόνα7: Διαδικασία σάρωσης για συστήματα LiDAR	26
Εικόνα8: Μέθοδοι σάρωσης για συστήματα LiDAR	26
Εικόνα9: Επίγειες κινητές μονάδες σάρωσης.....	28
Εικόνα10: Τεχνικές εύρεσης απόστασης ενεργών σαρωτών	29
Εικόνα11: Δυσκολία αποτύπωσης επιφανειών με μικρή υφή.....	30
Εικόνα12: Αντιστοίχιση χαρακτηριστικών μεταξύ δύο εικόνων	31
Εικόνα13: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων δέντρου.....	35
Εικόνα14: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων κυδωνιάς.....	36
Εικόνα15: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων πεύκου	36
Εικόνα16: Μέτρηση διαστάσεων γνωστού αντικειμένου.....	37
Εικόνα17: Διαδικασία αλλαγής κλίμακας μέσω του προγράμματος MeshLab.....	39
Εικόνα18: Υπολογισμός χαρακτηριστικών του δέντρου μέσω του προγράμματος MeshLab.....	40
Εικόνα19: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων και επιφάνειας της ελιάς.....	41
Εικόνα20: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων, επιφάνειας και υπολογισμός όγκου του πεύκου	42
Εικόνα21: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων ξύλου.....	43
Εικόνα22: Διαδικασία αλλαγής κλίμακας του ξύλου μέσω MeshLab.....	44
Εικόνα23: Δημιουργία επιφάνειας και υπολογισμός όγκου ξύλου.....	45
Εικόνα24: Βύθιση ξύλου και μέτρηση διαφοράς νερού	46
Εικόνα25: Δυσκολία αποτύπωσης τμήματος επιφάνειας λόγω σκιών που δημιουργήθηκαν από το φως του ήλιου.....	48

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας1: Ταξινόμηση μεθόδων εύρεσης βιομάζας ανάλογα με τις τεχνικές απαιτήσεις και την περιοχή μελέτης	23
Πίνακας2: Σύγκριση αλγορίθμων SIFT, ORB και SURF	32
Πίνακας3: Δημιουργία ψευδοκλίμακας δέντρου.....	38
Πίνακας4: Αποτελέσματα ψευδοκλίμακας δέντρου.....	39
Πίνακας5: Δημιουργία ψευδοκλίμακας ξύλου.....	43
Πίνακας6: Δημιουργία ψευδοκλίμακας ξύλου	44
Πίνακας7: Αξιολόγηση μεθόδου δομής από κίνηση.....	48

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Διάγραμμα1: Μέθοδοι εύρεσης βιομάζας.....	14
---	----

Ευρετήριο χαρτών

Χάρτης1: Βιομάζα εθνικού πάρκου Mahan στην Ινδία.....	18
Χάρτης2: Βιομάζα περιοχής στο Εκουαδόρ.....	20

Περίληψη

Τα φυτά αποθηκεύουν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα το οποίο είναι ένα σημαντικό συστατικό για την ανάπτυξη τους. Μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, χρησιμοποιώντας το διοξείδιο του άνθρακα, τις θρεπτικές ουσίες και το νερό, τα φυτά παράγουν βιομάζα. Παρατηρούμε ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση της βιομάζας με το διοξείδιο του άνθρακα καθώς αποτελεί συστατικό του μέρους. Επομένως, ο υπολογισμός της βιομάζας στις δενδρώδεις καλλιέργειες μας δίνει ένα εργαλείο να αξιολογήσουμε την πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν ως μορφές αποθήκευσης άνθρακα και δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Η ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας δείχνει μια εξέλιξη των μεθόδων εύρεσης της βιομάζας. Η παρούσα εργασία προσπαθεί να δώσει μια γενική εικόνα των μεθόδων αυτών και πιο συγκεκριμένα προσπαθεί να αξιολογήσει την μέθοδο της δομής από κίνησης (structure from motion) ως μια νέα και πιο οικονομική λύση στην εκτίμηση της βιομάζας. Με την μέθοδο αυτή δημιουργούμε μια τρισδιάστατη αναπαράσταση ενός συνόλου δέντρων με στόχο τον υπολογισμό του όγκου τους και κατά συνέπεια της βιομάζας τους. Ταυτόχρονα η προσέγγιση αυτή, μας δίνει την δυνατότητα υπολογισμού χαρακτηριστικών του δέντρου απαραίτητων στον υπολογισμό της βιομάζας με την χρήση αλλομετρικών εξισώσεων όπως είναι το ύψος του δέντρου, η διάμετρος στο ύψος του στήθους του δέντρου κ.α.. Τέλος, εξετάζεται η ακρίβεια των τρισδιάστατων μοντέλων στην εύρεση του όγκου των δέντρων.

Abstract

Plants store carbon dioxide from the atmosphere, which is a vital ingredient for their growth. Through the process of photosynthesis, with the use of carbon dioxide, nutrients, and water, plants produce biomass. It is observed that there is a direct correlation of biomass with carbon dioxide since it is a component of biomass. Therefore, the calculation of biomass of trees provides us a tool to assess the likelihood of using them as forms of carbon storage and carbon capture. The review of the relevant literature shows an evolution of methods in estimating biomass. This study attempts to provide a general overview of these methods and more specifically attempts to assess the method of structure from motion as a new and more affordable solution in estimation of the biomass. With this method, I create a three-dimensional representation from a set of trees in order to calculate their volume and consequently their biomass. Moreover, this approach enables us to calculate characteristics of trees that are necessary for calculating the biomass with the use of allometric equations such as the height of the tree, the tree diameter at breast high, etc. Finally, I examine the accuracy of the three-dimensional models in finding the volume of trees.

Key words: [Carbon dioxide, Biomass, Structure from Motion]

Εισαγωγή

Τα δάση διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον κύκλο του άνθρακα. Τα δέντρα απορροφούν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και στην συνέχεια μέσω της φωτοσύνθεσης παράγουν βιομάζα. Επομένως, μέσω του υπολογισμού της βιομάζας μπορεί να εκτιμηθεί το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε την δομή από κίνηση σαν μια σχετικά νέα μέθοδο εκτίμησης της βιομάζας.

Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο θα εστιάσουμε στους κύριους τρόπους εύρεσης της βιομάζας και στην διαχρονική εξέλιξη των μεθόδων αυτών. Αρχικά, θα αναφερθούμε στην παραδοσιακή δενδρομετρία η οποία αποτελείται από δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη και αφορά την κοπή και την ζύγιση των δέντρων για την εύρεση της βιομάζας. Από την άλλη μεριά, η δεύτερη μέθοδος είναι μη καταστροφική και έχει να κάνει με επιτόπιες μετρήσεις με ειδικά όργανα και την χρήση αλλομετρικών εξισώσεων. Στην συνέχεια του κεφαλαίου, θα γίνει αναφορά στις μεθόδους τηλεπισκόπησης. Αναλυτικότερα, θα αναφερθούμε στις δορυφορικές εικόνες, στα συστήματα radar και LiDAR (Light Detection And Ranging) καθώς και στην δομή από κίνηση. Αν και οι μέθοδοι αυτές είναι αρκετά αξιόπιστες έχουν ένα πολύ μεγάλο κόστος με εξαίρεση την δομή από κίνηση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα δώσουμε έμφαση στις μεθόδους του LiDAR και της δομής από κίνησης σαν εργαλεία κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων. Αρχικά, θα αναφερθούμε στην λειτουργία των συστημάτων LiDAR, στους τύπους των σαρωτών, καθώς και στις μεθόδους εύρεσης της απόστασης. Έπειτα, θα εστιάσουμε στην δομή από κίνηση και θα αναφερθούμε στον τρόπο συλλογής κατάλληλων δεδομένων που είναι καίριας σημασίας για την κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου με λιγότερες ατέλειες. Στη συνέχεια, θα αναπτύξουμε τα βήματα της δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου μέσω της δομής από κίνησης, ενώ επιπλέον θα εξετάσουμε και τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη διαδικασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα αξιολογήσουμε την μέθοδο της δομής από κίνησης σε πρακτικό επίπεδο. Αρχικά, θα κατασκευάσουμε τρισδιάστατα μοντέλα δέντρων διαφορετικών χαρακτηριστικών ώστε να εντοπίσουμε τις δυσκολίες κατασκευής. Έπειτα, θα εξετάσουμε αν τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αλλομετρικές εξισώσεις. Επίσης, θα δούμε αν μέσω των μοντέλων αυτών μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος, ο οποίος έχει άμεση συσχέτιση με τον υπολογισμό της βιομάζας. Μέσω της διαδικασίας αυτής θα μπορέσουμε να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας της δομής από κίνηση, να εντοπίσουμε τις δυνατότητες, τα προβλήματα και τις ατέλειες της μεθόδου στην διαδικασία της υλοποίησης και να διαπιστώσουμε την αξιοπιστία της μεθόδου βάσει των αποτελεσμάτων της.

Μεθοδολογία

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η εκτίμηση της βιομάζας βασίζεται σε μια σειρά μεθόδων οι οποίες εξελίσσονται συνεχώς. Παρατηρείται από πολλούς ερευνητές (Kumar, 2017, Vashum & Jayakumar 2012, κ.α.), ότι η παραδοσιακή δένδρομετρία είναι ανεπαρκής στην εκτίμηση της βιομάζας όταν αφορά περιοχές μεγάλης έκτασης. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των τηλεσκοπικών μεθόδων οδήγησε στην δημιουργία νέων προσεγγίσεων με αρκετά καλή ακρίβεια στην εκτίμηση της βιομάζας. Παρ' όλα αυτά, το υψηλό κόστος των προσεγγίσεων αυτών τις κάνει απαγορευτικές για να χρησιμοποιηθούν σε εμπορικές εφαρμογές. Σαν λύση στο πρόβλημα αυτό προτάθηκε η μέθοδος της δομής από κίνηση (SfM) ως μια νέα εναλλακτική προσέγγιση για την εκτίμηση της βιομάζας. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά χαμηλό κόστος εφαρμογής και πολύ χαμηλές τεχνικές απαιτήσεις σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να εξετάσει την μέθοδο αυτή και να απαντήσει σε ερωτήματα που έχουν να κάνουν με:

1. Κατά πόσο η μέθοδος της δομής από κίνηση παράγει ποιοτικά αποτελέσματα;
2. Ποιες είναι οι τεχνικές απαιτήσεις της μεθόδου αυτής;
3. Τι όγκο δεδομένων χρειάζεται για την δημιουργία αξιόπιστων αποτελεσμάτων;
4. Ποιες δυσκολίες αντιμετωπίζει στην δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου;

Για την απάντηση των παραπάνω ερωτημάτων, στο πρώτο κομμάτι της εργασίας γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων εύρεσης της βιομάζας. Ειδικότερα, εστιάζεται στην μέθοδο της δομής από κίνηση και στην διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας γίνεται τρισδιάστατη αναπαράσταση της δομής ορισμένων δέντρων και η εκτίμηση του όγκου μέσω της αναπαράστασης αυτής. Για την υλοποίηση του παραπάνω γίνεται επιτόπια συλλογή πρωτογενών δεδομένων μέσω εναέριας πλατφόρμας τύπου drone και χειροκίνητης κάμερας. Επίσης, χρησιμοποιείται καταστροφική μέθοδος για την ακριβή εκτίμηση του όγκου ενός τμήματος ενός δέντρου και την σύγκρισή του με το αντίστοιχο τρισδιάστατο μοντέλο. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε σε υπολογιστή με την χρήση ελεύθερων προγραμμάτων, ενώ για τον υπολογισμό του όγκου μέσω καταστροφικής δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της βύθισης και η αρχή του Αρχιμήδη.

Κεφάλαιο 1

Εκτίμηση της Βιομάζας

1.1 Το διοξείδιο του άνθρακα ως συστατικό της βιομάζας

Το δασικό οικοσύστημα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα. Τα δέντρα απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) από την ατμόσφαιρα το οποίο είναι ένα κύριο συστατικό για την ανάπτυξη τους. Επομένως, τα δέντρα μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης λειτουργούν σαν αποθήκες που συσσωρεύουν διοξείδιο του άνθρακα (Rane κ.α., 2017). Όπως αναφέρει ο Mackey (2014), φωτοσύνθεση είναι η βιοχημική διαδικασία που χρησιμοποιείται από τα φυτά για την παραγωγή βιομάζας από το διοξείδιο του άνθρακα, όπου απορροφάται από την ατμόσφαιρα μέσω των φύλλων, και των θρεπτικών συστατικών και του νερού που προέρχονται από τις ρίζες. Με τον όρο βιομάζα εννοούμε την ανανεώσιμη οργανική ύλη που παράγεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης (Kurchania, 2012). Σημαντικό, όπως εξηγούν οι Carvajal κ.α., είναι ότι το συνολικό διοξείδιο του άνθρακα που αποθηκεύεται από τα φυτά είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ του ατμοσφαιρικού CO_2 που απορροφάται κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και του CO_2 που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά την διαδικασία της αναπνοής του φυτού. Η διαφορά αυτή μετατρέπεται σε βιομάζα και τείνει να κυμαίνεται μεταξύ 45% και 50% του ξερού βάρους του φυτού.

Η ποσότητα άνθρακα που αποθηκεύει ένα δασικό οικοσύστημα δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε δέντρου και τις παρούσες κλιματολογικές συνθήκες. Όπως επισημαίνουν οι McPherson & Simpson (1999), ένα νέο δέντρο απορροφά με γρηγορότερο ρυθμό διοξείδιο του άνθρακα, ενώ ο ρυθμός αυτός μειώνεται μετά από μερικές δεκαετίες. Ενδεικτικά, μια μελέτη που έγινε σε εκτάσεις πεύκων στις νοτιοανατολικές ΗΠΑ, έδειξε ότι ο ρυθμός αποθήκευσης άνθρακα για τα πεύκα άρχισε να μειώνεται μετά από είκοσι έτη και έφτασε κοντά στο μηδέν στα εκατό χρόνια (Rathore, 2013). Επίσης, οι McPherson & Simpson (1999), αναφέρουν ότι κατά την διάρκεια ζεστού και ξηρού καιρού τα δέντρα ενδέχεται να χάσουν την κανονική τους ικανότητα να απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα. Ο Rathore (2013) από την μεριά του συμπεριλαμβάνει την ηλικία, το ύψος, το μέγεθος της περιφέρειας του δέντρου καθώς και την πυκνότητα του ξύλου ως ορισμένα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ποσότητα δέσμευσης του άνθρακα. Εκτός από τα χαρακτηριστικά του δέντρου κάνει αναφορά και σε κλιματολογικούς και τοπογραφικούς παράγοντες.

Όπως παρατηρούμε, η ποσότητα δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα έχει άμεση σχέση με ορισμένα χαρακτηριστικά του δέντρου και έχει άμεση συσχέτιση με την βιομάζα, αφού αποτελεί ένα κύριο συστατικό για την δημιουργία της. Επομένως, η ποσότητα του άνθρακα που αποθηκεύεται στα δέντρα ενός δάσους μπορεί να υπολογιστεί με τον προσδιορισμό της ποσότητας της βιομάζας του δάσους και με την εφαρμογή συντελεστή μετατροπής (Rathore, 2013). Οι μετρήσεις αυτές είναι σημαντικές για πληθώρα εφαρμογών σε τομείς όπως η εμπορική και αστική δασοκομία, η οικολογία κ.α. Η δενδρομετρία (επιστήμη που μελετά την δομή των δέντρων) μέσω της εκτίμησης ορισμένων χαρακτηριστικών των δέντρων υπολογίζει το διοξείδιο του άνθρακα που είναι ένα βασικό στοιχείο της βιομάζας (Miller, 2015). Ενδεικτικά, ο Luong (2012), υπολόγισε τη βιομάζα και στην συνέχεια με την χρήση συντελεστών προσδιόρισε την ποσότητα του άνθρακα και του διοξειδίου του άνθρακα για το εθνικό πάρκο Yok Don του Βιετνάμ. Η συλλογή των δεδομένων έγινε με την χρήση εικόνων από τον δορυφόρο SPOT, με ανάλυση 15m x 15m. Για τον υπολογισμό των παραπάνω χρησιμοποίησε αλλομετρικές¹ εξισώσεις που βασίστηκαν στην διάμετρο στο ύψος του στήθους και στο ύψος των δέντρων. Οι αλλομετρικές εξισώσεις ήταν οι ακόλουθες:

Αλλομετρικές εξισώσεις για εύρεση βιομάζας	
1) $AGB = 0,0396 \times D^2 \times H^{0.932}$	Όπου, AGB η βιομάζα πάνω από το έδαφος, BGB η βιομάζα κάτω από το έδαφος, TAB η συνολική βιομάζα, D διάμετρος στο ύψος του στήθους, H το ύψος του δέντρου
2) $BGB = 20\% \times AGB$	
3) $TAB = AGB + BGB$	
Αλλομετρική εξίσωση για εύρεση άνθρακα	
4) $CBS = 0.5 \times TAB$	Όπου, CBS ο συνολικός άνθρακας.
Αλλομετρική εξίσωση για εύρεση διοξειδίου του άνθρακα	
5) $CO_2 = 3.67 \times CBS$	

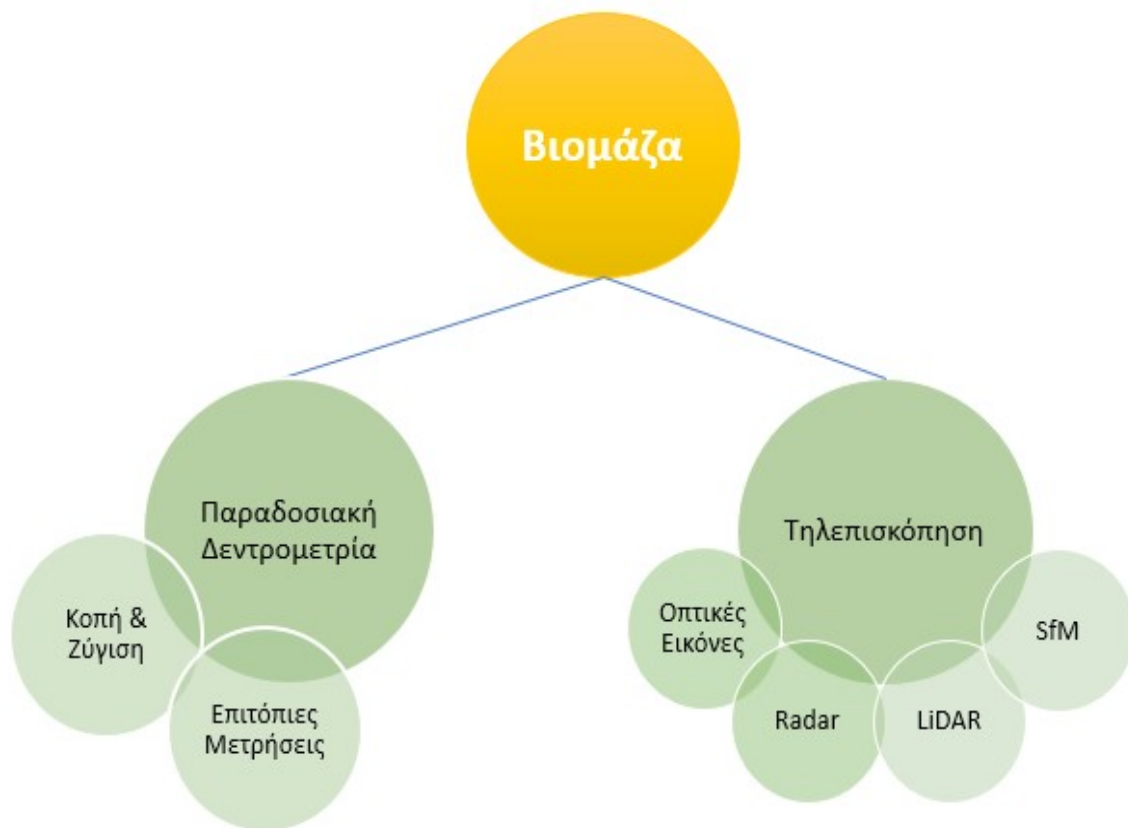
Πηγή: Luong, (2012)

1 Με τον όρο αλλομετρία εννοούμε την <<σύνδεση του μεγέθους μιας δομής ενός οργανισμού με το μέγεθος ή την ποσότητα μίας άλλης δομής του συγκεκριμένου οργανισμού>> (Bombelli, κ.α., 2009). Πιο απλά, όπως αναφέρει η Ρούσσου, (2009) <<αλλομετρία είναι η διαδικασία εύρεσης συναρτήσεων δύναμης μεταξύ βιολογικών χαρακτηριστικών. Η αλλομετρία μελετάει το πως μεταβάλλεται ένα χαρακτηριστικό σε σχέση με κάποιο άλλο ή με το σύνολο>>. Παραδείγματος χάριν, ο υπολογισμός της βιομάζας μέσω αλλομετρικών εξισώσεων γίνεται με συνάρτηση ορισμένων χαρακτηριστικών του δέντρου, όπως το ύψος, η διάμετρος του κορμού στο ύψος του στήθους, η ηλικία του δέντρου κ.α.

1.2 Μέθοδοι υπολογισμού της βιομάζας

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που χρειάζεται η ακριβής μέτρηση της βιομάζας. Όπως αναφέραμε παραπάνω, οι λόγοι αυτοί έχουν να κάνουν είτε με εμπορικούς, είτε με οικολογικούς σκοπούς. Βάσει αυτού του πλαισίου υπάρχει μεγάλος αριθμός μελετών με πληθώρα προσεγγίσεων για την εκτίμηση της βιομάζας ολόκληρων δασών ή μεμονωμένων δέντρων. Ο υπολογισμός της βιομάζας είναι ένα σύνθετο φαινόμενο καθώς για κάθε κλίμακα εφαρμογής υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις. Σημαντικό είναι ότι κάθε μέθοδος έχει διαφορετικές απαιτήσεις που έχουν να κάνουν με την ακρίβεια των μετρήσεων, τον τεχνικό εξοπλισμό κάθε μεθόδου και το κόστος υλοποίησης (Dittmann, 2017). Ένας εύκολος διαχωρισμός αφορά τις μεθόδους που έχουν να κάνουν με την παραδοσιακή δενδρομετρία και με τις μεθόδους τηλεπισκόπησης.

Διάγραμμα 1: Μέθοδοι εύρεσης βιομάζας

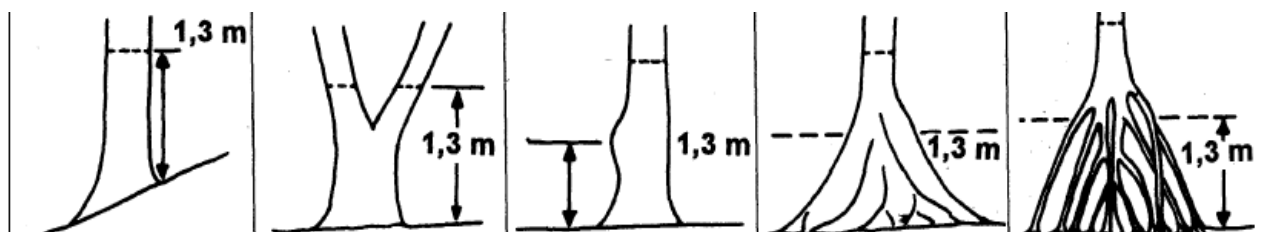


Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

1.2.1 Μέθοδοι παραδοσιακής δενδρομετρίας

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι περιλαμβάνουν επιτόπιες μετρήσεις για την εύρεση της βιομάζας. Η πιο ακριβής μέθοδος είναι η κοπή και η ζύγιση των δέντρων. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την συγκομιδή των δέντρων από μια περιοχή και την μέτρηση του φρέσκου και αποξηραμένου βάρους όλων των τμημάτων του δέντρου (κορμός, φύλλα, κλαδιά, ρίζες). Η συγκεκριμένη διαδικασία περιορίζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή μελέτης ή για ένα μικρό δείγμα δέντρων. Αν και ο υπολογισμός της βιομάζας καθορίζεται με μεγάλη ακρίβεια, είναι αρκετά χρονοβόρα με υψηλό κόστος και είναι απαγορευτική για μελέτες μεγάλης κλίμακας. Συνήθως, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη αλλομετρικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της βιομάζας σε περιοχές μεγάλης έκτασης (Vashum, κ.α., 2012).

Η δεύτερη μέθοδος εκτίμησης της βιομάζας είναι μια μη - καταστρεπτική μέθοδος και περιλαμβάνει επιτόπιες δειγματοληπτικές μετρήσεις ορισμένων χαρακτηριστικών των δέντρων, όπως το ύψος, η διάμετρος στο ύψος του στήθους (η διάμετρος μετριέται σε παγκόσμιο επίπεδο σε ύψος 1,30 μέτρα, εκτός από την Νέα Ζηλανδία που το ύψος ανέρχεται στο 1,40 μέτρα) κ.α. Οι μετρήσεις γίνονται με ειδικά όργανα (κλινόμετρα, μετροταινίες, ειδικές δαγκάνες κ.α), ενώ στην συνέχεια, με αλλομετρικές εξισώσεις προσδιορίζεται η βιομάζα (Bombelli, 2009). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά πιο απλή και πιο οικονομική από την προηγούμενη μέθοδο αλλά σαν αποτέλεσμα δημιουργεί μεγαλύτερο σφάλμα. Αυτό προκύπτει από τις μετρήσεις πεδίου που είναι αρκετά δύσκολες και εμπεριέχουν ένα σημαντικό βαθμό σφάλματος. Παραδείγματος χάριν, ο υπολογισμός του ύψους των δέντρων είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθεί ειδικά όταν η βλάστηση του δέντρου είναι πολύ πυκνή και δεν ξεχωρίζει η κορυφή. Επίσης, σημαντικό για την μείωση του σφάλματος είναι ο παρατηρητής να γνωρίζει τη γεωμορφολογία του εδάφους (Miller, 2015).

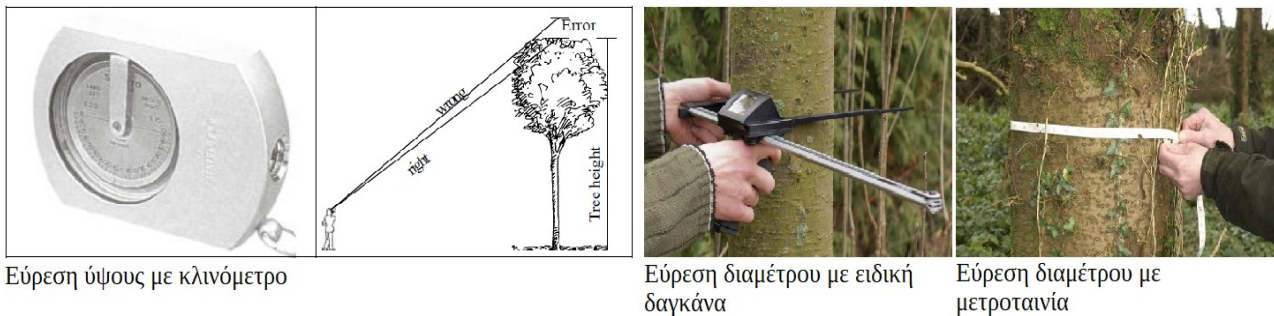


Εικόνα 1: Μέτρηση διαμέτρου σε ύψος 1.30 m ανάλογα με το σχήμα του δέντρου

Πηγή εικόνας: Hairiah, (2001)

Ενδεικτικά, οι Basuki, κ.α. (2009), χρησιμοποίησαν επεμβατική μέθοδο και επιτόπιες μετρήσεις σε εκατόν είκοσι δύο δέντρα για την δημιουργία νέων ακριβέστερων αλλομετρικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της βιομάζας. Οι αλλομετρικές εξισώσεις δημιουργήθηκαν από δεδομένα που συλλέχθηκαν μετά από καταστροφική δειγματοληψία για τέσσερα είδη δέντρων σε

τροπικά δάση στην Ινδονησία. Μια παρόμοια μελέτη για την περιοχή της Ινδονησίας έγινε από τους Manuri, κ.α. (2016), οι οποίοι χρησιμοποίησαν εκατόν οκτώ δέντρα από καταστροφική δειγματοληψία για την κατασκευή αλλομετρικών εξισώσεων. Παράλληλα, πήραν επιπλέον εκατόν εννέα δείγματα από προηγούμενες μελέτες για την επικύρωση της ακρίβειας των εξισώσεων τους. Διαπίστωσαν ότι οι νέες εξισώσεις ήταν πιο αξιόπιστες σε σύγκριση με τις υπάρχουσες εξισώσεις οι οποίες είχαν ελαφρώς μεγαλύτερο σφάλμα. Οι Mate, κ.α. (2014), χρησιμοποίησαν καταστροφική μέθοδο και επιτόπιες μετρήσεις ύψους και διαμέτρου για την εκτίμηση της βιομάζας για τρία είδη τροπικών δέντρων στην Μοζαμβίκη.



Εικόνα 2: Όργανα υπολογισμού χαρακτηριστικών δέντρου

Πηγή εικόνων: Hairiah, (2001)

1.2.2 Μέθοδοι τηλεπισκόπησης

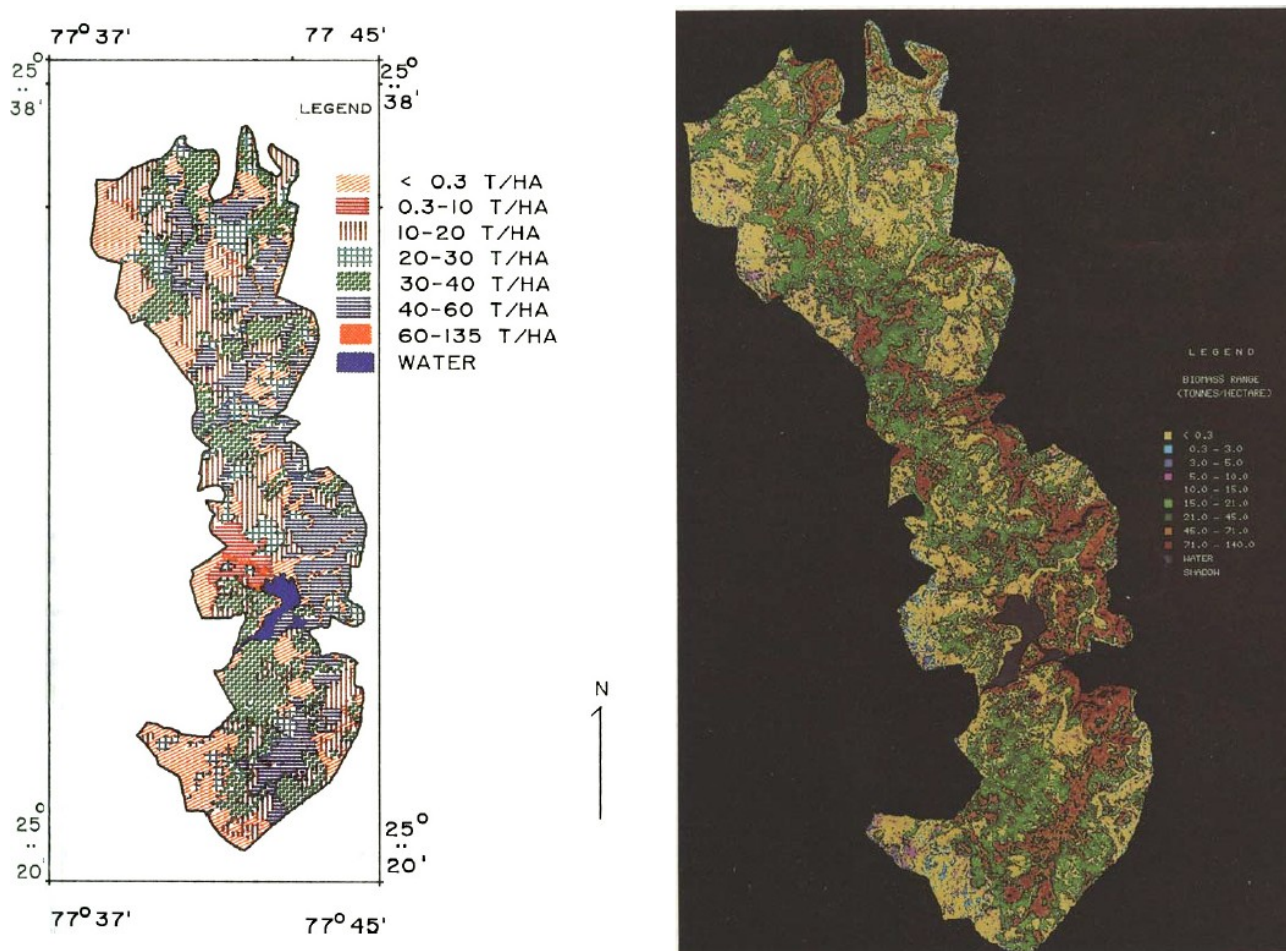
Όπως αναφέρει ο Kumar (2017), η ανεπάρκεια των παραδοσιακών μεθόδων δενδρομετρίας για προσεγγίσεις περιοχών μεγάλης έκτασης ενθάρρυναν την ανάπτυξη μεθόδων τηλεπισκόπησης. Με τον όρο τηλεπισκόπηση «εννοούμε την διαδικασία λήψης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή φαινόμενο, με την χρήση ανιχνευτικών συσκευών που δεν βρίσκονται σε επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης. Οι φωτογραφίες από αέρος, οι δορυφορικές εικόνες και οι εικόνες από ραντάρ είναι διάφορες μορφές καταγραφής δεδομένων από απόσταση» (Κάρταλης & Φείδας, 2006). Οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της δασικής βιομάζας έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη προσοχή τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Η τηλεπισκόπηση παρέχει την δυνατότητα παροχής πληροφοριών σε ένα ευρύ φάσμα χωρικών και χρονικών κλιμάκων, καθώς και την συνεχή επανεξέταση μιας περιοχής (Galidaki, 2016). Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι δεδομένων ανάλογα με την πλατφόρμα συλλογής. Αν και πολλοί συγγραφείς εστιάζουν σε τρεις μεθόδους τηλεπισκόπησης (οπτικές εικόνες, radar, lidar), τελευταίες μελέτες κάνουν αναφορά στην δομή από κίνηση (SfM) σαν μια νέα και εξελισσόμενη μέθοδο δενδρομετρίας.

Η οπτική τηλεπισκόπηση είναι μια εναλλακτική λύση εκτίμησης της βιομάζας. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η εφαρμογή της σε περιοχές μεγάλης έκτασης. Τα

πολυφασματικά δεδομένα² συλλέγονται από οπτικούς αισθητήρες δορυφόρων όπως των Landsat, SPOT, ASTER, CBERS, QuickBird, MODIS, ενώ η χωρική ανάλυση τους κυμαίνεται λιγότερο από ένα μέτρο ως εκατοντάδες μέτρα. Σημαντικό μειονέκτημα των οπτικών εικόνων είναι ότι η ποιότητα τους εξαρτάται από της καιρικές συνθήκες. (Lu, κ.α., 2016, Kumar, 2017). Παρ' όλα αυτά τα δεδομένα της οπτικής τηλεπισκόπησης έχουν χρησιμοποιηθεί από αρκετούς ερευνητές για την εύρεση της βιομάζας. Ενδεικτικά, οι Roy, κ.α (1996), χρησιμοποίησαν δεδομένα δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την χαρτογράφηση της βιομάζας στο εθνικό πάρκο Madhav, στην Ινδία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν του Landast TM με τα οποία έγινε η συσχέτιση των χαρακτηριστικών της εικόνας με τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για την εκτίμηση της βιομάζας του πάρκου το φυσικό οικοσύστημα χωρίστηκε σε τρία μέρη, τα δέντρα, τους θάμνους και τα χόρτα. Χρησιμοποιήθηκαν αλλομετρικές εξισώσεις για την εύρεση της βιομάζας, ενώ για είδη που δεν υπήρχαν στην βιβλιογραφία, ανέπτυξαν εξισώσεις με την μέθοδο της συγκομιδής. Έπειτα, δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος χάρτης της βιομάζας για την περιοχή μελέτης. Άλλες μελέτες που χρησιμοποίησαν οπτικά δεδομένα για την εύρεση της βιομάζας είναι των Muukkonen & Heiskanen, (2015), των Singh, κ.α., (2014), των Rahman & Koch, (2008), κ.α.

2 Μια πολυφασματική δορυφορική εικόνα καταγράφει την ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια περιοχή της γης σε διάφορα μήκη κύματος. Η περιοχή αποτυπώνεται σε τόσες εικόνες όσες είναι και οι αντίστοιχες φασματικές περιοχές (κανάλια) της ακτινοβολίας την οποία καταγράφει ο αισθητήρας. Η καταγραφή σε πολλά φασματικά κανάλια έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς διαφορετικά υλικά εκπέμπουν με διαφορετική ένταση στα διάφορα μήκη κύματος. Η εικόνα μπορεί να παρουσιαστεί είτε ξεχωριστά σε κάθε κανάλι, είτε συνδυαστικά με τρία κανάλια δημιουργώντας μια χρωματική σύνθεση. Τα φασματικά κανάλια είναι τα εξής: κανάλι 1 (μπλε), κανάλι 2 (πράσινο), κανάλι 3 (κόκκινο), κανάλι 4 (εγγύς υπέρυθρο), κανάλι 5 και 7 (μέσο υπέρυθρο), κανάλι 6 (θερμικό υπέρυθρο). (Καρτάλης & Φείδας, 2006)

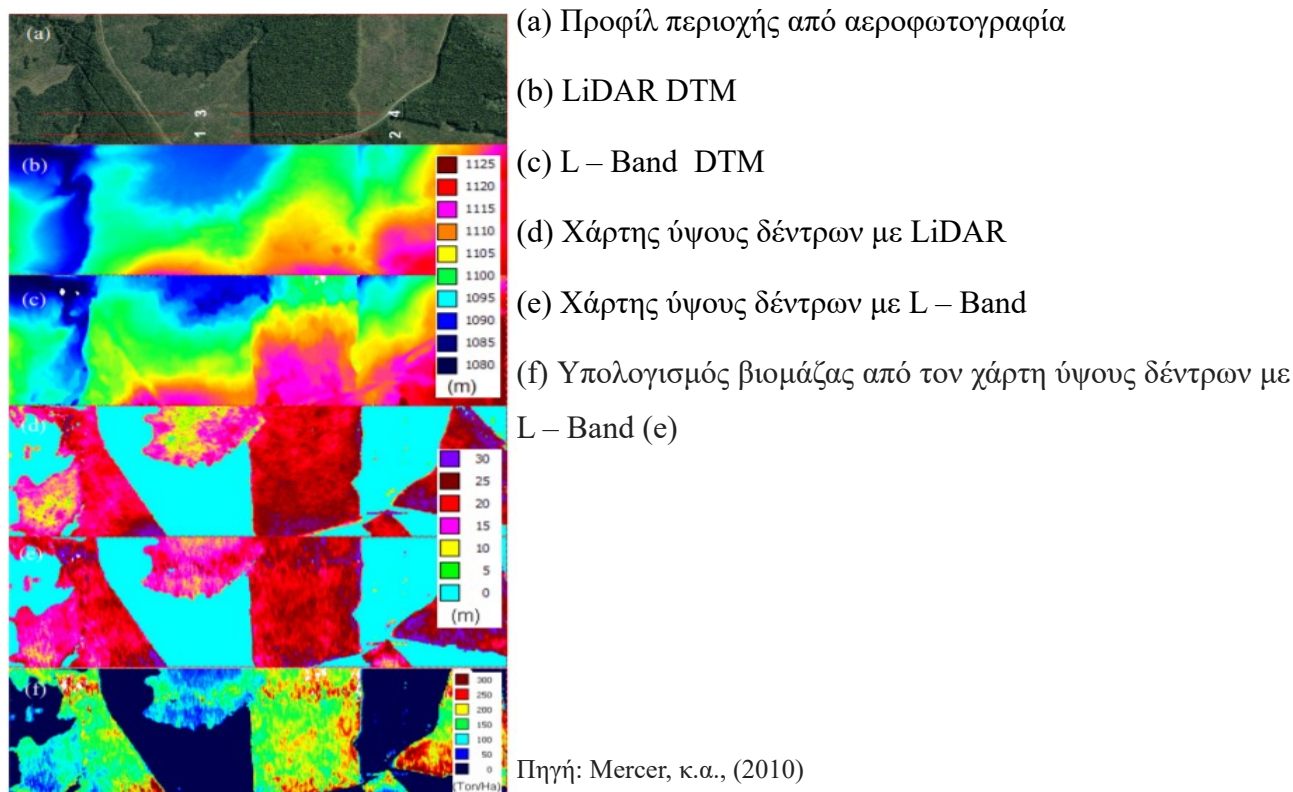
Χάρτης 1: Βιομάζα εθνικού πάρκου Madhav στην Ινδία



Πηγή: Roy, κ.α (1996)

Τα συστήματα SAR (Synthetic Aperture Radar) είναι μια μέθοδος τηλεανίχνευσης από απόσταση χρησιμοποιώντας μικροκυματική ακτινοβολία. Ένα ραντάρ τοποθετείται είτε σε ένα αεροπλάνο, είτε σε έναν δορυφόρο. Ένα σύστημα ραντάρ εκπέμπει παλμούς μικροκυματικής ακτινοβολίας και καταγράφει τις επιστροφές του από την επιφάνεια. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι η υψηλή χωρική ανάλυση, η λειτουργία του σε άσχημες καιρικές συνθήκες και σε νεφοκάλυψη, η δυνατότητα απόκτησης δεδομένων μέρα και νύχτα κ.α. (Μέρτικας, 2009., Sinha, κ.α., 2015). Παράλληλα, τα υψηλά μήκη κύματος ενός SAR παρέχουν μεγαλύτερη διείσδυση ανάμεσα στην βλάστηση παρέχοντας καλύτερη εκτίμηση της βιομάζας. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για περιοχές με μεγάλη έκταση, ενώ επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση της βιομάζας όταν εφαρμόζεται σε αραιά ή αναπτυσσόμενα δάση. Παρ' όλα αυτά τα δεδομένα SAR έχουν ένα κόστος που κυμαίνεται από δεκάδες μέχρι και χιλιάδες ευρώ το οποίο είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για την χρήση των συστημάτων αυτών για εμπορικούς σκοπούς (Dittmann, κ.α., 2017., Sinha, κ.α., 2015). Ενδεικτικά, οι Mercer, κ.α., (2010), υπολόγισαν την βιομάζα σε δασική περιοχή στην πόλη Έντσον του Καναδά. Χρησιμοποίησαν δεδομένα radar

και LiDAR για να συγκρίνουν τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου. Άλλες μελέτες υπολογισμού της βιομάζας με συστήματα radar είναι των Santos, κ.α., (2014), των Milne, κ.α., (2000), των Saatchi, κ.α., (2011), κ.α.

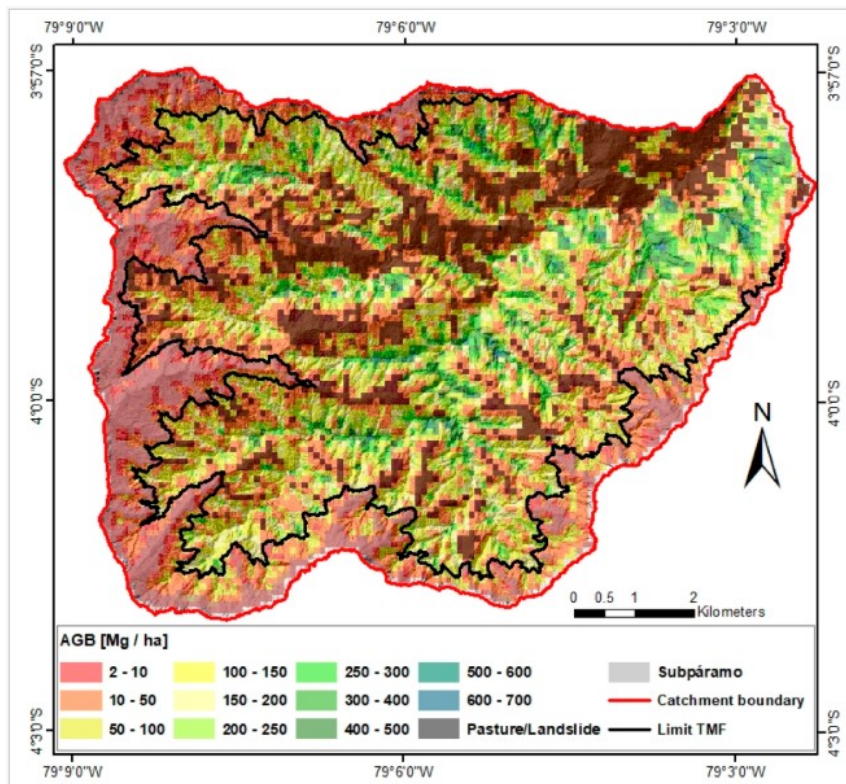


Εικόνα 3: Υπολογισμός βιομάζας σε δασική περιοχή του Καναδά

Τα συστήματα LiDAR είναι μια μέθοδος τηλεανίχνευσης που μετράει την απόσταση. Η μέθοδος LiDAR εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην δασοκομία την δεκαετία του '70, ενώ η ευρεία καθιέρωση της μεθόδου στην μοντελοποίηση των δασών έγινε την δεκαετία του '90. Αρχικά, η χρήση του LiDAR εμφανίστηκε στα βόρεια δάση λόγω της εύκολης δομής τους, ενώ υπήρχαν αρκετά προβλήματα στην χρήση LiDAR σε τροπικά δάση λόγω της πυκνότητας τους. Τα προβλήματα αυτά ξεπεράστηκαν με την εξέλιξη των συστημάτων (Melin, κ.α., 2017). Έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος LiDAR παρέχει ακριβείς μετρήσεις για ορισμένα δομικά χαρακτηριστικά των δέντρων. Οι παλμοί ενός LiDAR είναι σε θέση να διεισδύσουν σε πυκνά δάση και να συλλέξουν λεπτομερείς πληροφορίες τόσο για την οριζόντια όσο και για την κάθετη δομή των δέντρων. Οι εναέριες πλατφόρμες χρησιμοποιούνται συνήθως για περιοχές μεσαίας έκτασης, ενώ οι επίγειες πλατφόρμες για συλλογή στοιχείων για περιοχές μικρής έκτασης (Miller, 2015). Ενδεικτικά, οι Jaramillo, κ.α., (2018), υπολόγισαν την βιομάζα σε τροπική περιοχή νότια του Εκουαδόρ χρησιμοποιώντας δεδομένα από εναέριο LiDAR. Για την εύρεση της βιομάζας

χρειάστηκε ο υπολογισμός του ύψους, της διαμέτρου των δέντρων και η πυκνότητα του ξύλου. Άλλες μελέτες που αφορούν την εύρεση βιομάζας μέσω μεθόδων LiDAR είναι των Stovall, κ.α., (2018), των Calders, κ.α., (2015), των Olofsson & Holmgren, (2017), των Tanago, κ.α., (2017), κ.α.

Χάρτης 2: Βιομάζα περιοχής στο Εκουαδόρ

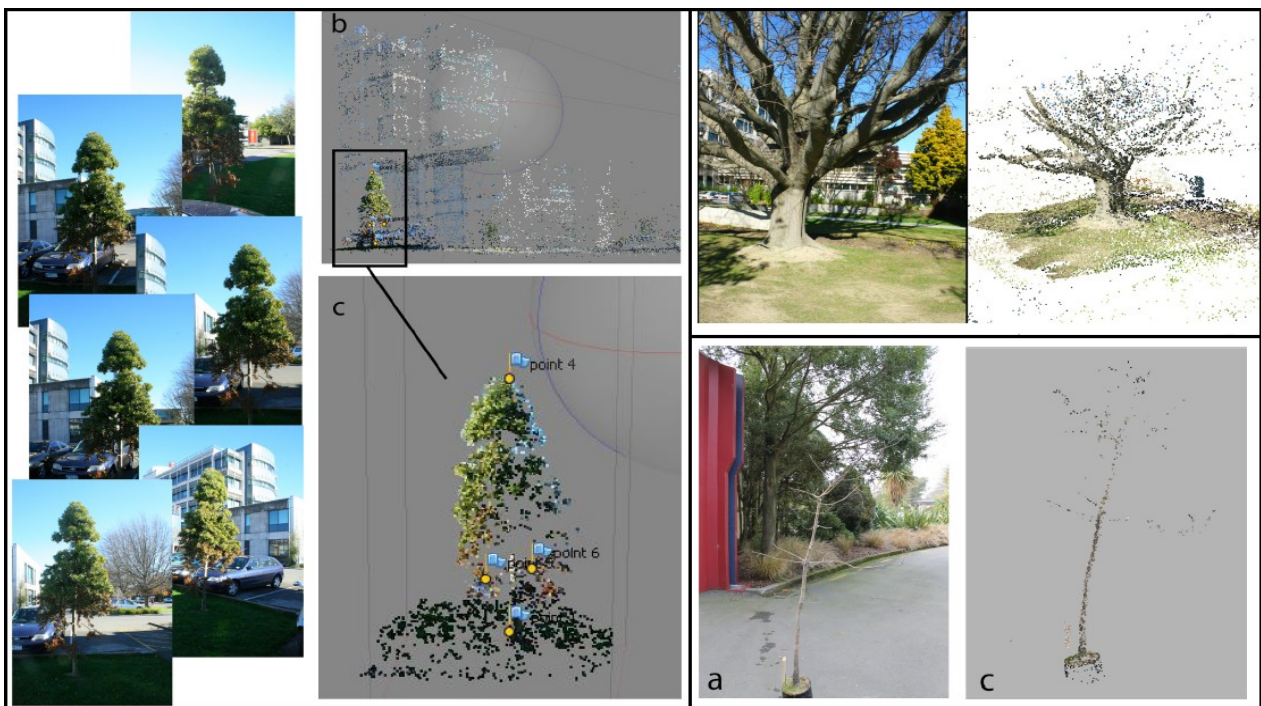


Πηγή: Jaramillo, κ.α., (2018)

Οι προηγούμενες μέθοδοι είναι αρκετά αξιόπιστες και χρησιμοποιούνται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα ειδικά σε περιοχές με μεγάλη έκταση. Για περιοχές μεσαίας και μικρής έκτασης χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος LiDAR. Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οικονομικά αποδοτικότερο εργαλείο από την παραδοσιακή δενδρομετρία, το κόστος παραμένει αρκετά υψηλό. Όπως αναφέρει ο Miller (2015), το κόστος ενός εναέριου LiDAR είναι περίπου στα 20.000 δολάρια, ανά πτήση. Αντίστοιχα, ακριβό κόστος έχουν και τα επίγεια συστήματα LiDAR. Το κόστος αυτό μπορεί να ξεκινήσει από τα 8.000 δολάρια για ένα απλό σύστημα και να φτάσει τα 500.000 δολάρια για ένα σύστημα υψηλής ανάλυσης.

Μια εναλλακτική και σχετικά καινούργια μέθοδος μειωμένου κόστους και χαμηλού όγκου εξοπλισμού είναι η δομή από κίνηση. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην απεικόνιση ενός περιβάλλοντος μέσω της δημιουργίας ενός σύννεφου σημείων, χρησιμοποιώντας εικόνες δύο διαστάσεων. Οι εικόνες αυτές μπορούν να τραβηχτούν με φωτογραφική μηχανή χειρός, ή με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV –Unmanned Aerial Vehicles) (Micheletti, κ.α., 2015).

Ενδεικτικά, οι Morgenroth & Gomez (2013), χρησιμοποίησαν την μέθοδο της δομής από κίνηση για να υπολογίσουν το ύψος και την διάμετρο των δέντρων και να εκτιμήσουν τον όγκο. Η μελέτη έγινε σε απλές και σύνθετες δομές δέντρων ώστε να πιστοποιηθεί η ακρίβεια της μεθόδου. Οι εκτιμώμενες μετρήσεις συγκρίθηκαν με ακριβείς επιτόπιες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν σφάλμα για την εκτίμηση του ύψους που κυμαίνεται στο 2,6%, ενώ για την εκτίμηση της διαμέτρου το σφάλμα έφτασε το 3,7%. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι η δομή από κίνηση είναι μια ποιοτική μέθοδος αναπαράστασης αν και υπήρχαν ορισμένα προβλήματα στην αναπαράσταση πολύ λεπτών και πολύπλοκων δομών.



Εικόνα 4: Δημιουργία σύννεφου σημείων διαφορετικών δομών δέντρων μέσω SfM

Πηγή: Morgenroth. & Gomez, (2013)

Μια άλλη αρκετά ενδιαφέρουσα έρευνα είναι αυτή του Miller, (2015), ο οποίος εκτίμησε ορισμένα χαρακτηριστικά των δέντρων μέσω της δημιουργίας σύννεφων σημείων. Για την υλοποίηση της έρευνάς του χρησιμοποίησε δύο ομάδες δέντρων. Αρχικά, πήρε τριάντα δέντρα με απλή δομή τα οποία ήταν τοποθετημένα σε πλαστικά δοχεία. Έπειτα έγινε η τρισδιάστατη απεικόνιση, υπολογίστηκαν ορισμένα χαρακτηριστικά των δέντρων και εκτιμήθηκε ο όγκος. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων προχώρησε σε επιτόπιες μετρήσεις και σε καταστροφική δειγματοληψία για την εύρεση του όγκου. Στην συνέχεια της έρευνας του, ο Miller δημιούργησε την τρισδιάστατη απεικόνιση για τριάντα πέντε δέντρα διαφορετική δομής. Οι εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών των δέντρων συγκρίθηκαν πάλι με επιτόπιες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εκτίμηση του όγκου εξαρτάται από την ικανότητα του εκάστοτε προγράμματος να

μοντελοποιεί με ακρίβεια το δέντρο. Οι πολύπλοκες δομές, τα λεπτά και πολλά κλαδιά και η πυκνότητα των φύλλων δυσκολεύουν αρκετά την τρισδιάστατη αποτύπωση των δέντρων. Άλλες μελέτες δενδομετρίας που χρησιμοποίησαν την μέθοδο της δομής από κίνηση είναι των Lingner, κ.α., (2018), των Zarco -Tejada., κ.α., (2014), των Fritz, κ.α., (2013) κ.α.



Εικόνα 5: Δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης δέντρων

Πηγή: Miller, (2015)

Συμπερασματικά, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης έχουν καταστεί πλέον ένα σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση της βιομάζας. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνικές τηλεπισκόπησης δεν μετρούν άμεσα την βιομάζα, αλλά υπολογίζουν ορισμένες παραμέτρους των δέντρων που σχετίζονται με την βιομάζα. Οι μετρήσεις πεδίου χρησιμοποιούνται συνήθως για την δημιουργία μοντέλων και αλλομετρικών εξισώσεων, ενώ στην συνέχεια, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης βασίζονται σε αυτά τα μοντέλα και στις εξισώσεις για την εκτίμηση της βιομάζας σε περιοχές μεγαλύτερης έκτασης.

Ειδικότερα, οι τεχνικές με LiDAR και της δομής από κίνηση είναι πιο αποτελεσματικές σε εφαρμογές περιοχών μικρής έκτασης. Η μέθοδος της δομής από κίνηση είναι πολλά υποσχόμενη λόγω του χαμηλού κόστους και των χαμηλών τεχνικών απαιτήσεων. Από την άλλη μεριά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν οπτικές εικόνες και radar, έχουν αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστες για εφαρμογές σε περιοχές μεγάλης έκτασης (Vashum & Jayakumar. S., 2012 και Dittmann, κ.α., 2017).

Πίνακας 1: Ταξινόμηση μεθόδων εύρεσης βιομάζας ανάλογα με τις τεχνικές απαιτήσεις και την περιοχή μελέτης

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
Αλλομετρικές εξισώσεις	Πολύ λίγες	Χωρική κλίμακα <1 ha
Οπτικές Εικόνες	Χαμηλές	Χωρική κλίμακα >10 ha
Αερομεταφερόμενα radar	Πολύ υψηλές	Χωρική κλίμακα >5 ha
Διαστημικά radar	Χαμηλές	Χωρική κλίμακα >10 ha
Επίγεια lidar	Υψηλές	Χωρική κλίμακα <1 ha
Αερομεταφερόμενα lidar	Πολύ υψηλές	Χωρική κλίμακα >5 ha
UAV lidar	Πολύ υψηλές	Χωρική κλίμακα <5 ha
Διαστημικό lidar	Χαμηλές	Χωρική κλίμακα >10 ha
Εναέριο SfM	Υψηλές	Χωρική κλίμακα <5 ha
Χειροκίνητο SfM	Πολύ χαμηλές	Μονό δέντρο

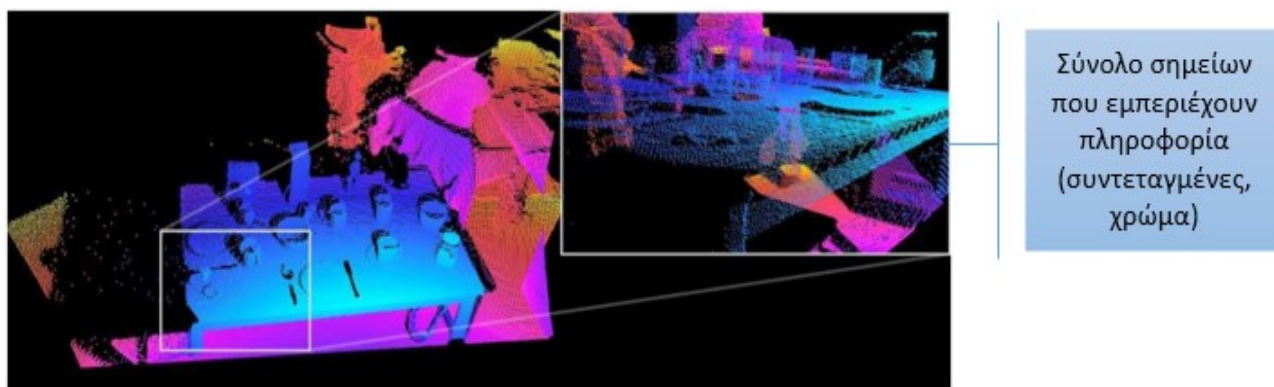
Πηγή: Dittmann, κ.α., (2017)

Κεφάλαιο 2

Κατασκευή Τρισδιάστατου Μοντέλου

2.1 Μέθοδοι δημιουργίας τρισδιάστατης αναπαράστασης

Η αυτόματη κατασκευή τρισδιάστατων απεικονίσεων είναι ένα αντικείμενο συνεχώς εξελισσόμενο με πληθώρα προσεγγίσεων και αλγορίθμων. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο είναι ένα ακριβές αντίγραφο ενός πραγματικού αντικειμένου. Όλες οι μέθοδοι αναπαράστασης έχουν μια συσκευή λήψης που μετρά και υπολογίζει διάφορα χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Τα δεδομένα αυτά υπόκεινται σε επεξεργασία μέσω ενός κατάλληλου λογισμικού με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Η ακρίβεια του αποτελέσματος καθώς και η πολυπλοκότητα κατασκευής εξαρτάται από την συσκευή λήψης (Torres, κ.α., 2012). Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η κατανόηση της δημιουργίας μιας τρισδιάστατης απεικόνισης. Η διαδικασία που θα μελετήσουμε αφορά την δημιουργία ενός point cloud και την κατασκευή επιφάνειας (surface). Σύμφωνα με τον Weinmann (2016), ένα σύννεφο σημείων περιγράφει ένα σύνολο δεδομένων από σημεία σε ένα συγκεκριμένο χώρο. Κάθε τρισδιάστατο σημείο στην βασική του μορφή εμπεριέχει χωρικές συντεταγμένες (x, y, z), ενώ προαιρετικά μπορούν να εκχωρηθούν και λοιπές πληροφορίες, όπως προσανατολισμός, κλίμακα, χρώμα κ.α.



Εικόνα 6: Αποτύπωση ενός σύννεφου σημείων

Πηγή: Steder. B., The Point Cloud Library PCL, University of Freiburg

Για την απόκτηση τρισδιάστατων δεδομένων υπάρχουν πληθώρα τεχνικών. Μια συνήθης κατηγοριοποίηση γίνεται ανάμεσα στις παθητικές και στις ενεργές τεχνικές. Οι ενεργές τεχνικές, γνωστές και ως LiDAR, εκπέμπουν ένα είδος ακτινοβολίας ή φωτός προς το αντικείμενο ή το περιβάλλον και ανιχνεύουν την αντανάκλαση του. Αντίθετα, οι παθητικές τεχνικές ανιχνεύουν την αντανακλώμενη ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Οι περισσότερες παθητικές τεχνικές ανιχνεύουν το ορατό φως, αλλά μπορούν επίσης να ανιχνεύσουν και άλλους τύπους ακτινοβολίας, όπως η

υπέρυθρη (Ebrahim, 2011). Αν και υπάρχουν πληθώρα τεχνικών, στο παρόν έγγραφο θα εξετάσουμε την δομή από κίνηση και την Multi-View Stereo (MVS). Οι συγκεκριμένες τεχνικές είναι αλληλένδετες μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο περιβάλλον από ένα σύνολο φωτογραφιών με γνωστές τις θέσεις της κάμερας, όπως θα δούμε και παρακάτω.

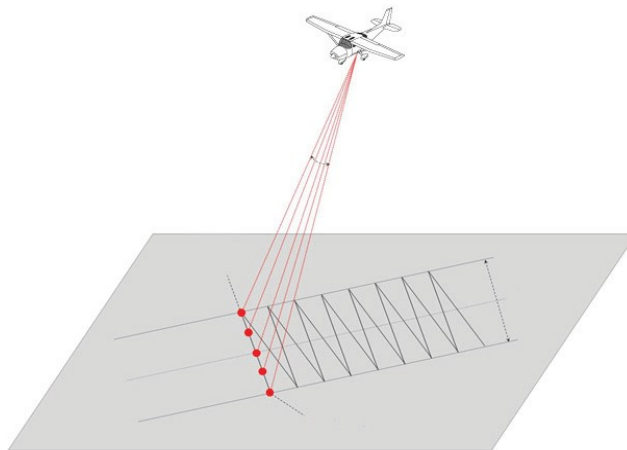
2.2 Τρισδιάστατη αναπαράσταση μέσω ενεργών σαρωτών – LiDAR

Η τρισδιάστατη αναπαράσταση με λέιζερ αναπτύχθηκε το τελευταίο μισό του 20ου αιώνα με σκοπό την ακριβή αναδημιουργία αντικειμένων και περιβάλλοντος. Ένας σαρωτής συλλέγει πληροφορίες απόστασης σχετικά με την επιφάνεια μέσα στο οπτικό του πεδίο, δημιουργώντας ένα σύννεφο σημείων (Ebrahim, 2011). Ο όρος LiDAR εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1953 από τους Middleton και Spilhaus και από τότε έχει μια ταχύτατη εξέλιξη και το καθιστά ως ένα απαραίτητο εργαλείο σε μια σειρά από κλάδων, όπως η αρχαιολογία, η γεωγραφία, η γεωμορφολογία, η δασοκομία κ.α (Wandinger, 2006). Ενδεικτικά, οι Cho, κ.α., (2015), χαρτογράφησαν μια περιοχή στην Ανταρκτική με έναν επίγειο σαρωτή LiDAR. Τα σημειακά δεδομένα που συλλέχθηκαν, γεωαναφέρθηκαν μέσω του συστήματος GNSS (Global Navigation Satellite System). Έπειτα, τα επεξεργασμένα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία ενός υποβάθρου (DEM) χρησιμοποιώντας την μέθοδο του τριγωνισμού (TIN). Οι Mahmud, κ.α., (2015) από την άλλη μεριά, χρησιμοποίησαν έναν επίγειο σαρωτή LiDAR για γεωλογικές παρατηρήσεις σε σπήλαιο της δυτικής Αυστραλίας. Επίσης, οι Arif, κ.α., (2017), χρησιμοποίησαν τρισδιάστατο σαρωτή λέιζερ για την ψηφιακή αναπαράσταση του φρουρίου Λαχώρη, το οποίο θεωρείται μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Σημαντικό πλεονέκτημα των τρισδιάστατων σαρωτών είναι η μεγάλη ακρίβεια και η εισαγωγή πραγματικών υφών και χρωμάτων οδηγώντας στην ακριβή αποτύπωση των μνημείων. Ενδεικτικά, για την αναπαράσταση του εσωτερικού του μνημείου έγιναν εκατόν ενενήντα σαρώσεις και τραβηχτήκαν περίπου χίλιες φωτογραφίες σε διάρκεια δώδεκα ημερών.

Ένα σύστημα LiDAR δημιουργεί μια τρισδιάστατη απεικόνιση μέσω της εύρεσης της απόστασης. Ο υπολογισμός της απόστασης γίνεται μέσω του χρόνου ταξιδιού που κάνει μια ακτίνα λέιζερ να φτάσει στο αντικείμενο και να επιστρέψει στον αισθητήρα. Ανάλογα την περιοχή μελέτης, ένα σύστημα σάρωσης μπορεί να είναι αερομεταφερόμενο για περιοχές μεγάλης έκτασης, ενώ για περιοχές μικρότερης έκτασης χρησιμοποιούνται επίγεια συστήματα τα οποία μπορούν να είναι είτε στατικά, είτε μετακινούμενα (Carter, κ.α., 2012).

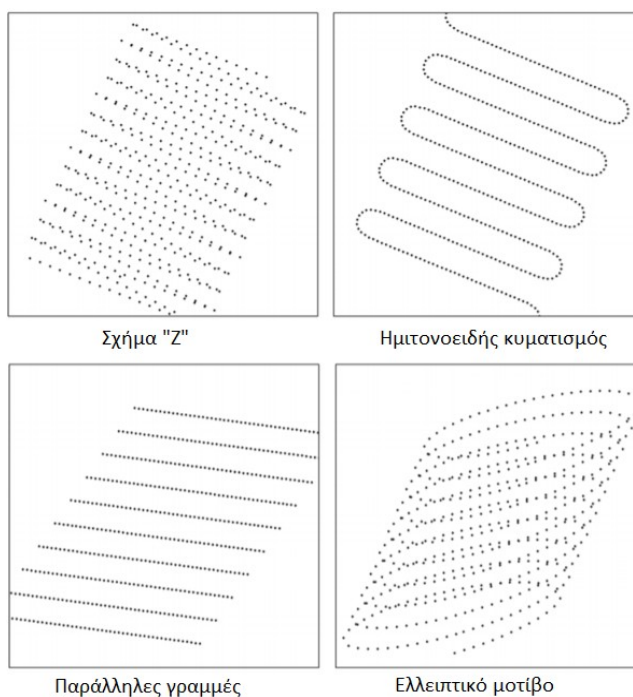
Οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές (Airborne Laser Scanning – ALS) είναι τοποθετημένοι συνήθως σε αεροπλάνα και ελικόπτερα, με το εύρος της πτήσης να κυμαίνεται από 200 μέτρα μέχρι 6000 μέτρα, ενώ η περιοχή που καλύπτει κυμαίνεται από 200 μέτρα μέχρι 1000 μέτρα. Οι παλμοί

λείζερ που εκπέμπονται στο έδαφος έχουν μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και κλίση, ενώ η σάρωση γίνεται συνήθως με σχήμα τύπου “Z”. Επίσης, για την καλύτερη αναπαράσταση της περιοχής μελέτης προτείνεται να υπάρχει μια αλληλοκάλυψη που να φτάνει τουλάχιστον το 50% (Balenonί, κ.α., 2006). Οι Gatziolis, κ.α. (2008), αναφέρουν με την σειρά τους τέσσερα μοτίβα σάρωσης. Τα πιο συνηθισμένα μοτίβα είναι του σχήματος “Z” και του ημιτονοειδούς κυματισμού, ενώ αναφέρουν επίσης τα παράλληλα και τα ελλειπτικά μοτίβα.



Εικόνα 7: Διαδικασία σάρωση περιοχής με συστήματα LiDAR

Πηγή: Balenociv, κ.α., (2006)



Εικόνα 8: Μέθοδοι σάρωσης με συστήματα LiDAR

Πηγή: Gatziolis, κ.α., (2008)

Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας τα εναέρια συστήματα αποτελούνται από τέσσερα μέρη:

- Σαρωτή λέιζερ
- GPS
- Αδρανειακό σύστημα (IMU)
- Υπολογιστή για την διαχείριση και την αποθήκευση δεδομένων.

Προκειμένου να αναφερθούν γεωγραφικά τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, οι συντεταγμένες των σημείων (x,y,z) υπολογίζονται με βάση την ακριβή θέση του σαρωτή που προσδιορίζεται με το GPS και των προσανατολισμό του σαρωτή που προσδιορίζεται από το αδρανειακό σύστημα (IMU). Το προϊόν που προκύπτει από αυτήν την διαδικασία είναι η δημιουργία ενός πυκνού σύννεφου σημείων (Balenović, κ.α., 2006).

Από την άλλη μεριά, οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ (Terrestrial Laser Scanner – TLS) χρησιμοποιούν τις ίδιες μεθόδους με τους αερομεταφερόμενους σαρωτές, με εξαίρεση ότι είναι επίγειοι. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να γίνει λήψη από πολλές γωνίες, ενώ μπορεί να σαρώσει από μικρά αντικείμενα μέχρι ολόκληρες σκηνές (Ebrahim, 2014). Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι επίγειοι σαρωτές χωρίζονται σε στατικούς και μετακινούμενους.

Σημαντικό πλεονέκτημα των κινητών συστημάτων σάρωσης είναι η ταχύτητα απόκτησης των δεδομένων σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους σάρωσης. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι τοποθετημένο σε αυτοκίνητο, σε φορητό, σε κάποια ειδική πλατφόρμα μεταφοράς, σε σακίδιο κ.τ.λ.. Αντίθετα, οι στατικοί σαρωτές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε τρίποδα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέρη όπου οι κινητοί σαρωτές έχουν δύσκολη προσβασιμότητα. Επίσης, οι στατικοί σαρωτές έχουν υψηλότερη ανάλυση, βελτιωμένη ακρίβεια θέσης και πολύ χαμηλότερο κόστος. Ακόμη, η πυκνότητα των δεδομένων ενός σύννεφου σημείων είναι συνήθως πολύ καλύτερη από αυτή των κινητών μονάδων. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα όταν χειριζόμαστε αρκετά περίπλοκα και περίτεχνα αντικείμενα και χρειαζόμαστε λεπτομερή δεδομένα. (Russo. J., 2011).



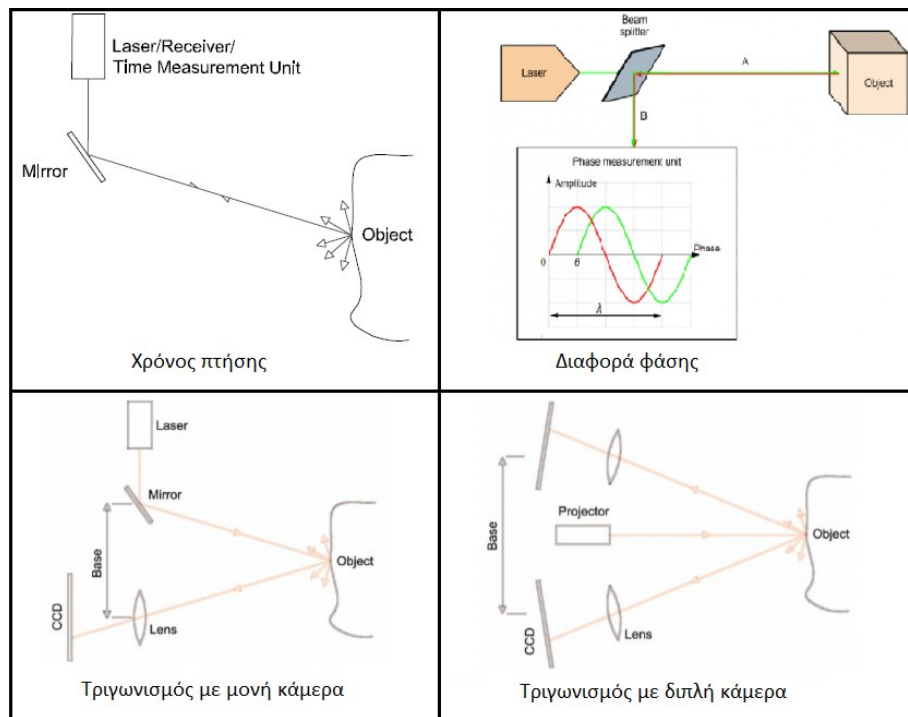
Εικόνα 9: Επίγειες κινητές μονάδες σάρωσης

Πηγή: Kukko, κ.α., (2012)

2.2.1 Τεχνικές εύρεσης απόστασης ενεργών σαρωτών

Η τεχνολογία των ενεργών σαρωτών (LiDAR) βασίζεται στην εύρεση της απόστασης. Η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται μέσω τριών τεχνικών (Ebrahim, 2014):

- Χρόνος πτήσης (time-of-flight): Οι συγκεκριμένοι σαρωτές στέλνουν μια παλμική ακτίνα λέιζερ στο αντικείμενο. Ο παλμός αντανακλάται στην επιφάνεια και ένα μέρος του επιστρέφει στον δέκτη. Ο χρόνος που χρειάζεται το φως να ταξιδεύσει στο αντικείμενο και να επιστρέψει μετριέται και υπολογίζεται η απόσταση.
- Διαφορά φάσης (Phase shift): Η μέθοδος αυτή είναι πανομοιότυπη με την μέθοδο του χρόνου πτήσης. Αρχικά στέλνεται στο αντικείμενο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η απόσταση προσδιορίζεται με την μετατόπιση της φάσης μεταξύ του απεσταλμένου και του ληφθέντος μήκους κύματος.
- Τριγωνισμός (Triangulation): Οι συγκεκριμένοι σαρωτές στέλνουν μια ακτίνα λέιζερ στο αντικείμενο, ενώ μια ή περισσότερες κάμερες εντοπίζουν τη θέση του σημείου που φωτίζει η ακτίνα. Σαν αποτέλεσμα, δημιουργείται ένα τρίγωνο με γνωστά χαρακτηριστικά την απόσταση μεταξύ πομπού και κάμερας, τη γωνία του πομπού και μια πλευρά του τριγώνου. Βάσει αυτών των στοιχείων υπολογίζεται ακριβώς η θέση της κουκίδας του λέιζερ πάνω στο αντικείμενο.



Εικόνα 10: Τεχνικές εύρεσης απόστασης ενεργών σαρωτών

Πηγή: Boehler, W., κ.α., (2001)

2.3 Τρισδιάστατη αναπαράσταση μέσω Δομής από Κίνηση – SfM

Η δομή από κίνηση είναι μια τεχνική τηλεπισκόπησης, στην οποία η τρισδιάστατη θέση των αντικειμένων εντοπίζεται από ένα σύνολο φωτογραφιών, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός σύννεφου σημείων (Miller, 2015). Η δομή από κίνηση χρησιμοποιεί την ίδια μεθοδολογία της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας, με μόνη διαφορά ότι η μέθοδος αυτή υπολογίζει αυτόματα την θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας, χωρίς να έχει την ανάγκη να προσδιορίσει ορατά σημεία (Micheletti, κ.α., 2015). Πιο συγκεκριμένα, σε ένα λογισμικό SfM εισάγουμε ένα σύνολο εικόνων, δημιουργώντας ένα σύννεφο σημείων με γνωστές τις θέσεις των φωτογραφιών και τις οπτικές παραμέτρους της κάμερας (Torres, κ.α., 2012).

Η απαρχή της μεθόδου τοποθετείται στην δεκαετία του '80, με την ανάπτυξη των αυτόματων αλγορίθμων ταυτοποίησης χαρακτηριστικών. Η συγκεκριμένη μέθοδος συνεχίζει την ανάπτυξη της την δεκαετία του '90, ενώ πλέον έχει καθιερωθεί σαν ένα φθηνό και αποτελεσματικό εργαλείο σε μια σειρά από κλάδους (Westoby, κ.α., 2012). Ενδεικτικά, οι Hixon, κ.α. χρησιμοποίησαν την μέθοδο της δομής από κίνηση για την αναπαράσταση αρχαιολογικών μνημείων στο νησί του Πάσχα στην Χιλή. Επίσης, οι Fonstad, κ.α. (2001), χρησιμοποίησαν την δομή από κίνηση για την μοντελοποίηση εδάφους του πάρκου Pedernales Falls State στο Τέξας, ενώ στην συνέχεια τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την μέθοδο LiDAR. Κάτι ανάλογο έκαναν οι

Westoby, et. al., (2012), οι οποίοι δημιούργησαν ψηφιακό μοντέλο ανύψωσης (DEM) σε περιοχή της Ουαλίας μέσω της δομής από κίνηση και το σύγκριναν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που δημιούργησαν με επίγειο σαρωτή LiDAR.

2.3.1 Απόκτηση Κατάλληλων Δεδομένων

Η απόκτηση εικόνων με σωστά χαρακτηριστικά είναι καίριας σημασίας για την δημιουργία ενός πυκνού σύννεφου σημείων υψηλής ανάλυσης. Όπως αναφέρουν οι Micheletti, κ.α., (2015), η πολυδιάστατη απεικόνιση ενός αντικειμένου, δηλαδή η καταγραφή ολόκληρου του αντικειμένου και των λεπτομερειών του από πολλαπλές χωρικές θέσεις βοηθάει στην καλύτερη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Επίσης, τονίζουν ότι επιφάνειες με έντονη αντανάκλαστική ιδιότητα, ομοιογενείς και διάφανες είναι αρκετά δύσκολο στην αποτύπωση τους. Ιδιαίτερη σημασία στις επιφάνειες έδωσε και ο Ekman, (2017), ο οποίος αναφέρει ότι λεπτές, διάφανες και επιφάνειες με πολύ μικρή ή καθόλου υφή είναι δύσκολα αναγνωρίσιμες, δημιουργώντας ατέλειες στην κατασκευή ενός σύννεφου σημείων.



Εικόνα 11: Δυσκολία αποτύπωσης επιφανειών με μικρή υφή

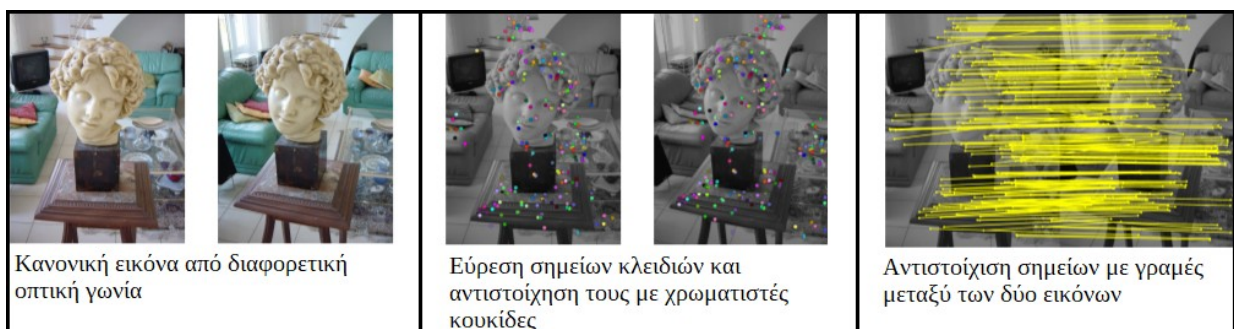
Πηγή: Ekman, (2017)

Από την μεριά τους, οι Westoby, κ.α. (2012) δίνουν έμφαση στην επιλογή της κατάλληλης πλατφόρμας για την απόκτηση δεδομένων. Ενδεικτικά, αναφέρουν ότι τοποθεσίες μικρής κλίμακας με απότομες κλίσεις είναι προτιμότερο η απόκτηση δεδομένων να γίνεται από το έδαφος. Αντίθετα, αεροφωτογραφίες χαμηλού ύψους ταιριάζουν σε περιοχές μεγαλύτερης κλίμακας και ηπιότερου αναγλύφου. Παρ' όλα αυτά επισημαίνουν ότι ο συνδυασμός πλατφορμών μπορεί ορισμένες φορές να είναι η βέλτιστη λύση για ορισμένες περιοχές. Ενδεικτικά, οι Conlin, κ.α. (2018), για την παρατήρηση της γεωμορφολογίας της παραλίας Μονζόλι της Γουιάνας σύγκριναν δεδομένα από διαφορετικές πλατφόρμες. Αν και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ορισμένες πλατφόρμες είχαν καλύτερη απόδοση, τονίζουν ότι η αποδοτικότητα μιας πλατφόρμας βασίζεται σε πολλούς παράγοντες, ενώ η βέλτιστη επιλογή των πλατφορμών γίνεται ανάλογα με τον τόπο και τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.3.2 Δημιουργία σύννεφου σημείων μέσω Δομής από Κίνηση (SfM) και Multi View Stereo (MVS)

Η μέθοδος SfM σε συνδυασμό με το MVS παρέχουν ένα τρόπο δημιουργίας ενός σύννεφου σημείων από συλλογή δισδιάστατων φωτογραφιών. Η δημιουργία ενός σύννεφου σημείων βασίζεται σε τρία βήματα.

Το πρώτο βήμα, όπως αναφέρει ο Miller (2015), αφορά την εύρεση “σημείων κλειδιών” για κάθε φωτογραφία. Τα συγκεκριμένα σημεία πρέπει να είναι αναγνωρίσιμα σε περισσότερες από μια φωτογραφίες. Η διαδικασία αυτή απαιτεί επικάλυψη εικόνων τουλάχιστον 50%, ώστε περισσότερα “σημεία κλειδιά” να ταιριάζουν μεταξύ των εικόνων για να είναι επιτυχημένη η τρισδιάστατη απεικόνιση. Επιπλέον, οι Westoby, κ.α. (2012), τονίζουν ότι τα “σημεία κλειδιά” πρέπει να είναι αμετάβλητα στην περιστροφή των εικόνων και αναλλοίωτα σε εξωτερικές συνθήκες (π.χ φωτισμός). Τα συγκεκριμένα σημεία πρέπει να είναι ορατά σε τουλάχιστον τρεις εικόνες. Επίσης, αναφέρουν ότι ο αριθμός των “σημείων κλειδιών” κάθε εικόνας εξαρτάται από την υφή και την ανάλυση των εικόνων. Ο εντοπισμός των “σημείων κλειδιών” γίνεται με αλγόριθμους εύρεσης και αντιστοίχισης κοινών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 12: Αντιστοίχιση χαρακτηριστικών μεταξύ δύο εικόνων

Πηγή εικόνων: Brink, (2017)

Όπως αναφέρει ο Ekman (2017), οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι εύρεσης και αντιστοίχισης κοινών χαρακτηριστικών είναι ο SIFT του Lowe και ο SURF του Bay. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου SIFT (Scale Invariant Feature Transform) είναι ο εντοπισμός πιθανών “σημείων κλειδιών” τα οποία παραμένουν αμετάβλητα στην αλλαγή της κλίμακας, της θέσης, του φωτισμού και του θορύβου. Στην συνέχεια, με κατάλληλες τεχνικές γίνεται η ακριβής περιγραφή αυτών των σημείων. Ο αλγόριθμος του Lowe υλοποιείται σε τέσσερα βήματα (Lowe, 2004):

1. Ανίχνευση ακροτάτων στο χώρο της κλιμάκωσης (Scale-space extrema detection)
2. Εντοπισμός “σημείων κλειδιών” (Keypoint localization)
3. Καθορισμός προσανατολισμού (Orientation assignment)

4. Περιγραφή των σημείων κλειδιών (Keypoint descriptor)

Ο αλγόριθμος SURF (Speeded Up Robust Features) του Bay στηρίζεται στην ίδια λογική του αλγορίθμου SIFT, δηλαδή στην εύρεση “σημείων κλειδιών” στις εικόνες, ενώ αναπτύσσει μια καινούργια μέθοδο για την δημιουργία του περιγραφέα. Ενδεικτικά, σε μια μελέτη που έκαναν οι Κουσκουρίδας, κ.α., (2009), αναφέρουν ότι ο αλγόριθμος SIFT έχει γενικά καλύτερη απόδοση, ενώ υστερεί σε επίπεδα χρόνου σε σύγκριση με τον αλγόριθμο SURF.

Επίσης, οι King & Panchal (2017), εκτός από τους αλγορίθμους SIFT και SURF αναφέρουν και τον αλγόριθμο ORB. Ο αλγόριθμος ORB είναι μια τροποποίηση του αλγορίθμου FAST. Ο αλγόριθμος εντοπίζει αν η ένταση ενός εικονοστοιχείου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη σε σχέση με τα γειτονικά του, χρησιμοποιώντας μια κυκλική ακτίνα εννέα εικονοστοιχείων από το κεντρικό. Οι ίδιοι υποστηρίζουν, μετά από σύγκριση των τριών αλγορίθμων, ότι ο αλγόριθμος ORB είναι ανώτερος των αλγορίθμων SIFT και SURF. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος ORB παράγει περισσότερα “σημεία κλειδιά” σε σχέση με τους άλλους δύο. Όσον αφορά την ποιότητα των σημείων ο αλγόριθμος SURF έχει μεγαλύτερο εύρος σημείων σε όλη την εικόνα σε σχέση με τους άλλους δύο αλγορίθμους, παρ’ όλα αυτά δεν παράγει καλύτερη ποιότητα αποτελέσματος. Ο αλγόριθμος SURF έρχεται πρώτος στην κατηγορία της ταχύτητας.

Πίνακας 2: Σύγκριση αλγορίθμων SIFT, ORB και SURF

	SIFT	ORB	SURF
Χρόνος	0	0	1
Ποσότητα σημείων κλειδιών	0	1	0
Ποιότητα σημείων κλειδιών	1	1	0
Σύνολο	1	2	1

Πηγή: King & Panchal (2017)

Αφού γίνει η αντιστοίχιση των “σημείων κλειδιών” μεταξύ των εικόνων, το επόμενο στάδιο αφορά την εύρεση των παραμέτρων της κάμερας και του προσανατολισμού των φωτογραφιών. Οι εξωτερικοί παράμετροι της κάμερας είναι άγνωστοι καθώς οι ακριβείς μετρήσεις αυτών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Η εκτίμηση της θέσης της φωτογραφικής μηχανής είναι ένα πρόβλημα που είναι δύσκολο να ρυθμιστεί, καθώς υπάρχει σύγχυση μεταξύ της θέσης της κάμερας και του προσανατολισμού της κάμερας. Βασικό πρόβλημα της μη βαθμονόμησης της κάμερας είναι ότι επηρεάζει αρνητικά την ανασυγκρότηση της σκηνής. Η πιο δημοφιλής λύση στην βελτίωση του παραπάνω προβλήματος είναι η ρύθμιση δέσμης (bundle adjustment) (Zhang, κ.α., 2006). Αν και η ρύθμιση δέσμης δεν είναι αυστηρά μέρος του SfM, είναι ένα πολύ κοινό βήμα που χρησιμοποιείται για την τελειοποίηση του αρχικού μοντέλου SfM. Η ρύθμιση δέσμης ελαχιστοποιεί το σφάλμα των θέσεων μεταξύ των εικόνων. Αναλυτικότερα, η διαδικασία αυτή αφορά την επεξεργασία των

αρχικών εκτιμήσεων των παραμέτρων της κάμερας με σκοπό τον υπολογισμό με ακρίβεια των θέσεων των τρισδιάστατων σημείων. Ο πιο γνωστός αλγόριθμος για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος είναι ο Levenberg-Marquardt (LMA). Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός αραιού σύννεφου σημείων.

Το τρίτο βήμα αφορά την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδο MVS για την δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων από ένα σύνολο εικόνων με γνωστές τις παραμέτρους της κάμερας. Αρχικά, ένα πρόγραμμα SfM αναγνωρίζει τις παραμέτρους της κάμερας, ενώ ένα πρόγραμμα MVS λειτουργεί συνδυαστικά για την κατασκευή ενός πυκνού σύννεφου σημείων. Η μέθοδος MVS υπολογίζει μια τρισδιάστατη ακτίνα για κάθε εικονοστοιχείο κάθε εικόνας με βάση τις παραμέτρους της κάμερας. Για κάθε εικονοστοιχείο ή μια ομάδα εικονοστοιχείων υπάρχουν τα αντίστοιχα σε άλλες εικόνες, τα οποία τέμνονται με τις ακτίνες. Τα συγκεκριμένα εικονοστοιχεία συγκρίνονται για να εντοπιστεί αν δείχνουν το ίδιο τρισδιάστατο αντικείμενο (Ekman, 2017). Στην συνέχεια έχουμε την κατασκευή ενός σύννεφου σημείων, όπου κάθε σημείο έχει ένα χρώμα RGB με βάση τις εικόνες εισόδου, δημιουργώντας μια ρεαλιστική τρισδιάστατη αναπαράσταση του αντικειμένου (Miller, 2015).

2.4 Δημιουργία επιφάνειας σε τρισδιάστατο σύννεφο σημείων

Η αναπαράσταση μιας τρισδιάστατης σκηνής γίνεται μέσω της περιγραφής της γεωμετρίας της. Γενικά, οι αλγόριθμοι που ασχολούνται με την γεωμετρία ενός αντικειμένου μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες μοντέλων, οι οποίες είναι η αναπαράσταση της επιφάνειας και η αναπαράσταση του όγκου. Στη πρώτη κατηγορία δεν έχουμε καμία πληροφορία για το εσωτερικό του αντικειμένου. Αν θέλουμε να αναπαραστήσουμε το εσωτερικό μιας επιφάνειας τότε η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ανεπαρκής και πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα όγκου (Botsch, κ.α., 2008). Στην παρούσα εργασία, θα μελετήσουμε την δημιουργία επιφάνειας και συγκεκριμένα την δημιουργία επιφάνειας σε δεδομένα σύννεφου σημείων.

Σύμφωνα με τους Mineo, κ.α. (2018), η δημιουργία επιφάνειας σε σύννεφο σημείων γίνεται με την μέθοδο του τριγωνισμού και με την μέθοδο της ανακατασκευής επιφάνειας. Οι μέθοδοι τριγωνισμού χρησιμοποιούν τα σημεία του σύννεφου σαν κορυφές για την δημιουργία τριγωνικών επιφανειών, με τον πιο γνωστό αλγόριθμο να είναι αυτός του Delaunay. Από την άλλη μεριά, οι αλγόριθμοι ανακατασκευής επιφάνειας υπολογίζουν νέα σημεία, η πυκνότητα των οποίων μπορεί να ποικίλει με την καμπυλότητα της τρισδιάστατης γεωμετρίας. Η ανακατασκευή επιφάνειας από νέα σημεία γίνεται βάσει της εξίσωσης Poisson.

Κεφάλαιο 3

Εκτίμηση Παραμέτρων Δέντρου μέσω SFM – MVS

3.1 Συνολική προσέγγιση

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης βασίστηκε στην συλλογή εικόνων από μεμονωμένα δέντρα διάφορων χαρακτηριστικών με τις οποίες κατασκευάστηκαν τρισδιάστατα μοντέλα. Η επιλογή των δέντρων έγινε με βάση την πυκνότητα των φύλλων, το μέγεθος των κλαδιών και του κορμού. Οι τρισδιάστατες αναπαραστάσεις των δέντρων με διαφορετικά χαρακτηριστικά θα μας βοηθήσει να έχουμε μια συνολική προσέγγιση των χαρακτηριστικών εκείνων που δημιουργούν ατέλειες στην δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων. Έπειτα, θα ελεγχθεί αν τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αλλομετρικές εξισώσεις. Οι τιμές που θα υπολογιστούν από τα τρισδιάστατα μοντέλα θα επαληθευτούν με επιτόπια συλλογή πραγματικών τιμών. Τελευταίο στάδιο της μελέτης είναι ο υπολογισμός του όγκου ενός δέντρου από το τρισδιάστατο μοντέλο, καθώς και η εύρεση του σφάλματος σε σχέση με τον πραγματικό όγκο. Για την εύρεση του σφάλματος θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ξυλομετρίας, η οποία βασίζεται στην Αρχή του Αρχιμήδη.

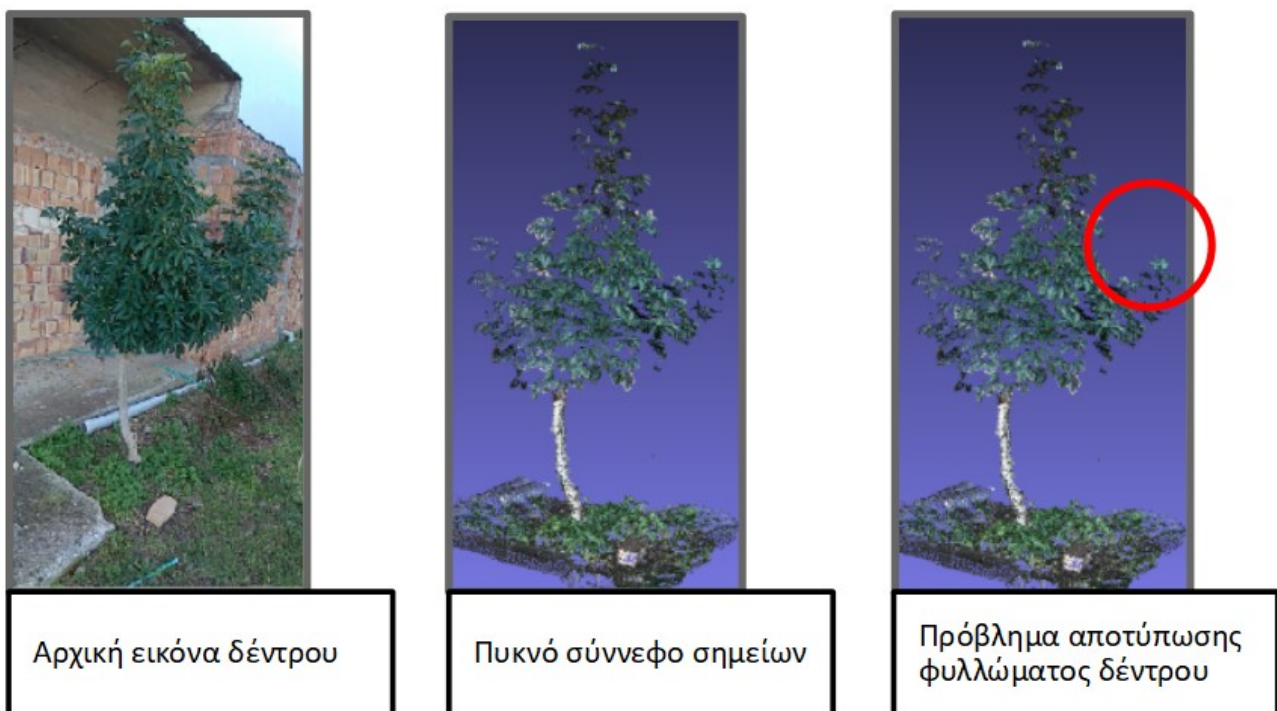
3.2 Απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων

Η τεχνική που ακολουθήθηκε ήταν η βιντεοσκόπηση του δέντρου με βάση ομόκεντρους κύκλους, με το δέντρο να βρίσκεται στο κέντρο αυτών των κύκλων. Η απόσταση του πρώτου κύκλου ήταν τέτοια ώστε να μπορούσε να περιλάβει μια γενική εικόνα του δέντρου. Έπειτα, ακολούθησαν εσωτερικοί κύκλοι για την καταγραφή των λεπτομερειών του δέντρου, όπως φύλλα και λεπτά κλαδιά, με απόσταση περίπου 1m από το δέντρο. Τα βίντεο τραβήχτηκαν με την ψηφιακή φωτογραφική μηχανή canon ixus 170 με 20 megapixel. Η μετατροπή των βίντεο σε εικόνες έγινε μέσω του προγράμματος Quick Time Player. Τα καρέ που πάρθηκαν είχαν χρονική απόσταση ενός δευτερολέπτου με σκοπό να υπάρχει επικάλυψη φωτογραφιών που φτάνει από το 90% μέχρι το 95%. Το σύνολο των φωτογραφιών που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων κυμαινόταν μεταξύ εξήντα πέντε και εκατόν εξήντα τεσσάρων εικόνων ανάλογα το δέντρο. Οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν σε μορφή jpg. Στην συνέχεια, η επεξεργασία των εικόνων για την κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων έγινε μέσω της εφαρμογής VisualSfM (Wu, 2011 & 2013) και του βοηθητικού εργαλείου CMP-MVS του Jancosek. Η εφαρμογή VisualSfM

χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο SIFT για την εύρεση κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ των εικόνων. Τέλος, για την επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MeshLab (Cignomi, κ.α., 2008), το οποίο παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για την επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων. Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής hp ProBook με επεξεργαστή Intel® Core TM i7-7500U CPU @ 2.70GHz 2.90GHz, μνήμη RAM 8,00 GB και λειτουργικό σύστημα 64 bit.

3.3 Σύγκριση τρισδιάστατων μοντέλων

Στην ενότητα αυτή επιλέχθηκαν τρία δέντρα διαφορετικών χαρακτηριστικών για σύγκριση της τρισδιάστατης αναπαράστασης. Το πρώτο δέντρο έχει αρκετά πυκνό φύλλωμα. Για την τρισδιάστατη αναπαράσταση του συγκεκριμένου δέντρου χρειάστηκαν εκατόν σαράντα φωτογραφίες. Το δεύτερο δέντρο είναι μια κυδωνιά που έχει λεπτά κλαδιά και λιγότερα φύλλα. Για την τρισδιάστατη απεικόνιση της κυδωνιάς χρησιμοποιήθηκαν εκατόν είκοσι μία φωτογραφίες. Το τρίτο δέντρο επιλέχθηκε ο κορμός ενός πεύκου που είναι μια “καθαρή” και συμπαγής επιφάνεια. Για την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν εξήντα πέντε φωτογραφίες.



Εικόνα 13: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων δέντρου

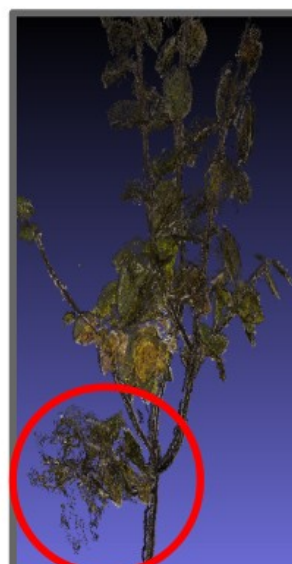
Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα



Αρχική εικόνα κυδωνιάς



Πυκνό σύννεφο σημείων



Προβλήματα ασυνεχειών
& αποτύπωσης φύλλων
του δέντρου

Εικόνα 14: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων κυδωνιάς

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα



Αρχική εικόνα πεύκου



Πυκνό σύννεφο σημείων



Προβλήματα ασυνεχειών
& αποτύπωσης κορμού
του δέντρου

Εικόνα 15: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων πεύκου

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η τρισδιάστατη απεικόνιση του πεύκου είναι η πιο συμπαγής με τις μικρότερες ατέλειες. Η αδυναμία απεικόνισης του κορμού στο υψηλότερο επίπεδο αφορά, όχι την πολυπλοκότητα της δομής και την αδυναμία του προγράμματος στην απεικόνιση της, αλλά στην δυσκολία αποτύπωσης του συγκεκριμένου επιπέδου στο σύνολο των φωτογραφιών λόγω ύψους. Αυτό δυσκολεύει πολύ την εύρεση “σημείων κλειδιών” μεταξύ των αλληλεπικαλυπτόμενων φωτογραφιών. Από την άλλη μεριά, η τρισδιάστατη απεικόνιση της κυδωνιάς παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα. Η απεικόνιση του κορμού στο σύνολο της παρουσιάζει μια συμπαγή μορφή, μόνο με μερικές ασυνέχειες σε πολύ λεπτά κλαδιά και δυσκολία αποτύπωσης ορισμένων φύλλων. Τέλος, το πρώτο δέντρο παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, ειδικά στο φύλλωμα. Αν και τραβήχτηκαν φωτογραφίες από κοντινότερη απόσταση για την αποτύπωση των λεπτομερειών του φυλλώματος, το πρόγραμμα παρουσιάζει αδυναμία δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου χωρίς κενά. Μεγαλύτερη αδυναμία είναι η απουσία ορισμένων τμημάτων του φυλλώματος.

3.4 Τρισδιάστατα μοντέλα για χρήση σε αλλομετρικές εξισώσεις

Οι αλλομετρικές εξισώσεις είναι ένας εύκολος τρόπος μέτρησης της βιομάζας. Για την χρήση αλλομετρικών εξισώσεων πρέπει να υπολογιστούν ορισμένα χαρακτηριστικά των δέντρων. Τα πιο συνήθη χαρακτηριστικά είναι το ύψος και το πλάτος του δέντρου, η διάμετρος του κορμού στο ύψος του στήθους και η απόσταση του εδάφους από το πρώτο κλαδί (Bombelli, κ.α, 2009). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του πρώτου δέντρου. Για τον υπολογισμό των πραγματικών τιμών των παραπάνω δημιουργήθηκε μια ψευδοκλίμακα. Η ψευδοκλίμακα αφορά ένα αντικείμενο γνωστών διαστάσεων. Το αντικείμενο που επιλέχθηκε είναι ένας συμπαγής όγκος ορθογωνίου σχήματος με μήκος 19 εκατοστά, πλάτος 9,5 εκατοστά και ύψος 6,5 εκατοστά.



Εικόνα 16: Μέτρηση διαστάσεων γνωστού αντικειμένου

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Για την δημιουργία της ψευδοκλίμακας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MeshLab. Αρχικά, μετρήθηκαν μέσω του προγράμματος οι τρεις διαστάσεις του όγκου. Καθώς δεν υπάρχει κλίμακα τα νούμερα ήταν σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Τα συγκεκριμένα νούμερα διαιρέθηκαν με τις πραγματικές τιμές του όγκου ώστε να υπολογιστεί η ψευδοκλίμακα για κάθε διάσταση.

Πίνακας 3: Δημιουργία ψευδοκλίμακας δέντρου

	Πραγματικές Τιμές (εκατ.)	Τρισδιάστατες Τιμές	Ψευδοκλίμακα (Πραγμ.Τιμές / Τρισδ.Τιμές)
Μήκος	19	0.762009	24.9340887
Πλάτος	9,5	0.365609	25.9850431
Ύψος	6,5	0.268144	24,2407065

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

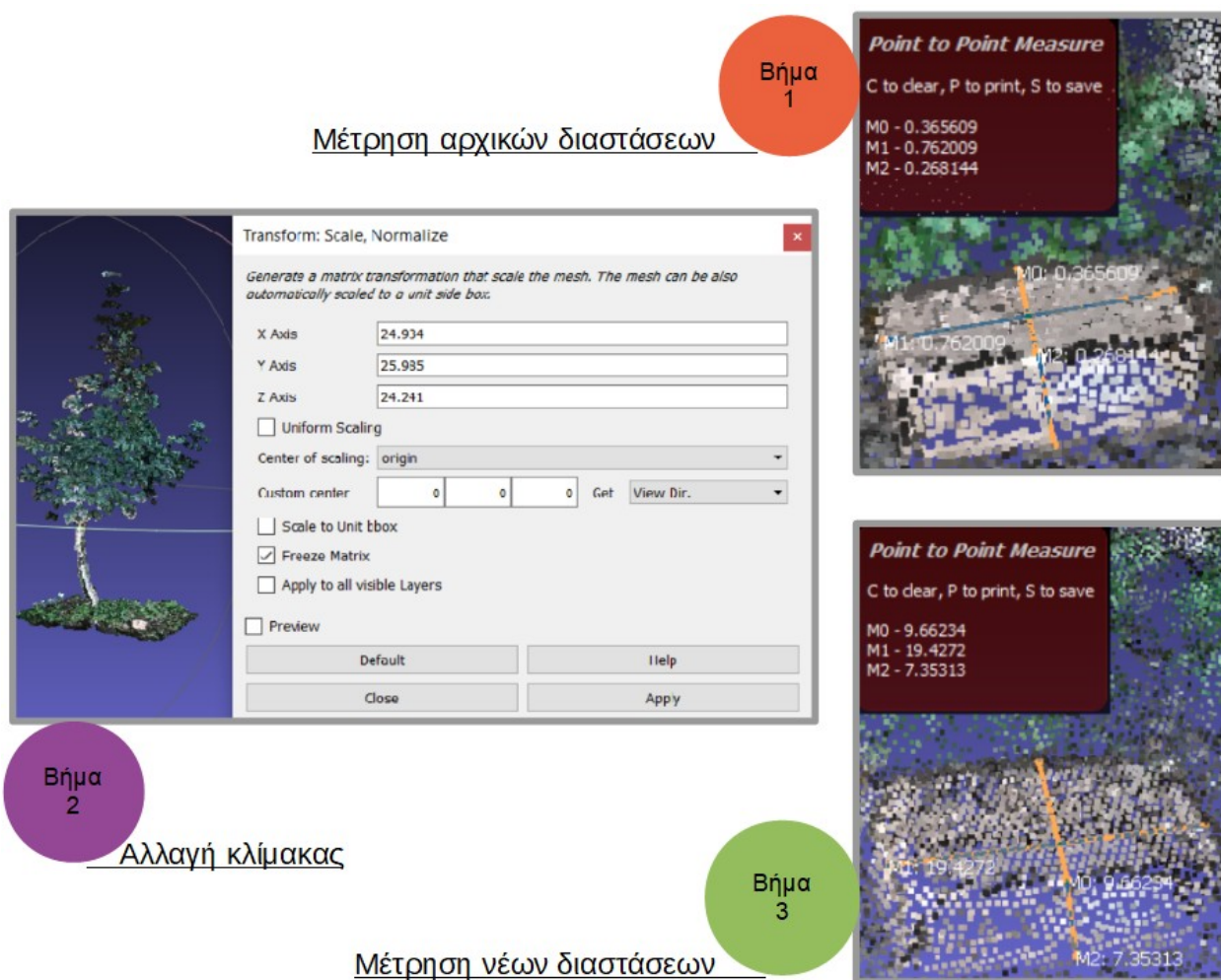
Αφού υπολογίστηκε η ψευδοκλίμακα, αμέσως μετά χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Transform: Scale, Normalize του MeshLab για την αλλαγή της κλίμακας των τριών διαστάσεων. Στην συνέχεια, για την επαλήθευση της ψευδοκλίμακας, μετρήθηκαν οι καινούργιες τρισδιάστατες τιμές και συγκρίθηκαν με τις κανονικές.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα ψευδοκλίμακας δέντρου

	Πραγματικές Τιμές	Τρισδιάστατες Τιμές
Μήκος	19	19,4
Πλάτος	9,5	9,7
Ύψος	6,5	7,4

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι οι τρισδιάστατες τιμές πλησιάζουν αρκετά τις πραγματικές τιμές. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στο ύψος με το σφάλμα να φτάνει το 13,8%, ενώ το μήκος και το πλάτος έχουν το μικρότερο σφάλμα με 2,1% έκαστος.



Εικόνα 17: Διαδικασία αλλαγής κλίμακας μέσω του προγράμματος MeshLab

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Βάσει των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι η ψευδοκλίμακα παρουσιάζει αρκετά αξιόπιστες τιμές που πλησιάζουν τις πραγματικές. Αυτό θα μας βοηθήσει να περάσουμε στο επόμενο στάδιο που είναι ο υπολογισμός συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του δέντρου που χρησιμοποιούνται στις αλλομετρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της βιομάζας.



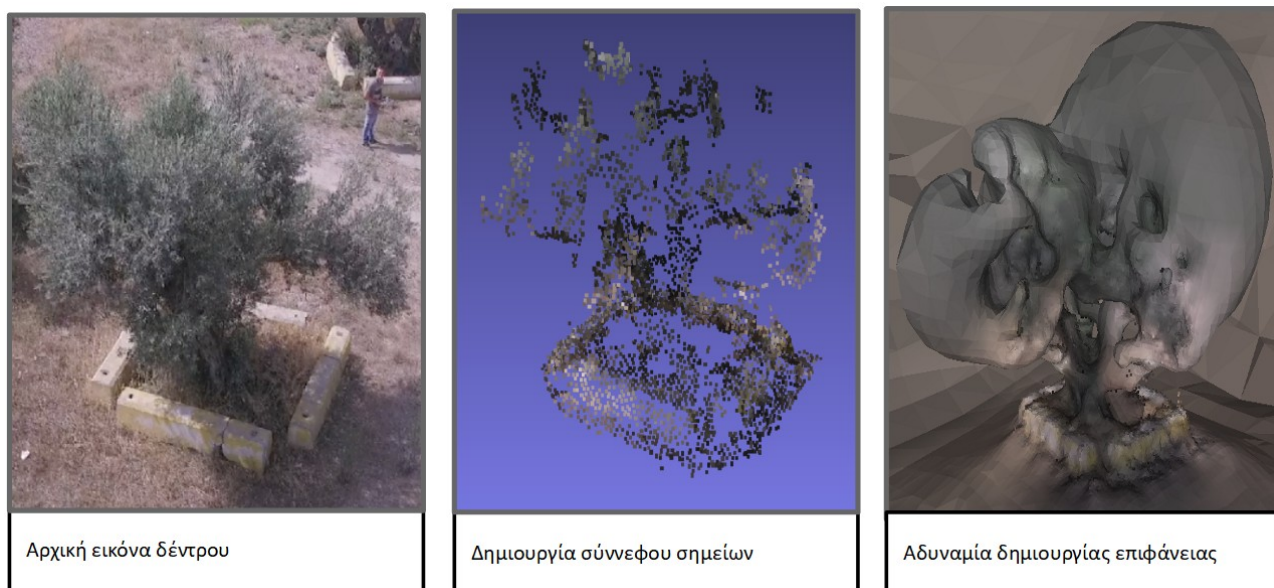
Εικόνα 18: Υπολογισμός χαρακτηριστικών του δέντρου μέσω του προγράμματος MeshLab

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Έχοντας υπολογίσει τα χαρακτηριστικά του δέντρου με τις νέες τιμές παρατηρούμε ότι το ύψος του δέντρου ανέρχεται στα 2,67 μέτρα, το πλάτος του δέντρου φτάνει το 1,53 μέτρα, ενώ το ύψος από το έδαφος μέχρι το πρώτο κλαδί είναι στα 68 εκατοστά. Αυτές οι τιμές μπορούν να αξιοποιηθούν στην αντίστοιχη αλλομετρική εξίσωση. Από το παράδειγμα αυτό διαπιστώνεται ότι ακόμα και τρισδιάστατα μοντέλα που έχουν ορισμένες ατέλειες στο σχηματισμό τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκεί να είναι υπολογίσιμα τα χαρακτηριστικά που ψάχνουμε για την κάθε αλλομετρική εξίσωση. Προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε τις πραγματικές τιμές σε γνωστό αντικείμενο καθώς και η δημιουργία ψευδοκλίμακας.

3.5 Εύρεση όγκου μέσω τρισδιάστατου μοντέλου

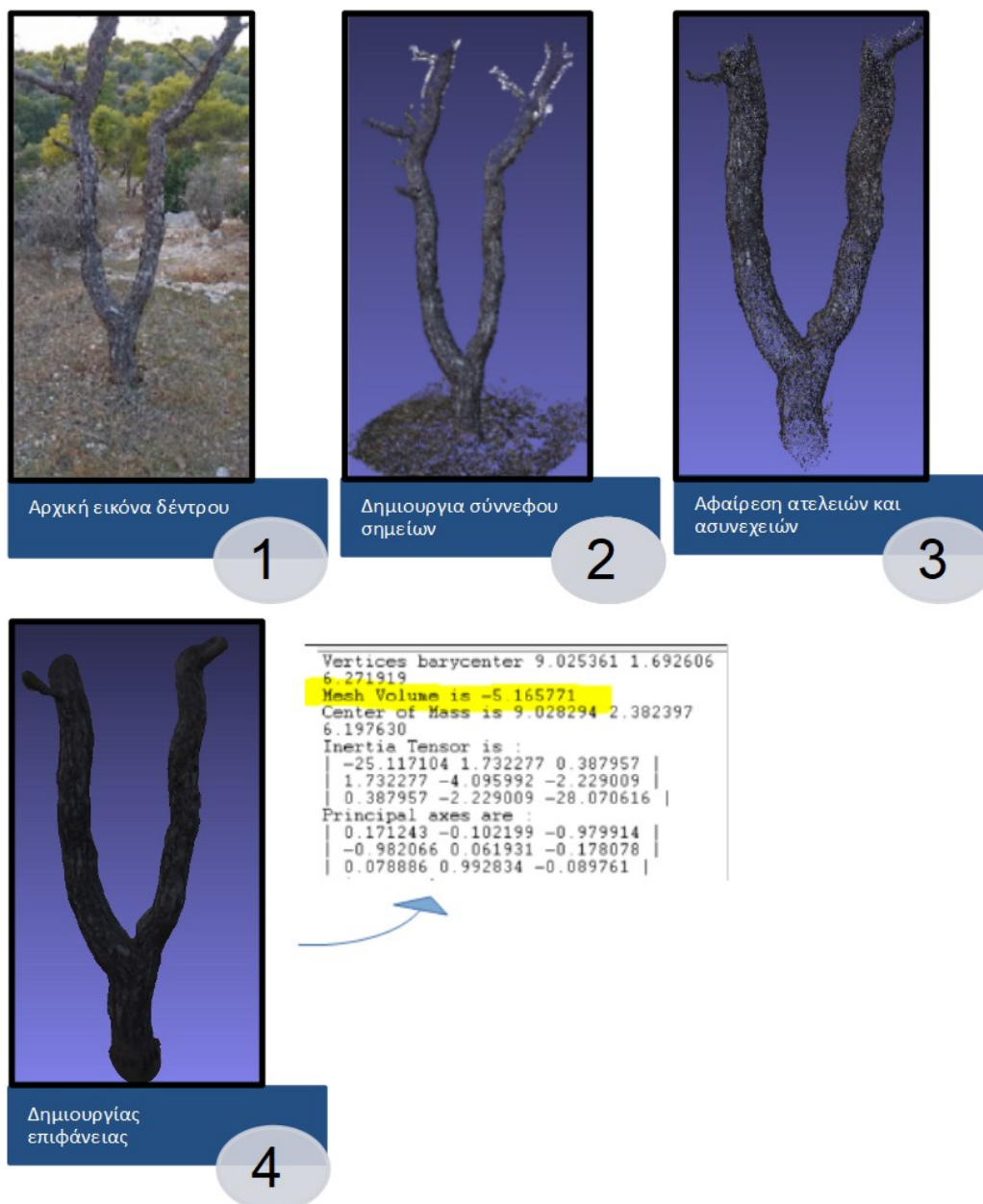
Σημαντικό για τον υπολογισμό του όγκου είναι η δημιουργία ενός σύννεφου σημείων με πολύ λίγες ατέλειες. Σε περίπτωση που το σύννεφο σημείων έχει σημαντικά προβλήματα αποτύπωσης είναι αδύνατον να δημιουργηθεί επιφάνεια από τα δεδομένα του. Η δημιουργία επιφάνειας βοηθάει στον σχηματισμό του δέντρου και κατ' επέκταση στον υπολογισμό του όγκου. Ενδεικτικά, δημιουργήσαμε το σύννεφο σημείων μιας ελιάς με πολύπλοκη δομή φύλλων και κλαδιών. Το video του δέντρου τραβήχτηκε με drone στο χώρο του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα. Το drone που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρίας dji το μοντέλο inspire 1, με κάμερα την zenmuse x3 12MP. Το σύνολο των φωτογραφιών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σύννεφου σημείων ήταν εκατόν εξήντα τέσσερις εικόνες. Όπως φαίνεται και παρακάτω υπάρχει αδυναμία κατασκευής της επιφάνειας λόγω ασυνεχειών και μη αποτύπωσης ορισμένων τμημάτων του δέντρου στο σύννεφο σημείων.



Εικόνα 19: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων και επιφάνειας της ελιάς

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Για την αποφυγή προβλήματος στην δημιουργία της επιφάνειας επιλέχθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του πεύκου, καθώς εμπεριέχει τις λιγότερες ατέλειες. Για την δημιουργία της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MeshLab (Kazhdan & Hoppe, 2013). Αρχικά, το μοντέλο καθαρίστηκε από τυχόν ατέλειες και ασυνέχειες. Έπειτα, για την δημιουργία της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές “compute normals for point sets” και “screened poisson surface reconstruction”. Αφού δημιουργήθηκε η επιφάνεια, στην συνέχεια υπολογίστηκε ο όγκος του δέντρου μέσω της εντολής “compute geometric measure”.

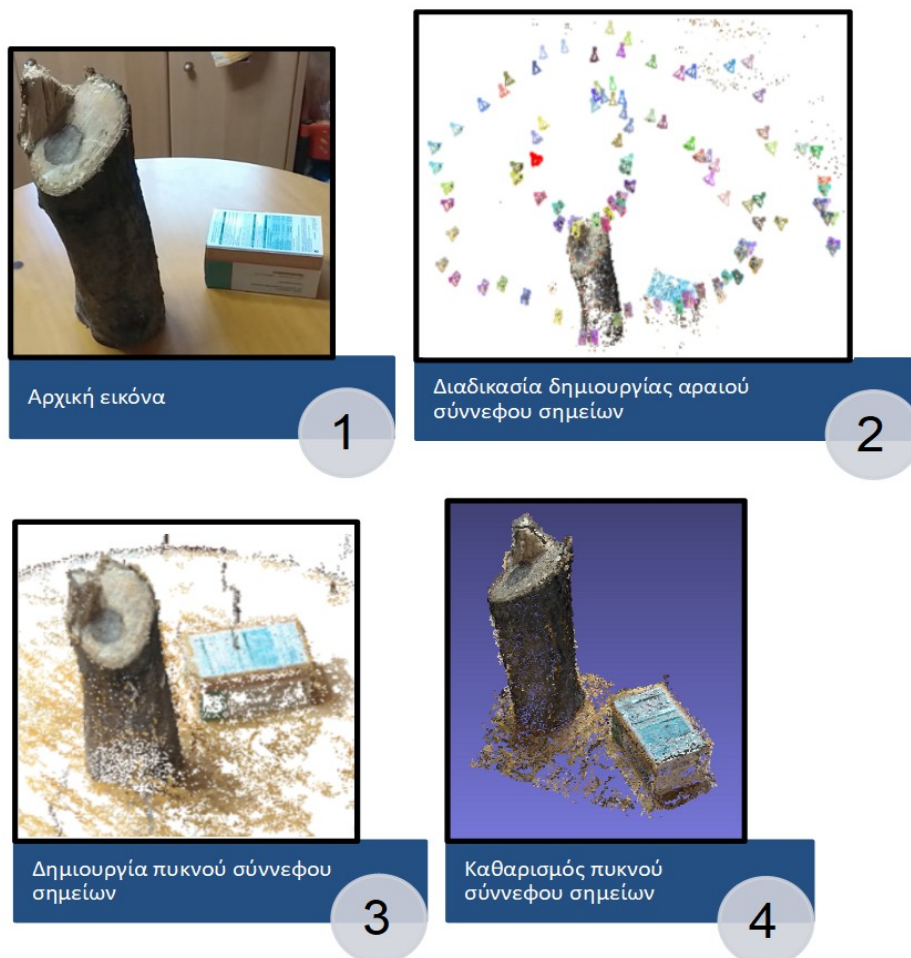


Εικόνα 20: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων, επιφάνειας και υπολογισμός όγκου του πεύκου

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Βάσει των παραπάνω παρατηρείται ότι ο υπολογισμός του όγκου δεν μπορεί να γίνει για όλα τα τρισδιάστατα μοντέλα. Σε πολύπλοκες δομές δέντρων είναι σχεδόν αδύνατον η δημιουργία επιφάνειας και ο υπολογισμός του όγκου. Επομένως, μόνο σε συμπαγείς δομές μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος. Στο παράδειγμα του πεύκου, αν και δημιουργήθηκε η επιφάνεια, η τιμή του όγκου είναι τυχαία καθώς δεν υπάρχει συγκεκριμένη κλίμακα. Συνεπώς, η δημιουργία ψευδοκλίμακας είναι βασική προϋπόθεση για την εύρεση του όγκου. Για να δούμε αν ο υπολογισμός του όγκου μέσα από τρισδιάστατες δομές πλησιάζει τις πραγματικές τιμές επιλέχθηκε ένα κομμάτι συμπαγούς ξύλου στο οποίο δημιουργήθηκε ψευδοκλίμακα και έπειτα βρέθηκε ο

όγκος του. Πρώτο βήμα της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι η κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου μέσω του προγράμματος VisualSfM. Για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν εκατόν μία φωτογραφίες.



Εικόνα 21: Δημιουργία πυκνού σύννεφου σημείων ξύλου

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Δεύτερο βήμα είναι η κατασκευή της ψευδοκλίμακας. Αρχικά, μετρήθηκαν οι διαστάσεις του γνωστού αντικειμένου από το τρισδιάστατο μοντέλο και διαιρέθηκαν με τις πραγματικές τιμές για να δημιουργηθεί η ψευδοκλίμακα.

Πίνακας 5: Δημιουργία ψευδοκλίμακας ξύλου

	Πραγματικές Τιμές	Τρισδιάστατες Τιμές	Ψευδοκλίμακα (Πραγμ.Τιμές / Τρισδ.Τιμές)
Μήκος	14	1.95668	7.1549768
Πλάτος	8.5	1.10833	7.669196
Ύψος	7	1.00078	6.99454426

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

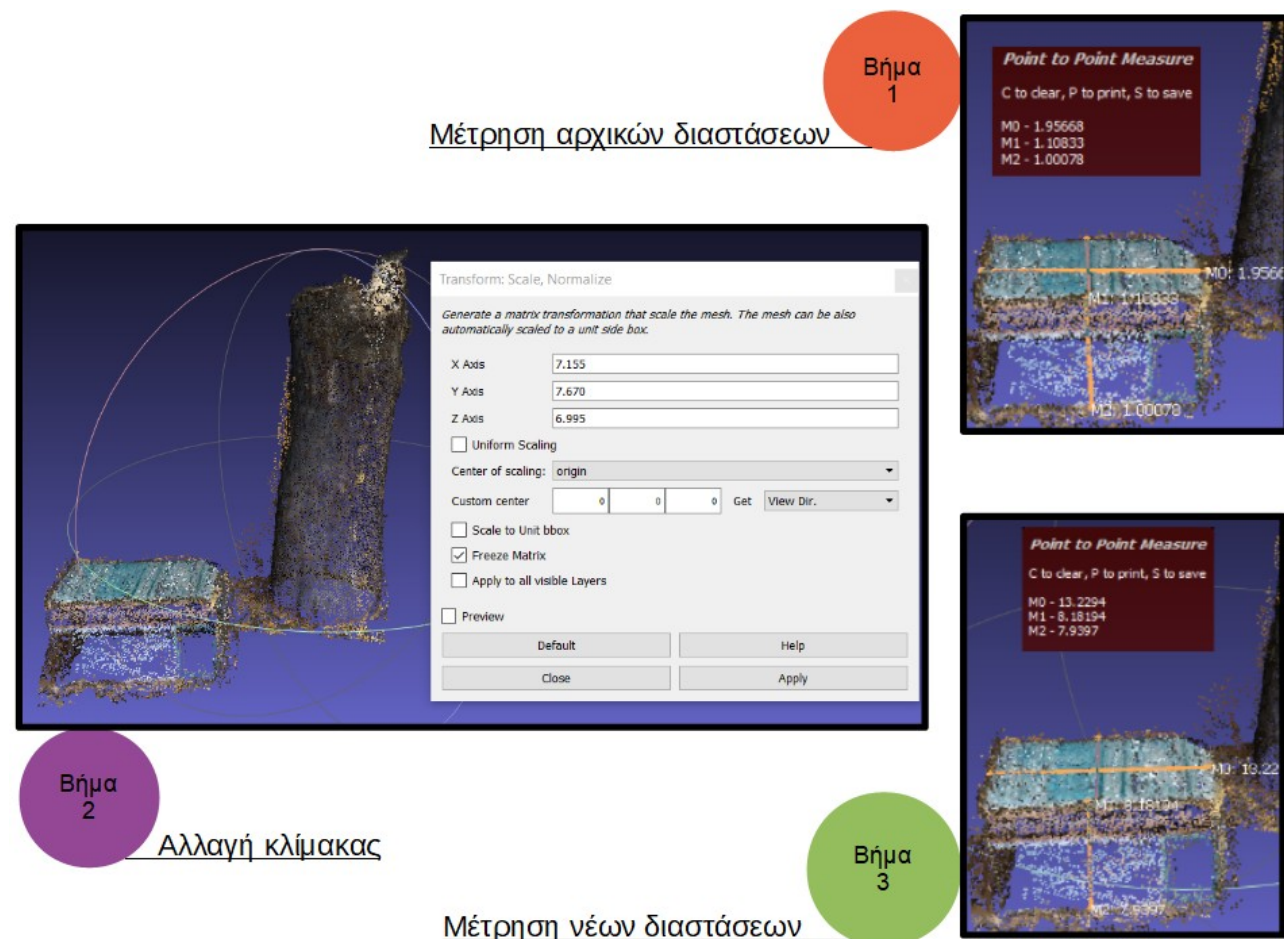
Αφού υπολογίστηκε η ψευδοκλίμακα στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Transform: Scale, Normalize του MeshLab για την αλλαγή της κλίμακας των τριών διαστάσεων. Αμέσως μετά συγκρίθηκαν οι νέες τρισδιάστατες τιμές με τις πραγματικές τιμές.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα ψευδοκλίμακας ξύλου

	Πραγματικές Τιμές	Τρισδιάστατες Τιμές
Μήκος	14	13.2
Πλάτος	8.5	8.2
Ύψος	7	7.9

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι οι νέες τρισδιάστατες τιμές πλησιάζουν αρκετά τις πραγματικές τιμές. Το μεγαλύτερο σφάλμα το παρουσιάζει το ύψος με το ποσοστό να φτάνει το 12,9%. Αμέσως μετά έρχεται το μήκος με το σφάλμα να φτάνει το 5,7%. Το πλάτος έχει το μικρότερο σφάλμα με 3,5%.



Εικόνα 22: Διαδικασία αλλαγής κλίμακας του ξύλου μέσω MeshLab

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

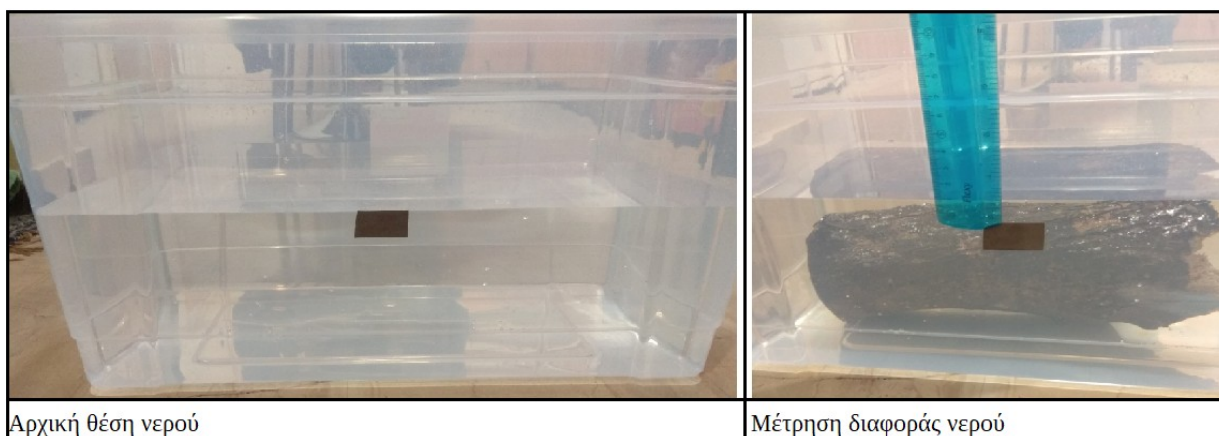
Αμέσως μετά την αλλαγή της κλίμακας έχουμε την δημιουργία της επιφάνειας και τον υπολογισμό του όγκου. Για την κατασκευή της επιφάνειας, αρχικά σβήστηκε το γνωστό αντικείμενο και έμεινε μόνο το κομμάτι ξύλου. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της επιφάνειας ήταν η “compute normals for point sets” και η “screened poisson surface reconstruction”. Αφού δημιουργήθηκε η επιφάνεια, στην συνέχεια υπολογίστηκε ο όγκος του δέντρου μέσω της εντολής “compute geometric measure”.



Εικόνα 23: Δημιουργία επιφάνειας και υπολογισμός όγκου του ξύλου

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Στην συνέχεια, για τον εντοπισμό του σφάλματος σε σχέση με τον πραγματικό όγκο χρησιμοποιήθηκε η Αρχή του Αρχιμήδη. Αρχικά το ξύλο τοποθετήθηκε μέσα σε πλαίσιο με νερό. Ο πραγματικός όγκος του ξύλου ισούται με τον όγκο του νερού που εκτοπίζει. Καθώς το πλαίσιο έχει σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο ο υπολογισμός του όγκου είναι το γινόμενο των τριών διαστάσεων, με την διάσταση του ύψους να τοποθετούμε την διαφορά του νερού.



Εικόνα 24: Βύθιση ξύλου και μέτρηση διαφοράς νερού

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

Σύμφωνα με τις μετρήσεις, το μήκος του πλαισίου ανέρχεται στα 54 εκατοστά, το πλάτος του στα 35 εκατοστά, ενώ η διαφορά του ύψους του νερού μετρήθηκε στο 1,5 εκατοστό. Με το ειδικό βάρος του νερού να είναι ένα υπολογίστηκε ο όγκος του ξύλου στα 2835 cm^3 . Διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια μικρή απόκλιση με τον τρισδιάστατο όγκο του ξύλου που εκτιμήθηκε στα 3100 cm^3 . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αν και χρησιμοποιήθηκε ένα αρκετά “καθαρό” και χωρίς ατέλειες μοντέλο, παρατηρείται ότι το σφάλμα φτάνει το 8,5%. Η χρήση πιο πολύπλοκων δομών στην εύρεση όγκου λογικά θα παρουσιάζουν το ανάλογο σφάλμα. Αφού έχει υπολογιστεί ο όγκος, στην συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η βιομάζα μέσω εξισώσεων συσχέτισης. Έπειτα, με την χρήση αλλομετρικών εξισώσεων και συντελεστών μετατροπής μπορεί να υπολογιστεί ο άνθρακας και το διοξείδιο του άνθρακα.

Συμπεράσματα

Η δομή από κίνηση είναι σχετικά μια νέα μέθοδος εύρεσης της βιομάζας. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη μέθοδο λόγω του χαμηλού κόστους, σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους τηλεπισκόπησης που το κόστος κυμαίνεται σε χιλιάδες ευρώ. Ενδεικτικά, για την υλοποίηση του πρακτικού κομματιού της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε μόνο μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή μέσου κόστους. Παρ' όλα αυτά, η αξιοπιστία μιας μεθόδου κρίνεται από τα αποτελέσματά της. Παρατηρούμε ότι τα τρισδιάστατα μοντέλα που κατασκευάσαμε είχαν ορισμένες ατέλειες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε δέντρου. Όσο πιο πολύπλοκη δομή, με λεπτά κλαδιά και φύλλα, τόσο περισσότερες ατέλειες είχε το μοντέλο (βλέπε εικόνα 13, 14). Παρ' όλα αυτά, ακόμα και με ατέλειες τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αλλομετρικές εξισώσεις με το σφάλμα των διαστάσεων να κυμαίνεται από 2,1% μέχρι 13,8%. Επίσης, σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου είναι η εύρεση του όγκου που έχει άμεση συσχέτιση με την βιομάζα. Για την δημιουργία επιφάνειας απαιτεί τρισδιάστατα μοντέλα χωρίς ατέλειες, που είναι σχεδόν αδύνατο να κατασκευαστούν με την μέθοδο της δομής από κίνηση, ειδικά για πολύπλοκες δομές δέντρων (βλέπε εικόνα 19). Ακόμα και στο παράδειγμα που χρησιμοποιήσαμε για την εύρεση του όγκου, αν και το μοντέλο ήταν αρκετά ικανοποιητικό, χρειάστηκε να καθαριστούν ορισμένες ατέλειες μέσω του προγράμματος MeshLab για την δημιουργία της επιφάνειας. Επομένως, η εύρεση όγκου μέσω της μεθόδου της δομής από κίνηση γίνεται μόνο σε πολύ απλές δομές δέντρων.

Έκτος από τις δυσκολίες και τα προβλήματα που παρουσιάζει το πρόγραμμα στο στάδιο της υλοποίησης, η δομή από κίνηση έχει αρκετές απαιτήσεις στο στάδιο της συλλογής δεδομένων. Πολύ σημαντικός παράγοντας για την απόκτηση κατάλληλων δεδομένων είναι οι καιρικές συνθήκες. Καθώς το αντικείμενο - στόχος πρέπει να είναι σταθερό στην διαδικασία συλλογής των δεδομένων, συνθήκες με δυνατό αέρα και βροχή μπορούν να επηρεάζουν το σχήμα του αντικειμένου. Στην εφαρμογή με τα δέντρα αυτό σημαίνει κουνημένα κλαδιά τα οποία δύσκολα θα αποτυπωθούν στο τρισδιάστατο μοντέλο καθώς το πρόγραμμα δεν θα μπορεί να εντοπίσει “σημεία κλειδιά” μεταξύ των φωτογραφιών. Επίσης, συνθήκες με έντονη ηλιοφάνεια προκαλούν σκιές που δημιουργούν πρόβλημα στην διαδικασία της κατασκευής του τρισδιάστατο μοντέλου. Ενδεικτικά οι Miller, κ.α. (2015), παρουσιάζουν όπως φαίνεται παρακάτω την δυσκολία αποτύπωσης τμήματος του κορμού ενός δέντρου λόγω ηλιοφάνειας. Λόγω της σκιάς που δημιουργείται το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται σαν μαύρη επιφάνεια με αποτέλεσμα πολλές λεπτομέρειες να χάνονται.



Εικόνα 25: Δυσκολία αποτύπωσης τμήματος επιφάνειας λόγω σκιών που δημιουργήθηκαν από το φως του ήλιου

Πηγή: Miller κ.α. (2015)

Επομένως, οι καιρικές συνθήκες είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζουν άμεσα την κατασκευή του μοντέλου. Οι φωτογραφίες πρέπει να συλλέγονται κάτω από ορισμένες καιρικές συνθήκες, όπως νεφοκάλυψη, και σε σύντομη χρονική διάρκεια για να μην υπάρχουν αλλαγές στις σκιές του ήλιου που θα επηρεάσουν το μοντέλο.

Πίνακας 7: Αξιολόγηση μεθόδου δομής από κίνηση

	1	2	3	4	5
Το κόστος της μεθόδου είναι χαμηλό σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εύρεσης της βιομάζας;					☑
Υπήρχε ικανοποιητική απεικόνιση των τρισδιάστατων μοντέλων;				☑	
Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αλλομετρικές εξισώσεις;				☑	
Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της βιομάζας μέσω εναλλακτικών τρόπων, όπως ο υπολογισμός όγκου;		☑			
Υπάρχουν προβλήματα στην συλλογή δεδομένων;			☑		
Υπάρχουν προβλήματα στην απεικόνιση συγκεκριμένων επιφανειών;			☑		

Πηγή: Επεξεργασία από τον συγγραφέα

* Η βαθμολογία της μεθόδου βασίστηκε στην εμπειρία και στις απόψεις του συγγραφέα

** 1= πολύ χαμηλό, 2 = χαμηλό, 3 = μέτρια, 4 = ικανοποιητικό, 5 = πολύ ικανοποιητικό

Έχοντας αποκτήσει μια γενική εικόνα της μεθόδου της δομής από κίνηση παρατηρούμε ότι μπορεί να αξιοποιηθεί με “ασφάλεια” σε αλλομετρικές εξισώσεις και να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση, λόγω χαμηλού κόστους, της μεθόδου που βασίζεται σε επιτόπιες δειγματοληπτικές μετρήσεις, καθώς και σε περιπτώσεις της μεθόδου LiDAR με εφαρμογή σε περιοχές με πολύ μικρή έκταση. Από την άλλη πλευρά, είναι προς το παρόν αδύνατον η συγκεκριμένη μέθοδος να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές μικρής κλίμακας και να “ανταγωνιστεί” τις μεθόδους που αφορούν τις δορυφορικές εικόνες και τα συστήματα radar.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

1. Κάρταλης, Κ. & Φείδας, Χ. (2006). *Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*. Εκδοτική Γκιούρδας, Β.
2. Κουσκούριδας, Ρ., & Μπελαγιάννης, Β. (2009). *Συγκριτική Μελέτη Αλγορίθμων Εξαγωγής Χαρακτηριστικών*. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ρομποτικής, ΤΕΕ, Αθήνα, 23-24 Φεβρουαρίου, 2009. Διαθέσιμο στο: http://library.tee.gr/digital/m2376/m2376_kouskouridas.pdf
3. Μερτίκας, Π, Σ. (2009). *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*. Ίων
4. Ρούσσου, Ν, Ο. (2009). *Χαρτογράφηση και Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση Καύσιμης Ύλης για Διαχείριση Πυρκαγιών με Χρήση Δορυφορικών Εικόνων Υψηλής Ανάλυσης και Εργαλείων Γεωπληροφορικής*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: http://www.latsis-foundation.org/content/actions/action_324/inline/ell/actionInline_324_5552fd602ce18.pdf

Ξενόγλωσση

1. Arif, R., & Essa, K. (2017). *Evolving Techniques of Documentation of a World Heritage Site in Lahore*. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W5.
2. Balenović, I., Alberti, G., & Marjanovic, H. (2006). *Airborne Laser Scanning - the Status and Perspectives for the Application in the South-East European Forestry*. SEEFOR 4 (2): 59-79.
3. Basuki, M, T., Laake van, E, P. Skidmore, A,K & Hussin, Y,A (2009). *Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical*. Forest Ecology and Management 257 (8)~1684-1694.
4. Boehler, W., Heinz, G., & Marbs, A. (2001). *The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording*. Διαθέσιμο στο: https://pdfs.semanticscholar.org/766a/6474e82a23035fd07f2b0044754881b38e99.pdf?_ga=2.94696027.691506310.1550134189-1523165777.1550134189
5. Bombelli, A., Avitabile, V., ... Wulder, M. (2009). *Biomass*. Rome: Global Terrestrial Observing System. Διαθέσιμο στο: <http://www.fao.org/docrep/pdf/012/i1238e/i1238e00.pdf>
6. Botsch, M., & Pauly, M. (2008). *Geometric Modeling Based on Polygonal Meshes*. Διαθέσιμο στο: https://lgg.epfl.ch/publications/2008/botsch_2008_GMPeg.pdf

7. Calders, K., Newnham, G., Armston, J., Disney, M., Schaaf, C., & Paynter, I. (2015). *Terrestrial LIDAR for forest monitoring*. Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/285206663_Terrestrial_LIDAR_for_forest_monitoring

8. Carter, J., Schmid, K., Waters, K., Betzhold, L., Hadley, B., Mataosky, R., & Halleran, J. (2012). *Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications*. National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center.
 Διαθέσιμο στο:
http://www.academia.edu/6731830/Lidar_101_An_Introduction_to_Lidar_Technology_Data_and_Applications_National_Oceanic_and_Atmospheric_Administration_NOAA_Coastal_Services_Center_Coastal_Geospatial_Services_Division_Coastal_Remote_Sensing_Program

9. Carvajal, M., Mota, C., Alacaraz-Lopez, C., Iglesias, M., & Martinez-Ballesta, M.,C. *Investigation Into CO2 Absorption of the most Representative Agricultural Crops of the Region of Murcia*. CSIC
 Διαθέσιμο στο: http://www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_ingles.pdf

10. Cho, H., Hong, S., Kim, S., Park, H., Park, I., & Sohn, H.G. (2015). *Application of a Terrestrial LiDAR System for Elevation Mapping in Terra Nova Bay, Antarctica*. *Sensors* 15(9), 23514-23535

11. Cignomi, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., & Ranzuglia, G. (2008). *MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool*. Sixth Eurographics Italian Chapter Conference, page 129-136, 2008

12. Dittmann, S., Thiessen, E., & Hartung, E. (2017). *Applicability of different non-invasive methods for tree mass estimation: A review*. *Forest Ecology and Management*, Volume 398 (2017), Pages 208-215.

13. Ebrahim, M. (2011). *3D Laser Scanners: History, Applications, and Future*. Assiut University.
 Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/267037683_3D_LASER_SCANNERS_HISTORY_APPLICATIONS_AND_FUTURE

14. Ekman, P., (2017). *Scene Reconstruction from 3D Point Clouds*. Aalto University. Διαθέσιμο στο: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/29233>
15. Fonstad, A. M., Dietrich, T. J., Courville, C. B., & Jensen, J. (2001). *Topographic Structure from Motion*. *Earth Surf. Process. Landforms* 38, 421–430.
16. Fritz, A., Kattenborn, T., & Koch, B. (2013). *UAV-based Photogrammetric Point Clouds-Tree Stem Mapping in open Stands in Comparison to Terrestrial Laser Scanner Point Clouds*. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W2, 2013.
17. Galidaki, G., Zianis, D., Gitas, I., Radoglou, K., Karathanassi, V., Tsakiri-Strati, M., Woodhouse, I., & Mallinis, G. (2016). *Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem*. *International Journal of Remote Sensing*, 2017 Vol. 38, No. 7, 1940–1966.
18. Gatziolis, D., & Andersen, E. H. (2008). *A Guide to LIDAR Data Acquisition and Processing for the Forests of the Pacific Northwest*. USDA, General Technical Report PNW-GTR-768. Διαθέσιμο στο: https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr768.pdf
19. Hairiah, K., Sitompul, SM., Noordwijk van, M., Palm, C. (2001). *Methods for sampling carbon stocks above and below ground*. Indonesia:International Centre for Research in Agroforestry. Διαθέσιμο στο: <https://scholar.google.com/citations?user=CjiIgQAAAAJ>
20. Hixon, W. S., Lipo, P. C., Hunt, L. T., & Lee, C. (2017). *Using Structure from Motion Mapping to Record and Analyze Details of the Colossal Hats (Pukao) of Monumental Statues on Rapa Nui (Easter Island)*. Society for American Archaeology. Διαθέσιμο στο: https://orb.binghamton.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=anthropology_fac
21. Jaramillo, G. V., Fries, A., Zeilinger, J., Homeier, J., Paladines-Benitez, J., & Bendix, J. (2018). *Estimation of Above Ground Biomass in a Tropical Mountain Forest in Southern Ecuador Using Airborne LiDAR Data*. *Remote Sens.* 2018, 10(5), 660;
22. Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). *Screened Poisson Surface Reconstruction*. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(3), 29, 2013
23. King, A., & Panchal, J. (2017). *Analysis of Keypoint Detection Algorithm for Space-Based SFM*. CSCI8820 Computer Vision-Spring 2017. Διαθέσιμο στο: http://jugalpanchal.com/paper_upload/Research_Report_Final%20Revision_2017.pdf
24. Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). *Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance*. *Sensors (Basel)*. 2012; 12(9): 11712-11733.

25. Kumar, L., & Mutanga, O. (2017). *Remote Sensing of Above-Ground Biomass*. Remote Sens. 2017, 9(9), 935;
26. Kurchania, K, A. (2012). *Biomass Conversion. The Interface of Biotechnology, Chemistry and Materials Science. Chapter 2: Biomass Energy*. Berlin, Heidelberg: Springer .
Διαθέσιμο στο: <https://www.springer.com/la/book/9783642284175>
27. Lindell, M. (2015). *Biomass removals from the forest*. SVEAKOG. Διαθέσιμο στο: <https://www.sveaskog.se/globalassets/trycksaker/foretagsinformation/7-biomass-removals-from-the-forest.pdf>
28. Lingner, S., Thiessen, E., Muller, K., & Hartung, E. (2018). *Dry Biomass Estimation of Hedge Banks: Allometric Equation vs. Structure from Motion via Unmanned Aerial Vehicle*. Journal of Forest Science, 64, 2018 (4): 149–156.
29. Lowe, G, D. (2004). *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. International Journal of Computer Vision, November 2004, Volume 60, Issue 2, pp 91-110.
30. Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). *A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods*. International Journal of Digital Earth, Volume 9, 2016 – Issue 1.
31. Lung, V, N. (2012). *Estimation of biomass for calculating carbon storage and CO2 sequestration using remote sensing technology in Yok Don National Park, Central Highlands of Vietnam*, J. Viet. Env. 2012, Vol. 3, No. 1, pp. 14-18
32. Mackey, B. (2014). *Counting trees, carbon and climate change*, The royal statistical society
Διαθέσιμο στο: <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1740-9713.2014.00720.x>
33. Mahmud, K., Mariethoz, G., Treble, C, P., & Baker, A. (2015). *Terrestrial LiDAR Survey and Morphological Analysis to Identify Infiltration Properties in the Tamala Limestone, Western Australia*. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Volume: 8, Issue: 10.
34. Manuri, S., Brack, C., Noor'an, F., Rusolono, T., Anggraini, M, S., Dotzauer, H., & Kumara, I. (2016). *Improved allometric equations for tree aboveground biomass estimation in tropical dipterocarp forests of Kalimantan, Indonesia*. Forest Ecosystems 2016 3:28.
35. Mate, R., Johansoon T., & Almeida, S. (2014). *Biomass Equations for Tropical Forest Tree Species in Mozambique*. Forests 2014, 5(3), 535-556;

36. McPherson, G. E., & Simpson, R. J. (1999). *Carbon Dioxide Reduction Through Urban Forestry: Guidelines for Professional and Volunteer Tree Planters*, Albany, California: United States Department of Agriculture
 Διαθέσιμο στο: https://www.fs.fed.us/psw/topics/urban_forestry/products/cufr_43.pdf
37. Melin, M., Shapiro, A., & Kapfer-Glover, P. (2017). *Lidar for Ecology and Conservation*. WWF Conservation Technology Series 1(3). Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/320347018_LiDAR_for_ecology_and_conservation_-_WWF_Conservation_Technology_Series_3
38. Mercer, B., Zhang, Q., Schwaebisch, M., & Denbina, M. (2010). *Estimation of Forest Biomass from an Airborne Single-Pass L-Band Pol-Insar System*. Commission I, WG I/2. Διαθέσιμο στο: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/03/03_04_Paper_120.pdf
39. Micheletti, N., Chandler, H. J., & Lane, N. S. (2015). *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry*. British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques, Chap. 2, Sec. 2.2 (2015)
40. Miller, J. (2015). *Estimation of Individual Tree Metrics using Structure – from – Motion Photogrammetry*. University Canterbury.
 Διαθέσιμο στο: <https://core.ac.uk/download/pdf/35472839.pdf>
41. Miller, J., Morgenroth, J., & Gomez, C. (2015). *3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates*. Urban Forest & Urban Greening 14 (2015) 932-940
42. Milne, K. A., Lucas, M. R., Cronin, N., Dong, Y., & Witte, C. (2000). *Forest and Woodland Biomass and Classification Using Airborne and Spaceborne Radar Data*. Amsterdam: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7.
43. Mineo, C., Pierce, G. S., & Summan, R. (2018). *Novel algorithms for 3D surface point cloud boundary detection and edge reconstruction*. Journal of Computational Design and Engineering, Volume 6, Issue 1, January 2019, Pages 81-91.
44. Morgenroth, J., & Gomez, C. (2013). *Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique—A proof of concept*. Urban Forestry & Urban Greening 13 (2014), 198-203;

45. Muukkonen, P., & Heiskanen, J. (2015). *Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories*. Remote Sensing of Environment 107(4):617-624.
46. Olofsson, K., & Holmgren, J. (2017). *Tree Stem and Canopy Biomass Estimates from Terrestrial Laser Scanning Data*. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W3, 2017.
47. Rahman, M., Koch, B., Csaplovics, E. (2008). *Satellite estimation of forest carbon using regression models*. International Journal of Remote Sensing Vol. 29, No. 23, 10 December 2008, 6917-6936.
48. Rathore, A. (2013). *Climate Change Impacts: Vegetation and Plant Responses in Gujarat*, Gujarat University. Διαθέσιμο στο: <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/handle/10603/28052>
49. Rane, D, A., Bhawe, G, S., Narkhede, S., & Burondkar, M, M. (2017). *Quantification of CO2 Absorption Rates of Few Tropical Trees of Konkan Region of Maharashtra*, Advanced Agricultural Research & Technology Journal: Vol. I, Issue I, January 2017
50. Roy, S, P., & Ravan, A, S. (1996). *Biomass estimation using satellite remote sensing data—An investigation on possible approaches for natural forest*. J. Biosci., Vol.21, Number 4, June 1996, pp 535-561.
51. Russo, J. (2011). *Terrestrial Mobile LiDAR Scanning (TMLS) and Static Scanning Combined*. LiDAR Magazine, Vol.1, No.2.
52. Saatchi, S., Marlier, M., Chazdon. L, R., Clark, B, D. (2011). *Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass*. Remote Sensing of Environment Volume 115(11): 2836-2849.
53. Santos, R, J., Gama, F, F., & Bispo, C, P. (2014). *Estimating Forest Biomass by Remote Sensing Radar Data in Brazil*. Drenwo 2014, Vol. 57, No. 192.
54. Singh, M., Malhi, Y., & Bhagwat, S. (2014). *Biomass estimation of mixed forest landscape using a Fourier transform texture-based approach on very-high-resolution optical satellite imagery*. International Journal of Remote Sensing 35:9, 3331-3349.
55. Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, K, L., Nathawat, S, M. (2015). *A review of radar remote sensing for biomass estimation*. Int. J. Environ. Sci. Technol. (2015) 12:1779–1792.
56. Steder, B. *The Point Cloud Library PCL*, University of Freiburg. Διαθέσιμο στο: <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/teaching/ws10/robotics2/pdfs/rob2-12-ros-pcl.pdf>

57. Stovall, A., Anderson-Teixeira, J. K., & Shugart, H. H. (2018). *Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry*. *Forest Ecology and Management*, Volume 427, 1 November 2018, Pages 217-229.
58. Tanago, G. J., Lau, A., ... Calders, K. (2017). *Estimation of Above-Ground Biomass of Large Tropical Trees with Terrestrial LiDAR*. *Methods in Ecology and Evolution* / Volume 9, Issue 2, Pages 207-209.
59. Torres, C. J., Romo, C., Arroyo, G., Haro, De J. (2012). *3D Digitization using Structure from Motion*. Spanish Computer Graphics Conference. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/258246473_3D_Digitization_using_Structure_from_Motion
60. Vashum, T. K., & Jayakumar, S. (2012). *Methods to Estimate Above-Ground Biomass and Carbon Stock in Natural Forests - A Review*. *J. Ecosyst Ecogr* 2012, 2:4.
61. Wandering, U. (2006). *Introduction to Lidar*. Leibniz Institute for Tropospheric Research
Διαθέσιμο στο: <http://home.ustc.edu.cn/~522hyl/%B2%CE%BF%BC%CE%C4%CF%D7/lidar/introduction%20to%20lidar1.pdf>
62. Weinmann, M. (2016). *Reconstruction and Analysis of 3D Scenes*. Switzerland: Springer International Publishing.

Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/301542305_Reconstruction_and_Analysis_of_3D_Scenes_-_From_Irregularly_Distributed_3D_Points_to_Object_Classes
63. Westoby, j. M., Brasington, J., Glasser, F. N., & Hambrey, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 (2012), 300-314.
64. Wu, C. (2011). *VisualSFM: A Visual Structure From Motion System*. Διαθέσιμο στο: <http://ccwu.me/vsfm/>
65. Wu, C. (2013). *Towards Linear-time Incremental Structure From Motion*. University of Washington. Διαθέσιμο στο: <http://ccwu.me/vsfm/vsfm.pdf>
66. Zarco Tejada, P. j., Varela-Diaz, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). *Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle*

(UAV) and automatic 3Dphoto-reconstruction methods. Europ. J. Agronomy 55 (2014), 89-99.

67. Zhang, J., Boutin, M., & Aliaga, G, D. (2006). *Robust Bundle Adjustment for Structure from Motion*. Purdue University.

Διαθέσιμο στο: <https://www.cs.purdue.edu/cgvlab/papers/aliaga/icip06.pdf>