



**Biodiversity
Greece**

LIFE EL-BIOS
Hellenic Biodiversity Information System
www.biodiversity-greece.gr

Tel: +30 210 5241903 (int.: 129)
Email: info@biodiversity-greece.gr



PROJECT	LIFE18 GIE/GR/000899
PROJECT TITLE	Hellenic Biodiversity Information System: An innovative tool for biodiversity conservation
ACRONYM	LIFE EL-BIOS
ACTION	B4
DELIVERABLE NUMBER	D B4.3
DELIVERABLE TITLE	Technical Guide: implications of the emerging RS data for biodiversity management and conservation. Technical guidelines and recommendations to be adopted from NECCA
REPORT STATUS	XXXX
COMPLETION DATE	March 2025
RESPONSIBLE	Aristotle University of Thessaloniki (AUTH)



LIFE EL-BIOS (LIFE20 GIE/GR/001317) has received funding from the LIFE Programme of the European Union.
EU funding contribution: 1.354.524 € (52.68% of total eligible budget).



LIFE EL-BIOS has received funding from GREEN FUND

**COORDINATING
BENEFICIARY**



ARISTOTLE
UNIVERSITY
OF THESSALONIKI



THE GOULANDRIS NATURAL HISTORY MUSEUM
GREEK BIOTOPE/WETLAND CENTRE



**ASSOCIATED
BENEFICIARIES**



ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ:

- ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΠΕΛΛΟΣ, ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ, ΤΑΤΜ/ΑΠΘ
- ΙΩΝ-ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΚΑΡΟΛΟΣ, ΜΕΤΑΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ, ΤΑΤΜ/ΑΠΘ
- ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ, ΤΑΤΜ/ΑΠΘ
- ΕΙΡΗΝΗ ΧΡΥΣΑΦΗ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ, ΤΑΤΜ/ΑΠΘ
- ΕΛΕΝΗ ΦΥΤΩΚΑ, ΕΚΒΥ/ΑΠΘ
- ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΛΛΙΝΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΤΑΤΜ/ΑΠΘ

ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ:

ΤΙΤΛΟΣ ΕΓΓΡΑΦΟΥ:

ΕΛΛΗΝΙΚΑ: Τεχνικός Οδηγός: Επιπτώσεις των αναδυόμενων δεδομένων τηλεπισκόπησης (RS) για τη διαχείριση και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές και συστάσεις που πρέπει να υιοθετηθούν από τον Ο.ΦΕ.ΠΕ.Κ.Α.

ΑΓΓΛΙΚΑ: Technical Guide: implications of the emerging RS data for biodiversity management and conservation. Technical guidelines and recommendations to be adopted from NECCA

Η παρούσα έκδοση εκφράζει αποκλειστικά τις απόψεις των συγγραφέων της.

Ο Εκτελεστικός Οργανισμός για το Κλίμα, τις Υποδομές και το Περιβάλλον (CINEA) και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δε μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνες για οποιαδήποτε χρήση των πληροφοριών που περιέχονται στο παρόν.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ:

- Μπέλλος Κ., Κάρολος Ι.Α., Αλεξανδρίδης Β., Χρυσάφη Ε., Φυτώκα Ε., Μαλλίνης Γ., 2025. Ανάπτυξη υπηρεσιών παρατήρησης γης και έκθεση επικύρωσης Παραδοτέο Δράσης Β.3.. Έργο LIFE EL-BIOS: Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για τη Βιοποικιλότητα: ένα καινοτόμο εργαλείο για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. ΑΠΘ. Σελίδες 76, Θεσσαλονίκη.

SUGGESTED CITATION:

- Bellos K., Karolos I.A., Alexandridis B., Chrysafis I., Fytoka, E. and Mallinis, G., 2025. Technical Guide: implications of the emerging RS data for biodiversity management and conservation. Technical guidelines and recommendations to be adopted from NECCA AUTH, Pages 76, Thessaloniki



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
EXECUTIVE SUMMARY.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	14
1.1 Εικόνες τηλεπισκόπησης για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την βιοποικιλότητα.....	14
1.2 Χρήση τρισδιάστατων δεδομένων (νέφους σημείων) για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την βιοποικιλότητα.....	17
1.2.1 Χρήση επίγειων συστημάτων LiDAR για τη συλλογή πληροφοριών για εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα.....	19
2. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ (UAV).....	21
2.1 Εξοπλισμός και Σχεδιασμός αποστολής.....	21
2.2 Παραδείγματα τέτοιων λογισμικών (και που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο του έργου LIFE ELBIOS) είναι το λογισμικό «UGCS» για την πτήση με το «Matrice 300 RTK» που φέρει LiDAR της εταιρίας “CHCNAV”, το λογισμικό QBase για τις πτήσεις που εκτελούνται με σκάφος σταθερής πτέρυγας της “Quantum Systems” και το λογισμικό DJI Pilot 4 για τις πτήσεις που εκτελούνται με τετρακόπτερο «Mavic 3E. Συλλογή Δεδομένων.....	22
2.2.1 Νομοθεσία και Καιρικές Συνθήκες.....	22
2.2.2 Μετρήσεις στο πεδίο.....	24
2.3 Επιλογή λογισμικών και επεξεργασία δεδομένων.....	25
3. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ LiDAR (TERRESTRIAL LASER SCANNING).....	28
3.1 Συλλογή Δεδομένων.....	28
3.2 Επιλογή λογισμικών και επεξεργασία δεδομένων.....	29
4. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SLAM.....	31
4.1 Συλλογή Δεδομένων.....	31
4.2 Επιλογή λογισμικών και επεξεργασία δεδομένων.....	34
5. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ.....	37
5.1 Διαχείριση, αποθήκευση και οργάνωση ψηφιακών αρχείων.....	37



5.2	Δημιουργία ενιαίων τρισδιάστατων μοντέλων	39
5.3	Εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με τη βιοποικιλότητα από τρισδιάστατα δεδομένα	43
5.3.1	Εξαγωγή πληροφορίας βάση μιας προσέγγισης αναγνώρισης μεμονωμένων δένδρων (Individual Tree Detection - ITD)	44
5.3.2	Εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με τη βιοποικιλότητα, βάση μιας προσέγγισης βάση περιοχής (area-based)	46
5.4	Λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα από επίγεια και εναέρια τρθδδεδομένα νέφους σημείων.....	50
5.4.1	Βιβλιοθήκη LAsTools.....	50
5.4.2	Γλώσσα προγραμματισμού Python	50
5.4.3	Λογισμικό3D Forest	51
5.4.4	3D Fin λογισμικό.....	58
6.	ΟΔΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ	61
6.1	Σύνοψη από τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις για την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων παρατήρησης Γης σε επιχειρησιακό επίπεδο	61
6.1.1	Κύρια οφέλη και πλεονεκτήματα.....	61
6.1.2	Περιορισμοί και προκλήσεις.....	61
6.1.3	Συστάσεις για εφαρμογή	62
6.2	Πλαίσιο εφαρμογής και οδικός χάρτης για την υιοθέτηση και εφαρμογή νέων τεχνολογιών	62
6.2.1	Αξιολόγηση υπαρχόντων δεδομένων και στόχων	63
6.2.2	Αξιολόγηση νέων τεχνολογιών.....	64
6.2.3	Εκτίμηση κινδύνων και μετριάσμός	64
6.2.4	Στρατηγική εφαρμογής.....	65
6.2.5	Αξιολόγηση ακρίβειας και πληρότητας.....	65
6.2.6	Μετάβαση σε ένα σχήμα που ενσωματώνει τις νέες τεχνολογικές μεθόδους	65
6.2.7	Παρακολούθηση, αξιολόγηση και προσαρμογή.....	66
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ AGISOFT METASHARE ΓΙΑ ΤΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ	25
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ	25
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΡΤΑΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce RTX 4090 ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	26
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ LIDAR ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ CHCNAV Copre	26
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΟΥ ΝΕΦΟΥΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΟΛΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΣΕ ΕΓΣΑ 87	27
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CYCLONE REGISTER 360	28
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟΝ ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΑΡΩΤΗ BLK 360 ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΤΡΟΦΙΛΙΑΣ	29
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΥΚΝΟΥ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ LASER SCANNER	30
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AGISOFT METASHARE	33
ΕΙΚΟΝΑ 10: Η ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ "PLOT 4" ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ SLAM ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΙΝΔΟΥ	33
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ SLAM ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗ GNSS	34
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ "GeoSLAM Hub"	35
ΕΙΚΟΝΑ 13: REPORT ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΟΥ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΟΥ SLAM ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΕΓΣΑ 87	36
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	37
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	38
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΤΥΠΟΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΘΕ "PLOT"	38
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΚΡΟΚΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΪΟΥ	39
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΌΛΩΝ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ "CLOUD COMPARE"	40
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ΔΕΔΟΜΕΝΑ SLAM (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ). ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΕΝΑΕΡΙΟ LIDAR (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ)	41
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ SLAM ΜΕ ΓΚΡΙ ΧΡΩΜΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ SLAM ΜΕ ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑ (ΔΕΞΙΑ) ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΕΝΑΕΡΙΑ ΈΓΧΡΩΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ LIDAR (ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ)	41
ΕΙΚΟΝΑ 21: (1) ΟΡΘΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΝΑΕΡΙΟΥ LIDAR, (2) ΟΡΘΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΝΑΕΡΙΟΥ LIDAR ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ SLAM, (3) ΟΡΘΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΝΑΕΡΙΟΥ LIDAR ΜΕ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ SLAM	42
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΔΕΝΤΡΩΝ ΑΠΟ ΈΝΑ ΕΝΙΑΙΟ ΝΕΦΟΣ ΔΕΝΤΡΩΝ. (Α) ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ: CBH-ΥΨΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΟΜΗΣ, CH-ΥΨΟΣ ΚΟΜΗΣ, CTH-ΟΛΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΟΜΗΣ, CL-ΜΗΚΟΣ ΚΟΜΗΣ, CW-ΠΛΑΤΟΣ ΚΟΡΥΦΗΣ, CC-ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΕΣ ΚΟΜΗΣ, DBH-ΣΤΗΘΙΑΙΑ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ, TH-ΥΨΟΣ ΔΕΝΤΡΟΥ, ΛΕΥΚΗ ΣΦΑΪΡΑ-ΘΕΣΗ ΔΕΝΤΡΟΥ- (Β) ΔΕΝΤΡΟ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΕΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ: ΘΕΣΗ (ΜΠΛΕ ΣΦΑΪΡΑ), DBH (60.8 CM), TH (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ- 35,6 M) ΚΑΙ ΠΡΟΦΪΛ ΚΟΡΜΟΥ (ΚΙΤΡΙΝΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ)- Γ) ΚΟΜΗ ΔΕΝΤΡΟΥ (ΜΑΥΡΟ ΝΕΦΟΣ) ΠΟΥ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΕΤΑΙ ΑΠΟ CTH (24,9 M), CH (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ- 24,3 M), CL (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ- 14.6 M), CBH (11,3 M), ΤΟ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΕΣ ΤΗΣ ΚΟΜΗΣ (ΠΟΡΤΟΚΑΛΪ ΣΦΑΪΡΑ) ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΪΠΕΔΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΤΟΥ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΣΦΑΪΡΑ) ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ- Δ) ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΚΥΡΤΟ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ (CONVEX HULL) ΤΗΣ ΚΟΜΗΣ ΜΕ ΌΓΚΟ (2009 M3) ΚΑΙ ΕΠΪΦΑΝΕΙΑ (866 M2) ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΠΡΟΒΟΛΗ ΣΤΟ ΕΠΪΠΕΔΟ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΕΠΪΦΑΝΕΙΑ (133,5 M2)- Ε) ΚΌΙΛΟ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ (CONCAVE HULL) ΤΗΣ ΚΟΜΗΣ ΜΕ ΌΓΚΟ (803 M3) ΚΑΙ ΕΠΪΦΑΝΕΙΑ (1617 M2) ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΠΡΟΒΟΛΗ ΣΤΟ ΕΠΪΠΕΔΟ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΪΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ (113,4 M2). (ΠΗΓΗ TROCHTA ET AL. 2017)	45
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΕΚΑΤΟΣΤΗΜΟΡΙΑ ΥΨΟΥΣ Η- PERCENTILES: Α) P-20, Β) P-40, Γ) P-60, Δ) P-80)	46
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΥΨΟΣ ΚΟΜΗΣ (CANOPY HEIGHT) (M)	47
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΟΜΗΣ (CANOPY DENSITY) (%)	48
ΕΙΚΟΝΑ 26: Α) ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑ (SKEWNESS) Β) ΚΥΡΤΩΣΗ (KURTOSIS)	49
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑΣ VERTICAL COMPLEXITY INDEX	49
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΟΥ ΈΡΓΟΥ ΣΤΟ 3DFOREST	53
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΪΝΑΚΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ 3DFOREST	53
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D FOREST	53
ΕΙΚΟΝΑ 31: ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ/ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ	54
ΕΙΚΟΝΑ 32: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΪΠΕΔΩΝ ΜΕ ΣΗΜΕΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΒΛΆΣΤΗΣΗΣ, ΚΑΘΨ ΚΑΙ ΤΑ ΕΠΪΜΈΡΟΥΣ ΕΠΪΠΕΔΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΔΈΝΔΡΩΝ	54
ΕΙΚΟΝΑ 33: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΙΣΆΓΕΙ Ο ΧΡΪΣΤΗΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D FOREST	55
ΕΙΚΟΝΑ 34: ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΑ ΔΈΝΔΡΑ ΕΝΤΨ ΜΪΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	56



ΕΙΚΟΝΑ 35: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 36: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ (ΠΛΑΓΙΑ ΌΨΗ) ΜΕ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΑ ΔΈΝΔΡΑ	57
ΕΙΚΟΝΑ 37: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΑ ΔΈΝΔΡΑ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	57
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΕΙΣΑΓΩΓΉ ΝΈΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΉΙΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΉΝ	58
ΕΙΚΟΝΑ 39: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΉΙΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΉΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΣΤΕΛΈΧΟΥΣ, ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΤΟΜΕΑ (SECTION) ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΤΟΜΕΩΝ.....	59
ΕΙΚΟΝΑ 40: ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ 3Δ VOXEL ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΉΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΆΛΛΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΉΝ	59
ΕΙΚΟΝΑ 41: ΟΔΙΚΟΣ ΧΆΡΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΚΤΙΚΉ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΉΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΉΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΧΉΡΑΣ ΜΕ ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΜΕΘΉΔΟΥΣ (ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΉ ΒUETTEL ET AL. 2025, SΤΕΡΗNSON, 2020).	63



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣ ΕΞΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΔΕΝΔΡΟ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D FOREST	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΟΜΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΔΕΝΔΡΟ	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D FIN	58



ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΑ	
IMU	Αδρανειακό Σύστημα
ΑΓΓΛΙΚΑ	
ALS	Airborne laser scanning
CBH	Canopy Base Height
CC	Canopy Cover
CH	Canopy Height
CHM	Canopy Height Model
CL	Crown Length
CTH	Canopy Top Height
CW	Crown Width
DBH	Diameter at Breast Height
DR	Discrete returns
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
FW	Full waveform
GNSS	Global navigation satellite system
LiDAR	Light Detection And Ranging
NRTK	Network Real Time Kinematic
PPK	Post Processing Kinematic
RHT	Randomized Hough Transform
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TH	Tree Height
TLS	Terrestrial Laser Scanning
UAV	Unoccupied Air Vehicle
VCI	Vertical Complexity Index



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν τεύχος συντάχθηκε στα πλαίσια της ΔΡΑΣΗΣ Β.4 «Καινοτόμες τεχνολογίες και προσεγγίσεις για την εξαγωγή πληροφοριών για τη βιοποικιλότητα, σε 2 επιλεγμένους Εθνικούς Δρυμούς της Ελλάδας (ένας ορεινός και ένας υγρότοπος/παράκτιος)», του έργου LIFE EL-BIOS (LIFE20 GIE/GR/001317) «hELIenic BIOodiversity Information System: an innovative tool for biodiversity conservation», το οποίο συγχρηματοδοτείται από το Πρόγραμμα LIFE της Ευρωπαϊκής Ένωσης και υλοποιείται με συντονιστή το Πράσινο Ταμείο και συνδικαιούχους τον Οργανισμό Φυσικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΟΦΥΠΕΚΑ), το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης-Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, το Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Γουλανδρή / Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΜΓΦΙ-ΕΚΒΥ), το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας-Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, το Ευρωπαϊκό Θεματικό Κέντρο του Πανεπιστημίου της Μάλαγα (ETC-UMA) στην Ισπανία και την εταιρεία OLYMPOS CONSULTING P.C.

Η Δράση αποτελείται από πέντε επιμέρους υποδράσεις:

B.4.1 Καινοτόμες μέθοδοι απόκτησης δεδομένων και εξαγωγής πληροφοριών (τηλεπισκόπηση, Παρατήρηση Γης, ασύρματοι αισθητήρες, LiDAR) στην πilotική τοποθεσία Α (ορεινή): Εθνικό Πάρκο Πίνδου.

B.4.2 Καινοτόμες μέθοδοι απόκτησης δεδομένων και εξαγωγής πληροφοριών (τηλεπισκόπηση, Παρατήρηση Γης, ασύρματοι αισθητήρες, LiDAR) στην πilotική τοποθεσία Β (υγρότοπος/παράκτια): Κοτύχι – Στροφυλιά Εθνικός Δρυμός Υγροτόπων.

B.4.3 Επίδειξη των επιπτώσεων και των πλεονεκτημάτων για τη διαχείριση και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, από την χρήση καινοτόμων μεθόδων απόκτησης δεδομένων και εξαγωγής πληροφοριών.

Η υποδράση B.4.3 επικεντρώνεται στην ανάδειξη των επιπτώσεων και των πλεονεκτημάτων καινοτόμων μεθόδων απόκτησης δεδομένων Τηλεπισκόπησης (RS) και εξαγωγής πληροφοριών, για τη διαχείριση και διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Μέσω μιας διαδικασίας σύντηξης πληροφοριών και σύνθεσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν σε κάθε pilotική περιοχή, μαζί με τα διαθέσιμα δεδομένα σε εθνικό επίπεδο (δεδομένα αναφοράς βιοποικιλότητας, δεδομένα Παρατήρησης Γης - ΕΟ), πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των αποτελέσματα των αναλύσεων στις δύο pilotικές περιοχές από την ομάδα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, σε συνεργασία με τις ομάδες του ΕΚΒΥ, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας Γουλανδρή / Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΜΓΦΙ-ΕΚΒΥ) και της εταιρείας OLYMPOS CONSULTING. Η αξιολόγηση αυτή οδήγησε στη σύνταξη της παρούσας τεχνικής έκθεσης, η οποία επισημαίνει την εγκυρότητα των εφαρμοζόμενων μεθόδων και καθορίζει τον οδικό χάρτη για την τακτική εφαρμογή τους στις προστατευόμενες περιοχές υψηλής προστασίας και διατήρησης της χώρας.

Η παρούσα έκθεση με τίτλο «Τεχνικός Οδηγός: Επιπτώσεις των αναδυόμενων δεδομένων τηλεπισκόπησης (RS) για τη διαχείριση και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές και συστάσεις που πρέπει να υιοθετηθούν από τον Ο.Φ.Ε.Π.Ε.Κ.Α»,



παρουσιάζει τις εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Β.4.3 και διαρθρώνεται σε επτά κύριες ενότητες:

Η Ενότητα 1 επικεντρώνεται στο θεωρητικό πλαίσιο χρήσης φασματικών δεδομένων μέσω δορυφορικών αισθητήρων και δεδομένων νέφους σημείων μέσω τεχνικής LiDAR, για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την βιοποικιλότητα.

Η Ενότητα 2 αναφέρεται στις κατευθυντήριες γραμμές για την απόκτηση, διαχείριση και επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων όπως εικόνες Sentinel και Planet score. Όπως επίσης παρουσιάζεται η σημασία της συλλογής δεδομένων πεδίου για την ανάπτυξη μοντέλων βιοποικιλότητας και άλλων δασικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη δασική βιοποικιλότητα.

Η Ενότητα 3 εστιάζει στην παραγωγή δεδομένων νέφους σημείων από διαφορετικούς επίγειους και ενεργητικούς σαρωτές και πλατφόρμες, καθώς επεξηγούνται οι δύο βασικές κατηγορίες ανάλυσης αυτών των δεδομένων α) την αναγνώριση μεμονωμένων δέντρων (Individual Tree Detection) και β) την ανάλυση βάση περιοχής (area-based).

Η Ενότητα 4 καλύπτει τις κατευθυντήριες γραμμές για την απόκτηση, διαχείριση δεδομένων από Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV). Δίνονται οδηγίες για τον εξοπλισμό και τον σχεδιασμό των αποστολών. Αναφέρονται οι νομικοί και καιρικοί περιορισμοί και παρέχονται συστάσεις για τον προγραμματισμό της αποστολής και των μετρήσεων στο πεδίο. Επίσης, στην ίδια ενότητα παρουσιάζονται λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων UAV.

Η Ενότητα 5 αναφέρεται στις κατευθυντήριες γραμμές για την απόκτηση, διαχείριση δεδομένων με Terrestrial Laser Scanner, ενώ παρουσιάζεται το λογισμικό "Cyclone Register 360" για την επεξεργασία αυτών των δεδομένων.

Η Ενότητα 6 αναφέρεται στις κατευθυντήριες γραμμές για την απόκτηση, διαχείριση δεδομένων με την τεχνολογία SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) για τη δημιουργία 3D μοντέλων και αποτύπωση τοπογραφικών χαρακτηριστικών, ενώ παρουσιάζονται τα λογισμικά, "GeoSLAM Hub" και "GeoSLAM Connect" για την επεξεργασία αυτών των δεδομένων.

Η Ενότητα 7 επικεντρώνεται ειδικότερα στην ανάλυση δεδομένων νέφους για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικών με τη βιοποικιλότητα. Σε αυτή την ενότητα δίνονται οδηγίες για τη διαχείριση, αποθήκευση και οργάνωση των αρχείων, καθώς και για τη δημιουργία ενιαίων τρισδιάστατων μοντέλων από δεδομένα νέφους. Τέλος, περιγράφονται λογισμικά (3D Forest, 3d Fin), βιβλιοθήκες (LAsTools) και η ανάπτυξη λογισμικού με γλώσσα προγραμματισμού για την εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα από επίγεια και εναέρια δεδομένα νέφους σημείων.



EXECUTIVE SUMMARY

This report has been prepared in the framework of ACTION B.4 “Innovative technologies and approaches for biodiversity information extraction in 2 selected National Parks of Greece (one mountainous and one wetland/coastal)” of the project EL-BIOS hELlenic BIOodiversity Information System: an innovative tool for biodiversity conservation, which is co-funded by the LIFE Programme of the European Union and implemented by the Green Fund and co-beneficiaries, the Organisation for the Natural Environment and Climate Change (NECCA), the Aristotle University of Thessaloniki-Department of Surveying and Surveying Engineering, the Goulandris Natural History Museum/Greek Biotope Wetland Centre (EKBY), the University of Thessaly - Department of Electrical and Computer Engineering (DECE), the European Topic Centre of the University of Malaga (ETC-UMA) in Spain and OLYMPOS CONSULTING P. C.

ACTION B.3 is comprised by three discrete sub-actions:

B.4.1 Innovative RS data acquisition and information extraction (remote sensing, EO, wireless sensors, Lidar) over pilot site A (mountainous): Pindos National Park.

B.4.2 Innovative RS data acquisition and information extraction (remote sensing, EO, Lidar) over pilot site B (wetland / Coastal): Kotychi Strofylia Wetlands National Park.

B.4.3 Demonstration of implications and advantages for management and conservation through innovative RS data acquisition and information extraction.

Sub-action B.4.3 focuses on highlighting the implications and advantages of innovative remote sensing (RS) data acquisition and information extraction methods for biodiversity management and conservation.

Through an information fusion procedure and the synthesis of data collected from each pilot site, along with available nationwide data (biodiversity baseline data, Earth Observation - EO data), an evaluation of the analysis results for the two pilot areas was conducted by the team of Aristotle University of Thessaloniki, in collaboration with the teams of Goulandris Natural History Museum/Greek Biotope Wetland Centre (EKBY), the University of Thessaly, and the company OLYMPOS CONSULTING P. C. This evaluation led to the preparation of the present technical report, pointing out the validity of the applied methods and defines the roadmap for their routine implementation across protected areas of high conservation value in the country.

This report entitled “Technical Guide: implications of the emerging RS data for biodiversity management and conservation. Technical guidelines and recommendations to be adopted from NECCA”, provides a synopsis of the work undertaken under sub-actions B.4.3.

This deliverable is divided into seven main sections.

Section 1 provides an overview of the theoretical framework for the utilization of spectral data from satellite sensors and point cloud data acquired through LiDAR technology, with the objective of extracting information related to biodiversity.



Section 2 provides guidelines for the acquisition, management, and processing of satellite data, such as Sentinel and PlanetScope imagery. Additionally, it highlights the importance of field data collection for the development of biodiversity models and other forest parameters related to forest biodiversity.

Section 3 focuses on the generation of point cloud data from various terrestrial and active scanners and platforms. The section elucidates the two primary categories of analysis for such data: (a) Individual Tree Detection (ITD) and (b) area-based analysis.

Section 4 covers the guidelines for acquiring and managing data from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems. It provides instructions on equipment selection and mission planning, while also addressing the legal and weather constraints. Additionally, it offers recommendations for mission execution and field measurements. The section also presents software for the processing of UAV data.

Section 5 outlines the guidelines for acquiring and managing data using a Terrestrial Laser Scanner and introduces the "Cyclone Register 360" software for processing these data.

Section 6 provides guidelines for acquiring and managing data using SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) technology for the creation of 3D models and the mapping of topographic features. In addition, the section presents the software "GeoSLAM Hub" and "GeoSLAM Connect" for processing these data.

Section 7 is specifically concerned with the analysis of point cloud data for the purpose of extracting information related to biodiversity. The section provides comprehensive instructions on the management, storage, and organisation of files, as well as the creation of unified three-dimensional models from point cloud data. Furthermore, it offers a detailed description of software tools such as 3D Forest and 3D Fin, along with libraries (Lastools), and the development of software using programming languages to extract biodiversity-related parameters from terrestrial and aerial point cloud data..



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος του έργου «LIFE EL BIOS – Ελληνικό Πληροφοριακό Σύστημα Βιοποικιλότητας: Ένα καινοτόμο εργαλείο για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας (LIFE20 GIE / GR / 001317)» είναι η δημιουργία μιας εθνικής βάσης δεδομένων βιοποικιλότητας, με τη μορφή μιας γεωπύλης ελεύθερης πρόσβασης, η οποία θα συνδυάζει τις σημαντικότερες ελληνικές βάσεις δεδομένων βιοποικιλότητας που σήμερα είναι αποσυνδεδεμένες μεταξύ τους. Στη συνέχεια, αυτές οι πληροφορίες θα συνδυαστούν με τηλεσκοπικά δεδομένα, δεδομένα που προέρχονται από ασύρματους αισθητήρες πεδίου και δεδομένα δειγματοληψίας πεδίου σε πιλοτικές τοποθεσίες του Δικτύου Natura 2000.

Στο τεύχος αυτό θα αναλυθεί η διαδικασία της λήψης και επεξεργασίας δεδομένων πεδίου, δορυφορικών, εναέριων και επίγειων τρισδιάστατων δεδομένων σε δύο (2) ξεχωριστές δασικές τοποθεσίες στον Ελλαδικό χώρο. Πρόκειται για ένα απαιτητικό εγχείρημα, τόσο σε επιστημονικό επίπεδο όσο και ως προς την εφαρμογή του στο πεδίο, που απαιτεί συνδυασμό τεχνογνωσίας, οργάνωσης και προσαρμοστικότητας στις εκάστοτε συνθήκες.

Συνοπτικά, οι στόχοι αυτής της ενότητας εργασιών στο πλαίσιο του έργου ELBIOS ήταν (ερευνητικοί στόχοι):

1. Η διερεύνηση της δυνατότητας εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με τη βιοποικιλότητα, αξιοποιώντας διαθέσιμα **δορυφορικά δεδομένα** πολλαπλής κλίμακας
2. Η διερεύνηση της δυνατότητας εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με τη βιοποικιλότητα, ακολουθώντας μια προσέγγιση **αναγνώρισης μεμονωμένων δέντρων**, αξιοποιώντας διαθέσιμα ανοικτά λογισμικά, βιβλιοθήκες και νέφη σημείων από ένα σχετικά νέο σύστημα καταγραφής (SLAM, TLS), το οποίο επιτυγχάνει ευελιξία στο πεδίο και οικονομία χρόνου.
3. Η διερεύνηση της δυνατότητας εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με τη βιοποικιλότητα, ακολουθώντας μια προσέγγιση **ανάλυσης βάση περιοχής**, αξιοποιώντας διαθέσιμα ανοικτά λογισμικά, βιβλιοθήκες και νέφη σημείων από ένα επίγειο σύστημα καταγραφής (SLAM, TLS), με αναγνωρισμένη αξία προς την ακρίβεια καταγραφής δεδομένων.
4. Η διερεύνηση της δυνατότητας εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με τη βιοποικιλότητα, ακολουθώντας μια προσέγγιση **αναγνώρισης μεμονωμένων δέντρων**, αξιοποιώντας διαθέσιμα ανοικτά λογισμικά, βιβλιοθήκες, αξιοποιώντας τη **συγχώνευση πληροφορίας** από νέφη σημείων SLAM και εναέριου αισθητήρα LiDAR (UAV-LiDAR).
5. Η διερεύνηση της δυνατότητας εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με τη βιοποικιλότητα, ακολουθώντας μια προσέγγιση **ανάλυσης βάση περιοχής**, αξιοποιώντας τη **συγχώνευση πληροφορίας** από νέφη σημείων SLAM και εναέριου αισθητήρα LiDAR (UAV-LiDAR).
6. Η διερεύνηση των **περιορισμών** και των **ευκαιριών** που υφίστανται ως προς τη συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων νέφους σημείων για την **εξαγωγή πληροφοριών για τη κατακόρυφη δομή** σχετικά με τη βιοποικιλότητα σε **προστατευόμενες, χερσαίες δασικές περιοχές**.

Στο παρόν τεύχος ακολουθεί η καταγραφή και ανάλυση ορισμένων ζητημάτων που ενδέχεται να προκύψουν τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο και τα οποία ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της έρευνας. Η αναγνώρισή τους αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη διαχείριση των σχετικών κινδύνων και την ενίσχυση της συνολικής επιστημονικής εγκυρότητας του έργου.



1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

1.1 Εικόνες τηλεπισκόπησης για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την βιοποικιλότητα

Η βιοποικιλότητα αποτελεί τη βάση για την υγεία των οικοσυστημάτων και των υπηρεσιών που παρέχουν στην κοινωνία. Ωστόσο, η βιοποικιλότητα μειώνεται ραγδαία σε παγκόσμιο επίπεδο, παρά τις δεσμεύσεις των κυβερνήσεων να μειώσουν τον ρυθμό απώλειας (Butchart et al., 2010). Η παρακολούθηση είναι βασικό στοιχείο της διατήρησης της βιοποικιλότητας, καθώς επιτρέπει στις κυβερνήσεις και την κοινωνία των πολιτών να εντοπίζουν προβλήματα, να αναπτύσσουν λύσεις και να αξιολογούν την αποτελεσματικότητα των δράσεων και την πρόοδο προς την επίτευξη των στόχων της Aichi, που τέθηκαν από τη Σύμβαση για τη Βιολογική Ποικιλότητα (O'Connor et al., 2015)(Turner et al., 2015)

Η αξιολόγηση της βιοποικιλότητας στο χερσαίο περιβάλλον διεξάγεται παραδοσιακά με επιτόπιες έρευνες πεδίου και άμεσες παρατηρήσεις σε δειγματοληπτικές επιφάνειες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μια μικρή περιοχή από την οποία προκύπτουν γενικά συμπεράσματα για τις συνολικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι παρουσιάζουν εγγενείς αδυναμίες που μπορούν να εμποδίσουν την πλήρη κατανόηση των οικοσυστημάτων.

Μία σημαντική περιοριστική παράμετρος είναι ότι οι παρατηρητές μπορεί να εισάγουν υποκειμενικότητα στη διαδικασία συλλογής δεδομένων, οδηγώντας σε μεροληπτικά αποτελέσματα και μειώνοντας την αξιοπιστία και την ακρίβεια του συνόλου δεδομένων. Επιπλέον, το εύρος των επιτόπιων ερευνών είναι από τη φύση του περιορισμένο. Συχνά, η πλήρης κάλυψη μεγάλων περιοχών είναι ανέφικτη, αφήνοντας σημαντικά τμήματα των οικοσυστημάτων χωρίς παρακολούθηση και εμποδίζοντας την κατανόηση των προτύπων και τάσεων της βιοποικιλότητας. Η μεγάλη απαίτηση πόρων για τις άμεσες παρατηρήσεις και τις επιτόπιες έρευνες αποτελεί μια πρόσθετη πρόκληση, καθώς αυτές οι μέθοδοι απαιτούν σημαντικούς οικονομικούς και ανθρώπινους πόρους, οι οποίοι μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμοι, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με περιορισμένες δυνατότητες. Επίσης, η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται μέσω άμεσων παρατηρήσεων και ερευνών πεδίου μπορεί να είναι περίπλοκη και χρονοβόρα.

Συνολικά, ενώ οι άμεσες παρατηρήσεις και οι επιτόπιες έρευνες έχουν αποτελέσει πολύτιμα εργαλεία στην παρακολούθηση της βιοποικιλότητας, οι περιορισμοί τους καθιστούν αναγκαία την εξερεύνηση καινοτόμων προσεγγίσεων για τη βελτίωση της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας των δεδομένων.

Η αντιμετώπιση μιας παγκόσμιας πρόκλησης, όπως η απώλεια της βιοποικιλότητας, απαιτεί τη συγκέντρωση παγκόσμιων πληροφοριών σε πολλαπλές χωρικές και χρονικές κλίμακες. Τα προϊόντα τηλεπισκόπησης έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν συνεχή χωροχρονική πληροφόρηση σχετικά με βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των οργανισμών, βελτιώνοντας έτσι τόσο τη χρήση όσο και την ακρίβεια αυτών των μοντέλων βιοποικιλότητας για σκοπούς διαχείρισης και σχεδιασμού (Randin et al., 2020).

Η τηλεπισκόπηση μέσω δορυφορικών εικόνων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη δημιουργία συνεκτικών αρχείων παρατήρησης των βασικών παραγόντων αλλαγής της βιοποικιλότητας (δηλαδή, της δυναμικής της κάλυψης και χρήσης γης, των κλιματικών μεταβλητών και των συνθηκών της επιφάνειας της θάλασσας) από το τοπικό έως το παγκόσμιο επίπεδο (Hansen and Loveland, 2012).



Με αυξανόμενο εύρος δορυφορικών αισθητήρων, συνεχώς βελτιωμένη ανάλυση και συχνές ενημερώσεις δεδομένων, οι δορυφόροι πλέον αποτελούν έναν τεράστιο πόρο για την παρατήρηση του πλανήτη Γη και η δορυφορική τηλεπισκόπηση έχει αναδειχθεί ως ζωτικό εργαλείο για την παρακολούθηση της κατάστασης περιβαλλοντικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη διατήρηση της βιοποικιλότητας (Buchanan, G. M., Nelson, A., Mayaux, P., Hartley, A., & Donald, 2009; Pettorelli et al., 2014a).

Επιπλέον, την αυξανόμενη ελεύθερη διαθεσιμότητα των δορυφορικών-δεδομένων και την παροχή λογισμικών επεξεργασίας, η εφαρμογή φασματικών εικόνων για την παρακολούθηση της δυναμικής της κάλυψης γης έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία και σπουδαιότητα.

Οι δορυφορικές εικόνες προσφέρουν

- Ολοκληρωμένη εικόνα εκτενών και συχνά δυσπρόσιτων περιοχών, προσφέροντας μια ευρύτερη χωρική προοπτική και μια πιο ολιστική κατανόηση της κατανομής της βιοποικιλότητας.
- Συχνές και συνεχείς ενημερώσεις σχετικά με δυναμικές περιβαλλοντικές αλλαγές και γεγονότα, κάτι που είναι κρίσιμο για την αποτελεσματική διατήρηση των οικοσυστημάτων.
- Έγκαιρη ανίχνευση υποβάθμισης και απώλειας οικοτόπων, εισβολής ξενικών ειδών και άλλων απειλών προς τα οικοσυστήματα, επιτρέποντας προληπτική παρέμβαση πριν οι απειλές γίνουν πιο σοβαρές.
- Συνοχή ψηφιακών δεδομένων, που σε συνδυασμό με επιτόπιες επαληθεύσεις, εξασφαλίζει υψηλό επίπεδο ακρίβειας και αξιοπιστίας στις πληροφορίες που συλλέγονται.
- Αυτοματοποιημένη αποδοτικότητα, καθώς η τεχνητή νοημοσύνη βελτιώνει την επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων, προσφέροντας προηγμένες αναλυτικές δυνατότητες και μια ισχυρή βάση για τη λήψη αποφάσεων.
- Οικονομική αποδοτικότητα, καθώς η τηλεπισκόπηση μέσω δορυφόρων μειώνει την ανάγκη για δαπανηρές επιτόπιες έρευνες και επανδρωμένες αποστολές, καθιστώντας την παρακολούθηση της βιοποικιλότητας πιο οικονομικά βιώσιμη, επεκτάσιμη και μη παρεμβατική.

Υπάρχουν αρκετές προσπάθειες χαρτογράφησης και παρακολούθησης βιοποικιλότητας, χρησιμοποιώντας δορυφορικά πολυφασματικά δεδομένα όπως Landsat (Fernández-García et al., 2021) (Madonsela et al., 2017), Sentinel-2 (Agrillo et al., 2021; Hauser et al., 2021), PlanetScope (Marzalletti et al., 2021), MODIS (Pinto-Ledezma and Cavender-Bares, 2021), Kompsat (Andries et al., 2021), σε διαφορετικές κλίμακες και τύπους οικοσυστημάτων. Δορυφορικά πολυφασματικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την τοπική καταχώρηση ειδών (alpha-diversity) (Chrysafis et al., 2020; Mallinis et al., 2020), τη μέτρηση και την παρακολούθηση άλλων συνιστωσών της ποικιλότητας, όπως γάμα και βήτα ποικιλότητα (Arekhi et al., 2017; Khare et al., 2019), δείκτες βιοποικιλότητας (Pastick et al., 2020), και λειτουργική ποικιλότητα φυτικών ειδών (Ma et al., 2019; Zhao et al., 2021), τα πρότυπα λειτουργίας των οικοσυστημάτων και τη σύνθεση, τη φαινολογία της βλάστησης (Reddy, 2021)

Διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για την ποσοτικοποίηση της φασματικής ποικιλότητας των δεδομένων τηλεπισκόπησης και τη συσχέτισή της με τη βιοποικιλότητα στο έδαφος, βασιζόμενες σε φασματικά βελτιωμένες εικόνες (Gould, 2000; Nagendra et al., 2010; Warren



et al., 2014) χωρικά βελτιωμένες εικόνες (Madonsela et al., 2017), πολυμεταβλητούς μετασηματισμούς (Lopes et al., 2017) και προηγμένες τεχνικές ταξινόμησης εικόνας (Khare et al., 2018).

Προϊόντα που παρέχουν τιμές ανάκλασης επιφάνεια της γης (Surface Reflectance - SR) προτιμώνται σε μελέτες βιοποικιλότητας και δασικών οικοσυστημάτων, καθώς αντιπροσωπεύουν την πραγματική ανάκλαση της επιφάνειας, αφαιρώντας τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας, όπως η σκέδαση και η απορρόφηση (Buchanan, G. M., Nelson, A., Mayaux, P., Hartley, A., & Donald, 2009). Σε αντίθεση με την ανάκλαση στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA), η οποία επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η SR επιτρέπει την καλύτερη ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης, της υγρασίας του εδάφους και της κάλυψης γης (Song et al., 2001). Αυτό βελτιώνει την ακρίβεια στην ταξινόμηση της βλάστησης και στον υπολογισμό βιοφυσικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της υγείας των οικοσυστημάτων (Pettorelli et al., 2005). Επιπλέον, η SR χρησιμοποιείται ευρέως σε μοντέλα χαρτογράφησης της βιοποικιλότητας και παρακολούθησης οικοτόπων, καθώς μειώνει τις ασυνέπειες μεταξύ διαφορετικών εικόνων και αισθητήρων, επιτρέποντας συγκρίσεις σε βάθος χρόνου (Zhu et al., 2015).

Η φασματική ανάλυση των δεδομένων είναι κατάλληλη για την εξέταση της φασματικής ποικιλότητας καθώς τα φυτικά είδη παρουσιάζουν ένα σύνολο χαρακτηριστικών που ανταποκρίνονται στο φως σε διαφορετικά μήκη κύματος (Laliberté et al., 2020). Κάθε φυτό διαθέτει μια ξεχωριστή φασματική υπογραφή, δηλαδή έναν συγκεκριμένο τρόπο απορρόφησης και ανάκλασης του φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος, γεγονός που επιτρέπει την αναγνώρισή του μέσω τηλεπισκόπησης. Συγκεκριμένα, στην ορατή περιοχή του φάσματος, η χλωροφύλλη των φυτών απορροφά έντονα το μπλε και το κόκκινο φως, ενώ αντανακλά το πράσινο, εξηγώντας έτσι το χρώμα της βλάστησης. Στο εγγύς υπέρυθρο (NIR), η υγιής βλάστηση παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα λόγω της δομής των κυτταρικών τοιχωμάτων των φύλλων, ενώ σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως στο μεσαίο υπέρυθρο (SWIR), η φασματική υπογραφή επηρεάζεται από την περιεκτικότητα των φυτών σε νερό. Αυτή η διαφοροποίηση στις φασματικές ιδιότητες επιτρέπει τη χαρτογράφηση της βιοποικιλότητας, την αναγνώριση φυτικών ειδών και την ανίχνευση αλλαγών στη βλάστηση λόγω κλιματικών ή ανθρωπογενών επιδράσεων.

Φασματικοί δείκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της μεταβλητότητας στη μοντελοποίηση, η οποία σχετίζεται με τον φωτισμό της σκηνής, το υπόβαθρο του εδάφους, τη μη φωτοσυνθετική βλάστηση και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Chrysafis et al., 2019), ενώ μπορούν να ενισχύσουν τη συσχέτιση ορισμένων χαρακτηριστικών της βλάστησης σε σύγκριση με την αρχική ανακλαστικότητα που καταγράφεται από τον αισθητήρα (Massetti et al., 2016)

Τα μέτρα υφής εικόνων μεσαίας-υψηλής και πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης επιτρέπουν λεπτομερέστερη διάκριση των δομικών χαρακτηριστικών μέσα σε δασικές περιοχές (Schumacher et al., 2016) και του προτύπου της χωρικής μεταβλητότητας (Haralick et al., 1973). Αυτή η μεταβλητότητα θεωρείται ότι αντανακλά μεγαλύτερη περιβαλλοντική ετερογένεια.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορεί να μας πει πολλά για την κατάσταση της βιοποικιλότητας και τις δυνατότητες παρεμβάσεων διατήρησης σε πολλαπλές χωρικές και χρονικές κλίμακες (Pettorelli et al., 2014b) (O'Connor et al., 2015), ωστόσο, η δεν αποτελεί πανάκεια και λίγα μπορούν να επιτευχθούν χωρίς μια ισχυρή κατανόηση του εξεταζόμενου κοινωνικοοικολογικού συστήματος.



Ομοίως, η πρόσβαση σε σχετικές πληροφορίες πεδίου είναι το κλειδί για τη σωστή βαθμονόμηση, ανάλυση και επικύρωση των δορυφορικών εικόνων.

Ομοίως η χρήση εικόνων από εναέρια συστήματα (UAV) παρέχει τη δυνατότητα για ακόμη πιο λεπτομερή καταγραφή και αξιολόγηση της επιφάνειας γης, επιτρέποντας την κατανόηση των οικολογικών διεργασιών. Τα UAV αποτελούν μια ευέλικτη πηγή δεδομένων πολύ υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης και επιτρέπουν τη μελέτη πολλών ειδών της χλωρίδας (Müllerová et al., 2021) αλλά και της πανίδας (Seir 2021 , αξιοποιώντας τη διαθεσιμότητα μικρο-αισθητήρων τελευταίας τεχνολογίας (π.χ. RGB, θερμικών, πολυφασματικών, LiDAR και υπερφασματικών) (Manfreda et al., 2018, Müllerová et al., 2025).

1.2 Χρήση τρισδιάστατων δεδομένων (νέφους σημείων) για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την βιοποικιλότητα

Η ανάλυση νέφους σημείων που προκύπτουν από πολλαπλές πηγές αισθητήρων αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία για την ακριβή εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα. Είναι γνωστό ότι σε αντίθεση με τις κλιματικές συνθήκες οι οποίες καθορίζουν πρωτίστως τη βιοποικιλότητα σε μεγάλη κλίμακα (εκτεταμένες περιοχές), σε μικρότερες κλίμακες, ρόλο στην ποικιλότητα και την κατανομή των ειδών έχει και η δομή της βλάστησης, και ιδιαίτερα εντός χερσαίων περιοχών που καλύπτονται από δασικά οικοσυστήματα (Zellweger et al., 2013a). Ειδικότερα στις δασικές περιοχές, η δομή, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τρισδιάστατο σύμπλεγμα το οποίο διαχωρίζεται συνήθως σε δύο συνιστώσες: την οριζόντια και την κατακόρυφη δομή (Franklin and Van Pelt, 2004, McElhinny et al., 2005). Η κατακόρυφη δομή περιγράφει την κατανομή του κατακόρυφου προφίλ της βλάστησης, ενώ η οριζόντια δομή περιγράφει την κατανομή της βλάστησης κατά την οριζόντια διάσταση μιας δασικής περιοχής. Η δομή της βλάστησης (και η πολυπλοκότητά της) επηρεάζει την εμφάνιση και την κατανομή των ειδών με διάφορους τρόπους: τροποποιεί τις μικροκλιματικές συνθήκες, παρέχει θέσεις αναπαραγωγής, επηρεάζει την κατανομή και τη διαθεσιμότητα των πόρων και των θέσεων και παρέχει προστασία από τα αρπακτικά (Brokaw et al., 1999, LaRue et al., 2019, MacArthur and MacArthur, 1961, Melin et al., 2014). Όταν σε ένα δάσος υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός οικολογικών θέσεων (niches) και περισσότεροι διαθέσιμοι πόροι (δηλαδή μεγαλύτερη δομική ποικιλότητα- structural diversity), είναι πιθανότερο να υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλότητα ειδών από ό,τι σε ένα δάσος με λιγότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά (Stein et al., 2014). Για παράδειγμα, τα ανομήλικα, κηπευτά δάση με μεγάλη μίξη ειδών, παρέχουν περισσότερα μικροενδιαιτήματα σε σχέση με τα ομήλικα δάση (Gilbert and Lechowicz, 2004, Savilaakso et al., 2021). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι η μεταβλητότητα του ανάγλυφου (δηλαδή η τοπογραφία) επηρεάζει την ποικιλότητα των ειδών σε τοπική κλίμακα (Vogeler et al., 2014, Zhou et al., 2015).

Οι τρέχουσες μέθοδοι τηλεπισκόπησης, οι οποίες περιλαμβάνουν και στηρίζονται σε ενεργούς και παθητικούς αισθητήρες, προσφέρουν δεδομένα σχετικά με την οικολογία για την αξιολόγηση της των δασών σε μεγάλη κλίμακα (Turner et al., 2003, Miura and Jones, 2010, Álvarez-Martínez et al., 2018). Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στην τηλεπισκόπηση για τη χαρτογράφηση της βιοποικιλότητας μπορούν γενικά να διαχωριστούν στη μοντελοποίηση των οικοτόπων που φιλοξενούν και υποστηρίζουν τη βιοποικιλότητα, και τη μοντελοποίηση της κατανομής της βιοποικιλότητας. Η χρήση δεδομένων παθητικών οπτικών αισθητήρων τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της βιοποικιλότητας



έχει μελετηθεί εκτενώς τις τελευταίες δεκαετίες και προσφέρει σχετικά δεδομένα για την ταξινόμηση τύπων βλάστησης ή για τον καθορισμό της οριζόντιας δομής του τοπίου (Turner et al., 2003). Ωστόσο, η ποικιλότητα πολλών taxa εξαρτάται επίσης από την κατακόρυφη δομή, η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας αποκλειστικά δεδομένα από οπτικούς αισθητήρες (Vierling et al., 2008). Μια προσέγγιση που επιτρέπει να ξεπεραστούν τέτοιοι περιορισμοί είναι η χρήση της τεχνικής LiDAR (Light Detection And Ranging), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση τόσο της οριζόντιας όσο και της κατακόρυφης δομής της βλάστησης σε κλίμακα τοπίου (Bergen et al., 2009). Η τεχνική LiDAR είναι μια τεχνολογία ενεργητικής τηλεπισκόπησης (active remote sensing). Ως τέτοια, δεν απαιτεί ηλιακή ενέργεια (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) για την καταγραφή της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τα αντικείμενα ενδιαφέροντος (Dubayah and Drake, 2000, Wehr and Lohr, 1999). Αντ' αυτού, ένα όργανο LiDAR εκπέμπει παλμική ακτινοβολία (συνήθως στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος), η οποία στη συνέχεια ανακλάται πίσω από τα αντικείμενα στον αισθητήρα του οργάνου LiDAR. Τα συστήματα LiDAR μπορεί να είναι διαστημικά, εναέρια ή επίγεια. Η αερομεταφερόμενη σάρωση με λέιζερ (Airborne laser scanning-ALS- ή αερομεταφερόμενο LiDAR) χρησιμοποιείται συχνά στη τρισδιάστατη αποτύπωση και εκτίμηση παραμέτρων των οικοσυστημάτων, επειδή αυτή η προσέγγιση μπορεί να καλύψει μεγάλες εκτάσεις. Επιπλέον, τέτοια σύνολα δεδομένων αλλά και όργανα καταγραφής γίνονται ολοένα και πιο διαθέσιμα και οικονομικά προσιτά (Bakx et al., 2019). Γενικότερα, η παλμική ακτινοβολία ενός ALS διαπερνά εν μέρει τη βλάστηση, επιτρέποντας έτσι τη μέτρηση της κατάστασης της κόμης του ανωρόφου και του υπορόφου. Τα δεδομένα LiDAR μπορούν να καταγραφούν είτε ως διακριτές επιστροφές (discrete returns - DR), είτε ως πλήρεις κυματομορφές (full-waveform - FW) είτε ως μεμονωμένα φωτόνια (single photons). Στα συστήματα DR-ALS, καταγράφεται ένας σταθερός αριθμός επιστροφών για κάθε παλμό LiDAR (Wagner et al., 2004). Το σύστημα FW-ALS καταγράφει την κατανομή της επιστρεφόμενης φωτεινής ενέργειας και συχνά περιέχει περισσότερες πληροφορίες από τα δεδομένα DR-ALS (π.χ. Adams et al., 2012). Τα συστήματα LiDAR με διακριτές επιστροφές είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική LiDAR. Οι πληροφορίες που προσφέρονται από το FW-ALS έχει διαπιστωθεί ότι είναι χρήσιμες σε δασοκομικές εφαρμογές που επικεντρώνονται στην ταξινόμηση ειδών, στη μοντελοποίηση μεμονωμένων δέντρων και στην εξαγωγή βιοφυσικών παραμέτρων (Maltamo et al., 2014). Στα συστήματα DR LiDAR, απαιτούνται πολλά (εκατοντάδες ή χιλιάδες) φωτόνια για την αξιόπιστη ανίχνευση ενός και μόνο αντικειμένου. Έχει αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλο για την εκτίμηση των παραδοσιακών χαρακτηριστικών του δάσους (Räty et al., 2022). Στα περισσότερα συστήματα ALS, η απόσταση από το αντικείμενο έως τον αισθητήρα μπορεί να υπολογιστεί με τον προσδιορισμό του χρονικού διαστήματος μεταξύ της αποστολής του παλμού λέιζερ και της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας (echo) (Baltsavias, 1999, Wehr and Lohr, 1999). Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες παρέχονται για κάθε ηχώ με την ενσωμάτωση της μέτρησης του χρόνου και των πληροφοριών από το σύστημα GPS-IMU, το οποίο μετρά την ακριβή θέση και τον προσανατολισμό της πλατφόρμας ALS για κάθε υποβαλλόμενο παλμό LiDAR. Στην ανάλυση ALS σχετίζεται με τα δάση, το πρώτο βήμα επεξεργασίας είναι συνήθως η μοντελοποίηση της επιφάνειας του εδάφους, δηλαδή η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM). Στη συνέχεια, το ύψος της βλάστησης σε σχέση με το έδαφος υπολογίζεται (γενικότερα) με αφαίρεση του DTM από τις τιμές μέγιστου υψομέτρου όπως προσδιορίζεται από την καταγραφόμενη ανάκλαση.



Τα δεδομένα LiDAR προσφέρουν πολλαπλά μέτρα για την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της δομής των οικοτόπων (Bakx et al., 2019, Davies and Asner, 2014, Hill et al., 2013). Σε γενικές γραμμές, πρόκειται για στατιστικά μέτρα που σχετίζονται με τις τιμές ύψους ή/και έντασης της ανάκλασης ενός LiDAR, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν με χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος. Αυτά τα μέτρα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν χονδρικά σε μέτρα ύψους, πυκνότητας και έντασης. Τα μέτρα ύψους μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε μέτρα κατανομής που περιγράφουν την κεντρική τάση (π.χ. μέσος όρος), το σχήμα (π.χ. λοξότητα), τη διασπορά (π.χ. τυπική απόκλιση) και τα εκατοστημόρια της κατανομής ύψους δεδομένων LiDAR. Τα μέτρα πυκνότητας υπολογίζουν το ποσοστό των επιστροφών στους επιμέρους ορόφους της κόμης ή πάνω/κάτω από ένα ορισμένο όριο ύψους. Τα μέτρα έντασης αντιπροσωπεύουν το πλάτος ενός οπισθοσκεδαζόμενου παλμού (backscattered ALS echo or pulse) ALS και εξαρτώνται, για παράδειγμα, από τη γεωμετρία και την ανάκλαση ενός στόχου (κυρίως στα συστήματα LiDAR συνεχούς κυματομορφής). Τα μέτρα που υπολογίζονται από ένα σύστημα FW-ALS είναι ως επί το πλείστον παρόμοια με αυτά που προκύπτουν για ένα σύστημα LiDAR διακριτών επιστροφών.

1.2.1 Χρήση επίγειων συστημάτων LiDAR για τη συλλογή πληροφοριών για για εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα

Η χρήση των επίγειων δεδομένων LiDAR έχει φέρει επανάσταση στη μελέτη της βιοποικιλότητας, επιτρέποντας τη συλλογή λεπτομερών τρισδιάστατων δεδομένων για τη δομή της βλάστησης και του φυσικού περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες όπως το επίγειο Simultaneous Localization and Mapping – SLAM και το Terrestrial Laser Scanning – TLS, έχουν καταστεί κρίσιμα εργαλεία για την εξαγωγή με ακρίβεια παραμέτρων που σχετίζονται με τη βιοποικιλότητα, όπως η δομή του δάσους, η κατανομή των ειδών και η δυναμική της βλάστησης. Συγκεκριμένα, με τη χρήση συστημάτων TLS η δομή τόσο της βλάστησης όσο και του εδάφους μπορεί να μετρηθεί αυτόματα μέσω μαζικών νεφών σημείων XYZ σε τρισδιάστατο χώρο (Liang et al., 2016, Ritter et al., 2017). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του TLS αποτελεί η γρήγορη, αυτόματη και λεπτομερής καταγραφή της δομής του δάσους (Holopainen et al., 2013). Επειδή η τεχνολογία TLS συνδέεται με νέα πρότυπα και πρωτόκολλα, επηρεάζει σταδιακά την παραδοσιακή μεθοδολογία στον τρόπο αξιολόγησης των χαρακτηριστικών της δασικής δομής. Οι πρώτες μελέτες σχετικά με την εφαρμογή του TLS σε απογραφές χερσαίων οικοσυστημάτων αποκάλυψαν τις μεγάλες δυνατότητές του για την εξαγωγή ακριβών μετρήσεων των χαρακτηριστικών των μεμονωμένων δέντρων (Liang et al., 2016), αλλά απαιτείται ακόμη μεγάλη προσπάθεια για την ανάλυση των δεδομένων TLS. Πρόσφατες μελέτες έχουν ερευνήσει και προτείνει διάφορες προσεγγίσεις για την αυτόματη αναγνώριση των θέσεων των δένδρων δειγματοληπτικών επιφανειών, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε αλγορίθμους συστάδων (cluster algorithms) και σε αλγορίθμους προσαρμογής κύκλων (circle fitting algorithms), για την αναγνώριση των κορμών των δένδρων (Olsson et al., 2014). Επίσης, παρόμοιοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την αυτόματη μέτρηση της σθηθιαίας διαμέτρου (DBH), του ύψους δένδρου (tree height) και άλλων σχετικών παραμέτρων βιοποικιλότητας.

Η χρήση TLS αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων νέφους σημείων στο πεδίο έφερε επανάσταση στον τρόπο συλλογής και στην αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, αποτελεί συχνά χρονοβόρα διαδικασία και ορισμένες φορές με ελλιπή απόκτηση δεδομένων λόγω της στατικής θέσης του αισθητήρα κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Για την περαιτέρω βελτίωση της αποτελεσματικότητας



στη συλλογή δεδομένων με τη χρήση συστημάτων σάρωσης laser, η χρήση κινητών επίγειων σαρωτών με ενεργητικούς αισθητήρες LiDAR που υποστηρίζουν σύγχρονες μεθόδους Ταυτόχρονης Ανίχνευσης και Δημιουργίας Χάρτη (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε δασικά οικοσυστήματα, λόγω της ικανότητάς να μετρά πολύπλοκες δασικές περιοχές σε σύντομο χρονικό διάστημα (Collob et.al.,2020, Liang et. Al.,2016, Maltamo et.al.,2011, Chen et.al.,2019). Με το TLS, είναι απαραίτητο να υπάρχουν πολλαπλές θέσεις σάρωσης (δηλαδή, μια προσέγγιση πολλαπλών σαρώσεων) με τεχνητούς στόχους για υψηλά ποσοστά ανίχνευσης και χαμηλά σφάλματα DBH - ακόμη και τότε, υπάρχουν πάντα φαινόμενα σκίασης και μη ανιχνεύσεις. Ωστόσο, οι κινητοί αισθητήρες SLAM προσφέρουν ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση του προβλήματος της απόκρυψης δέντρων και της αδυναμίας μετακίνησης. Αυτό μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο και το κόστος εργασίας. Έρευνες παρουσιάζουν ότι εντός ίσου χρονικού πλαισίου, η περιοχή που μπορεί να διερευνηθεί με τη χρήση του MLS είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την περιοχή που διερευνάται με το TLS (Liang et. Al.,2016).

Καθώς οι αισθητήρες LiDAR μια σημεία διακριτών επιστροφών (discrete returns) μπορούν να παρέχουν αρκετές επιστροφές σήματος ανά παλμό και αρκετά σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο, η κατακόρυφη κατανομή των επιστροφών LiDAR χρησιμοποιείται συχνά για τον χαρακτηρισμό του κατακόρυφου προφίλ της βλάστησης, το οποίο προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη δομή του υπορόφου του δάσους και, ως εκ τούτου, μπορεί να είναι χρήσιμο για την πρόβλεψη τοπικών προτύπων βιοποικιλότητας (Carrasco et.al.,2019). Με τις νέες δυνατότητες των οργάνων LiDAR για τον χαρακτηρισμό των κατακόρυφων προφίλ, ο προσδιορισμός των δομικών στοιχείων σε μια δασική επιφάνεια που συμβάλλουν στην ετερογένεια, όπως μετρούνται από δομικές μεταβλητές: ύψος, διάμετρος κορμού και διάμετρος κόμης. Επίσης, δομικές μεταβλητές που εξάγονται από δεδομένα επίγειας σάρωσης (TLS) για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των δασών, επικεντρώνονται στην ανάλυση μετρικών όπως το ύψος δέντρου (TH), η διάμετρος στο ύψος του στήθους (DBH), τα χαρακτηριστικά της κόμης, ο όγκος του κορμού και η δομή του θόλου. Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του όγκου και της βιομάζας των δέντρων, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των δασών και τις οικολογικές μελέτες (Panagiotidis et.al.,2021).



2. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ (UAV)

2.1 Εξοπλισμός και Σχεδιασμός αποστολής

Η εναέρια αποτύπωση με UAV (Unmanned Air Vehicle ή Unoccupied Air Vehicle) ή ΣμηΕΑ (Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών) όπως είναι γνωστά στα ελληνικά, πέρα από τη χρησιμότητα της μπορεί να γεννήσει πολλά ερωτήματα και προκλήσεις ως προς την αξιοποίησή της. Τα ερωτήματα αυτά ξεκινάνε από το καθαρά πτητικό κομμάτι και καταλήγουν στο κομμάτι της συλλογής δεδομένων. Υπάρχουν πολλοί τύποι μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο εμπόριο, κατασκευασμένοι για διάφορες ανάγκες πολλών επαγγελματικών κλάδων για πολλές και διαφορετικές εφαρμογές (πχ κινηματογράφος, ασφάλεια συνόρων, χαρτογράφηση, αγροτικές εφαρμογές κλπ.).

Συνεπώς, το πρώτο πράγμα που πρέπει να απασχολήσει κάποιον που θέλει να πραγματοποιήσει τέτοιες εργασίες είναι ποιο ακριβώς πρόβλημα κλήθηκε να επιλύσει. Αυτό το στάδιο αν και μοιάζει αυτονόητο είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς αν δεν δοθεί η απαραίτητη βαρύτητα μπορεί να οδηγήσει σε επιλογή λανθασμένου εξοπλισμού και να αποβεί μοιραίο για τις εργασίες.

Το δεύτερο στάδιο του προβλήματος είναι το είδος των δεδομένων που χρειάζεται να συλλέξει κάποιος για τις εργασίες του. Στα UAV μπορούν να προσαρμοστούν διάφορα φορτία (payloads) και με σωστό χειρισμό να επιστρέψουν στον χρήστη τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τα φορτία αυτά μπορεί να είναι κάμερες ή βιντεοκάμερες RGB για φωτογράφιση, μεγάφωνα για αστυνομικές/στρατιωτικές εφαρμογές, θερμικές κάμερες, αισθητήρες LiDAR (Light Detection And Ranging), συστήματα κατάλληλα για μεταφορά προϊόντων κλπ.

Μετά από ενδελεχή μελέτη των αναγκών σε συνδυασμό με το κόστος του εξοπλισμού μπορούν να επιλεγούν διαφορετικά πτητικά συστήματα για τις εργασίες. Για παράδειγμα, σε δασικό περιβάλλον και μάλιστα σε αρκετά έντονο ανάγλυφο (πχ Πίνδου), για ακριβείς τρισδιάστατες (3D) γεωχωρικές πληροφορίες μπορεί να επιλεγούν δύο (2) τετρακόπτερα με φορτία μία RGB κάμερα με μηχανικό κλείστρο και ένα LiDAR σύστημα για λήψη νεφών σημείων.

Οι λόγοι που επιλέγονται τετρακόπτερα και όχι συστήματα σταθερής πτέρυγας (Fixed Wing) είναι πολλοί. Η δυνατότητα των συστημάτων αυτών να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα, χωρίς την ανάγκη για αεροδιαδρόμους είναι εξαιρετικά πολύτιμη για την πραγματοποίηση πτητικών εργασιών σε πολλές διαφορετικές περιοχές στο εσωτερικό ενός δάσους. Ακόμη, ο τρόπος που τα τετρακόπτερα μπορούν να κερδίζουν ή να χάνουν υψόμετρο εύκολα τα καθιστά την ασφαλέστερη επιλογή για περιοχές με έντονα ανάγλυφα. Ένα σκάφος σταθερής πτέρυγας, που αντίστοιχα κερδίζει ή χάνει υψόμετρο προσδευτικά, σε ένα έντονο ανάγλυφο κινδυνεύει να μην προλάβει να ανταποκριθεί στις συνθήκες έγκαιρα και να συγκρουσθεί. Φυσικά αυτός ο κίνδυνος μπορεί να αποφευχθεί να επιλεγεί μεγάλο ύψος πτήσης. Δυστυχώς όμως όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος πτήσης, τόσο χειρότερη είναι η ποιότητα των τελικών συλλεχθέντων γεωχωρικών δεδομένων.

Σχετικά με τα φορτία (payloads), ο λόγος που επιλέγεται η κάμερα RGB και το σύστημα LiDAR είναι καθαρά για την απόκτηση πληροφορίας νέφους σημείων με τη μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα και ακρίβεια. Η τεχνολογία της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης και παραγωγής τρισδιάστατου νέφους σημείων σε συνδυασμό με τη λήψη δεδομένων νέφους σημείων LiDAR ικανών να διαπεράσουν την



κόμη των δένδρων και να φτάσουν να πάρουν σημεία μέχρι το σημείο του εδάφους αποτελούν το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα για τις εναέριες εργασίες.

Τα σκάφη σταθερής πτέρυγας με λειτουργία VTOL (Vertical Take Off Landing), απογειώνονται κάθετα μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια εκτελούν κυκλικές κινήσεις για να πάρει υψόμετρο. Στην πραγματικότητα, χρειάζεται αρκετό χώρο και για την απογείωση και για την προσγείωση. Ωστόσο έχουν τη δυνατότητα του να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση δάσους όπου η κλίση του εδάφους στις περιοχές μελέτης είναι ομαλή (π.χ Στροφυλιά) κρίνεται πως το σκάφος σταθερής πτέρυγας αποτελεί μία λογική επιλογή με γνώμονα του παράγοντες ακρίβεια, ταχύτητα, κόστος και ασφάλεια.

Σε περιοχές έντονου ανάγλυφου, η χρήση σκάφους σταθερής πτέρυγας με λειτουργία VTOL θεωρείται επιλογή που εμπεριέχει μεγάλη ποσότητα ρίσκου και αποφεύγεται η χρήση του. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί τετρακόπτερο για να καλύψει τις φωτογραμμετρικές εργασίες που απαιτούνταν ενώ οι μετρήσεις LiDAR μπορούν πχ να πραγματοποιηθούν με σύστημα 'Matrice 300 RTK' της εταιρίας 'DJI'.

Για τον σχεδιασμό των αποστολών, χρησιμοποιούνται ειδικά λογισμικά». Το λογισμικά αυτά έχουν τη δυνατότητα καθορισμού της πορείας του σκάφους στην περιοχή μελέτης αλλά και του τρόπου που συλλέγει τα δεδομένα, όπως για παράδειγμα:

- Ορισμός σημείου απογείωσης και προσγείωσης
- Ορισμός επικάλυψης φωτογραφιών ή δέσμης LiDAR
- Ταχύτητα καταγραφής φωτογραφιών
- Ταχύτητα Οχήματος
- Γεωπερίφραξη
- Ύψος Πτήσης
- Ορισμός τρόπου προσγείωσης σε περίπτωση χαμηλής μπαταρίας

2.2 Παραδείγματα τέτοιων λογισμικών (και που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο του έργου LIFE ELBIOS) είναι το λογισμικό «UGCS» για την πτήση με το «Matrice 300 RTK» που φέρει LiDAR της εταιρίας «CHCNAV», το λογισμικό QBase για τις πτήσεις που εκτελούνται με σκάφος σταθερής πτέρυγας της «Quantum Systems» και το λογισμικό DJI Pilot 4 για τις πτήσεις που εκτελούνται με τετρακόπτερο «Mavic 3E.Συλλογή Δεδομένων

2.2.1 Νομοθεσία και Καιρικές Συνθήκες

Αρχικά, δεν μπορεί να υπάρξει συλλογή εναέριων δεδομένων με ΣμηΕΑ (Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών) αν δεν υπάρξει η αντίστοιχη αδειοδότηση από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ). Για να υπάρξει αδειοδότηση, πρέπει να υποβληθεί σχέδιο πτήσης με τα όρια της περιοχής που θα κινηθεί το αεροσκάφος, το χρονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο θα εκτελέσει τις πτήσεις καθώς και το μέγιστο ύψος πτήσης. Το εκάστοτε σύστημα οφείλει να ανήκει στην ανοικτή κατηγορία (συστήματα κάτω των 25 κιλών που δεν φέρουν επικίνδυνα φορτία) και να τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Ο χειριστής (remote pilot) έχει απευθείας οπτική επαφή με το ΣμηΕΑ.



- Οι πτήσεις εκτελούνται μόνο με μη επανδρωμένα αεροσκάφη με μέγιστη μάζα κατά την απογείωση (MTOM) μικρότερη των 25 κιλών.
- Η πτητική λειτουργία μη επανδρωμένων αεροσκαφών στις «απαγορευμένες περιοχές για τις πτήσεις μη επανδρωμένων αεροσκαφών» αλλά και σε απαγορευμένες /περιορισμένες περιοχές (Prohibited/Restricted Areas) όπως έχουν οριστεί για επανδρωμένα αεροσκάφη, απαγορεύεται.
- Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη που ίπτανται σε «Προσωρινές Αποκλειστικές Περιοχές (Temporary Segregated Areas) για την πτήση ΣμηΕΑ πρέπει να συμμορφώνονται προς τους ισχύοντες περιορισμούς.
- Το μεγαλύτερο επιτρεπόμενο ύψος πτήσης των ΣμηΕΑ της «ανοικτής» κατηγορίας είναι τα 400 πόδια (FT) από την επιφάνεια του εδάφους ή της μέσης στάθμης της θάλασσας.
- Ο χειριστής είναι υπεύθυνος για την ασφαλή πτητική λειτουργία και τη διατήρηση ασφαλούς απόστασης τουλάχιστον πενήντα μέτρων πλευρικά τόσο από μη εμπλεκόμενα πρόσωπα καθώς επίσης από περιουσίες στο έδαφος.
- Τα ΣμηΕΑ της «ανοικτής» κατηγορίας δεν επιτρέπεται να εκτελούν πτήση επάνω από συγκεντρώσεις προσώπων ή σε πλευρική απόσταση μικρότερη από 150μ.
- Ο εκμεταλλεόμενος (ιδιοκτήτης, κάτοχος, μισθωτής-operator) και ο χειριστής (remote pilot) του ΣμηΕΑ εγγράφεται σε ειδικό Μητρώο (Ιδιοκτητών, κατόχων, μισθωτών και χειριστών ΣμηΕΑ) το οποίο τηρείται στην αρμόδια Διεύθυνση της Αεροπορικής Αρχής (ΥΠΑ/Δ2-Διεύθυνση Πτητικών Προτύπων).
- Ο ιδιοκτήτης του ΣμηΕΑ είναι υπεύθυνος για ζημίες έναντι τρίτων, σε περίπτωση δε επαγγελματικής χρήσης, για την κάλυψη των ζημιών απαιτείται ασφαλιστήριο συμβόλαιο.
- Κάθε ΣμηΕΑ φέρει σε εμφανές σημείο τοποθετημένο στη βασική δομή πινακίδιο αναγνώρισης στο οποίο αναγράφονται ο κατασκευαστής, και ο αριθμός σειράς κατασκευής.

Η ερευνητική ομάδα κατάλληλα πιστοποιημένη κατά EASA (European Union Aviation Safety Agency) ευθυγραμμίζεται απολύτως με τις υποδείξεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελληνικής νομοθεσίας και πριν από κάθε πτητική δραστηριότητα συντάσσει έγγραφο το οποίο διαβιβάζει στις αρμόδιες αρχές ζητώντας αδειοδότηση για πτητικές δραστηριότητες σε συγκεκριμένη περιοχή σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Φυσικά η διαδικασία πρέπει να υλοποιηθεί αρκετά νωρίτερα (μερικές εβδομάδες) την ημερομηνία εκτέλεσης της κάθε πτήσης. Ακόμη είναι απαραίτητη άδεια από τον εκάστοτε φορέα διαχείρισης (πχ Εθνικό Πάρκο Πίνδου) καθώς και σύντομη περιγραφή της πτητικής δραστηριότητας, αριθμός εκμεταλλεομένου καθώς και στιγμιότυπο οθόνης από την εφαρμογή «Drone Aware» η οποία αποτελεί είναι ένα πληροφοριακό σύστημα πραγματικού χρόνου της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ) για τις πτήσεις Συστημάτων μη-Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) στην Ελλάδα. Το “DAGR” (Drone Aware GR) παρέχει πληροφορίες στους χειριστές και εκμεταλλεομένους ΣμηΕΑ σχετικά με τους περιορισμούς πτήσεων και δίνει τη δυνατότητα αποστολής αιτημάτων πτήσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως η ερευνητική ομάδα πολλές φορές ενώ ακολουθεί την παραπάνω χρονοβόρα διαδικασία, μερικές μέρες πριν την πτητική δραστηριότητα, οι καιρικές προβλέψεις που γίνονται διαθέσιμες μπορεί να μην είναι ευνοϊκές συνθήκες (πχ βροχές ή ισχυρούς ανέμους), σε αυτή την περίπτωση πρέπει να επαναληφθεί όλος ο σχεδιασμός για νέες ημερομηνίες. Αυτό δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στον σχεδιασμό των μετρήσεων πεδίου καθώς η χρονική αβεβαιότητα είχε ως αποτέλεσμα η ομάδα να



προετοιμάζεται και τελικά να μην μπορεί να υλοποιήσει τις μετρήσεις για αρκετές φορές. Αυτό δημιουργεί καθυστερήσεις και σύγχυση καθώς και ζητήματα οικονομικής φύσεως.

Συνοπτικά, οι νομικοί και καιρικοί περιορισμοί αυξάνουν το επίπεδο δυσκολίας προγραμματισμού της αποστολής των μετρήσεων στο πεδίο. Ορθό είναι πριν ξεκινήσει κανείς να βγει στο πεδίο, πρέπει να κάνει ενδελεχή έλεγχο της υπάρχουσας νομοθεσίας, να ακολουθήσει πιστά τις υποδείξεις και να κινητοποιηθεί αρκετά νωρίτερα από το διάστημα που επιθυμεί να βρίσκεται στο πεδίο για να πάρει τις προβλεπόμενες αδειοδοτήσεις. Ως προς το πρόβλημα των καιρικών συνθηκών, το μόνο που μπορεί να κάνει κάποιος είναι μία ορθολογική επιλογή ημερομηνιών (άνοιξη ή ακόμα καλύτερα καλοκαίρι) και να παρακολουθεί συνεχώς πηγές μετεωρολογικών δεδομένων, έτσι ώστε να παραμένει συνεχώς όσο πιο ενημερωμένος γίνεται για να έχει χρόνο να ρυθμίσει τις όποιες οργανωτικές αστοχίες ενδέχεται να προκύψουν στην πορεία.

2.2.2 Μετρήσεις στο πεδίο

Ένα σημαντικό πρόβλημα που μπορεί να προκύψει κατά τις μετρήσεις πεδίου η έλλειψη αντίληψης και καλής γνώσης του χώρου. Η επιλογή των δειγματοληπτικών περιοχών με βάση μόνο τα υφιστάμενα χαρτογραφικά υπόβαθρα (πχ. χάρτες τύπων οικοτόπων) και την ερμηνεία εικόνων υψηλής ευκρίνειας ως προς την προσβασιμότητα οδηγεί σε σημαντική καθυστέρηση και στην πλοήγηση στο πεδίο των επιμέρους ομάδων και την αποτύπωση στις θέσεις δειγματοληψίας.

Η έλλειψη καλής γνώσης του χώρου πυροδοτεί ένα κύμα χρονικής πίεσης που αυξάνει εκθετικά το άγχος του ανθρώπινου δυναμικού για την πορεία των μετρήσεων και οδηγεί σε λήψη βιαστικών και πολλές φορές λανθασμένων αποφάσεων και περιττών ρίσκων. Μετρήσεις υπό την πίεση του χρόνου, πολλαπλές αποτυχημένες προσπάθειες εντοπισμού κατάλληλων σημείων απογείωσης και προσγείωσης, προβλήματα επικοινωνίας είναι μερικά από τα ζητήματα που μπορεί να προκύψουν. Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν είναι η έλλειψη σήματος κινητής τηλεφωνίας, παράγοντας που είναι απαραίτητος για τη λειτουργία των δεκτών GNSS για την επίλυση RTK. Αυτό οδηγεί αν και τελικώς μπορεί να οδηγήσει σε αυτοσχεδιασμούς στο πεδίο, οι οποίοι εν τέλει θα φέρουν το σωστό αποτέλεσμα (τοποθέτηση στόχων για εξάρτηση των επίγειων συστημάτων και προσδιορισμός τους από το αποτέλεσμα των γεωαναφερμένων αποτελεσμάτων των εναέριων αποτυπώσεων μέσω της μεθόδου PPK) καθυστερούν σημαντικά τη διαδικασία των μετρήσεων στο πεδίο καθώς αυξάνεται ο βαθμός πολυπλοκότητας των διαδικασιών.

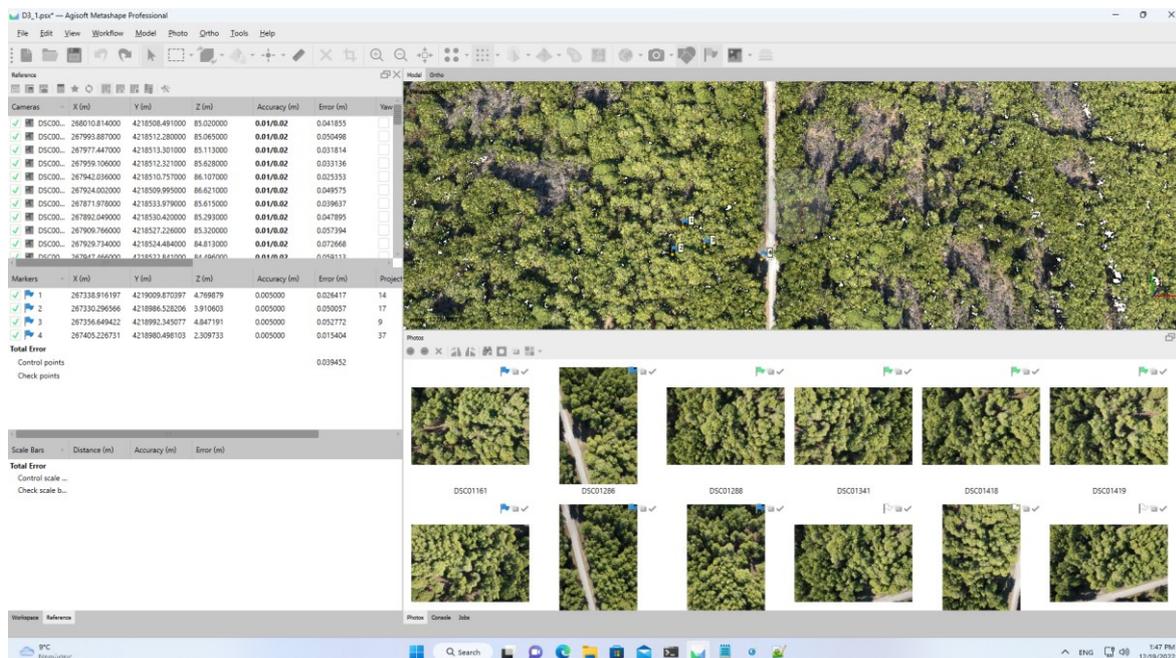
Συνεπώς, υπογραμμίζεται την αξία της επίσκεψης του πεδίου πριν την έναρξη των μετρήσεων, καθώς είναι ο μόνος τρόπος να αποκτήσει κανείς πλήρη αντίληψη των συνθηκών που επικρατούν.

Σχετικά με το κομμάτι των μετρήσεων, υλοποιούνται πάντα με προσοχή και σεβασμό στους ισχύοντες κανονισμούς. Γίνεται χρήση των αντίστοιχων λογισμικών σχεδίασης των πτήσεων που προαναφέρθηκαν και συλλέγονται τα δεδομένα. Κομβικό ρόλο παίζει η ύπαρξη πολλαπλών μπαταριών καθώς και των φορητών σταθμών φόρτισης που πρέπει να φέρει μαζί της η ερευνητική ομάδα. Πολλά πράγματα μπορεί να μην πάνε όπως έχουν σχεδιαστεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με ΣμηΕΑ και εν τέλει να χρειαστούν περισσότερες πηγές τροφοδοσίας. Συμπερασματικά, η ύπαρξη πολλών μπαταριών καθώς και φορητών σταθμών φόρτισης είναι αναγκαία σε τέτοιου είδους αποστολές ειδικά ενδέχεται να χαθεί πολύτιμος χρόνος σε αναζήτηση πηγών φόρτισης

καθώς και η αντίστοιχη αναμονή. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές ορεινές ή/και δυσπρόσιτες.

2.3 Επιλογή λογισμικών και επεξεργασία δεδομένων

Η επίλυση των δεδομένων που προκύπτουν από το UAV που κάνει συλλογή φωτογραφιών με στόχο την εφαρμογή της φωτογραμμετρικής μεθόδου, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από εξειδικευμένα λογισμικά (όπως πχ. το λογισμικό Agisoft Metashape).



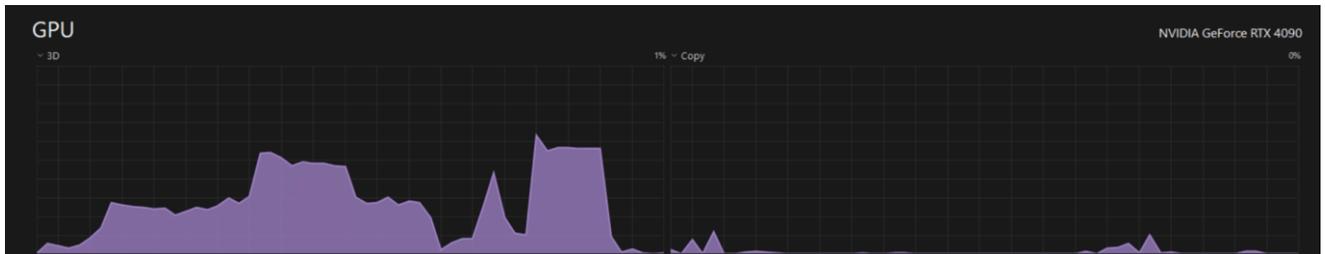
Εικόνα 1: Χρήση του λογισμικού Agisoft Metashape για τη φωτογραμμετρική επίλυση

Σημαντικός παράγοντας στην επιτυχή επίλυση των τρισδιάστατων μοντέλων και των ορθομωσαϊκών είναι η ύπαρξη ενός ισχυρού υπολογιστικού συστήματος.

Device specifications	
Device name	DESKTOP-A2ODAMM
Processor	12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900K 3.20 GHz
Installed RAM	128 GB (128 GB usable)
Device ID	[REDACTED]
Product ID	[REDACTED]
System type	64-bit operating system, x64-based processor

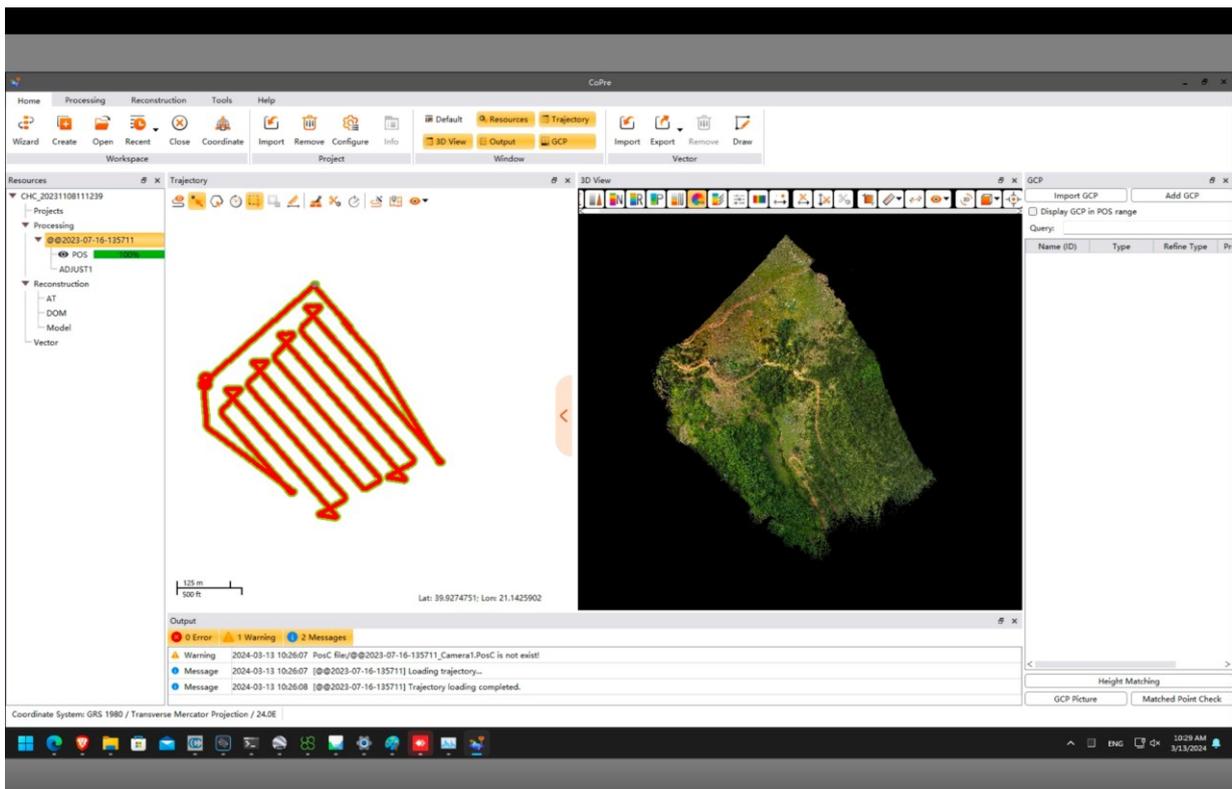
Εικόνα 2: Χαρακτηριστικά Η/Υ

Για παράδειγμα, ένα σύστημα, εξοπλισμένο με 128 Gb μνήμη RAM σε συνδυασμό με την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce RTX 4090 αποτελεί ένα ισχυρό πόρο για την διαδικασία της επεξεργασίας των πολλών και μεγάλου μεγέθους δεδομένων του προγράμματος.



Εικόνα 3: Χρήση της κάρτας γραφικών NVIDIA GeForce RTX 4090 για την υποβοήθηση της επίλυσης του φωτογραμμετρικού μοντέλου

Η επίλυση των δεδομένων που προκύπτουν από ένα LiDAR αισθητήρα απαιτούν για να επιλυθούν εξειδικευμένα λογισμικά (όπως π.χ. το λογισμικό CHCNAV CoPre που συνοδεύει τον LiDAR CHCNAV αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο του ELBIOS). Αφού εισαχθούν ορισμένοι παράμετροι μετασχηματισμού πρακτικά συνδυάζει τα δεδομένα του GNSS και του αδρανειακού (IMU) για να βρει τη θέση του σημείου λήψης κάθε φορά με ακρίβεια και στη συνέχεια το λογισμικό προσπαθεί να συνδυάσει τις αλληλεπικαλυπτόμενες δέσμες του LiDAR αισθητήρα για να δημιουργήσει το 3D μοντέλο της περιοχής αποτύπωσης.



Εικόνα 4: Επίλυση των LiDAR δεδομένων με χρήση του λογισμικού CHCNAV CoPre

Κατά τον ορισμό του συστήματος αναφοράς, ορίζεται στην εκκίνηση του προγράμματος το ελλειψοειδές εκ περιστροφής (GRS80), επταπαραμετρικός μετασχηματισμός, ορισμός προβολής TM (συγκεκριμένα TM87) καθώς επίσης και διόρθωση του καννάβου κατά North-East. Ακόμη σε ότι αφορά την υψομετρία, αυτή βασίζεται σε ένα τοπικό γεωειδές στον ελληνικό χώρο με στόχο τα γεωμετρικά υψόμετρα να μετασχηματιστούν κατάλληλα σε ορθομετρικά με βάση μία γραμμική



παρεμβολή της αποχής του Γεωειδούς. Όλη αυτή η διαδικασία οδηγεί στη σωστή γεωαναφορά του μοντέλου κατευθείαν από τη διαδικασία της επίλυσης.

Point Measurement	
Coordinate (m):	255188.471, 4422945.091, 1645.100
RGB:	150, 137, 82
Intensity:	11520
Time:	1689517077.5597
Number of Returns:	1
Return Number:	1
Scan Angle (deg):	22.000
Scan Direction:	0
Point Source ID:	24

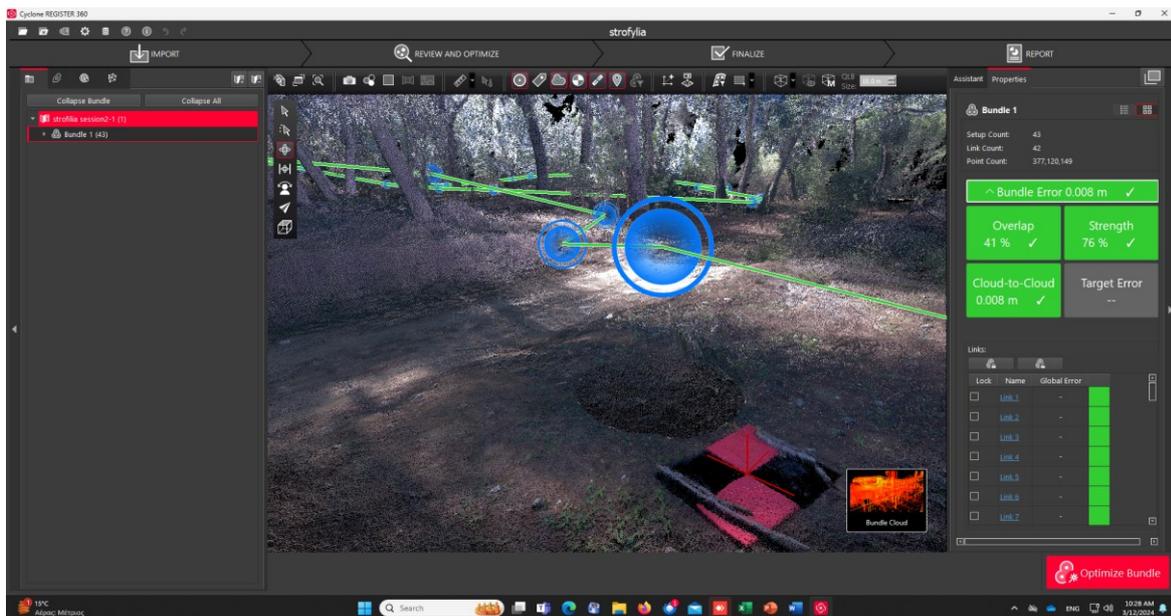
Εικόνα 5: Επιλογή ενός σημείου του νέφους και προβολή των συντεταγμένων του σε ΕΓΣΑ 87



3. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ LiDAR (TERRESTRIAL LASER SCANNING)

3.1 Συλλογή Δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων με επίγειο σύστημα σάρωσης είναι μία σχετικά απλή διαδικασία με τα σύγχρονα συστήματα τα οποία είναι πιο ελαφριά, ευέλικτα και γρήγορα από τα παλαιότερα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του έργου LIFE ELBIOS για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το προϊόν της εταιρίας “Leica Geosystems” με το όνομα BLK360, το οποίο είναι ικανό να συλλέξει λεπτομερή τρισδιάστατα νέφη σημείων με χρωματική πληροφορία σε μερικά λεπτά. Με τη βοήθεια του λογισμικού “Leica Cyclone FIELD 360” διευκολύνεται η άμεση απόκτηση τρισδιάστατων δεδομένων στο πεδίο καθώς και το στάδιο της προεπιθυγράμμισης των νεφών σημείων. Πρακτικά το μόνο που απαιτείται από τον χρήστη του συστήματος κατά το στάδιο των μετρήσεων είναι μία στοιχειώδης αντίληψη του χώρου και των δυνατοτήτων και περιορισμών του συστήματος. Αυτό είναι απαραίτητο για να τοποθετηθεί ο σαρωτής στον χώρο με στρατηγικό τρόπο ώστε να υπάρξει ικανή αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των νεφών σημείων για να δημιουργηθεί το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο.



Εικόνα 6: Εντοπισμός φωτοσταθερών μέσα από το λογισμικό Cyclone Register 360

Ωστόσο, η χρήση της τεχνολογίας αυτής σε δασικό περιβάλλον αν και φανερά χρήσιμη μπορεί να αποδειχθεί αρκετά απαιτητική σαν εργασία, όπως διαπιστώθηκε μέσα από την εμπειρία που αποκτήθηκε από το έργο LIFE ELBIOS. Παράγοντες όπως ο άνεμος που συνεπάγεται κίνηση των κλαδιών των δέντρων επηρεάζουν την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος, η πυκνή βλάστηση σημαίνει πως πρέπει να πραγματοποιηθούν πολύ κοντινές στάσεις με τον σαρωτή και άρα πάρα πολλές στάσεις που συνεπάγεται πάρα πολύ μεγάλα μεγέθη αρχείων που δυσχεραίνουν το στάδιο της μετέπειτα επεξεργασίας. Ακόμη το έντονο ανάγλυφο επίσης μπορεί να οδηγήσει σε αναγκαιότητα για πολλά σημεία στάσης ή ακόμα και δυσκολία τοποθέτησης του τρίποδα στο έδαφος.



Εικόνα 7: Μετρήσεις με τον επίγειο σαρωτή BLK 360 στην περιοχή της Στροφιλιάς

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο κομμάτι της γεωαναφοράς των δεδομένων. Για να επιτευχθεί θα πρέπει να γίνει τοποθέτηση τεσσάρων (4) ή και περισσότερων στόχων στο πεδίο με κατάλληλη γεωμετρία. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντεταγμένες των στόχων αυτών σε ένα σύστημα αναφοράς, στη δική μας περίπτωση στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ '87 έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για τον αφινικό μετασχηματισμό του νέφους σημείων. Οι συντεταγμένες στη δική μας περίπτωση δόθηκαν με χρήση GNSS είτε και RTK κινηματικό προσδιορισμό θέσης, είτε με στατικό προσδιορισμό.

3.2 Επιλογή λογισμικών και επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των νεφών σημείων που προκύπτουν από τον επίγειο σαρωτή απαιτείται και πάλι εξειδικευμένο λογισμικό για την ευθυγράμμιση των νεφών σημείων. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό της "Leica Geosystems" που ονομάζεται "Cyclone Register 360".

Ένα ζήτημα που πρέπει πάντοτε να θυμάται κάποιος που θέλει να πραγματοποιήσει αντίστοιχες εργασίες είναι πως ο όγκος δεδομένων των νεφών σημείων που προκύπτουν από το TLS (Terrestrial Laser Scanner) είναι μεγάλος (μερικά GB ανάλογα με το αντικείμενο αποτύπωσης) και η υπολογιστική δύναμη που χρειάζεται για την ευθυγράμμιση των νεφών σημείων και τη δημιουργία του τελικού 3D μοντέλου είναι αρκετά μεγάλη, πράγμα που σημαίνει πως απαιτείται ένας ισχυρός υπολογιστής (μήμες RAM, κάρτες γραφικών κλπ.) για την ομαλή πορεία των εργασιών.

Ο λόγος που χρησιμοποιείται το λογισμικό "Cyclone Register 360" είναι η συμβατότητα με τον σαρωτή. Συνήθως κάθε σαρωτής που διαθέτει η εκάστοτε εταιρία συνοδεύεται από ένα αντίστοιχο λογισμικό για την επίλυση των μετρήσεων που συνήθως είναι και απαραίτητο καθώς τα αρχεία αποθηκεύονται στον σαρωτή σε ένα προστατευμένο format από τις εταιρίες για εμπορικούς κυρίως λόγους.

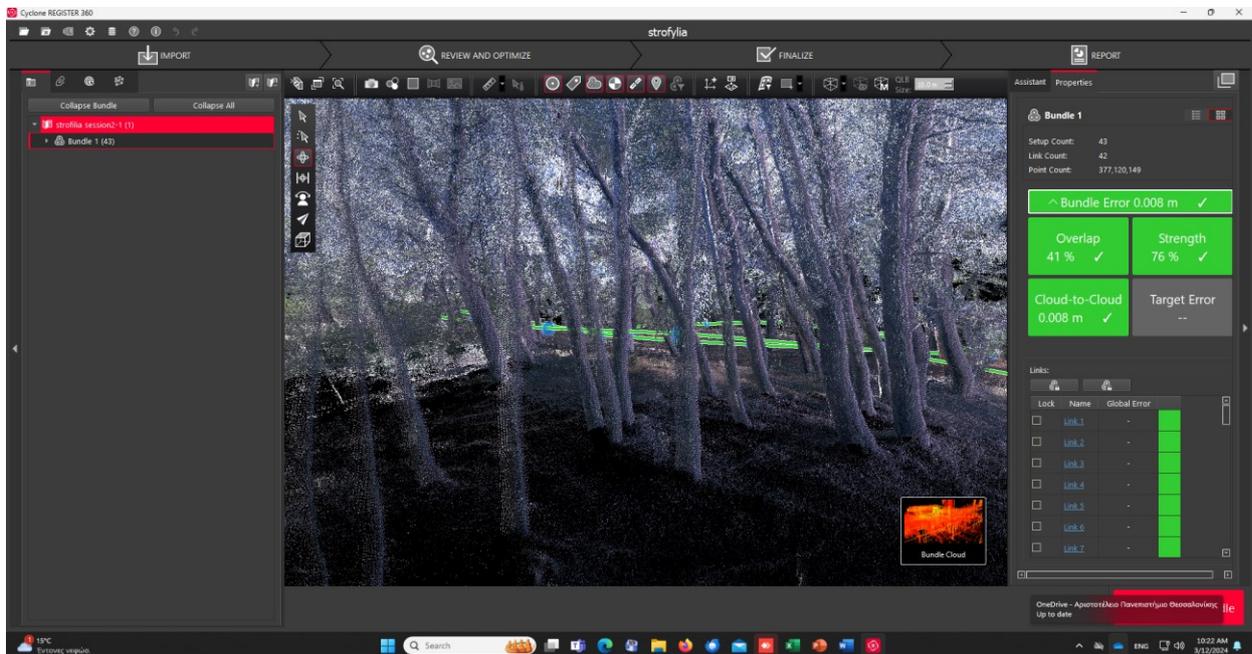
Έχοντας κάνει την προεθυγράμμιση των νεφών σημείων στο πεδίο με τη χρήση του "Cyclone Field 360" στο Tablet που συνδέεται με τον σαρωτή, η διαδικασία την επεξεργασίας στο γραφείο αποτελεί το επόμενο στάδιο. Σε αυτό το σημείο έρχεται η αντίληψη του χρήστη να προσπαθήσει να βελτιστοποιήσει την ακρίβεια στην σύνδεση των νεφών σημείων και μάλιστα πολλές φορές αυτή η



διαδικασία θα πρέπει να γίνει σε μεγάλο βαθμό “χειροκίνητα” στις περιπτώσεις που οι αλγόριθμοι “cloud-to-cloud” δεν καταφέρουν να επιφέρουν το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Αν και το αποτέλεσμα του παίρνει κάποιος χρησιμοποιώντας το Laser Scanner το καθιστά την πιο λεπτομερή 3D μέθοδο αποτύπωσης του δασικού περιβάλλοντος, ο χρόνος που απαιτείται στο πεδίο, ο όγκος των δεδομένων και οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι παράγοντες σημαντικοί και δεν πρέπει να παραλείπονται.

Σε περίπτωση που πρέπει να χρησιμοποιηθεί το νέφος σημείων σε περαιτέρω λογισμικά επεξεργασίας για εξαγωγή δεδομένων δασολογικού χαρακτήρα παρατηρείται πως το αποτέλεσμα του TLS είναι τόσο λεπτομερές που δημιουργεί προβλήματα στην επεξεργασία του από τα λογισμικά αυτά και τελικά για να γίνει διαχειρίσιμο πρέπει να υποστεί σημαντική γενίκευση.



Εικόνα 8: Απεικόνιση του πυκνού νέφους σημείων που προέκυψε από τις μετρήσεις με το Laser Scanner

Συνεπώς, αν η ποιότητα των δεδομένων είναι το αυστηρό ζητούμενο τότε το TLS αποτελεί την ιδανική επιλογή. Ωστόσο αν το ζήτημα είναι η σχέση ταχύτητας και ακρίβειας ή χρόνου και αποτελέσματος η τα συστήματα SLAM αποτελούν την καλύτερη επιλογή.



4. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

SLAM

4.1 Συλλογή Δεδομένων

Η τεχνολογία SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προόδου στον χώρο των τρισδιάστατων αποτυπώσεων καθώς επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση του εντοπισμού θέσης και της δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου του περιβάλλοντος. Αυτή η σύνθετη τεχνολογία έχει εφαρμογές που εκτείνονται από την ρομποτική έρευνα μέχρι την τοπογραφία και την οικολογία, επιτρέποντας τη δημιουργία υψηλής ποιότητας τρισδιάστατων αναπαραστάσεων του εκάστοτε χώρου.

Στον τομέα της τοπογραφίας, η τεχνολογία SLAM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία 3D μοντέλων και αποτύπωση τοπογραφικών χαρακτηριστικών. Στην οικολογία, το SLAM σήμερα παίζει έναν σημαντικό ρόλο στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση προστατευόμενων περιοχών. Τα συστήματα είτε στην επίγεια μορφή τους είτε στην εναέρια μέσω των UAVs (Unoccupied Air Vehicles) με ενσωματωμένους αισθητήρες μπορούν να συλλέγουν δεδομένα επιτρέποντας τη δημιουργία λεπτομερών 3D μοντέλων του δασικού περιβάλλοντος.

Οι 3D αποτυπώσεις που προκύπτουν από τη χρήση των συστημάτων SLAM παρέχουν σημαντική πληροφορία για τη μορφολογία, τη δομή και τις αλλαγές στο περιβάλλον. Αυτή η προηγμένη τεχνολογία είναι καθοριστική για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων, τη διαχείριση φυσικών πόρων και την υποστήριξη βιώσιμων πρακτικών στους τομείς της τοπογραφίας και της δασολογίας.

Στο εμπόριο υπάρχουν σαρωτές που παρέχουν χρωματική πληροφορία RGB, ωστόσο υπάρχει και ένα σύστημα της εταιρίας "GeoSLAM" με την ονομασία "GeoSLAM Revo" το οποίο δεν διαθέτει ενσωματωμένη κάμερα, αλλά αξιοποιώντας τον LiDAR αισθητήρα του και τις μετρήσεις του αδρανειακού του συστήματος (IMU) επιστρέφει στον χρήστη αποκλειστικά και μόνο τρισδιάστατη γεωμετρική πληροφορία, δηλαδή τιμές x , y , και z σε ένα ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς.

Η απουσία της χρωματικής πληροφορίας δημιουργεί πρόβλημα στην κλασική διαδικασία γεωαναφοράς με χρήση ειδικά χρωματισμένων σημείων GCPs (Ground Control Points) καθώς αυτή είναι αδύνατο να υλοποιηθεί. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι προγραμματιστές της εταιρίας δημιούργησαν μία ιδιαίτερη λειτουργικότητα στο σύστημα αυτό. Το προγραμματίσαν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης, με μία ειδική βάση να τοποθετεί ακίνητο το σύστημα στα σημεία που επιθυμεί και το λογισμικό εσωτερικά να τα χαρακτηρίζει ως σημεία αναφοράς (Reference Points). Με αυτή τη δυνατότητα επιτρέπει στον εκάστοτε χρήστη να τοποθετήσει τον σαρωτή στα σημεία που επιθυμεί και μόλις τελειώσει τη διαδικασία αυτή να περάσει με ένα σύστημα GNSS ή με έναν γεωδαιτικό σταθμό εξαρτώμενος από κάποιο τριγωνομετρικό ή πολυγωνομετρικό σημείο να δώσει συντεταγμένες στα σημεία που στήθηκε ακίνητος ο σαρωτής έτσι ώστε να μπορεί στη συνέχεια μέσω κατάλληλου λογισμικού να μπορεί να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός από το αυθαίρετο σύστημα αναφοράς σε κάποιο εξαρτημένο σύστημα όπως για παράδειγμα το ΕΓΣΑ '87.

Ένα πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστεί στη χρήση του GNSS είναι η απουσία σήματος κινητής τηλεφωνίας. Μην έχοντας κάποιον άλλον εξοπλισμό στο πεδίο, υπάρχει ο κίνδυνος να μη μπορεί να

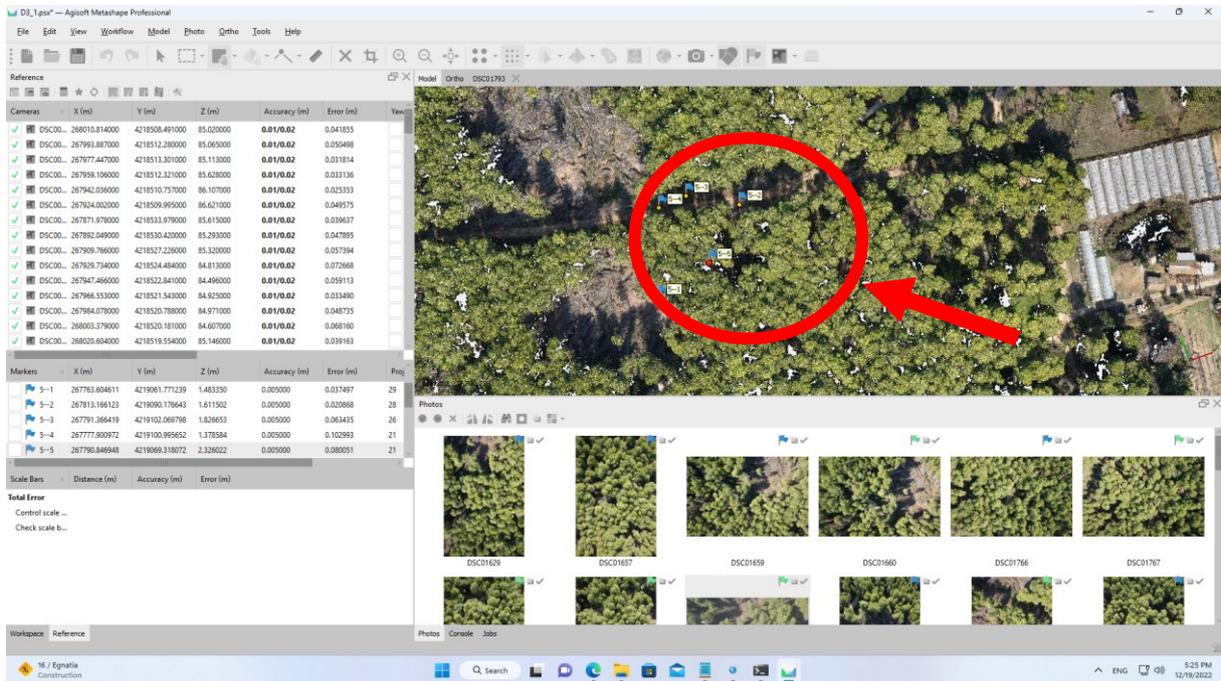


δοθεί με κανέναν τρόπο γεωαναφορά στα νέφη σημείων, και άρα αυτά να παραμείνουν σε ένα ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς γεγονός που θα επιφέρει επιπλέον δυσκολίες στη συγχώνευση των δεδομένων από τις διαφορετικές πηγές.

Με δημιουργικότητα μπορεί να δοθεί λύση σε αυτό το φαινομενικό άλυτο πρόβλημα. Οι λύσεις περιλαμβάνουν τα εξής:

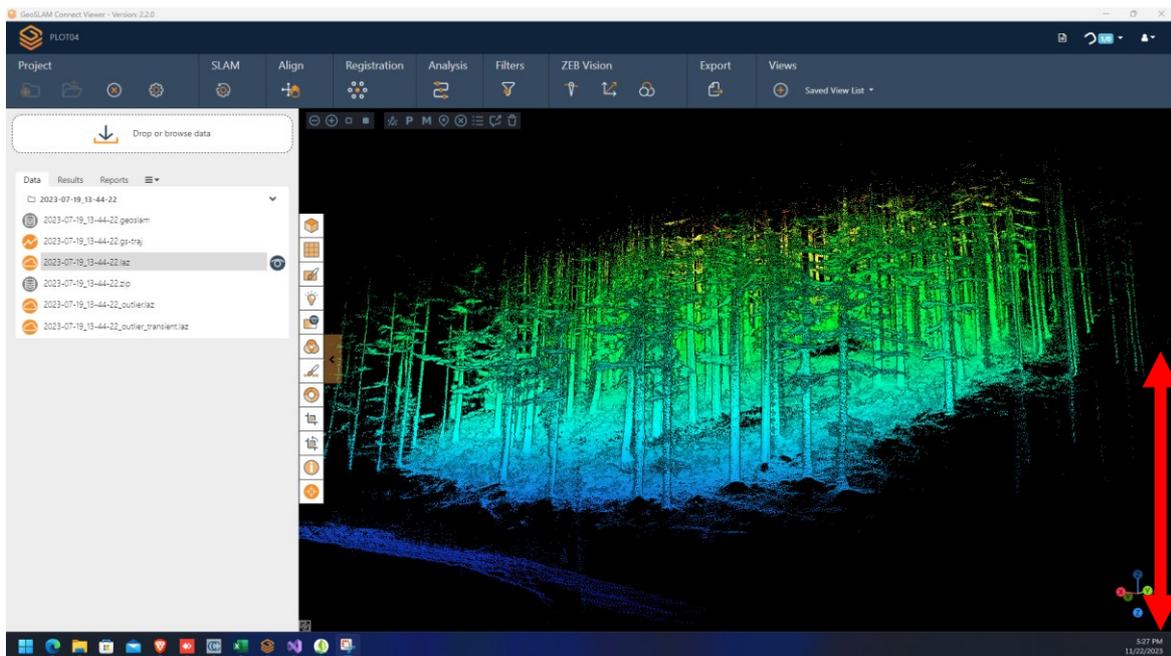
- Επιλογή πολλαπλών γειτονικών περιοχών αποτύπωσης
- Προεγκατάσταση φωτοσταθερών στις περιοχές αυτές
- Τοποθέτηση των στόχων (φωτοσταθερά) με τρόπο ώστε να μείνουν ακίνητοι
- Μετρήσεις με τον σαρωτή SLAM όπου αντίστοιχα στήνονται στα φωτοσταθερά σημεία κάθε περιοχής
- Με το τέλος των μετρήσεων με το SLAM, οι στόχοι να παρέμεινουν στη θέση τους στο έδαφος σε κάθε περιοχή
- Σάρωση της γενικότερης περιοχής με UAV που φέρει κεραία GNSS και φωτογραφική κάμερα (π.χ. Quantum Systems' Trinity f90+)
- Στατικός προσδιορισμός θέσης στο σημείο απογείωσης
- Επίλυση των δεδομένα GNSS στο γραφείο με απόδοση ακριβής πληροφορία θέσης στο φωτογραμμετρικό μοντέλο που προκύπτει μέσω της τεχνικής PPK (Post Processing Kinematic) στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87
- Ο χρήστης, στο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων στο γραφείο, αναγνωρίζει τα γεωαναφερμένα πλέον κέντρα των στόχων και σημειώνει τις συντεταγμένες τους
- Τέλος, χρήση των συντεταγμένων και εισαγωγή τους στο λογισμικό του συστήματος SLAM για να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός από το αυθαίρετο σύστημα αναφοράς στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87.

Η ορθή και γρήγορη αντίδραση της ερευνητικής ομάδας σε μία αναπάντεχη δυσκολία που οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες όπως η απώλεια σήματος κινητής τηλεφωνίας παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της μετρητικής αποστολής και είναι αποτέλεσμα της εμπειρίας πεδίου αλλά και της τριβής με ζητήματα φωτογραμμετρίας και δορυφορικού προσδιορισμού θέσης.



Εικόνα 9: Εντοπισμός φωτοσταθερών μέσα από το λογισμικό Agisoft Metashape

Ένα δεύτερο ζήτημα που μπορεί να προκύψει είναι το έντονο ανάγλυφο. Το αδρανειακό σύστημα που φέρει στο εσωτερικό του το SLAM απαιτεί ομαλές κινήσεις και στροφές στον χώρο. Σε έντονο ανάγλυφο ακόμα και το περπάτημα είναι δύσκολο για τον χειριστή του συστήματος πόσο μάλλον οι ομαλές κινήσεις του συστήματος. Αυτό οδηγεί σε δεδομένα με αρκετό θόρυβο ή λανθασμένες επιμέρους επιλύσεις. Στην περίπτωση αυτή γίνονται επαναμετρήσεις ενώ χρησιμοποιούνται και ειδικόι αλγόριθμοι επανεπεξεργασίας των δεδομένων.



Εικόνα 10: Η αποτύπωση της περιοχής "plot 4" από το σύστημα SLAM στην περιοχή της Πίνδου



Επίσης πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως τα προβλήματα σχετικά με τη λειτουργία του GNSS μπορεί να απαιτήσουν στην απόκτηση δεύτερου δέκτη GNSS έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ζευγάρι Base-Rover. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως ο δέκτης που λειτουργεί ως Base μπορεί να είναι τοποθετημένος σε ένα σχετικά απομακρυσμένο σημείο ενώ ο δέκτης που χρησιμοποιείται ως Rover λαμβάνει τις διορθώσεις θέσης από τον Base ακόμα και αρκετά μέσα στο δάσος.



Εικόνα 11: Μετρήσεις με το σύστημα SLAM και προσδιορισμός θέσης μέσω φωτοσταθερών και δέκτη GNSS

Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι το γεγονός πως οι διορθώσεις θέσης που μεταβιβάζονται από τον δέκτη Base στον δέκτη Rover γίνεται μέσω ενός συστήματος ραδιομόντεμ (radiomodem) τεχνολογίας LoRaWAN. Η μέγιστη απόσταση κατά την οποία ο δέκτης Base μπορεί να στείλει δεδομένα στον δέκτη Rover είναι της τάξης του ενός χιλιομέτρου. Ωστόσο ακόμη και σε αυτή την περίπτωση τα υψηλά και πυκνά τοποθετημένα δέντρα συνεχίζουν να αποτελούν πρόβλημα στην επίλυση διαφορικής κινηματικής λύσης GNSS καθότι συχνά εμφανίζονται φαινόμενα όπως η μερική απώλεια σήματος GNSS και το φαινόμενο της πολυανάκλασης.

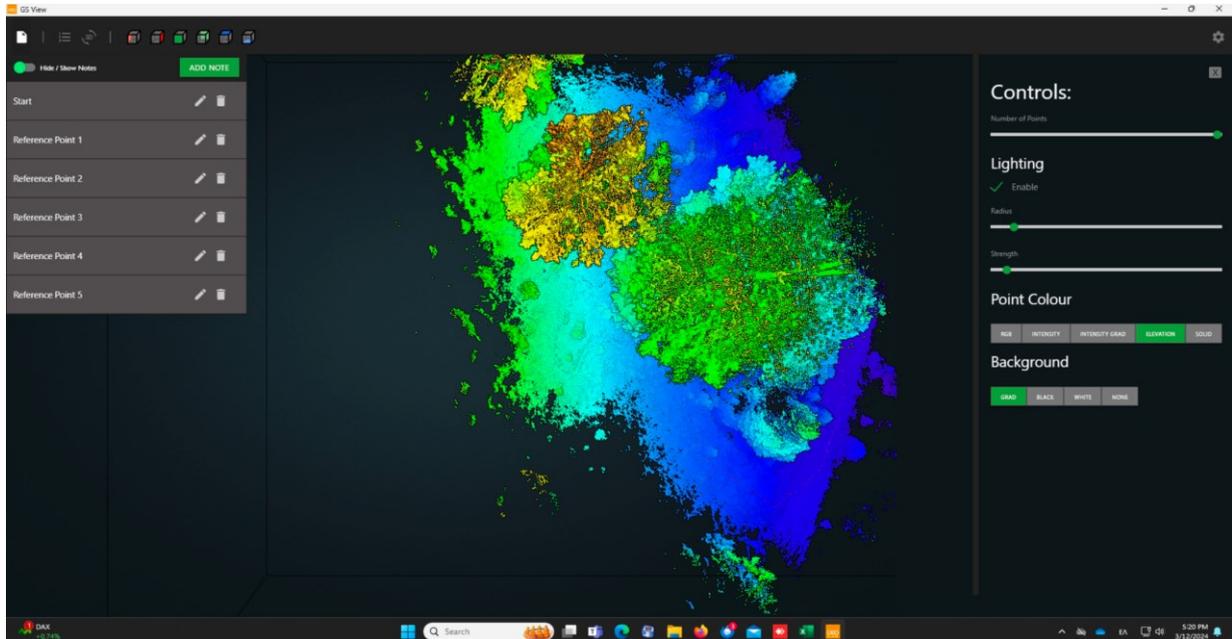
4.2 Επιλογή λογισμικών και επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από το σύστημα SLAM πραγματοποιείται στα λογισμικά που συνοδεύουν τον σαρωτή (π.χ. στην περίπτωση του συστήματος SLAM που χρησιμοποιήθηκε στο LIFE ELBIOS, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά “GeoSLAM Hub” και “GeoSLAM Connect”. Κυρίως η επεξεργασία πραγματοποιείται στο πρώτο, το δεύτερο λογισμικό χρησιμοποιείται μόνο για ιδιαίτερες περιπτώσεις που είναι απαραίτητες ορισμένες λειτουργίες επανεπεξεργασίας).

Σε ένα τέτοιο λογισμικό (όπως π.χ. το “GeoSLAM Hub”) εισάγονται τα δεδομένα σε συμπιεσμένη μορφή “.zip” όπως εξάγονται από τον σαρωτή. Στη συνέχεια το λογισμικό επεξεργάζεται τα δεδομένα και αν δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα παράγει σε μερικά λεπτά το τρισδιάστατο νέφος της περιοχής αποτύπωσης καθώς και την πορεία που ακολούθησε ο σαρωτής μέσα σε αυτή.



Το λογισμικό έχει χαρακτηρίσει ορισμένα σημεία ως “reference points” και παροτρύνει τον χρήστη να εισάγει τις συντεταγμένες ώστε να πραγματοποιήσει τον μετασχηματισμό από το αυθαίρετο σύστημα αναφοράς στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ '87.



Εικόνα 12: Απεικόνιση σημείων αναφοράς μέσω του λογισμικού “GeoSLAM Hub”

Ο χρήστης κάνει τον έλεγχο της ορθότητας των δεδομένων και του μετασχηματισμού μέσω των αναφορών που επιστρέφονται από το λογισμικό στον χρήστη όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα από το αυθαίρετο σύστημα αναφοράς στο ΕΓΣΑ '87 με μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS της τάξης των επτά (7) εκατοστών.



Adjustment reference points with error values

Name	Target			Actual			Error(m)
	X	Y	Z	X	Y	Z	
manual	255319.831	4423214.358	1717.392	255319.751	4423214.380	1717.422	0.089
manual	255322.526	4423231.679	1717.451	255322.514	4423231.682	1717.431	0.024
manual	255307.143	4423233.432	1713.965	255307.141	4423233.440	1714.001	0.037
manual	255296.898	4423222.685	1711.938	255296.993	4423222.653	1711.891	0.111

RMS Error(m) 0.074



Εικόνα 13: Report που προκύπτει από τον μετασχηματισμό του νέφους σημείων του SLAM στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ 87



5. ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ

5.1 Διαχείριση, αποθήκευση και οργάνωση ψηφιακών αρχείων

Τα δεδομένα των UAV, Laser Scanner και SLAM σε συνδυασμό με τα GNSS δεδομένα (RINEX) που συλλέγονται στο πεδίο στη συνέχεια πρέπει να εξαχθούν από τα συστήματα και να αποθηκευτούν με κατάλληλη οργάνωση σε ασφαλή τοποθεσία.

Βέβαια αυτή η διαδικασία στην ουσία ξεκινάει από το στάδιο των μετρήσεων στο πεδίο. Επειδή τα δεδομένα που κάθε μέρα συλλέγονται στο πεδίο είναι πάντοτε πάρα πολλά, είναι αναγκαία η μεταφορά των δεδομένων στο τέλος κάθε ημέρας από τις επιμέρους κάρτες μνήμης στους φορητούς υπολογιστές της ομάδας πεδίου. Ο τρόπος που τα δεδομένα αποθηκεύονται είναι ανά περιοχή (plot) και χωρίζονται σε επεξεργασμένα και μη (synthetic data & non synthetic data).

Name	Date modified	Type
Non-Synthetic_Data	11/13/2023 4:16 PM	File folder
Synthetic_Data	11/14/2023 1:21 PM	File folder

Εικόνα 14: Οργάνωση Δεδομένων

Ο φάκελος “Non-Synthetic_Data” περιέχει τα δεδομένα ανεπεξέργαστα και σχετικά αταξινόμητα στο εσωτερικό του. Αντίθετα, στον φάκελο “Synthetic_Data”, τα δεδομένα χωρίζονται ανά περιοχή (plot) ενώ ταυτόχρονα έξω από τους φακέλους των περιοχών υπάρχει ένα αρχείο της μορφής “.bin” που εμπεριέχει όλα τα δεδομένα γεωαναφερμένα και συνδυασμένα.



Name	Date modified	Type
01	11/24/2023 10:36 AM	File folder
02	11/24/2023 10:40 AM	File folder
03	11/24/2023 10:45 AM	File folder
04	11/13/2023 4:24 PM	File folder
05	11/24/2023 10:48 AM	File folder
06	11/24/2023 10:51 AM	File folder
07	11/13/2023 4:24 PM	File folder
08	12/13/2023 11:13 AM	File folder
09	11/13/2023 4:25 PM	File folder
10	12/13/2023 11:18 AM	File folder
11	12/13/2023 11:26 AM	File folder
12	11/13/2023 4:25 PM	File folder
13	11/13/2023 4:25 PM	File folder
14	12/13/2023 11:27 AM	File folder
15	11/13/2023 4:25 PM	File folder
16	11/13/2023 4:25 PM	File folder
18	12/13/2023 11:30 AM	File folder
19	11/13/2023 4:26 PM	File folder
20	11/13/2023 4:26 PM	File folder
21	11/13/2023 4:26 PM	File folder
22	11/13/2023 4:26 PM	File folder
pindos_all	12/13/2023 11:33 AM	BIN File

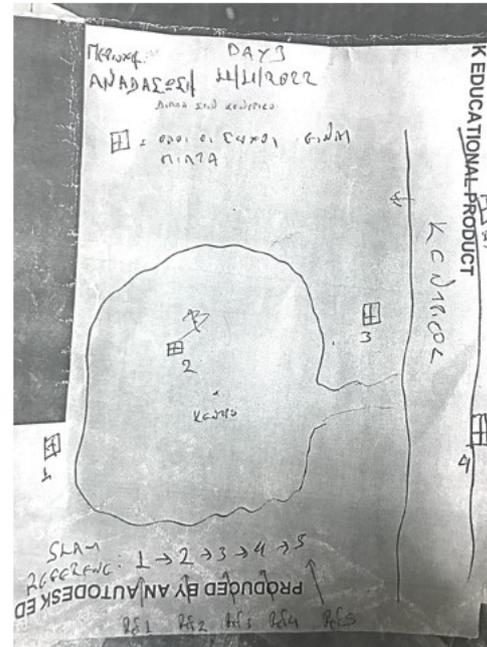
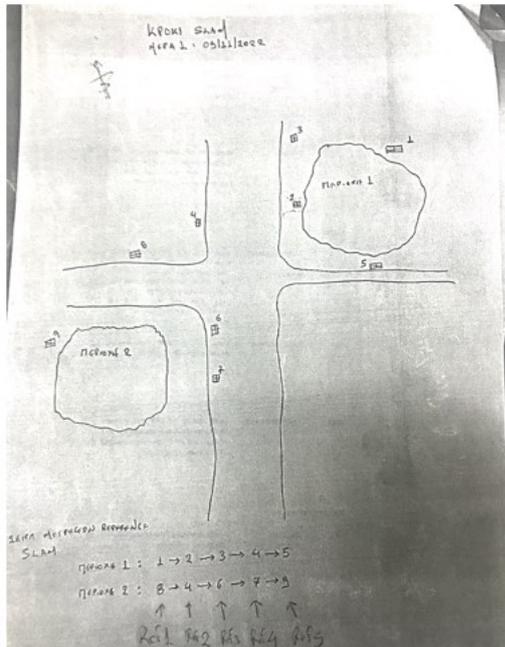
Εικόνα 15: Διαχωρισμός περιοχών και προσθήκη των διαφορετικών τύπων δεδομένων

Κάθε φάκελος της κάθε υποπεριοχής περιέχει τα φωτογραμμετρία δεδομένα χωρισμένα σε δεδομένα φωτογραμμετρίας και σε LiDAR δεδομένα, τα επίγεια δεδομένα από το SLAM σύστημα (Simultaneous Localisation And Mapping) καθώς και τα όρια της κάθε περιοχής σε μορφή “.shp” που είναι η μορφή Shapefile.

Name	Date modified	Type
Photogrammetry	11/24/2023 10:38 AM	File folder
Shapefile	11/24/2023 10:42 AM	File folder
SLAM	1/11/2024 6:56 PM	File folder
UAV-LiDAR	11/24/2023 10:37 AM	File folder

Εικόνα 16: Τύποι Δεδομένων σε κάθε “plot”

Η οργάνωση αυτή των δεδομένων δεν είναι τόσο αυτονόητη διαδικασία όσο φαίνεται. Όταν βρίσκεται κάποιος στο πεδίο υπό την πίεση του χρόνου, και ειδικά όταν δουλεύουν παράλληλα πολλαπλά συνεργεία, πρέπει να γίνει σοβαρή προετοιμασία από το γραφείο με κοινά έντυπα ώστε να σημειώνονται τα πάντα με κοινές ονομασίες και κωδικούς. Οι μετρήσεις είναι πάρα πολλές και οι σημειώσεις τους ακόμα περισσότερες και συνήθως βιαστικά γραμμένες.



Εικόνα 17: Κροκί μετρήσεων πεδίου

Για να μη χαθεί τίποτα ή να μην υπάρξει κάποια ασάφεια στην οργάνωση η ομάδα πεδίου ταξινομεί κάθε αρχείο και έγγραφο όσο πιο γρήγορα ήταν εφικτό μετά τη διαδικασία των μετρήσεων. Όπου υπήρχε ασυμφωνία μεταξύ των αρχείων, γίνεται επανέλεγχος και διόρθωση των ονομασιών ούτως ώστε να είναι όλα κοινά. Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως απαιτείται σκληρός δίσκος μεγάλης χωρητικότητας για να αποθηκευτούν τα δεδομένα και μάλιστα επαρκεί οριακά. Συνεπώς το κλειδί για την επιτυχή αποθήκευση των δεδομένων βρίσκεται στην προνοητικότητα, τον σχεδιασμό και την προσεκτική οργάνωση.

5.2 Δημιουργία ενιαίων τρισδιάστατων μοντέλων

Εναέρια και επίγεια δεδομένα συλλέγονται με στόχο να γίνει συγχώνευση των δεδομένων αυτών και να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα (ψηφιακά δίδυμα) για τις περιοχές μελέτης.

Δεδομένου ότι έχει προηγηθεί η εργασία της επεξεργασίας της κάθε πηγής δεδομένων ξεχωριστά και έχουν προκύψει νέφη σημείων από τις επιμέρους επιλύσεις το επόμενο στάδιο είναι η συγχώνευση των δεδομένων αυτών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει επιλογή ενός λογισμικού ικανού να δεχθεί τα επιμέρους δεδομένα σε κατάλληλη μορφή (συνήθως .E57 και .las) ώστε να μπορέσουν να συνδυαστούν κατάλληλα.

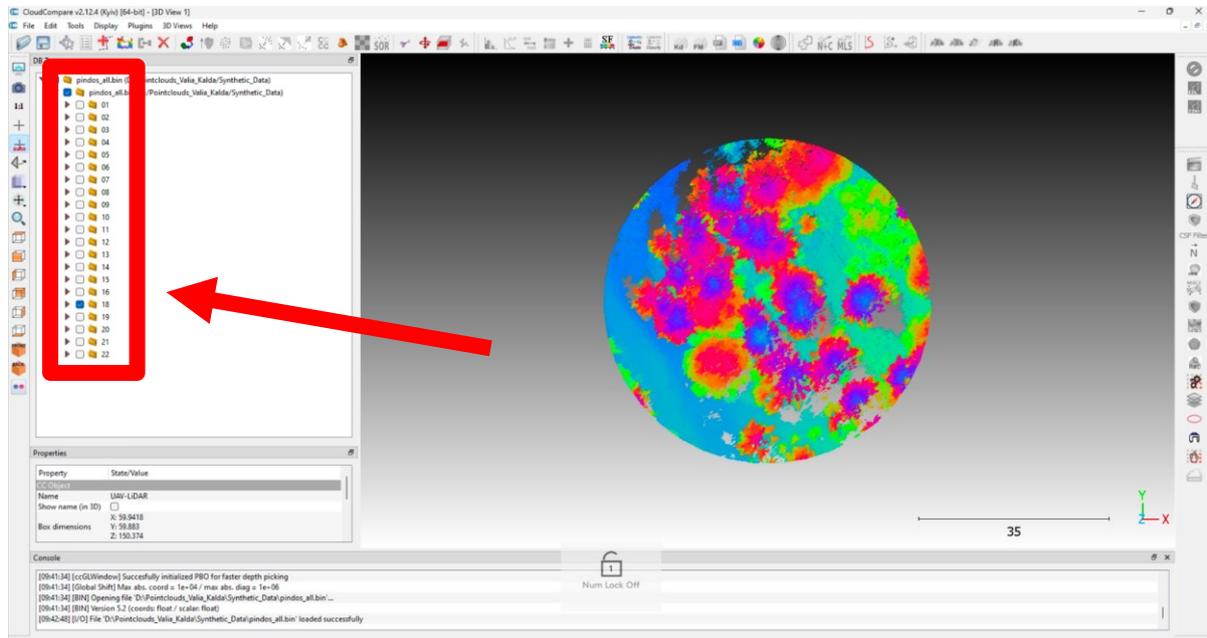
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Cloud Compare για τη συγχώνευση δεδομένων, καθώς αποτελεί ένα ευέλικτο και ισχυρό εργαλείο για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των laser scanners και των LiDAR. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του Cloud Compare:

- Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων: Το Cloud Compare επιτρέπει την ανακατασκευή επιφάνειας, την εξαγωγή στατιστικών, την ενοποίηση και την ευθυγράμμιση σημείων, καθώς και την ανίχνευση αντικειμένων. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να εκτελέσει διάφορες εργασίες επεξεργασίας δεδομένων με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.



- **Οπτικοποίηση Δεδομένων:** Το Cloud Compare παρέχει προηγμένες δυνατότητες οπτικοποίησης που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των δεδομένων. Με τη χρήση γραφικών παραστάσεων και εργαλείων απεικόνισης, ο χρήστης μπορεί να εξερευνήσει και να αναλύσει τα δεδομένα του με ευκολία.
- **Ανοιχτού Κώδικα:** Ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το Cloud Compare είναι ελεύθερο να χρησιμοποιηθεί και να προσαρμοστεί από την κοινότητα των χρηστών του. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες έχουν πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα και μπορούν να το προσαρμόσουν σύμφωνα με τις ανάγκες τους.

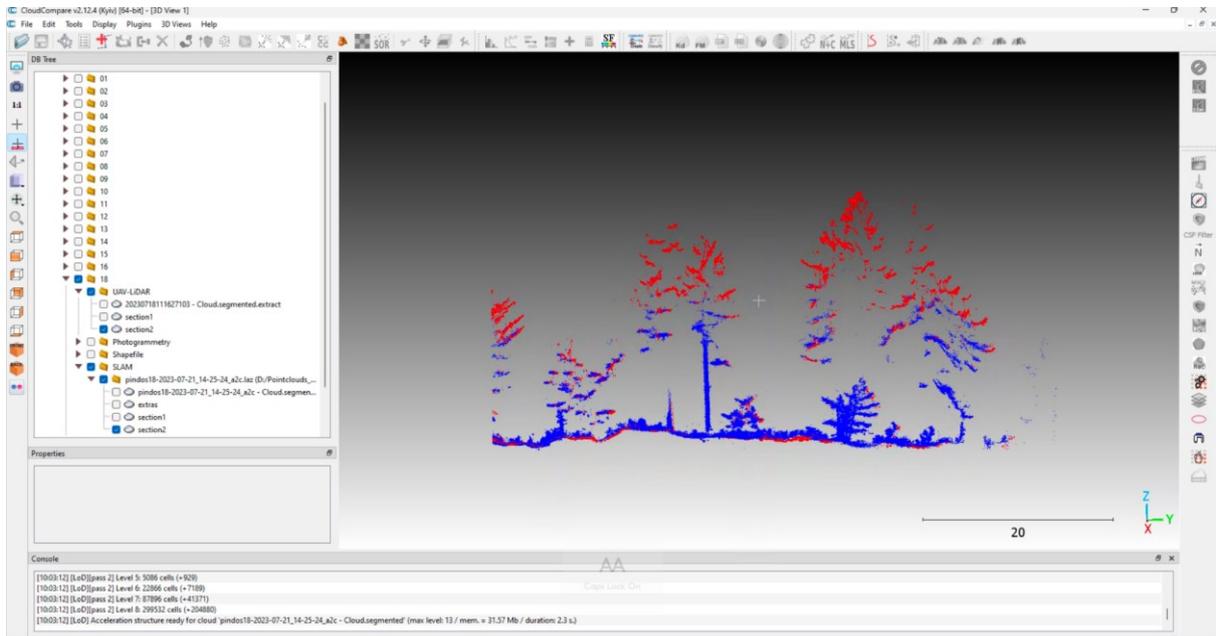
Το Cloud Compare αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τους επαγγελματίες που χρησιμοποιούν laser scanners και LiDAR, παρέχοντας τους τη δυνατότητα να επεξεργαστούν, να αναλύσουν και να οπτικοποιήσουν τα δεδομένα τους με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.



Εικόνα 18: Συγκέντρωση όλων των περιοχών μελέτης στο λογισμικό "Cloud Compare"

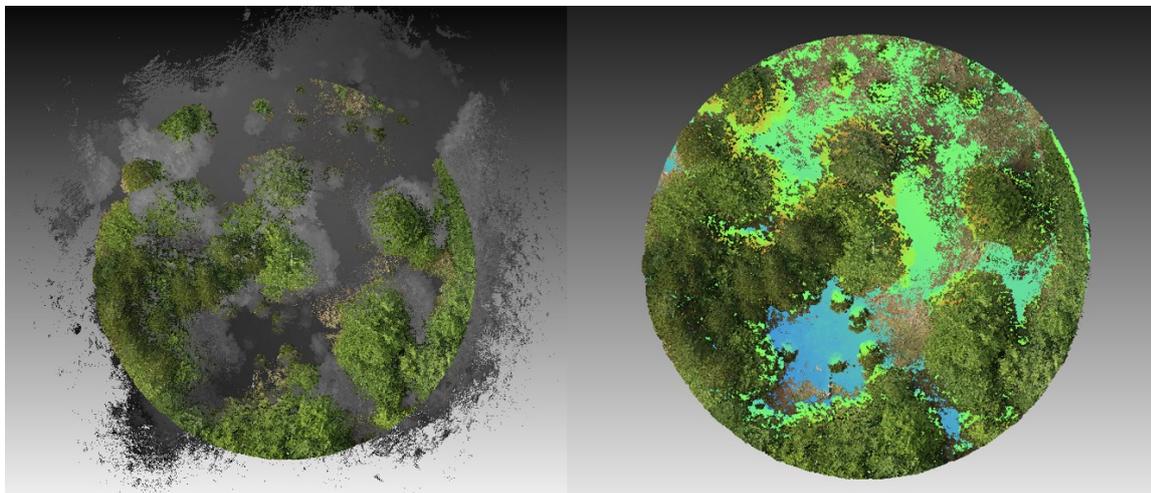
Ο τρόπος που γίνεται η συγχώνευση των δεδομένων είναι μέσω της γεωαναφοράς τους. Η ερευνητική ομάδα φροντίζει να παρέχει πληροφορία θέσης για όλα τα δεδομένα σε κοινό σύστημα αναφοράς (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς – ΕΓΣΑ '87).

Κατά τη διαδικασία αυτή πρέπει τα διάφορα δεδομένα να τοποθετηθούν σωστά το χώρο σωστά όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 19: Συνδυασμός δεδομένων. Δεδομένα SLAM (Μπλε χρώμα). Δεδομένα από εναέριο LiDAR (κόκκινο χρώμα)

Ωστόσο παρατηρείται πως σε ορισμένες περιπτώσεις τα νέφη σημείων που προκύπτουν από τον SLAM αισθητήρα, ενώ αν κάποιος τα παρατηρούσε μόνα τους φαινόταν σωστά, κατά τη διαδικασία συνδυασμού τους με τα υπόλοιπα δεδομένα μπορεί να έχουν ασυμφωνίες (διπλά είδωλα, εσωτερικά σφάλματα τροχιάς, θόρυβο κλπ.).



Εικόνα 20: Προβληματικά δεδομένα SLAM με γκρι χρώμα (αριστερά) και διορθωμένα δεδομένα SLAM με ψευδοχρώμα (δεξιά) σε συνδυασμό με εναέρια έγχρωμα δεδομένα LiDAR (και στις δύο φωτογραφίες)

Αυτό δημιουργεί την ανάγκη επανεπεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν από τον SLAM αισθητήρα μέσω ειδικού λογισμικού. Κατά την επανεπεξεργασία SLAM, ο πρωταρχικός στόχος είναι η βελτιστοποίηση των αλγοριθμικών παραμέτρων. Αυτό περιλαμβάνει τη λεπτομερή ρύθμιση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό. Με τη συστηματική προσαρμογή αυτών των παραμέτρων, η επανεπεξεργασία στοχεύει να μετριάσει τον αντίκτυπο των ψευδών μετρήσεων, να ενισχύσει τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος και τελικά να αποφέρει



πιο ορθά και ακριβή αποτελέσματα. Οι αρχικές αστοχίες οφείλονται στο έντονο ανάγλυφο που πρακτικά δημιουργεί προβλήματα στο αδρανειακό του συστήματος, αν για παράδειγμα ο χρήστης έκανε κάποια απότομη κίνηση για να διατηρήσει την ισορροπία του στο πεδίο, αυτή η κίνηση μπορεί να ήταν η αρχή ενός συστηματικού σφάλματος στην τροχιά του συστήματος στον χώρο. Ένας ακόμη παράγοντας είναι το οπτικό πεδίο εντός του δάσους. Ορισμένες φορές ο χρήστης αναγκάζεται να περάσει μαζί με τον αισθητήρα SLAM από στενές περιοχές εντός του δάσους με αποτέλεσμα ο LiDAR αισθητήρας να αποτυγχάνει καθώς ο αριθμός των χαρακτηριστικών σημείων που λαμβάνει εκείνη τη στιγμή ενδέχεται να μην είναι αρκετός για να συνδυάσει τα επιμέρους “frames” δεδομένων.

Ουσιαστικά, η επανά-επεξεργασία χρησιμεύει ως στρατηγική παρέμβαση για την υπέρβαση των περιορισμών που τίθενται από τις δύσκολες συνθήκες του πραγματικού κόσμου. Είναι μια προληπτική προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης με επαναληπτική προσαρμογή αλγοριθμικών παραμέτρων, διασφαλίζοντας την προσαρμοστικότητά τους σε ποικίλα περιβαλλοντικά σενάρια και εν τέλει ενισχύοντας την ικανότητα του συστήματος να δημιουργεί ακριβείς και αξιόπιστους χάρτες για πλοήγηση και εντοπισμό.



Εικόνα 21: (1) Ορθά δεδομένα εναέριου LiDAR, (2) Ορθά δεδομένα εναέριου LiDAR σε συνδυασμό με προβληματικά δεδομένα SLAM, (3) Ορθά δεδομένα εναέριου LiDAR με διορθωμένα δεδομένα SLAM



5.3 Εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με τη βιοποικιλότητα από τρισδιάστατα δεδομένα

Για την παραγωγή δεδομένων νέφους σημείων χρησιμοποιούνται επίγειοι και ενεργητικοί σαρωτές και πλατφόρμες:

- Επίγειους κινητούς σαρωτές με ενεργητικούς αισθητήρες LiDAR που υποστηρίζουν σύγχρονες μεθόδους Ταυτόχρονης Ανίχνευσης και Δημιουργίας Χάρτη (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM)
- Επίγειους στατικούς σαρωτές με ενεργητικούς αισθητήρες LiDAR (Terrestrial Laser Scanning - TLS),
- Αερομεταφερόμενους ενεργητικούς αισθητήρες LiDAR σε πλατφόρμα μη διακατεχόμενου εναέριου οχήματος (Unoccupied Air Vehicle - UAV) UAV -LiDAR, και,
- Οπτικό αισθητήρα τηλεπισκόπησης σε πλατφόρμα μη διακατεχόμενου εναέριου οχήματος - UAV camera.

Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ακρίβεια, την ανάλυση και την ταχύτητα συλλογής δεδομένων, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη και λεπτομερή χαρτογράφηση των δασικών εκτάσεων.

Η ανάλυση των νεφών σημείων μπορεί να διακριθεί σε δύο βασικές προσεγγίσεις: α) την αναγνώριση μεμονωμένων δέντρων (Individual Tree Detection) και β) την ανάλυση βάση περιοχής (area-based).

- α. Η **αναγνώριση μεμονωμένων δέντρων** επικεντρώνεται στον εντοπισμό μεμονωμένων ατόμων (δένδρων) και τη μέτρηση χαρακτηριστικών τους όπως το ύψος, η διάμετρος και ο όγκος τους, επιτρέποντας μια άμεση σύγκριση με τις επιτόπιες μετρήσεις πεδίου (ένα-προς-ένα). Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη λεπτομερή μελέτη της δομής της βλάστησης και της κατανομής των δέντρων σε μια δειγματοληπτική περιοχή. Τα αποτελέσματα αυτή της μεθόδου συγκρίνονται με τις επιτόπιες μετρήσεις πεδίου για την αξιολόγηση της ακρίβειας.
- β. Η **ανάλυση βάση περιοχής** δημιουργεί αποτελέσματα σε μορφή ψηφιδωτών (raster), τα οποία προέρχονται από την επεξεργασία των νεφών σημείων. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την εξαγωγή παραμέτρων όπως η πυκνότητα της βλάστησης, η κάλυψη του εδάφους και η βιομάζα σε μεγαλύτερες περιοχές. Η χρήση των ψηφιδωτών δεδομένων διευκολύνει τη δημιουργία χωρικών μοντέλων που μπορούν να αναπαραστήσουν τις συνθήκες βλάστησης και τις αλλαγές στο δασικό οικοσύστημα με υψηλή ακρίβεια.

Κατά προτεραιότητα χρησιμοποιούνται ανοικτά διαθέσιμα λογισμικά, βιβλιοθήκες, αλλά και η ανάπτυξη διαδικασιών σε κώδικα κατάλληλης γλώσσας προγραμματισμού (πχ. Python), τα οποία δύναται να επιτρέψουν τη μεταφορά και επανάληψη των ρών εργασίας και σε άλλες προστατευόμενες περιοχές.

Τέλος, τονίζεται ότι ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας και της ανάλυσης, πραγματοποιείται έχοντας ως γνώμονα τη διερεύνηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών παρόμοιων τεχνολογικών εργαλείων για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τη βιοποικιλότητα χερσαίων περιοχών.



5.3.1 Εξαγωγή πληροφορίας βάση μιας προσέγγισης αναγνώρισης μεμονωμένων δένδρων (Individual Tree Detection - ITD)

Η διαδικασία της αναγνώρισης των μεμονωμένων δένδρων για το σύνολο των δειγματοληπτικών επιφανειών πραγματοποιείται συνδυαστικά με τη χρήση τόσο των ελεύθερων διαθέσιμων βιβλιοθηκών (πχ. LAsTools), όσο και με τη χρήση των ελεύθερων λογισμικών όπως το 3D Forest και 3D Fin, αλλά και την ανάπτυξη scripts κώδικα σε προγραμματιστική γλώσσα python.

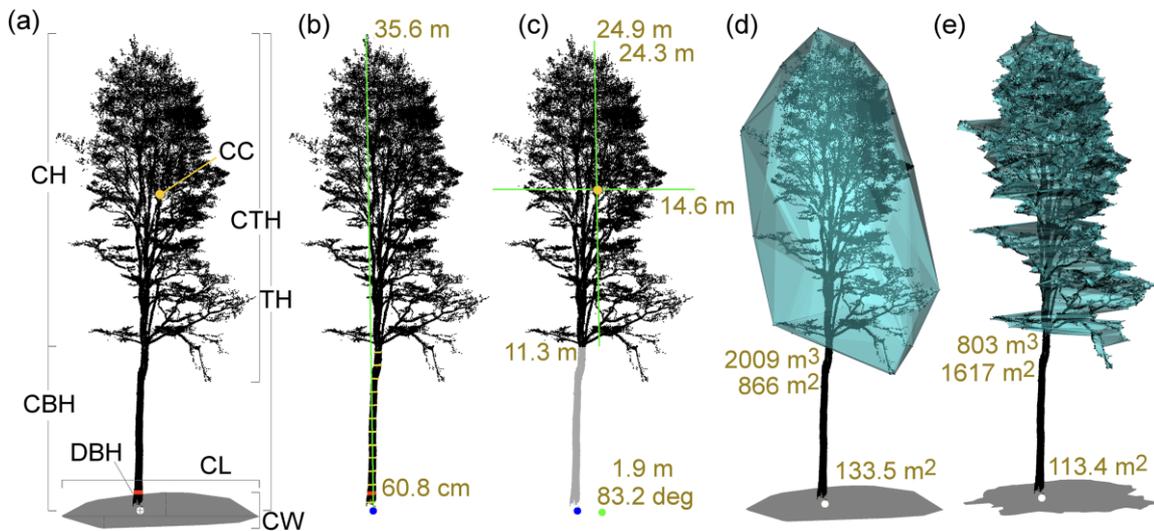
Τα δεδομένα SLAM παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη χωρική κατανομή και τη δομή των μεμονωμένων δέντρων, έχοντας ως πλεονέκτημα τη σχετικά πιο γρήγορη ολοκλήρωση της διαδικασίας των μετρήσεων στο πεδίο, ενώ τα δεδομένα TLS αξιολογούνται ως προς τη δυνατότητα βελτίωσης του πλήθους των σημείων και συνεισφορά στη μέτρηση των διαμέτρων και των όγκων των κορμών (αν και με σημαντικά μεγαλύτερες χρονικές απαιτήσεις). Η ενοποίηση των δεδομένων SLAM με τα δεδομένα UAV-LiDAR επιτρέπει τη δημιουργία ακριβών και λεπτομερών τρισδιάστατων μοντέλων του δασικού περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας υψηλή πιστότητα στην αποτύπωση τόσο της κατακόρυφης όσο και της οριζόντιας διάστασης της βλάστησης. Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών επιφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα, καλύπτοντας αποτελεσματικά τις ελλείψεις που παρουσιάζει το UAV-LiDAR στις κόμμες των δέντρων. Το επίγιο SLAM, αν και περιορίζεται από την πυκνή φυλλωσιά, παρέχει πολύτιμα δεδομένα για τις χαμηλότερες στρώσεις, συμπληρώνοντας έτσι τα δεδομένα που προκύπτουν από τις εναέριες λήψεις. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση διευκολύνει την εξαγωγή σημαντικών παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα και την αποτελεσματική σύγκριση με τις επιτόπιες μετρήσεις πεδίου, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της δομής και της κατάστασης του δασικού οικοσυστήματος.

5.3.1.1 Θέση και αριθμός ατόμων

Η θέση του δέντρου στις «παραδοσιακές» απογραφές πεδίου νοείται συνήθως ως η θέση του κέντρου της βάσης του δέντρου και αυτή η προσέγγιση υιοθετείται και σε λογισμικά όπως το 3D Forest (λευκή σφαίρα στο Σχήμα 3α -βλ. **Error! Reference source not found.**). Μπορούν να εφαρμοστούν δύο μέθοδοι για την εξαγωγή της θέσης του δέντρου (Trochta et al. 2017), όπως περιγράφονται παρακάτω:

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί όλα τα σημεία μέχρι ένα καθορισμένο από τον χρήστη ύψος (π.χ. στο 3D Forest η προεπιλογή είναι 60 cm) πάνω από το χαμηλότερο σημείο του δέντρου και υπολογίζει τις διάμεσες συντεταγμένες X και Y. Η συντεταγμένη Z ορίζεται ως η διάμεση τιμή Z των (N) (προεπιλεγμένη τιμή είναι N=5) πλησιέστερων σημείων του εδάφους σε αυτή τη θέση X, Y.

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα τυχαίο μετασχηματισμό Hough (Randomized Hough Transform - RHT) για την ανίχνευση κύκλων σε σημεία δέντρων σε ύψος 1,3 m και 0,65 m πάνω από το χαμηλότερο σημείο του νέφους δέντρων. Η θέση του δέντρου ορίζεται ως η τομή του διανύσματος που σχηματίζεται από τα κέντρα των δύο εκτιμώμενων κύκλων με την επιφάνεια του DTM (Trochta et al. 2017).



Εικόνα 22: Εξαγωγή και οπτικοποίηση των παραμέτρων των δέντρων από ένα ενιαίο νέφος δέντρων. (α) οπτικοποίηση των παραμέτρων του δέντρου: CBH-ύψος βάσης κόμης, CH-ύψος κόμης, CTH-ολικό ύψος κόμης, CL-μήκος κόμης, CW-πλάτος κορυφής, CC-κεντροειδές κόμης, DBH-στηθιαία διάμετρος, TH-ύψος δέντρου, λευκή σφαίρα-θέση δέντρου, (b) δέντρο με υπολογισμένες βασικές παραμέτρους: θέση (μπλε σφαίρα), DBH (60.8 cm), TH (πράσινη γραμμή- 35,6 m) και προφίλ κορμού (κίτρινοι κύλινδροι)- γ) κόμη δέντρου (μαύρο νέφος) που αντιπροσωπεύεται από CTH (24,9 m), CH (πράσινη γραμμή- 24,3 m), CL (πράσινη γραμμή- 14.6 m), CBH (11,3 m), το κεντροειδές της κόμης (πορτοκαλί σφαίρα) και την επίπεδη προβολή του (πράσινη σφαίρα) με την απόσταση και το αζιμουθίο από τη θέση του δέντρου- δ) τρισδιάστατο κυρτό περίβλημα (convex hull) της κόμης με όγκο (2009 m³) και επιφάνεια (866 m²) και ορθογώνια προβολή στο επίπεδο με την κατάλληλη επιφάνεια (133,5 m²)- ε) κοίλο περίβλημα (concave hull) της κόμης με όγκο (803 m³) και επιφάνεια (1617 m²) και ορθογώνια προβολή στο επίπεδο με την επιφάνειά του (113,4 m²). (Πηγή Trochta et al. 2017)

5.3.1.2 Στηθιαία διάμετρος

Υπάρχουν διάφοροι διαθέσιμοι μέθοδοι για τον υπολογισμό της στηθιαίας διαμέτρου (Diameter-at-Breast Height-DBH) του δέντρου (κόκκινος κύλινδρος στην **Error! Reference source not found.** -α) και β)). Για παράδειγμα, αυτό μπορεί να γίνει είτε με την ανίχνευση κύκλων με ρυθμιζόμενο αριθμό επαναλήψεων για την εκτίμηση ενός κύκλου στο νέφος σημείων είτε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων όπου γίνεται μια αλγεβρική εκτίμηση του κύκλου και μια σταδιακή γεωμετρική μείωση των τετραγωνικών αποστάσεων από έναν υπολογισμένο κύκλο. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν ένα υποσύνολο του νέφους σημείων ενός «εκτιμώμενου» δέντρου - μια οριζόντια τομή μεταξύ 1,25 έως 1,35 μέτρων πάνω από την υπολογιζόμενη θέση του δέντρου. Για την επιτυχή προσαρμογή του κύκλου απαιτούνται τουλάχιστον 4 σημεία σε αυτή την τομή. Περαιτέρω σε πολλά λογισμικά (όπως το 3D Forest που παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα), υπάρχει δυνατότητα για χειροκίνητη επεξεργασία (δηλαδή η εξάλειψη όλων των σημείων που δεν αντιπροσωπεύουν το DBH) (Trochta et al. 2017).

5.3.1.3 Ύψος δέντρου

Το ύψος δέντρου ορίζεται ως η διαφορά στις συντεταγμένες Z μεταξύ του υψηλότερου σημείου του νέφους σημείων του δέντρου και της θέσης της βάσης του δέντρου (κατακόρυφη γραμμή και αριθμός πάνω από το δέντρο στα σχήματα της **Error! Reference source not found.**, α) και β). Υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές μέθοδοι που προσεγγίζουν εννοιολογικά τη μέτρηση του ύψους δένδρου, όπως η έννοια του «μήκος δέντρου» το οποίο στηρίζεται στη μεγαλύτερη ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο οποιοδήποτε σημείων του νέφους σημείων του δέντρου. Η μέθοδος αυτή είναι επομένως κατάλληλη



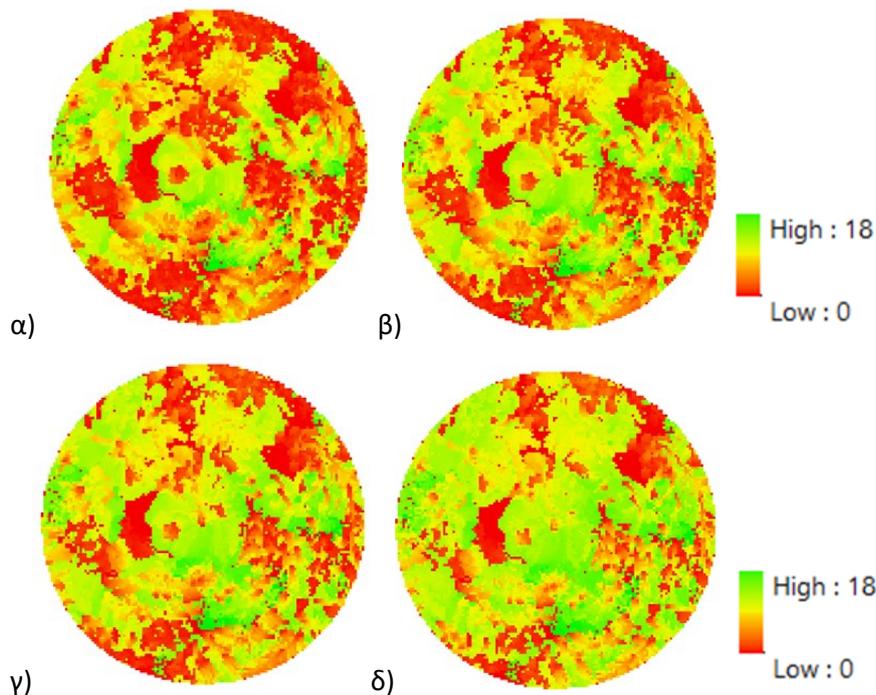
για τον υπολογισμό του συνολικού μήκους κεκλιμένων δένδρων ή ακόμη και του μήκους του κατακείμενου νεκρού ξύλου (Trochta et al. 2017).

5.3.2 Εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με τη βιοποικιλότητα, βάση μιας προσέγγισης βάση περιοχής (area-based)

5.3.2.1 Εκατοστημόρια ύψους H- Percentiles: (p-20, p-40, p-60, p-80)

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μετρήσεις LiDAR που σχετίζονται με το ύψος των δέντρων είναι τα εκατοστημόρια της κατανομής του ύψους των παλμών λέιζερ και περιλαμβάνουν ένα εύρος από το πρώτο (H01) έως το ενενήντα ένατο (H99) εκατοστημόριο. Σε αντίθεση με μια μεμονωμένη μεταβλητή ύψους, τα εκατοστημόρια ύψους (H- Percentiles) που προκύπτουν από μετρήσεις LiDAR είναι μια σειρά στατιστικών περιγραφών του κατακόρυφου προφίλ της κόμης. Για παράδειγμα, το ενενηκοστό εκατοστημόριο (H80) αντιπροσωπεύει το ύψος κάτω από το οποίο βρίσκεται το 80% των επιστροφών των παλμών λέιζερ (**Error! Reference source not found.**).

Πολλές μελέτες χρησιμοποιούν μετρήσεις H - Percentiles για την εκτίμηση χαρακτηριστικών της δασικής δομής όπως ο όγκος κορμού (Maltamo et al., 2006; Næsset, 2004) και η υπέργεια βιομάζα (Wang et al., 2019). Καθώς επίσης αποδεικνύουν την ισχυρή συσχέτιση με το ύψους της κόμης (Zhu et al., 2022) και την φυλική επιφάνεια (Leaf area index- LAI) (Qu et al., 2018). Τα H - Percentiles προσφέρουν τη δυνατότητα να αποκαλύψουν πληροφορίες πολλαπλών επιπέδων βλάστησης και όχι πληροφορίες μόνο για την κορυφή της κόμης, αποτελώντας μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους-δείκτες για τον χαρακτηρισμό της δομής της βλάστησης (Qu et al., 2018).



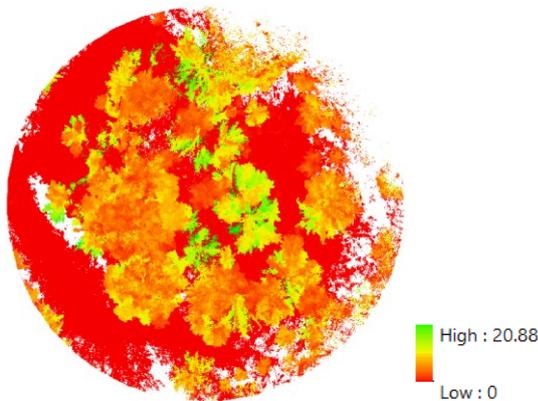
Εικόνα 23: Εκατοστημόρια ύψους H- Percentiles: α) p-20, β) p-40, γ) p-60, δ) p-80)



5.3.2.2 Ύψος της κόμης (Canopy Height) (m)

Το κατακόρυφο προφίλ της κόμης είναι ένα από τα μέτρα ποσοτικοποίησης και ανάλυσης της πολύπλοκης δομής της κόμης των δασών και τον περαιτέρω χαρακτηρισμό της πιθανής ετερογένειας της χωρικής τους δομής (Lefsky et al., 1999; Ziemer et al., 2023). Το ύψος της κόμης αποτελεί μια δομική παράμετρος της βλάστησης που μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από το κατακόρυφο προφίλ της κόμης.

Το ύψος της κόμης είναι η πιο συνηθισμένη μετρική που προκύπτει από τα δεδομένα LiDAR, λόγω της ευκολίας μέτρησης και της υψηλής ακρίβειας (Coops et al., 2016). Πολλές μελέτες έχουν αποδείξει τη συσχέτιση του ύψους κόμης με την βιοποικιλότητα ειδών, θηλαστικών και πτηνών (Coops et al., 2016). Ένας τρόπος για να προκύψει ένα μοντέλο ύψους κόμης (CHM - Canopy Height Model) είναι να ληφθεί η διαφορά μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (DSM - Digital Surface Model), και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM - Digital Terrain Model). Το DSM που εξάγεται από τα σημειακά δεδομένα LiDAR, είναι ένα μοντέλο που αναπαριστά χαρακτηριστικά υπερυψωμένα πάνω από το "γυμνό έδαφος" και εμπεριέχει πληροφορία φυσικών και τεχνητών χαρακτηριστικών (κορυφές δέντρων, κτιρίων και άλλων αντικειμένων) που υπάρχουν πάνω στο έδαφος. Το DTM πρόκειται για ένα μοντέλο που περιέχει πληροφορία υψομέτρου της «γυμνής» επιφάνειας του εδάφους. Το CHM που παράγεται με την αφαίρεση του DTM από το DSM, αντιπροσωπεύει το ύψος των δέντρων και δεν πρόκειται για τιμή υψομέτρου, αλλά ουσιαστικά για το ύψος ή την απόσταση μεταξύ του εδάφους και της κορυφής των δέντρων (**Error! Reference source not found.**).



Εικόνα 24: Ύψος κόμης (Canopy Height) (m)

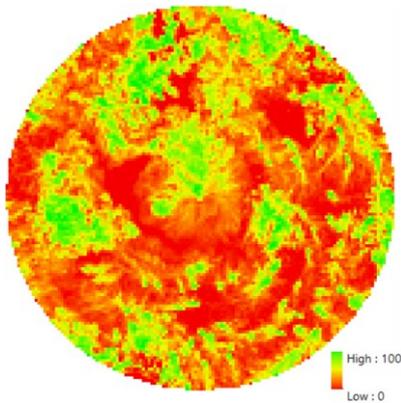
5.3.2.3 Πυκνότητα κόμης (Canopy Density)

Η ανάκτηση δομικών χαρακτηριστικών δέντρων και δασών από δεδομένα LiDAR έχει επικεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό στη χρήση μοντέλων ύψους κόμης, αλλά αυτά έχουν αποδειχθεί μόνο εν μέρει χρήσιμα για τη χαρτογράφηση και την απόδοση δομής σε πολύπλοκα, δασικά οικοσυστήματα (Lee and Lucas, 2007). Η πυκνότητα της κόμης προσφέρει επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την κατακόρυφη κατανομή της κυρίαρχης βλάστησης πχ κυρίαρχα δέντρα στο δάσος, της βιοποικιλότητας και των οικολογικών διεργασιών (Ziemer et al., 2023).

Για παράδειγμα, η πυκνότητα κόμης μπορεί να υπολογιστεί ως το ποσοστό των πρώτων επιστροφών μεγαλύτερο από το κατώτερο όριο ύψους 3m πάνω από το έδαφος. Το όριο ύψους 3m χρησιμοποιείται για την εξάλειψη των επιστροφών από πούδη και θαμνώδη κάλυψη. Το αποτέλεσμα



αποτελεί μια εικόνα (raster), με εύρος τιμών 1-100, οι οποίες ουσιαστικά δείχνουν το ποσοστό εδάφους που καλύπτεται από την κόμη της βλάστηση (**Error! Reference source not found.**).



Εικόνα 25: Πυκνότητα κόμης (Canopy Density) (%)

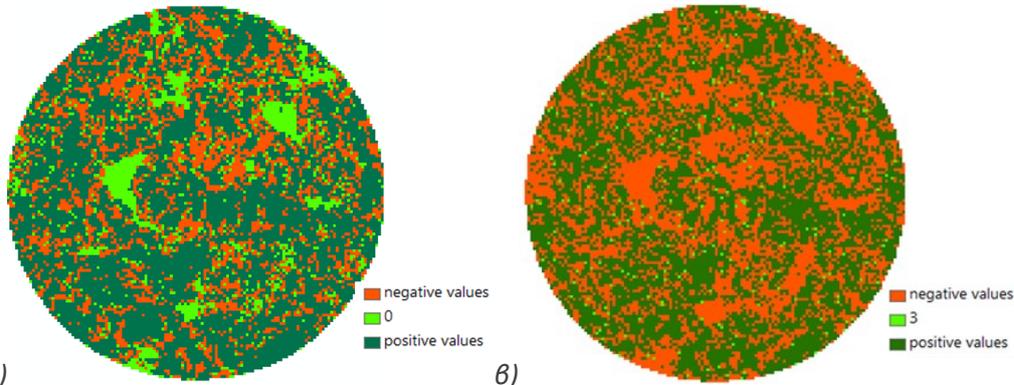
5.3.2.4 Ασυμμετρία (Skewness) και Κύρτωση (Kurtosis)

Η ασυμμετρία (Skewness) και η κύρτωση (Kurtosis) είναι δυο παράμετροι σχήματος της κατανομής των σημείων LiDAR ύψους της κόμης που συνδέονται στενά με τις πληροφορίες όγκου και τα ειδών (Frazer et al., 2011; Park, 2020) και χρησιμοποιούνται συχνά σε μελέτες περιγραφής χαρακτηριστικών δομής δασικών συστάδων και της σχέσης ύψους και διαμέτρου (Abreu Neto et al., 2021; Spracklen and Spracklen, 2021). Η ασυμμετρία (Skewness) είναι ένα μέτρο για το βαθμό συμμετρίας κατανομή πυκνότητας του νέφους σημείων και δείχνει την κατεύθυνση της απόκλισης από το ονομαστικό ύψος των σημείων LAS. Οι τιμές που λαμβάνει το μέτρο της ασυμμετρίας (**Error! Reference source not found.**) είναι:

- Skewness <0 όπου η κατανομή του ύψους είναι λοξή πάνω από το μέσο επίπεδο
- Skewness =0 όπου η κατανομή του ύψους (κορυφές και κοιλότητες) είναι συμμετρική γύρω από το μέσο επίπεδο
- Skewness >0 όπου η κατανομή του ύψους είναι λοξή κάτω από το μέσο επίπεδο

Η κύρτωση (Kurtosis) είναι ένα μέτρο ευκρίνειας της μεταβολής των σημείων LiDAR και χαρακτηρίζει την κύρτωση της καμπύλης της κατανομής τους. Οι τιμές που λαμβάνει το μέτρο της κύρτωσης (**Error! Reference source not found.**) είναι:

- Kurtosis <3: Η κατανομή των σημείων είναι λοξή πάνω από το μέσο επίπεδο (η κατανομή είναι πλατύκυρτη)
- Kurtosis =3: Η κατανομή των σημείων είναι κανονική
- Kurtosis >3: Η κατανομή των σημείων είναι λεπτόκυρτη

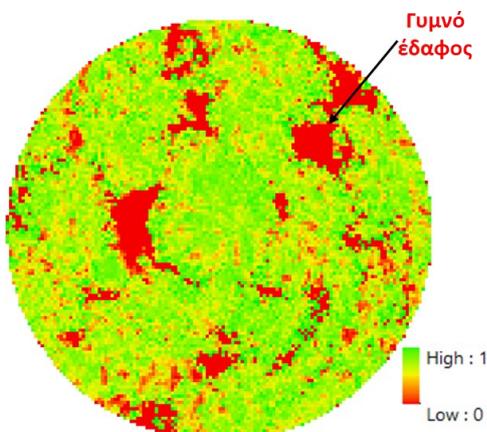


α) β)
Εικόνα 26: α) Ασυμμετρία (Skewness) β) Κύρτωση (Kurtosis)

5.3.2.5 Δείκτης κάθετης πολυπλοκότητας Vertical Complexity Index (VCI)

Ο δείκτης κάθετης πολυπλοκότητας (Vertical Complexity Index – VCI) βασίζεται στον δείκτη Shannon (Shannon, 1948). Στον τομέα της οικολογίας, ο δείκτης αυτός έχει χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της ποικιλομορφίας και της ομοιομορφίας (evenness) των ειδών. Αυτή η έννοια της ομοιομορφίας μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και στο τρισδιάστατο νέφος σημείων LiDAR, για την ποσοτικοποίηση της κατακόρυφης κατανομής του νέφους (δηλαδή, εάν τα σημεία είναι συγκεντρωμένα σε επίπεδα ή πιο ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το νέφος σημείων). Στη συνέχεια, αυτή η ποσοτικοποίηση της κατανομής μπορεί να αντικατοπτρίζει τις δομικές ιδιότητες του δάσους που περιγράφονται από τα γενικευμένα στάδια ανάπτυξης της συστάδας (Miller, 1997; van Ewijk et al., 2011).

Για παράδειγμα, ο VCI (**Error! Reference source not found.**) υπολογίζεται για να περιγράψει την ομαλότητα της κατακόρυφης κατανομής των σημείων σε όλο το επίπεδο της κόμης (Bruggisser et al., 2019). Για τον υπολογισμό του VCI, το νέφος σημείων μετατρέπεται σε δομή voxel και οι πληροφορίες του νέφους σημείων μειώνονται με τη σύνοψη των αριθμών σημείων ανά voxel. Το εύρος τιμών VCI κυμαίνεται από 0 έως 1, όπου VCI=1 σημαίνει ομοιόμορφη κατανομή των σημείων σε όλο το ύψος της κόμης και μικρότερες τιμές δηλώνουν μια όλο και πιο άνιση κατανομή (Bruggisser et al., 2019; van Ewijk et al., 2011).



Εικόνα 27: Δείκτης κάθετης πολυπλοκότητας Vertical Complexity Index



5.4 Λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα από επίγεια και εναέρια τρθδδεδομένα νέφους σημείων

Έχοντας επιτυχώς συνδυάσει τα εναέρια με τα επίγεια χαρακτηριστικά δημιουργείται ένα αξιόπιστο ψηφιακό δίδυμο των περιοχών μελέτης. Το τελικό στάδιο για την ανάλυση και εξαγωγή πληροφοριών περιλαμβάνει την εισαγωγή των δεδομένων αυτών σε πακέτα λογισμικών ικανά να παρέχουν χρήσιμα δεδομένα. Μετά από εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα για την επιλογή των πιο κατάλληλων, αλλά και ελεύθερων προς χρήση λογισμικών και βιβλιοθηκών, διαπιστώθηκε ότι σε αρχικό στάδιο της προ-επεξεργασίας των δεδομένων χρησιμοποιείται εκτεταμένα αλγόριθμοι της βιβλιοθήκης LASTools συνδυαστικά με επιλεγμένες λειτουργίες του λογισμικού CloudCompare, αλλά και ανάπτυξη κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python με χρήσιμες συναρτήσεις για τη διαχείριση των δεδομένων και την εξαγωγή τιμών. Ωστόσο, τα λογισμικά που επίσης χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για την εξαγωγή χρήσιμων παραμέτρων σχετικά με τη βιοποικιλότητα, όπως η θέση, το ύψος και η σθηθιαία διάμετρος του κάθε μεμονωμένου δένδρου είναι το «3D Forest» και το «3D Fin» και παρουσιάζονται παρακάτω. Σημειώνεται ότι αυτή δεν είναι μια εξαντλητική καταγραφή των λογισμικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή παραμέτρων σχετικά με τη βιοποικιλότητα, αλλά μάλλον μια ενδεικτική αποτύπωση των επιλογών επεξεργασίας που μπορεί να έχει ο χρήστης, της ροής εργασιών, αλλά και ένα έναυσμα για περαιτέρω αναζήτηση μεθόδων ανάλυσης.

5.4.1 Βιβλιοθήκη LASTools

Είναι ένα σύνολο εργαλείων/αλγορίθμων για την επεξεργασία των δεδομένων LiDAR που συλλέγονται από τους διάφορες αισθητήρες είναι της βιβλιοθήκης LASTools. Κύρια χαρακτηριστικά της βιβλιοθήκης αποτελούν: α) η προετοιμασία και ο καθαρισμός των δεδομένων (νέφη σημείων) από θόρυβο (πχ. lasclean) και οργάνωση τους με τη δημιουργία χωρικών δεικτών για γρηγορότερη επεξεργασία (lasindex), β) η παραγωγή υψομετρικού μοντέλου εδάφους (DTM), γ) η μετατροπή και συμπίεση των δεδομένων σε διάφορες μορφές (πχ. las, laz), που εξοικονομεί χώρο χωρίς απώλεια ποιότητας, καθιστώντας τη μεταφορά και αποθήκευση των δεδομένων πιο αποτελεσματική. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται εργαλεία για τον καθαρισμό του θορύβου, για την αναγνώριση του εδάφους από τη βλάστηση, τον υπολογισμό ύψους δένδρων από το αναγνωρισμένο έδαφος και την εξαγωγή πληροφοριών όπως η πυκνότητα βλάστησης.

5.4.2 Γλώσσα προγραμματισμού Python

Διάφορα τμήματα κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python, μπορούν να αναπτυχθούν με σκοπό την επεξεργασία διαφορετικών τύπων δεδομένων και την εξαγωγή στατιστικών και αναλυτικών μετρικών. Στη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιούνται ποικίλες συναρτήσεις και βιβλιοθήκες (πχ. numpy, pandas, shapely, rasterio) που επιτρέπουν την ανάγνωση, οργάνωση και προετοιμασία των δεδομένων προς ανάλυση. Η επεξεργασία περιλαμβάνει βήματα όπως τον καθαρισμό και τη μετατροπή των δεδομένων, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται η εξαγωγή κρίσιμων μετρικών όπως η μέση τιμή, η διακύμανση, και άλλοι δείκτες που βοηθούν στην κατανόηση των δεδομένων.

Επιπλέον, μπορούν να δημιουργηθούν κατάλληλες συναρτήσεις που περιλαμβάνουν τη σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με τα συλλεχθέντα δεδομένα πεδίου, για να αξιολογηθεί η ακρίβεια



τους. Με τη χρήση προχωρημένων βιβλιοθηκών, όπως NumPy, Pandas, Shapely, Rasterio, Matplotlib γίνεται υπολογισμός διαφορών μεταξύ των αναμενόμενων και παρατηρούμενων τιμών, καθώς και η παρουσίαση αποτελεσμάτων μέσω γραφημάτων για οπτική ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι άμεσα αξιοποιήσιμα, αξιόπιστα και να μπορούν να υποστηρίξουν περαιτέρω επιστημονικές ή επιχειρησιακές εφαρμογές.

5.4.3 Λογισμικό 3D Forest

Το λογισμικό «3D Forest», αποτελεί ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και την απεικόνιση LiDAR δεδομένων που συλλέχθηκαν από Laser Scanner αισθητήρες στο πλαίσιο της εκτίμησης και της μελέτης βιοποικιλότητας δασικών περιοχών. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την παραγωγή πυκνών νεφών σημείων που απεικονίζουν την τοπογραφία του εδάφους και την τρισδιάστατη (3D) δομή του δάσους με πολύ υψηλή ακρίβεια. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων αυτών με στόχο την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τη δομή του δάσους, τη βιομηχανική εκμετάλλευση του ξύλου, την εκτίμηση της βιομάζας του δάσους, την ανίχνευση αλλαγών στο φυσικό περιβάλλον, και πολλά άλλα.

Η αποδοχή του από την ερευνητική κοινότητα και το γεγονός πως και αυτό το πακέτο λογισμικού είναι ανοιχτού κώδικα (open source), ελεύθερο προς χρήση με μηδενικό κόστος, καθιστά το λογισμικό καλή επιλογή για τις εργασίες. Με το συγκεκριμένο λογισμικό, ο καταρτισμένος χρήστης δύναται να εξαγει στο τέλος των διεργασιών πληροφορίες ανά μεμονωμένο δένδρο σε μια συστάδα δένδρων, όπως παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες ([Πίνακας 1](#) και [Πίνακας 2](#)).

Πίνακας 1: Παράμετροι προς εξαγωγή για κάθε μεμονωμένο δένδρο στο λογισμικό 3D Forest

Παράμετροι Δένδρου	Στοιχεία
Θέση	X, Y, Z συντεταγμένες
Στηθιαία διάμετρος/Diameter Breast Height (m)	Διάμετρος δένδρου σε ύψος 1,3μ. από το έδαφος
Ύψος/Tree Height (m)	Κατακόρυφη απόσταση σημείου βάσης και του υψηλότερου σημείου του δένδρου
Μήκος νέφους/Cloud length (m)	Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων στο νέφος του δένδρου
Καμπύλη κορμού/Stem Curve	Κέντρο κορμού, διάμετρος πάνω από τη βάση του δένδρου (0,65m, 1,3m, 2m κ.λπ.)
Κυρτό Επίπεδο/Convex planar	Πολύγωνο με το συντομότερο όριο
Κοίλο Επίπεδο/Concave planar	Πολύγωνο με το μικρότερο εμβαδόν
Αριθμός σημείων δένδρου /Number of tree points	Αριθμός σημείων για ένα δένδρο

Πίνακας 2: Παράμετροι κόμης για κάθε μεμονωμένο δένδρο

Παράμετροι Κόμης (Crown)	Στοιχεία
Κεντροειδές/Centroid	X, Y, Z συντεταγμένες
Θέση/Position (m)	Θέση με απόκλιση από τη βάση του δένδρου (απόσταση, κατεύθυνση)



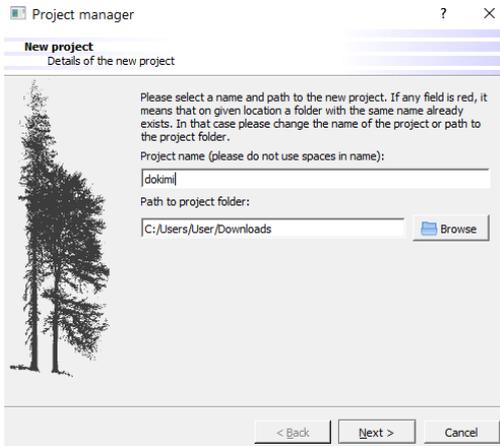
Ύψος βάσης/Bottom Height (m)	Κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της θέσης της βάσης του δέντρου και του ύψους του σημείου όπου ο χαμηλότερος ζωντανός βραχίονας συνδέεται με τον κύριο κορμό
Ύψος/Height (m)	Κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κατώτατου ύψους της κόμης και του υψηλότερου σημείου της
Όγκος/Volume by voxels (m ³)	Όγκος στέμματος που υπολογίζεται από voxels με δεδομένο μέγεθος

Η βασική λογική ροή εργασιών για τη χρήση του λογισμικού "3D Forest" στοχεύει στις παρακάτω διαδικασίες:

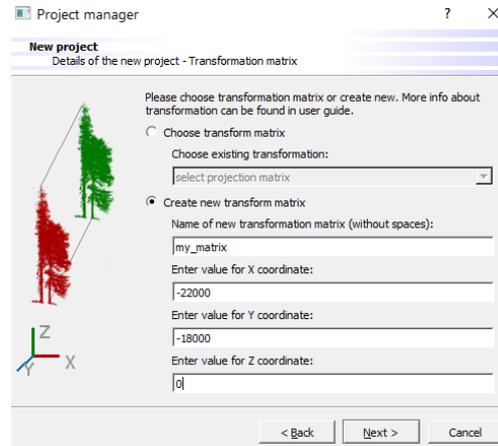
- **Εισαγωγή Δεδομένων:** Τα δεδομένα LiDAR εισάγονται στο λογισμικό "3D Forest"
- **Επεξεργασία Δεδομένων:** Τα δεδομένα υπόκεινται σε επεξεργασία, ώστε να αφαιρεθεί τυχόν θόρυβος ή ανεπιθύμητα στοιχεία και να προετοιμαστούν για την περαιτέρω ανάλυση.
- **Ανάλυση Δεδομένων:** Το λογισμικό προσφέρει εργαλεία για την ανάλυση των δεδομένων, όπως εκτίμηση του ύψους των δένδρων, της πυκνότητας δένδρων, της διανομής ύψους, καθώς και την ανίχνευση αλλαγών.
- **Εξαγωγή Αποτελεσμάτων:** Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξάγονται σε μορφή αναφορών ή γραφημάτων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση του δάσους.
- **Ανάπτυξη Στρατηγικών:** Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, μπορεί να αναπτυχθούν στρατηγικές για τη βιώσιμη διαχείριση του δάσους, όπως η εντοπισμός περιοχών με υψηλή βιοποικιλότητα ή η αναγνώριση περιοχών με προσαρμοσμένες ανάγκες διαχείρισης.

Ωστόσο, η πρακτική υλοποίηση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συγκεκριμένες ανάγκες και τα χαρακτηριστικά της κάθε δειγματοληπτικής επιφάνειας με τη συστάδα των μεμονωμένων δένδρων. Μετά τη ροή εργασιών, αναλύονται όλα τα απαραίτητα βήματα προς την επιτυχή επεξεργασία των τρισδιάστατων δεδομένων.

Αρχικά, δημιουργείται νέο έργο με τον ορισμό τίτλο έργου και της θέσης των αρχείων εισόδου (path), ενώ ορίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού (transformation matrix). Να σημειωθεί ότι οι τιμές των X, Y, Z συντεταγμένων για τον πίνακα μετασχηματισμού επιλέγονται με βασικό κριτήριο να μειωθούν τα δεκαδικά στοιχεία των συντεταγμένων όλων των σημείων του νέφους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η γρήγορη λειτουργία του λογισμικού και η ομαλή οπτικοποίηση του νέφους σημείων. Στις περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιείται ο πίνακας μετασχηματισμού, το λογισμικό αδυνατεί να οπτικοποιήσει ορθά την τρισδιάστατη μορφή του νέφους σημείων και παρουσιάζει οπτικά σφάλματα.

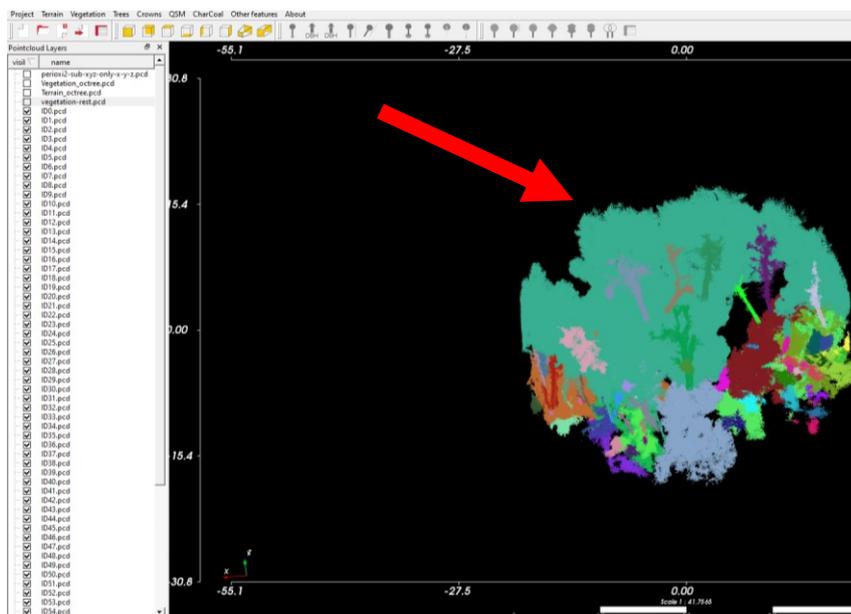


Εικόνα 28: Δημιουργία νέου έργου στο 3DForest



Εικόνα 29: Ορισμός πίνακα μετασχηματισμού στο 3DForest

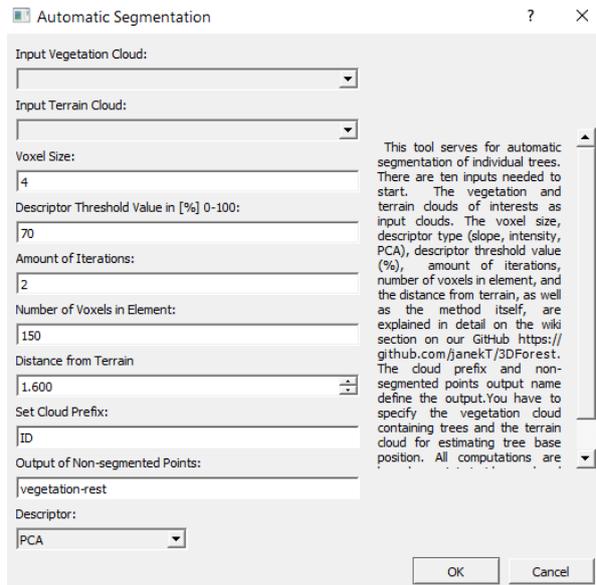
Στη συνέχεια, εισάγονται τα δεδομένα στο νέο έργο και ακολούθως χρησιμοποιείται η εντολή Terrain by Octree για να αναγνωρισθούν και κατηγοριοποιηθούν σε ξεχωριστό επίπεδο (layer) τα σημεία του εδάφους. Σε επόμενο βήμα, πραγματοποιείται η αναγνώριση του κάθε μεμονωμένου δένδρου ξεχωριστά με τη χρήση της εντολής Automatic Tree Segmentation. Σε πρώτο χρόνο παρατηρείται ότι το αποτέλεσμα της πρώτης ταξινόμησης δεν είναι ενθαρρυντικό, καθώς σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει αποτυχία στη διαδικασία αναγνώρισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με αποτέλεσμα να ενοποιούνται αντικείμενα (δένδρα) που δεν θα έπρεπε (βλ. [Εικόνα 30](#)). Ως εκ τούτου, η σωστή παραμετροποίηση των τιμών του αλγορίθμου αυτόματης ταξινόμησης αποτελεί μια απαιτητική και επαναληπτική διαδικασία, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα με την αναγνώριση των μεμονωμένων δένδρων για τις διάφορες δειγματοληπτικές επιφάνειες.



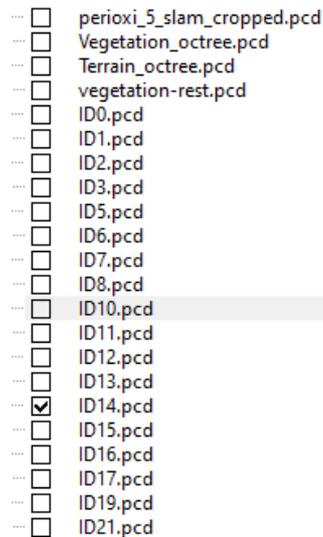
Εικόνα 30: Πρόβλημα κατά τη διαδικασία ταξινόμησης στο λογισμικό 3D Forest



Η σημαντικότητα της κάθε παραμέτρου, όπως το voxel size, η descriptor threshold value, το amount of iterations, το πλήθος των voxels και η απόσταση από το έδαφος, για την αναγνώριση ύπαρξης κορμού δένδρου πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά.

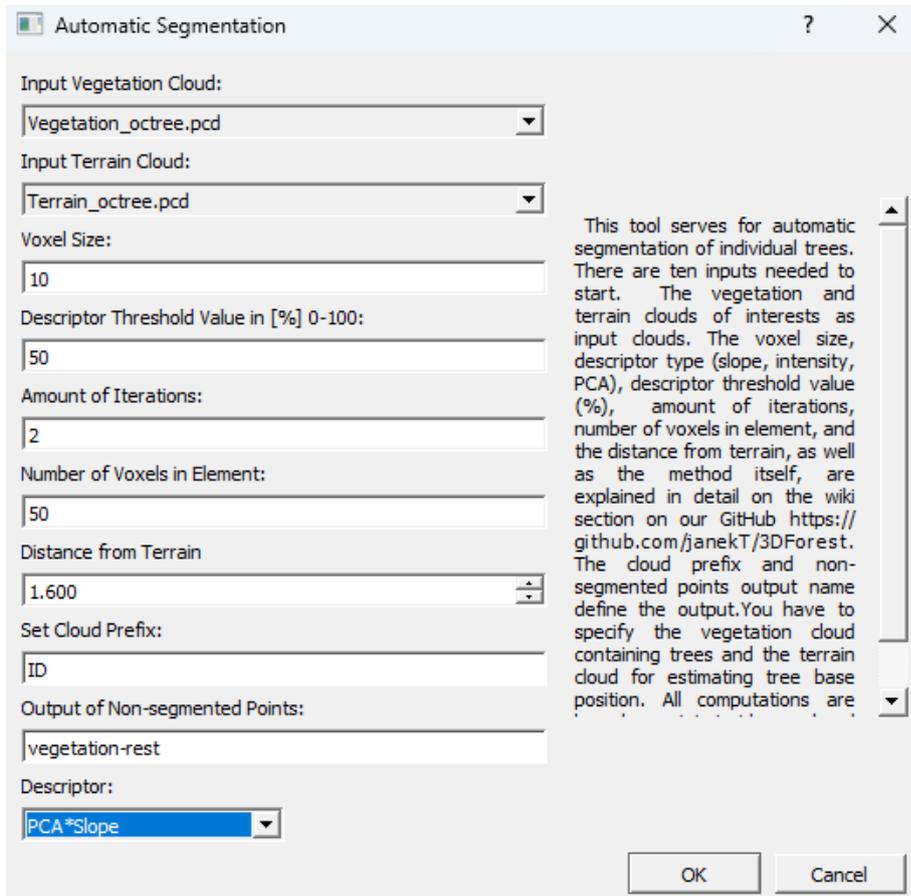


Εικόνα 31: Αυτοματοποιημένη ταξινόμηση/αναγνώριση των μεμονωμένων δένδρων



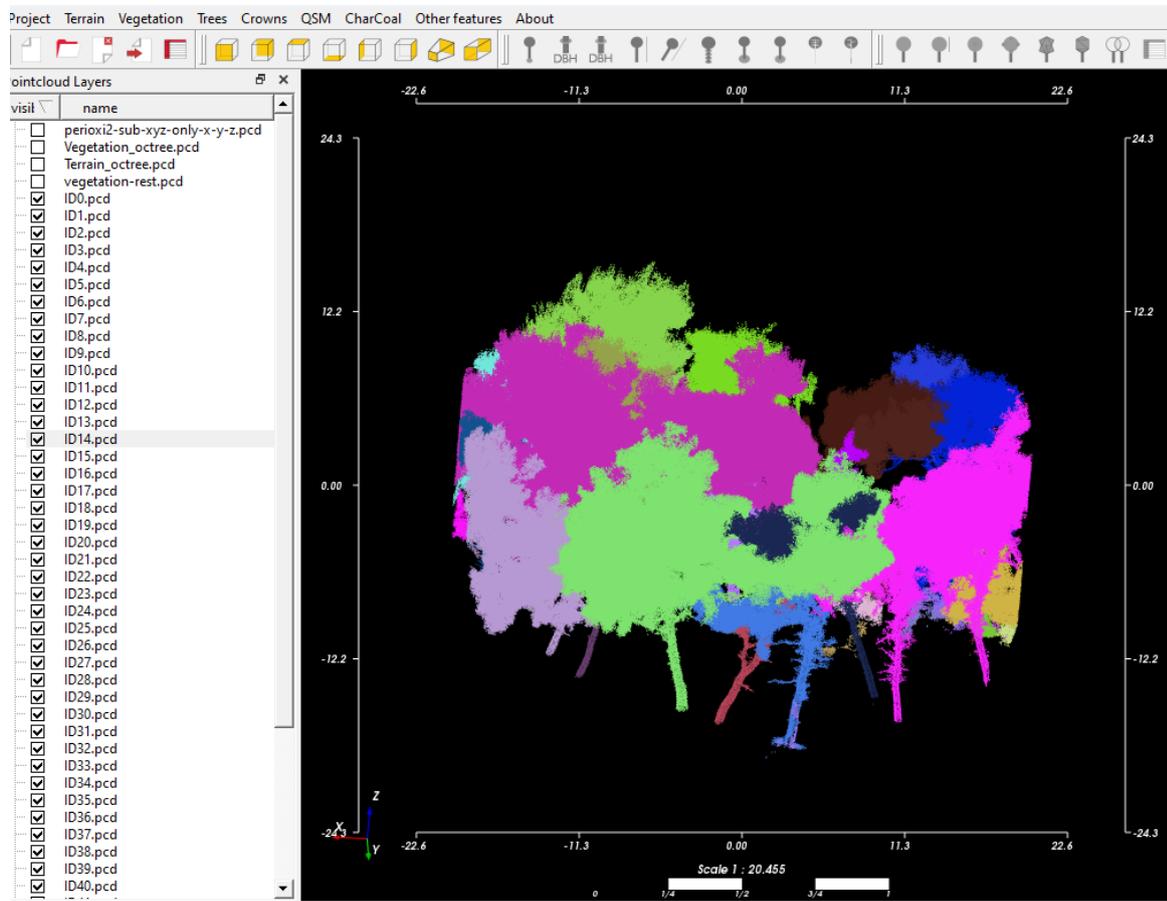
Εικόνα 32: Δημιουργία επιπέδων με σημεία εδάφους και βλάστησης, καθώς και τα επιμέρους επίπεδα ταξινόμησης των μεμονωμένων δένδρων

Οι παράμετροι που ζητάει το λογισμικό να ορίσει ο χρήστης κατά την εκκίνηση του εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το είδος των δεδομένων που εισήχθησαν σε αυτό. Για παράδειγμα, σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχουν δεδομένα που φέρουν χρωματική πληροφορία RGB, ενώ σε κάποιες άλλες τα δεδομένα δεν φέρουν χρωματική πληροφορία. Επίσης, η πυκνότητα των δεδομένων είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία, καθώς πολλές φορές λόγω των πολύ πυκνών νεφών σημείων που προκύπτουν από τις πολλαπλές πηγές μετρήσεων λειτουργούν αρνητικά κατά τη διαδικασία της επίλυσης, καθώς το πρόγραμμα καταναλώνει περισσότερη μνήμη RAM με αποτέλεσμα να εμφανίζει προβλήματα στη λειτουργία του και άρα πρέπει να γίνει γενίκευση των δεδομένων αυτών και εισαγωγή τους εκ νέου στο λογισμικό.

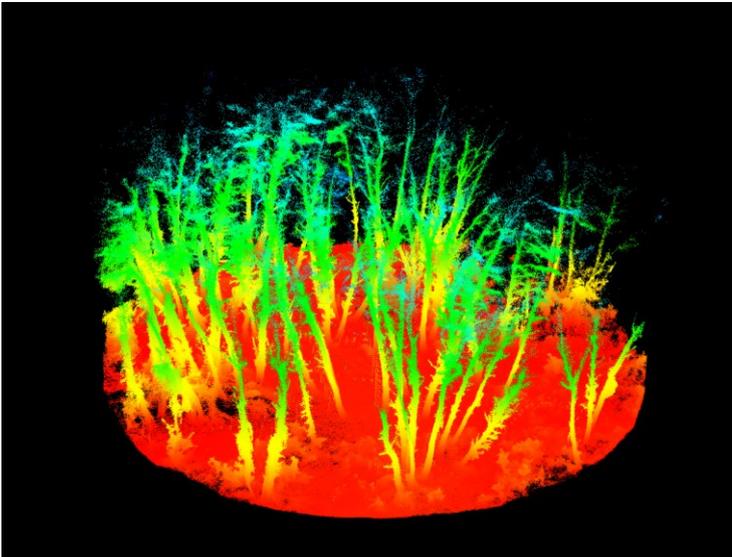


Εικόνα 33: Παράμετροι που εισάγει ο χρήστης στο λογισμικό 3D Forest

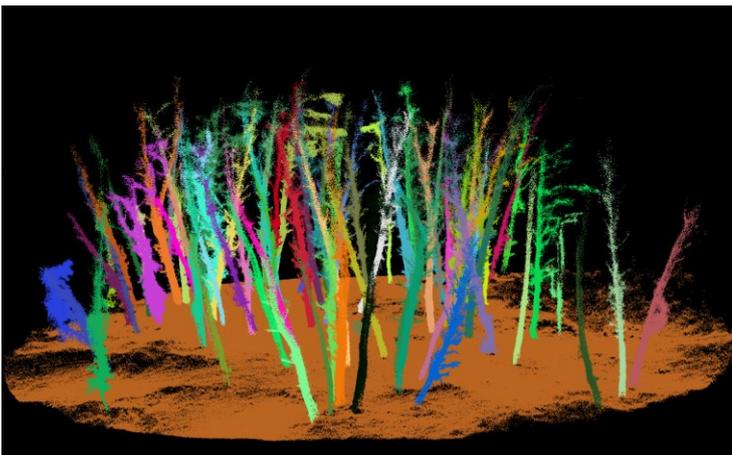
Τελικώς, ορίζονται οι παράμετροι με το βέλτιστο δυνατόν τρόπο και εξάγεται ένα ορθά ταξινομημένο (στο μεγαλύτερο μέρος του) σύνολο δεδομένων το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των δενδροκομικών στοιχείων του κάθε δένδρου. Η πληροφορία αυτή θεωρείται πολύ σημαντική για την ορθή τη διαχείριση των δασικών περιοχών και την αποτελεσματική χάραξη στρατηγικών.



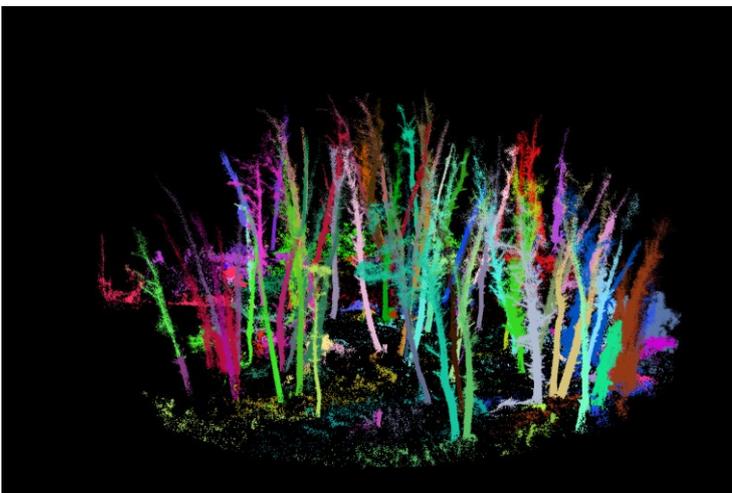
Εικόνα 34: Ταξινομημένα δένδρα εντός μίας περιοχής μελέτης



*Εικόνα 35: Τρισδιάστατο νέφος σημείων
δειγματοληπτικής επιφάνειας*



*Εικόνα 36: Τρισδιάστατο νέφος σημείων
(πλάγια όψη) με ταξινομημένα δένδρα*



*Εικόνα 37: Τρισδιάστατο νέφος σημείων
με ταξινομημένα μεμονωμένα δένδρα σε
δειγματοληπτική επιφάνεια*

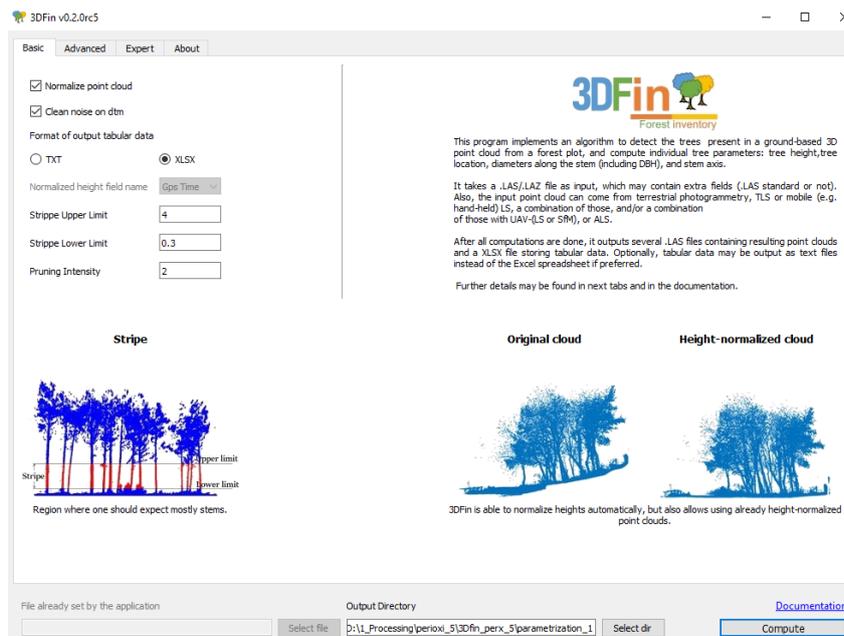
5.4.4 3D Fin λογισμικό

Το λογισμικό «3D Fin», αποτελεί ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και την απεικόνιση LiDAR δεδομένων που συλλέγονται από Laser Scanner αισθητήρες στο πλαίσιο της εκτίμησης και της μελέτης χερσαίων περιοχών. Αποτελεί ένα λογισμικό για την τρισδιάστατη απογραφή περιοχών σε χερσαία νέφη σημείων, ενώ για να ενισχύσει τη φιλικότητά του προς το χρήστη παρέχεται ως plug-in tool σε διάφορα λογισμικά, όπως το Cloud Compare και το QGIS. Οι χρήστες μπορούν να διερευνήσουν και χρησιμοποιήσουν πληθώρα λειτουργιών του στο ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό Cloud Compare.

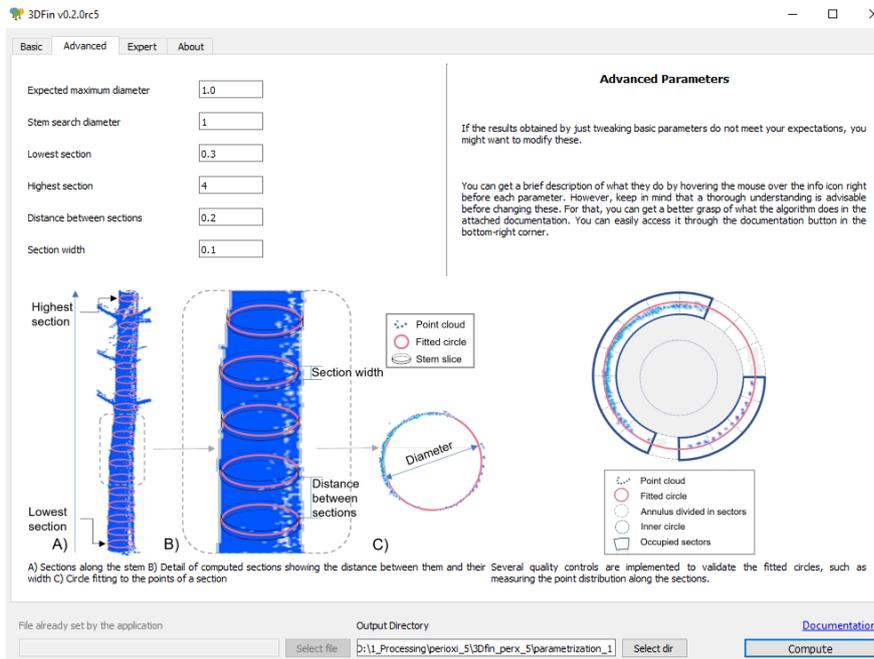
Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων αυτών με στόχο την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τη δομή του δάσους. Με το συγκεκριμένο λογισμικό, ο καταρτισμένος χρήστης δύναται να εξάγει στο τέλος των διεργασιών πληροφορίες ανά μεμονωμένο δένδρο σε μια συστάδα δένδρων, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα ([Πίνακας 3](#)).

Πίνακας 3: Εξαγωγή παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα στο λογισμικό 3D Fin

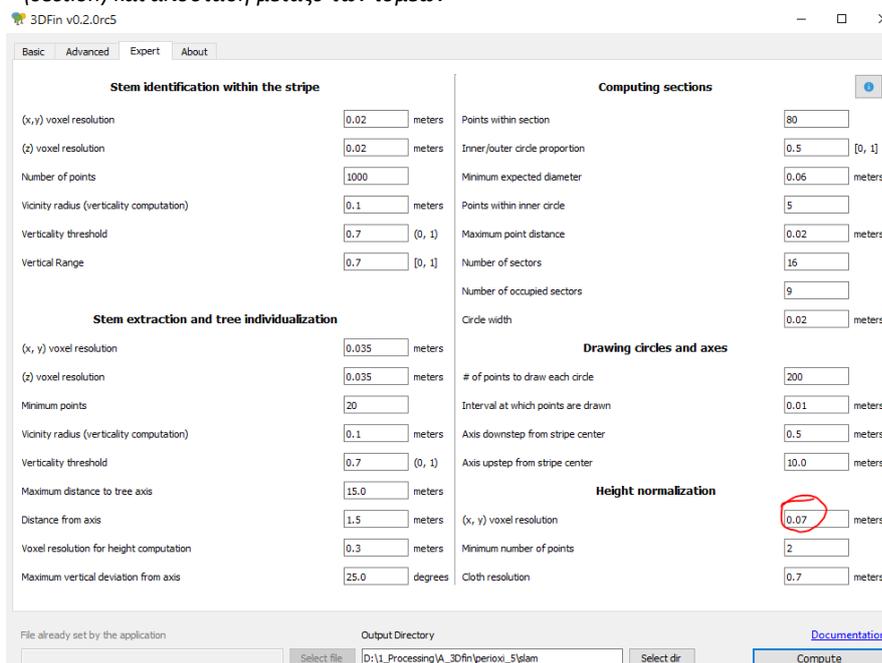
Παράμετροι Δένδρου	Στοιχεία
Θέση	X, Y, Z συντεταγμένες
Διάμετρος/Diameter (m)	Διάμετρος δένδρου σε ύψος σε διάφορους τομείς
Ύψος/Tree Height (m)	Κατακόρυφη απόσταση σημείου βάσης και του υψηλότερου σημείου του δένδρου
Ολική ποιότητα/Overall Quality (0-1)	Κριτήριο ποιότητας τομέα διαμέτρου σε κάθε μεμονωμένο δένδρο
Outlier Probability	Τιμές πιθανότητας για κάθε τομέα
Sector Occupancy	Ποσοστό (%) ύπαρξης σημείων
Points Inner Cycle	Πλήθος σημείων στο εσωτερικό του κάθε τομέα (section)



Εικόνα 38: Εισαγωγή νέφους σημείων και παραμετροποίηση μεταβλητών



Εικόνα 39: Παραμετροποίηση μεταβλητών σχετικά με την διάμετρο αναζήτησης στελέχους, το εύρος αναζήτησης τομέα (section) και απόσταση μεταξύ των τομέων



Εικόνα 40: Επιλογή επιθυμητής διάστασης του 3D voxel και παραμετροποίηση διαστάσεων άλλων μεταβλητών

Στην αρχική καρτέλα του 3DFin, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την κανονικοποίηση (normalization) της τιμής του ύψους του νέφους σημείων, αλλά και των καθαρισμών πιθανών outliers που λειτουργούν ως θόρυβος κοντά στο ανάγλυφο του εδάφους (βλ. [Εικόνα 38](#)). Σημαντικοί παράμετροι αποτελούν το χαμηλότερο και υψηλότερο όριο λωρίδας (lower and upper stripe limit) σε συνδυασμό με την ένταση του «κλαδέματος» (pruning intensity). Οι τιμές που λαμβάνει η



παράμετρος της έντασης του κλαδέματος μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 5, όπου η χαμηλότερη τιμή υποδηλώνει ότι τα ο κορμός του δένδρου είναι αρκετά καθαρός και δεν περιβάλλεται από έντονα κλαδιά. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές συνιστώνται σε περιπτώσεις όπου τα δέντρα έχουν μεγάλο αριθμό χαμηλών κλαδιών ή ιδιαίτερα θορυβώδη νέφη σημείων. Η σωστή παραμετροποίηση αυτών των μεταβλητών επηρεάζεται από τις συνθήκες της βλάστησης σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια.

Ακολούθως, στην επόμενη καρτέλα «advanced» σημαντική είναι η επιλογή της μέγιστης τιμής διαμέτρου προς αναζήτηση, σε συνδυασμό με την επιλογή του ύψους του χαμηλότερου και υψηλότερου τομέα αλλά και της απόστασης μεταξύ αυτών (βλ. [Εικόνα 39](#)). Επίσης, αποδεικνύεται σημαντική παράμετρος η επιλογή της τιμής της διάστασης του voxel, ώστε να συμβαδίζει με την ανάλυση του νέφους σημείου και να επιτυγχάνεται η μέγιστη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



6. ΟΔΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ

6.1 Σύνοψη από τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις για την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων παρατήρησης Γης σε επιχειρησιακό επίπεδο

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια του έργου ELBIOS, αλλά και την επιστημοντική εμπειρία και έρευνα σε διεθνώς επίπεδο, επισημαίνονται κωδικοποιημένα τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών UAV/TLS/MLS (Næsset et al. 2025, Buettel et. al. 2025, Müllerová et al., 2021, Müllerová et al., 2025, Seir et al. 2021).

6.1.1 Κύρια οφέλη και πλεονεκτήματα

- **Ολοκληρωμένη αποτύπωση πόρων:** Δυνατότητα εκτίμησης βασικών παραμέτρων σχετικών με τη βιοποικιλότητα (όπως για παράδειγμα θέση, ύψος, διάμετρος, όγκος της βλάστησης-ειδικότερα σε δασικά περιβάλλοντα) με ένα ενιαίο σύνολο σαρώσεων.
- **Δυνατότητα υπολογισμού και μέτρησης σύνθετων χαρακτηριστικών και μεταβλητών:** Εξαγωγή παραμέτρων δύσκολων ή αδύνατων με κλασικές επίγειες μετρήσεις (π.χ. LAI, επιφάνεια κόμης, όγκος κόνης, μικροενδιαιτήματα).
- **Ενισχυμένη αντικειμενικότητα και επαναληψιμότητα:** Η ψηφιακή επεξεργασία μειώνει την υποκειμενικότητα και βελτιώνει τη συγκρισιμότητα των δεδομένων.
- **Διαχρονική αξία δεδομένων:** Δυνατότητα εκ των υστέρων επανεπεξεργασίας με νεότερους αλγόριθμους για κάλυψη αναδυόμενων αναγκών.
- **Δυνατότητα μέτρησης αυξημένης έκτασης δειγματοληπτικών επιφανειών:** Η χρήση UAV/TLS/MLS διευκολύνει τη σάρωση μεγαλύτερων επιφανειών χωρίς σημαντική αύξηση χρόνου, καθιστώντας τα δείγματα πιο αντιπροσωπευτικά.

6.1.2 Περιορισμοί και προκλήσεις

- **Τεχνική εξειδίκευση:** Απαιτείται υψηλού επιπέδου κατάρτιση προσωπικού για την επεξεργασία και αξιολόγηση των δεδομένων.
- **Υποδομές:** Η επεξεργασία δεδομένων UAV/TLS/MLS (νεφών σημείων, εικόνων) χρειάζεται επαρκή υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένα λογισμικά.
- **Συνθήκες πεδίου:** Η απόδοση διαφοροποιείται ανάλογα με την εποχικότητα (π.χ. με φύλλωμα για τα χαρακτηριστικά της κόμης, χωρίς φύλλωμα για ύψος/διάμετρο των δένδρων).
- **Πλήρης αντικατάσταση:** Δεν είναι σκόπιμη/εφικτή στο άμεσο μέλλον β η πλήρης αντικατάσταση παραδοσιακών μεθόδων
- **Τεχνολογικοί περιορισμοί:** Δεν υπάρχουν ολοκληρωμένες τεχνολογικές λύσεις που να επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πληροφορίας μετά την καταγραφή της από τον αισθητήρα.
- **Ποικιλομορφία οικοτόπων και φυσικού περιβάλλοντος:** Σε οικοτόπους με πυκνή βλάστηση/υπόροφο, δεν είναι εφικτή η συλλογή δεδομένων υψηλής ακρίβειας ή σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να υπάρχουν σημαντικά κενά



- **Δυσπρόσιτο ανάγλυφο:** Το φυσικό περιβάλλον, και δη το φυσικό/δασικό περιβάλλον της χώρας μας, ενέχει περιορισμούς στη χρήση εξοπλισμού. Για παράδειγμα με έντονο ανάγλυφο δεν είναι εφικτή συχνά η χρήση UAV σταθερής πτέρυγας, η ακρίβεια δεκτών GNSS εμφανίζεται μειωμένη. Επίσης το έντονο ανάγλυφο καθιστά απαγορευτική την πρόσβαση σε θέσεις με κλίση, χωρίς οδικό δίκτυο κ.λπ.
- **Έλλειψη προσωπικού:** Υπάρχει περιορισμένη διαθεσιμότητα προσωπικού με άριστη γνώση των τεχνολογιών (ιδίως MLS/TLS)
- **Αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα:** Μπορεί να υπάρξουν πιθανές επιπτώσεις στην άγρια πανίδα εξαρτώνται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, όπως ο χρόνος παρουσίας των ερευνητών σε μια περιοχή, ο τύπος του εξοπλισμού, το είδος που παρακολουθείται ή επηρεάζεται κ.α.

6.1.3 Συστάσεις για εφαρμογή

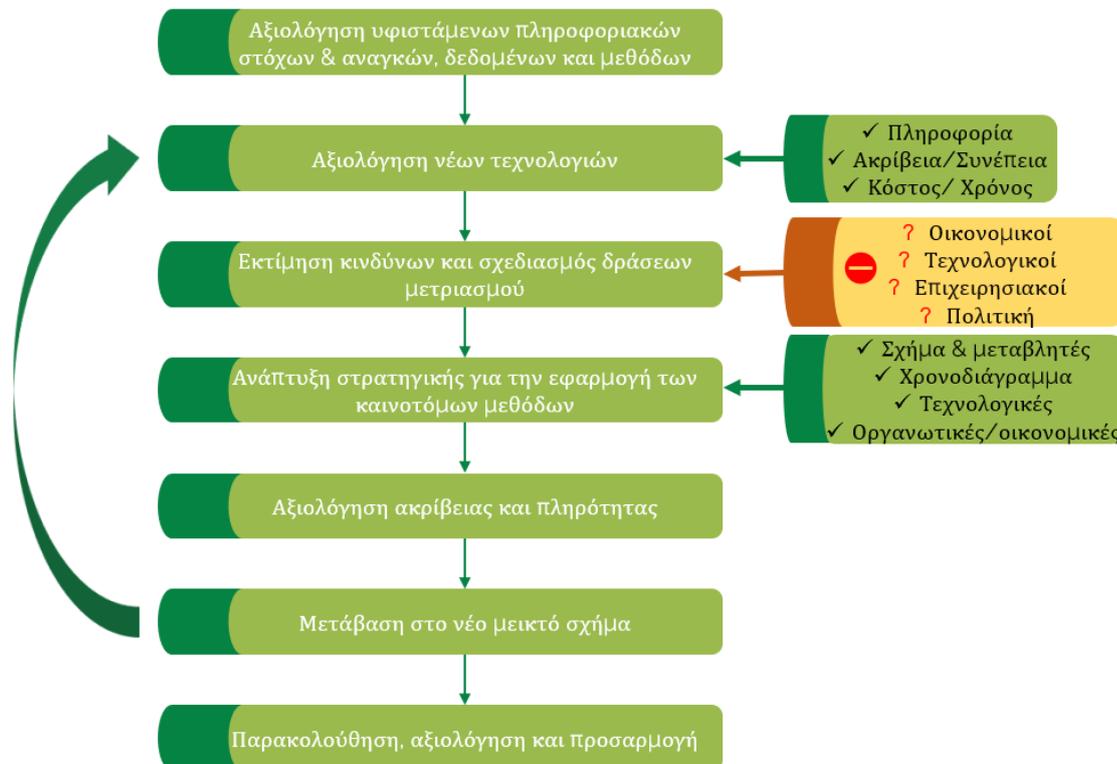
- **Πιλοτική αξιολόγηση:** Πριν τα οριστικά συμπεράσματα ως προς της δυνατότητα αξιοποίησης, θα πρέπει να γίνεται καταγραφές και αναλύσεις σε δειγματοληπτικές επιφάνειες και σε διαφορετικές εποχικές/καιρικές συνθήκες.
- **Συνδυασμός μεθόδων:** Θα πρέπει για αρκετό διάστημα να γίνεται συλλογή πληροφοριών και με παραδοσιακές μετρήσεις, ώστε να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των δεδομένων.
- **Δημιουργία βάση δεδομένων αναφοράς:** Θα πρέπει να δημιουργείται ένα σύνολο δεδομένων, σε συνδυασμό με ακριβή δεδομένα αναφοράς για ανάπτυξη και βελτίωση αλγορίθμων στο μέλλον.
- **Συνεχής επικαιροποίηση:** Εκ νέου ανάλυση των δεδομένων με νεότερους αλγόριθμους για την εξαγωγή νέων μεταβλητών.
- **Διατομεακή συνεργασία:** Συνεργασία των ειδικών βιοποικιλότητας με ειδικούς τηλεπισκόπησης, προμηθευτών εξοπλισμού για βέλτιστη ενσωμάτωση των τεχνολογιών.
- **Τυποποίηση στα πρωτόκολλα για τη συλλογή/αποθήκευση δεδομένων από UAV/TLS/MLS:** Η χρήση αυτών των τεχνολογιών για μετρήσεις σχετικά με τη βιοποικιλότητα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στον σχεδιασμό της μελέτης και στις μεθόδους που εφαρμόζονται.
- **Συλλογή κατάλληλων μεταδεδομένων:** Είναι κρίσιμη για την τυποποίηση της μεθοδολογίας και τη δυνατότητα μεταφοράς της στην πράξη, και την αξιοποίηση των δεδομένων
- **Προσεκτικός σχεδιασμός:** Για τη μέγιστη αποδοτικότητα, θα πρέπει οι ειδικοί να ορίζουν τον κατάλληλο τύπο πλατφόρμας (π.χ. UAV, terrestrial), αισθητήρα, σχέδιο δειγματοληψίας, μέθοδο συλλογής και προσέγγιση επεξεργασίας - ανάλογα με τις μεταβλητές ενδιαφέροντος.

6.2 Πλαίσιο εφαρμογής και οδικός χάρτης για την υιοθέτηση και εφαρμογή νέων τεχνολογιών

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει στη διάθεση των φορέων άσκησης και πολιτικής και διαχείρισης των προστατευόμενων περιοχών και της βιοποικιλότητας πλειάδων καινοτόμων, νέων τεχνολογιών, όπως αυτές που εξετάστηκαν στο πλαίσιο του έργου LIFE ELBIOS. Η επιχειρησιακή αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών, μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στο είδος, την ποσότητα και την ποιότητα των πληροφοριών, που οι υπεύθυνοι διαχείρισης και πολιτικής χρειάζονται για την διατήρηση και διαχείριση των προστατευόμενων περιοχών.



Από μια άλλη οπτική και σε μια άλλη κλίμακα, η επιχειρησιακή αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις διαδικασίες και τις μεθόδους συλλογής, ανάλυσης και αξιοποίησης των δεδομένων σχετικά με τη βιοποικιλότητα (Stephenson, 2020). Και βέβαια η επιχειρησιακή αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών ενέχει προκλήσεις και κινδύνους που μπορεί να προκύψουν από την μη ορθή ενσωμάτωσή τους στο μηχανισμό καταγραφής και παρακολούθησης της βιοποικιλότητας των προστατευόμενων περιοχών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας οδικός χάρτης για την εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων, με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του έργου ELBIOS, την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, αλλά και σημαντικές ερευνητικές εργασίες και εργασίες ανασκόπησης της βιβλιογραφίας που έγιναν πρόσφατα διαθέσιμες (Buettel et al. 2025, Dalton et al. 2024, Dornela et al. 2023, Ramilo-Henry et al. 2024, Stephenson, 2020)



Εικόνα 41: Οδικός χάρτης για την τακτική παρακολούθηση της βιοποικιλότητας στις προστατευόμενες περιοχές της χώρας με καινοτόμες μεθόδους (Τροποποιημένο από Buettel et al. 2025, Stephenson, 2020).

6.2.1 Αξιολόγηση υπαρχόντων δεδομένων και στόχων

Η διαδικασία ξεκινά με την προσεκτική αποτίμηση των δεδομένων που ήδη υπάρχουν και των στόχων του εκάστοτε προγράμματος παρακολούθησης. Η εξέταση αυτή δεν αφορά μόνο το είδος και την ποιότητα των δεδομένων, αλλά και το κατά πόσο αυτά καλύπτουν τις ανάγκες διαχείρισης και πολιτικής. Αυτή η αξιολόγηση πρέπει να συμπεριλάβει τα χαρακτηριστικά και τα κενά των υφιστάμενων δεδομένων ως προς την κάλυψη των αναγκών διαχείρισης και διατήρηση (π.χ. ύπαρξη



χρονοσειράς δεδομένων, κενά ως προς τη χωρική κατανομή, πληροφοριακά κενά, βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες ανάγκες υποβολής αναφορών σε διεθνή πλαίσια και συνθήκες κ.α.)

6.2.2 Αξιολόγηση νέων τεχνολογιών

Το επόμενο βήμα έχει να κάνει με την αξιολόγηση των νέων τεχνολογικών εξελίξεων τεχνολογία.

Το κεντρικό ερώτημα είναι αν τα δεδομένα και οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από τις νέες μεθόδους είναι συμβατά και συγκρίσιμα με αυτά που προκύπτουν από τις παραδοσιακές μεθόδους. Η συμβατότητα αυτή είναι κρίσιμη για να μπορούν να συνδεθούν τα νέα δεδομένα με τα παλαιότερα και να διατηρηθεί η δυνατότητα ανάλυσης μακροχρόνιων τάσεων.

Εκτός από τη συμβατότητα, αξιολογείται και η σκοπιμότητα υιοθέτησης των νέων τεχνολογιών: το κόστος εξοπλισμού, η εκπαίδευση του προσωπικού, ο χρονικός ορίζοντας εγκατάστασης και οι ανάγκες συντήρησης. Επίσης πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο οι νέες τεχνολογίες μπορεί να λειτουργήσουν συμπληρωματικά ή μπορούν να αντικαταστήσουν τελείως τις παραδοσιακές μεθόδους. Για παράδειγμα, οι ασύρματοι αισθητήρες ήχου μπορούν να παρακολουθούν αδιάλειπτα την ορνιθοπανίδα, τις περιβαλλοντικές παραβάσεις ή την ποιότητα των υδάτων (όπως π.χ. επιδείχθηκε στο πλαίσιο του έργου LIFE ELBIOS), κάτι που δεν είναι εφικτό με τις κλασικές μεθόδους, οι οποίες στηρίζονται σε περιοδικές, τακτικές ή όχι επισκέψεις στο πεδίο. Από την άλλη, και όπως πάλι προέκυψε από το έργο LIFE ELBIOS η χρήση των UAV, TLS, MLS, -και ανεξάρτητα από τα τεχνικά πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που αυτή προσφέρει βλ. προηγούμενη ενότητα- υπόκειται στους χρονικούς περιορισμούς των κλασικών επίγειων μετρήσεων, ενώ η τρέχουσα τεχνολογική ικανότητα έχει να κάνει κυρίως με παραμέτρους που μπορούν να μετρηθούν και με κλασικές μεθόδους. Σε κάθε περίπτωση για την αξιολόγηση της καταλληλότητας νέων τεχνολογιών συνίσταται να υλοποιούνται πιλοτικές μελέτες μικρής κλίμακας στο πεδίο, ώστε να αξιολογείται η απόδοσή της κάθε τεχνολογίας σε πραγματικές συνθήκες, για διαφορετικές ομάδες, είδη, οικοτόπους, συνθήκες κ.λπ (ακολουθώντας την φιλοσοφία του έργου LIFE ELBIOS στη Δράση B4).

6.2.3 Εκτίμηση κινδύνων και μετριασμός

Η μετάβαση σε νέες τεχνολογίες εμπεριέχει κινδύνους που πρέπει να προβλεφθούν. Αυτοί μπορεί να αφορούν:

- Τεχνολογία -Δεδομένα: Ασυνέχεια στις χρονοσειρές δεδομένων αν τα υφιστάμενα και τα νέα δεδομένα δεν ακολουθούν την ίδια τυποποίηση.
- Τεχνολογία - υποδομή: Πιθανές βλάβες στον εξοπλισμό, πιθανότητα απώλειας δεδομένων, πιθανή κλοπή, βανδαλισμός ή ταχεία απαξίωση της τεχνολογίας.
- Επιχειρησιακοί: Έλλειμμα εκπαίδευσης και προσωπικού, δυσχέρεια κατά τη συλλογή (όπως για παράδειγμα διαπιστώθηκε στο έργο ELBIOS λόγω γεωγραφικών συνθηκών, αλλά και λόγω εγγύτητας με στρατιωτικές εγκαταστάσεις), έλλειψη υποδομών και οργανωτικών δομών.
- Πολιτική: Έλλιπης υποστήριξης σε πολιτικό επίπεδο της ανάγκης για τη συλλογή δεδομένων βιοποικιλότητας, έλλειψη σταθερού πολιτικού πλαισίου, οικονομική κατάσταση της χώρας κλπ



Για κάθε κατηγορία απαιτείται σχέδιο μετριασμού, π.χ. μέσω παράλληλης συλλογής δεδομένων με διαφορετικές μεθόδους, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα ρίσκα.

6.2.4 Στρατηγική εφαρμογής

Με βάση τα προηγούμενα, καταρτίζεται ένα λεπτομερές σχέδιο εφαρμογής: πότε, πού και πώς θα χρησιμοποιηθεί η εκάστοτε νέα τεχνολογική μέθοδος. Ξεκινώντας αυτό απαιτεί το σχεδιασμό (και χρονικά) των κατάλληλων οργανωτικών αλλαγών στη δομή του οργανισμού (ΟΦΥΠΕΚΑ κ.α.) καθώς και ένα λεπτομερές πλάνο για την διασφάλιση της οικονομικής υποστήριξης και βιωσιμότητας των αλλαγών. Το σχέδιο πρέπει να περιλαμβάνει χρονοδιάγραμμα, ρόλους, τους υπεύθυνους της μετάβασης/ενσωμάτωσης, πρωτόκολλα και δείκτες προόδου. Η τυποποίηση των διαδικασιών συμβάλλει στη διαφάνεια, την επαναληψιμότητα και τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών έργων ή περιοχών.

Απαιτείται επίσης ο καθορισμός και η περιγραφή των μεταβλητών που θα καταγράφονται με τις νέες μεθόδους, και του σχήματος αποθήκευσης και διαχείρισης της πληροφορίας. Σημαντικό στοιχείο είναι η παράλληλη εφαρμογή νέων και παλαιών μεθόδων για ένα διάστημα (σε περίπτωση που προβλέπεται ολοκληρωτική αντικατάσταση των υφιστάμενων μεθόδων). Αυτό εξασφαλίζει τη σύγκριση και τη συνέχιση των δεδομένων..

6.2.5 Αξιολόγηση ακρίβειας και πληρότητας

Με τη λειτουργία της νέα ροή δεδομένων και πληροφοριών στο κεντρικό σύστημα-βάση δεδομένων της βιοποικιλότητας, είναι σημαντικό η αξιοπιστία τους διασφαλίζεται μέσω διασταυρωμένου ελέγχου με υφιστάμενα δεδομένα ή δεδομένα για ένα πιλοτικό διάστημα όπου λαμβάνονται παράλληλα (βλέπε προηγούμενο βήμα). Αυτό σημαίνει ότι εντοπίζονται και διορθώνονται τυχόν αποκλίσεις, π.χ. λόγω διαφορών στη συχνότητα δειγματοληψίας ή στις μονάδες μέτρησης. Σημαντικό είναι να υπάρχει καλή τεκμηρίωση και διαχείριση δεδομένων, ώστε οι μελλοντικοί χρήστες να κατανοούν τα όρια και τις ιδιαιτερότητες των μεθόδων.

Είναι σημαντικό επίσης να οριστούν δείκτες και μετρικές που θα αξιολογούν την ποιότητα των δεδομένων. Για παράδειγμα στην περίπτωση των UAV, TLS, MLS, θα μπορούσε να είναι η ακρίβεια γεωναφοράς, η πληρότητα κάλυψης, η αναλογία της δειγματοληπτικής επιφάνειας που καλύφθηκε κ.λπ.

6.2.6 Μετάβαση σε ένα σχήμα που ενσωματώνει τις νέες τεχνολογικές μεθόδους

Η μετάβαση σηματοδοτεί τη στιγμή που ξεκινά η συλλογή δεδομένων (και) με τις νέες τεχνολογικές μεθόδους. Όπως προαναφέρθηκε οι προγενέστερες, παραδοσιακές μέθοδοι μπορεί να διατηρηθούν στο σχήμα της παρακολούθησης, αλλά η πόροι που θα αφιερώνονται σε αυτές θα βαίνουν μειούμενες (εκτός τις περίπτωσης που οι νέες τεχνολογίες δεν μπορούν να παρέχουν την ίδια πληροφορία). Σημαντικό είναι ο χρόνος και ο τρόπος της μετάβασης, να έχει πλήρως προβλεφθεί κατά τη σύνταξη της στρατηγικής της μετάβασης. Σε αυτή τη φάση είναι κρίσιμη η εκπαίδευση προσωπικού, η προσαρμογή πρωτοκόλλων και η εξασφάλιση ότι όλα τα δεδομένα και τα μεταδεδομένα ακολουθούν το ίδιο πλαίσιο.



6.2.7 Παρακολούθηση, αξιολόγηση και προσαρμογή

Το τελικό βήμα δεν είναι το τέλος της διαδικασίας, αλλά μια συνεχής «ζωντανή» δράση. Γίνεται συστηματική παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας των νέων μεθόδων, με χρήση δεικτών που ορίστηκαν από την αρχή. Οι τακτικές αξιολογήσεις δείχνουν αν η μέθοδος συνεχίζει να εξυπηρετεί τους στόχους ή χρειάζεται βελτιώσεις. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών που μπορεί να προκύψουν στο μέλλον, εξασφαλίζοντας ευελιξία και ανθεκτικότητα στο πρόγραμμα παρακολούθησης. Η ύπαρξη μηχανισμών ανατροφοδότησης επιτρέπει την έγκαιρη προσαρμογή, ώστε να διατηρείται η αξιοπιστία και η δυνατότητα σύγκρισης των δεδομένων διαχρονικά.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abreu Neto, R. de, Abreu, M.C., Soares, A.A.V., Monte, M.A., Araújo, E.J.G. de, Curto, R. de A., Miranda, N.A., 2021. Describing the Structure and Relationship of Height and Diameter in an Old Unmanaged Eucalyptus spp. Plantation. *Floresta e Ambient.* 28, 1–11. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2020-0087>
- Adams, T., Beets, P., Parrish, C., 2012. Extracting more data from LiDAR in forested areas by Analyzing waveform shape. *Remote Sensing (Basel, Switzerland)* 4 (3), 682–702. <https://doi.org/10.3390/rs4030682>
- Agrillo, E., Filipponi, F., Pezzarossa, A., Casella, L., Smiraglia, D., Orasi, A., Attorre, F., Taramelli, A., 2021. Earth observation and biodiversity big data for forest habitat types classification and mapping. *Remote Sens.* 13. <https://doi.org/10.3390/rs13071231>
- Alvarez-Martínez, J.M., Jiménez-Alfaro, B., Barquín, J., Ondiviela, B., Recio, M., Silí oCalzada, A., Juanes, J.A., Isaac, N., 2018. Modelling the area of occupancy of habitat types with remote sensing. *Methods Ecol. Evol.* 9 (3), 580–593. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12925>
- Andries, A., Murphy, R.J., Morse, S., Lynch, J., 2021. Earth observation for monitoring, reporting, and verification within environmental land management policy. *Sustain.* 13. <https://doi.org/10.3390/su13169105>
- Arekhi, M., Yilmaz, O.Y., Yilmaz, H., Akyüz, Y.F., 2017. Can tree species diversity be assessed with Landsat data in a temperate forest? *Environ. Monit. Assess.* 189. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6295-6>
- Baillarin, S.J., Meygret, A., Dechoz, C., Petrucci, B., Lacherade, S., Tremas, T., Isola, C., Martimort, P., Spoto, F., 2012. Sentinel-2 level 1 products and image processing performances. *Int. Geosci. Remote Sens. Symp. XXXIX*, 7003–7006. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351959>
- Bakx, T.R.M., Koma, Z., Seijmonsbergen, A.C., Kissling, W.D., Zurell, D., 2019. Use and categorization of Light Detection and Ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. *Divers. Distrib.* 25 (7), 1045–1059
- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54 (2), 199–214. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-5)
- Bergen, K. M., Goetz, S. J., Dubayah, R. O., Henebry, G. M., Hunsaker, C. T., Imhoff, M. L., Nelson, R. F., Parker, G. G., Radeloff, V. C. 2009. Remote sensing of vegetation 3D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 114(G2). <https://doi.org/10.1029/2008JG000883>
- Brokaw, N. V. L., Lent, R. A. 1999. Vertical structure. In I. Hunter, & L. Malcom (Eds.), *Maintaining biodiversity in forest ecosystems* (pp. 373-399). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511613029.013
- Bruggisser, M., Hollaus, M., Kükenbrink, D., Pfeifer, N., 2019. COMPARISON of FOREST STRUCTURE METRICS DERIVED from UAV LIDAR and ALS DATA. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 4, 325–332. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-325-2019>
- Buchanan, G. M., Nelson, A., Mayaux, P., Hartley, A., & Donald, P.F., 2009. Delivering a Global, Terrestrial, Biodiversity Observation System through Remote Sensing. *Conserv. Biol.* 23, 499–502. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01083.x>
- Buettel, J. C., Lindenmayer, D. B., Scheele, B. C., & Evans, M.J., 2025. Maintaining robust terrestrial ecological monitoring amid technological advancements. *Trends in Ecology & Evolution*, 40(7), 651–662. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2025.04.003>



- Butchart, S.H.M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J.P.W., Almond, R.E.A., Baillie, J.E.M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K.E., Carr, G.M., Chanson, J., Chenery, A.M., Csirke, J., Davidson, N.C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Galloway, J.N., Genovesi, P., Gregory, R.D., Hockings, M., Kapos, V., Lamarque, J.-F., Leverington, F., Loh, J., McGeoch, M.A., McRae, L., Minasyan, A., Morcillo, M.H., Oldfield, T.E.E., Pauly, D., Quader, S., Revenga, C., Sauer, J.R., Skolnik, B., Spear, D., Stanwell-Smith, D., Stuart, S.N., Symes, A., Tierney, M., Tyrrell, T.D., Vié, J.-C., Watson, R., 2010. Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science* (80-.). 328, 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>
- Bütler, R., Lachat, T., Krumm, F., Kraus, D., Larrieu, L., 2020. Field Guide to Tree-related Microhabitats. Descriptions and size limits for their inventory. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf.
- Carrasco, L., Giam, X., Papeş, M., & Sheldon, K. (2019). Metrics of Lidar-Derived 3D Vegetation Structure Reveal Contrasting Effects of Horizontal and Vertical Forest Heterogeneity on Bird Species Richness. *Remote Sensing*, 11(7), 743. <https://doi.org/10.3390/rs11070743>
- Castillo-Santiago, M.A., Ricker, M., de Jong, B.H.J., 2010. Estimation of tropical forest structure from SPOT-5 satellite images. *Int. J. Remote Sens.* 31, 2767–2782. <https://doi.org/10.1080/01431160903095460>
- Chen, S.; Liu, H.; Feng, Z.; Shen, C.; Chen, P. Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLoS ONE* 2019, 14, e0211392.
- Chrysafis, I., Korakis, G., Kyriazopoulos, A.P., Mallinis, G., 2020. Predicting tree species diversity using geodiversity and sentinel-2 multi-seasonal spectral information. *Sustain.* 12, 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12219250>
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Siachalou, S., Patias, P., 2017. Assessing the relationships between growing stock volume and Sentinel-2 imagery in a Mediterranean forest ecosystem. *Remote Sens. Lett.* 8, 508–517. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1295479>
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Tsakiri, M., Patias, P., 2019. Evaluation of single-date and multi-seasonal spatial and spectral information of Sentinel-2 imagery to assess growing stock volume of a Mediterranean forest. *Int J Appl Earth Obs Geoinf.* 77, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.004>
- Coops, N.C., Tompaski, P., Nijland, W., Rickbeil, G.J.M., Nielsen, S.E., Bater, C.W., Stadt, J.J., 2016. A forest structure habitat index based on airborne laser scanning data. *Ecol. Indic.* 67, 346–357. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.057>
- Correia, A.C., Faias, S.P., Ruiz-Peinado, R., Chianucci, F., Cutini, A., Fontes, L., Manetti, M.C., Montero, G., Soares, P., Tomé, M., 2018. Generalized biomass equations for Stone pine (*Pinus pinea* L.) across the Mediterranean basin. *For. Ecol. Manage.* 429, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.037>
- Dalton, D., Berger, V., Kirchmeir, H., Adams, V., Botha, J., Halloy, S., Hart, R., Švara, V., Torres Ribeiro, K., Chaudhary, S., & Jungmeier, M. (2024). A framework for monitoring biodiversity in protected areas and other effective area-based conservation measures: Concepts, methods and technologies. IUCN WCPA Technical Report Series No. 7. Gland, Switzerland: IUCN. <https://doi.org/10.2305/HRAP7908>
- Davies, A.B., Asner, G.P., 2014. Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends Ecol. Evol.* (Amsterdam) 29 (12), 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.005>
- Dornelas M, Chow C, Patchett R, Breeze T, Brotons L, Beja P, Carvalho L, Jandt U, Junker J, Kissling WD, Kühn I, Lumbierres M, Lyche Solheim A, Mjelde M, Moreira F, Musche M, Pereira H, Sandin L, Van Grunsven R (2023) Deliverable 4.2 Novel technologies for biodiversity monitoring - Final Report. ARPHA Preprints. <https://doi.org/10.3897/arphapreprints.e105600>



- Dubayah, R.O., Drake, J.B., 2000. Lidar remote sensing for forestry. *J. For.* 98 (6), 44–52. <https://doi.org/10.1093/jof/98.6.44>
- Dube, T., Mutanga, O., 2015. Investigating the robustness of the new Landsat-8 Operational Land Imager derived texture metrics in estimating plantation forest aboveground biomass in resource constrained areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 108, 12–32. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.06.002>
- Durkaya, A., Durkaya, B., Cakil, E., 2010. Predicting the above-ground biomass of crimean pine (*Pinus nigra*) stands in Turkey. *J. Environ. Biol.* 31, 115–118.
- Eckert, S., 2012. Improved forest biomass and carbon estimations using texture measures from WorldView-2 satellite data. *Remote Sens.* 4, 810–829. <https://doi.org/10.3390/rs4040810>
- Fernández-García, V., Marcos, E., Fernández-Guisuraga, J.M., Fernández-Manso, A., Quintano, C., Suárez-Seoane, S., Calvo, L., 2021. Multiple endmember spectral mixture analysis (Mesma) applied to the study of habitat diversity in the fine-grained landscapes of the cantabrian mountains. *Remote Sens.* 13, 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs13050979>
- Franklin, J.F., Van Pelt, R., 2004. Spatial aspects of structural complexity in old-growth forests. *J. For.* 102 (3), 22–29. [10.1093/jof/102.3.22](https://doi.org/10.1093/jof/102.3.22)
- Frazer, G.W., Magnussen, S., Wulder, M.A., Niemann, K.O., 2011. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass. *Remote Sens. Environ.* 115, 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.008>
- Gilbert, B., Lechowicz, M.J., 2004. Neutrality, niches, and dispersal in a temperate forest understory. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101 (20), 7651–7656. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400814101>
- Gould, W., 2000. Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots. *Ecol. Appl.* [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[1861:RSOVP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1861:RSOVP]2.0.CO;2)
- Hansen, M.C., Loveland, T.R., 2012. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 122, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>
- Haralick, R., Shanmugam, K., Dinstein, I., 1973. Texture features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.* 3, 610–621.
- Hauser, L.T., Féret, J.B., An Binh, N., van der Windt, N., Sil, Â.F., Timmermans, J., Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M., 2021. Towards scalable estimation of plant functional diversity from Sentinel-2: In-situ validation in a heterogeneous (semi-)natural landscape. *Remote Sens. Environ.* 262. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112505>
- Hill, R. A., Hinsley, S. A., Broughton, R. K. 2013. Assessing habitats and organism-habitat relationships by airborne laser scanning. In: *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning*, 335–356. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-0178663-8_17
- Holopainen, M.; Kankare, V.; Vastaranta, M.; Liang, X.; Lin, Y.; Vaaja, M.; Yu, X.; Hyyppä, J.; Hyyppä, H.; Kaartinen, H.; et al. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning—A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban For. Urban Green.* 2013, 12, 546–553.
- IPCC, 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), e Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Kanagawa, Japan. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2014.11.004>
- Kelsey, K.C., Neff, J.C., 2014. Estimates of aboveground biomass from texture analysis of Landsat imagery. *Remote Sens.* 6, 6407–6422. <https://doi.org/10.3390/rs6076407>
- Khare, S., Latifi, H., Ghosh, S.K., 2018. Multi-scale assessment of invasive plant species diversity using Pléiades 1A, RapidEye and Landsat-8 data. *Geocarto Int.* 33, 681–698. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1289562>



- Khare, S., Latifi, H., Rossi, S., 2019. Forest beta-diversity analysis by remote sensing: How scale and sensors affect the Rao's Q index. *Ecol. Indic.* 106, 105520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105520>
- Laliberté, E., Schweiger, A.K., Legendre, P., 2020. Partitioning plant spectral diversity into alpha and beta components. *Ecol. Lett.* 23, 370–380. <https://doi.org/10.1111/ele.13429>
- Larrieu, L., Cabanettes, A., Courbaud, B., Goulard, M., Heintz, W., Kozák, D., Kraus, D., Lachat, T., Ladet, S., Müller, J., Paillet, Y., Schuck, A., Stillhard, J., Svoboda, M., 2021. Co-occurrence patterns of tree-related microhabitats: A method to simplify routine monitoring. *Ecol. Indic.* 127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107757>
- Larrieu, L., Paillet, Y., Winter, S., Büttler, R., Kraus, D., Krumm, F., Lachat, T., Michel, A.K., Regnery, B., Vandekerckhove, K., 2018. Tree related microhabitats in temperate and Mediterranean European forests: A hierarchical typology for inventory standardization. *Ecol. Indic.* 84, 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.051>
- LaRue, E. A., Hardiman, B. S., Elliott, J. M., Fei, S. 2019. Structural diversity as a predictor of ecosystem function. *Environ. Res. Lett.*, 14(11), 114011–. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab49bb>.
- Lassauce, A., Paillet, Y., Jactel, H., Bouget, C., 2011. Deadwood as a surrogate for forest biodiversity: Meta-analysis of correlations between deadwood volume and species richness of saproxylic organisms. *Ecol. Indic.* 11, 1027–1039. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.004>
- Latifi, H., 2009. Characterizing Forest Structure by Means of Remote Sensing : A Review. *Remote Sens. - Adv. Tech. Platforms* 1–27.
- Lee, A.C., Lucas, R.M., 2007. A LiDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests. *Remote Sens. Environ.* 111, 493–518. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.018>
- Lefsky, M. a., Cohen, W.B., 2003. Selection of remotely sensed data. *Remote Sens. For. Environ. Concepts Case Stud.* 13–47. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0306-4_2
- Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W., Parker, G., Shugart, H., 1999. Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA. *Remote Sens. Environ.* 67, 83–98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00071-6)
- Liang, X.; Kankare, V.; Hyyppä, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F.; et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2016, 115, 63–77
- Liang, X.; Kankare, V.; Hyyppä, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F.; et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2016, 115, 63–77.
- Löfroth, T., Birkemoe, T., Shorohova, E., Dynesius, M., Fenton, N.J., Drapeau, P., Tremblay, J.A., 2023. Deadwood Biodiversity, in: *Advances in Global Change Research*. pp. 167–189. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_6
- Lopes, M., Fauvel, M., Ouin, A., Girard, S., 2017. Spectro-Temporal Heterogeneity Measures from Dense High Spatial Resolution Satellite Image Time Series: Application to Grassland Species Diversity Estimation. *Remote Sens.* 9, 993. <https://doi.org/10.3390/rs9100993>
- Ma, X., Mahecha, M.D., Migliavacca, M., van der Plas, F., Benavides, R., Ratcliffe, S., Kattge, J., Richter, R., Musavi, T., Baeten, L., Barnoaiea, I., Bohn, F.J., Bouriaud, O., Bussotti, F., Coppi, A., Domisch, T., Huth, A., Jaroszewicz, B., Joswig, J., Pabon-Moreno, D.E., Papale, D., Selvi, F., Laurin, G.V., Valladares, F., Reichstein, M., Wirth, C., 2019. Inferring plant functional diversity from space: the potential of Sentinel-2. *Remote Sens. Environ.* 233, 111368. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111368>



- MacArthur, R., MacArthur, J.W., 1961. On bird species diversity. *Ecology* 42, 594–598. <https://doi.org/10.2307/1932254>
- Madonsela, S., Cho, M.A., Ramoelo, A., Mutanga, O., 2017. Remote sensing of species diversity using Landsat 8 spectral variables. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 133, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.008>
- Mallinis, G., Chrysafis, I., Korakis, G., Pana, E., Kyriazopoulos, A.P., 2020. A Random Forest Modelling Procedure for a Multi-Sensor Assessment of Tree Species Diversity. *Remote Sens.* 12, 1210. <https://doi.org/10.3390/rs12071210>
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Packalén, P., Hyyppä, J., 2006. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. *For. An Int. J. For. Res.* 79, 217–229. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl007>
- Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. 2014. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies (2014th ed., Vol. 27)*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Maltamo, M.; Bollandsas, O.M.; Naesset, E.; Gobakken, T.; Packalen, P. Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory. *Forestry* 2011, 84, 23–31.
- Marzialetti, F., Cascone, S., Frate, L., Di Febbraro, M., Acosta, A.T.R., Carranza, M.L., 2021. Measuring alpha and beta diversity by field and remote-sensing data: A challenge for coastal dunes biodiversity monitoring. *Remote Sens.* 13. <https://doi.org/10.3390/rs13101928>
- Massetti, A., Sequeira, M.M., Pupo, A., Figueiredo, A., Guiomar, N., Gil, A., 2016. Assessing the effectiveness of RapidEye multispectral imagery for vegetation mapping in Madeira Island (Portugal). *Eur. J. Remote Sens.* 49, 643–672. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20164934>
- McCune, B., Grace, J., 2002. Analysis of Ecological Communities. *MjM Softw. Des.* Glenden Beach 289, 303–305. [https://doi.org/10.1016/s0022-0981\(03\)00091-1](https://doi.org/10.1016/s0022-0981(03)00091-1)
- McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C., Bauhus, J., 2005. Forest and woodland stand structural complexity: Its definition and measurement. *For. Ecol. Manage.* 218 (1), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034>
- Melin, M., Hill, R.A., Bellamy, P.E., Hinsley, S.A., 2019. On bird species diversity and remote sensing-utilizing lidar and hyperspectral data to assess the role of vegetation structure and foliage characteristics as drivers of avian diversity. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 12 (7), 2270–2278. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2906940>
- Miller, D.R., 1997. Forest stand dynamics. *Agric. For. Meteorol.* 86, 139–140. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(97\)00018-x](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(97)00018-x)
- Miura, N., Koyanagi, T., Yokota, S., Yamada, S., 2019. Can UAV LiDAR derive vertical structure of herbaceous vegetation on riverdike?. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2/W5, 127–132, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-127-2019>, 2019
- Morris, E.K., Caruso, T., Fischer, M., Hancock, C., Obermaier, E., Prati, D., Maier, T.S., Meiners, T., Caroline, M., Wubet, T., Wurst, S., Matthias, C., Socher, A., Sonnemann, I., Nicole, W., 2014. Choosing and using diversity indices: insights for ecological applications from the German Biodiversity Exploratories. *Ecol. Evol.* 3514–3524. <https://doi.org/10.1002/ece3.1155>
- Müllerová, J., Gago, X., Bučas, M., Company, J., Estrany, J., Fortesa, J., Manfreda, S., Michez, A., Mokroš, M., Paulus, G., Tiškus, E., Tsiafouli, M. A., & Kent, R. (2021). Characterizing vegetation complexity with unmanned aerial systems (UAS) – A framework and synthesis. *Ecological Indicators*, 131, 108156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108156>
- Müllerová, J., Kent, R., Brůna, J., Bučas, M., Estrany, J., Manfreda, S., Michez, A., Mokroš, M., Tsiafouli, M. A., & Gago, X., 2025. Understanding spatio-temporal complexity of vegetation using drones,



- what could we improve? *Journal of Environmental Management*, 373, 123656. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123656>
- Muukkonen, P., Mäkipää, R., 2006. Erratum: Biomass equations for European trees: Addendum (Silva Fennica (2005) 4 (63)). *Silva Fenn.* 40, 763–773. <https://doi.org/ISSN 0037-5330>
- Næsset, E., Ørka, H. O., Dalponte, M., Gobakken, T., Ene, L. T., Mauro, F., Puliti, S., & Coops, N. C. (2025). Terrestrial and mobile laser scanning for national forest inventories: From theory to implementation. *Environmental Impact Assessment Review*, 110, 107647. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107647>
- Næsset, E., 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scand. J. For. Res.* 19, 164–179. <https://doi.org/10.1080/02827580310019257>
- Nagendra, H., 2002. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Appl. Geogr.* 22, 175–186.
- Nagendra, H., Rocchini, D., Ghate, R., Sharma, B., Pareeth, S., 2010. Assessing plant diversity in a dry tropical forest: Comparing the utility of landsat and ikonos satellite images. *Remote Sens.* 2, 478–496. <https://doi.org/10.3390/rs2020478>
- O'Connor, B., Secades, C., Penner, J., Sonnenschein, R., Skidmore, A., Burgess, N.D., Hutton, J.M., 2015. Earth observation as a tool for tracking progress towards the Aichi Biodiversity Targets. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 1, 19–28. <https://doi.org/10.1002/rse2.4>
- Oliver, C.D., Larson, B.C., 1996. Forest stand dynamics.
- Olofsson, K.; Holmgren, J.; Olsson, H. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sens.* 2014, 6, 4323–4344.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., & Slavík, M. (2021). Assessment of Stem Volume on Plots Using Terrestrial Laser Scanner: A Precision Forestry Application. *Sensors*, 21(1), 301. <https://doi.org/10.3390/s21010301>
- Park, T., 2020. Potential Lidar Height, Intensity, and Ratio Parameters for Plot Dominant Species Discrimination and Volume Estimation. *Remote Sens.* 12, 3266. <https://doi.org/10.3390/rs12193266>
- Pastick, N.J., Dahal, D., Wylie, B.K., Parajuli, S., Boyte, S.P., Wu, Z., 2020. Characterizing land surface phenology and exotic annual grasses in dryland ecosystems using landsat and sentinel-2 data in harmony. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12040725>
- Pettorelli, N., Safi, K., Turner, W., 2014. Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 369, 20130190. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0190>
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends Ecol. Evol.* 20, 503–510. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2005.05.011>
- Pinto-Ledezma, J.N., Cavender-Bares, J., 2021. Predicting species distributions and community composition using satellite remote sensing predictors. *Sci. Rep.* 11, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96047-7>
- Qu, Y., Shaker, A., Silva, C.A., Klauber, C., Pinagé, E.R., 2018. Remote sensing of leaf area index from LiDAR height percentile metrics and comparison with MODIS product in a selectively logged tropical forest area in Eastern Amazonia. *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10060970>
- Ramilo-Henry, M., Casabella-Herrero, G., Bota, G., & Brotons, L.. 2024. Developing and deploying new technologies for biodiversity monitoring. *Biodiversa+ Report*, D2.14. Biodiversa+.
- Randin, C.F., Ashcroft, M.B., Bolliger, J., Cavender-Bares, J., Coops, N.C., Dullinger, S., Dirnböck, T., Eckert, S., Ellis, E., Fernández, N., Giuliani, G., Guisan, A., Jetz, W., Joost, S., Karger, D., Lembrechts,



- J., Lenoir, J., Luoto, M., Morin, X., Price, B., Rocchini, D., Schaepman, M., Schmid, B., Verburg, P., Wilson, A., Woodcock, P., Yoccoz, N., Payne, D., 2020. Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models. *Remote Sens. Environ.* 239, 111626. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111626>
- Raty, J., Varvia, P., Korhonen, L., Savolainen, P., Maltamo, M., Packalen, P., 2022. A Comparison of linear-mode and single-photon airborne LiDAR in species-specific forest inventories. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 60, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3060670>.
- Reddy, C.S., 2021. Remote sensing of biodiversity: what to measure and monitor from space to species? *Biodivers. Conserv.* 30, 2617–2631. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02216-5>
- Ritter, T.; Schwarz, M.; Tockner, A.; Leisch, F.; Nothdurft, A. Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. *Forests* 2017, 8, 265
- Sandström, J., Bernes, C., Junninen, K., Löhmus, A., Macdonald, E., Müller, J., Jonsson, B.G., 2019. Impacts of dead wood manipulation on the biodiversity of temperate and boreal forests. A systematic review. *J. Appl. Ecol.* 56, 1770–1781. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13395>
- Savilaakso, S., Johansson, A., Hakkila, M., Uusitalo, A., Sandgren, T., Monkkonen, M., Puttonen, P., 2021. What are the effects of even-aged and uneven-aged forest management on boreal forest biodiversity in Fennoscandia and European Russia? A systematic review. *Environ. Evid.* 10 (1), 1–38. <https://doi.org/10.1186/s13750020-00215-7>
- Schumacher, P., Mislimeshova, B., Brenning, A., Zandler, H., Brandt, M., Samimi, C., Koellner, T., 2016. Do Red Edge and Texture Attributes from High-Resolution Satellite Data Improve Wood Volume Estimation in a Semi-Arid Mountainous Region. *Remote Sens.* 8, 540. <https://doi.org/10.3390/rs8070540>
- Seier, G., Hödl, C., Abermann, J., Schöttl, S., Maringer, A., Hofstadler, D. N., Pröbstl-Haider, U., & Lieb, G. K. (2021). Unmanned aircraft systems for protected areas: Gadgetry or necessity? *Journal for Nature Conservation*, 64, 126078. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126078>
- Shannon, C.E., 1948. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x>
- Smiris, P., Maris, F., Vitoris, K., Stamou, N., Kalambokidis, K., 2000. Aboveground biomass of *Pinus halepensis* Mill. forests in the Kassandra Peninsula - Chalkidiki. *Silva Gandav.* 65. <https://doi.org/10.21825/sg.v65i0.815>
- Solla-gullón, F., Álvarez, P., Balboa, M.A., Soalleiro, R.J.R., 1998. Growing Stock-Based Assessment of the Carbon Stock in a Pilot Zone of Northern Spain : Comparison of Biomass Equations and Biomass Expansion Factors. ... challenges ... 1–11.
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S. a, 2001. Classification and change detection using Landsat TM Data- When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 75, 230–244. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
- Spracklen, B., Spracklen, D. V., 2021. Determination of structural characteristics of old-growth forest in ukraine using spaceborne lidar. *Remote Sens.* 13. <https://doi.org/10.3390/rs13071233>
- Stein, A., Gerstner, K., Kreft, H., Arita, H., 2014. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecol. Lett.* 17 (7), 866–880. [10.1111/ele.12277](https://doi.org/10.1111/ele.12277)
- Stephenson, P.J. 2020. Technological advances in biodiversity monitoring: applicability, opportunities and challenges. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 45, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.08.005>



- Trochta, J., Krůček, M., Vrška, T., Král, K., 2017. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS One* 12, e0176871. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871>
- Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A.K., Szantoi, Z., Buchanan, G., Dech, S., Dwyer, J., Herold, M., Koh, L.P., Leimgruber, P., Taubenboeck, H., Wegmann, M., Wikelski, M., Woodcock, C., 2015. Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. *Biol. Conserv.* 182, 173–176. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.048>
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., Steininger, M., 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends Ecol. Evol. (Amsterdam)* 18 (6), 306–314. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)
- van Ewijk, K.Y., Treitz, P.M., Scott, N.A., 2011. Characterizing Forest Succession in Central Ontario using Lidar-derived Indices. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 77, 261–269. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.3.261>
- Vierling, K.T., Vierling, L.A., Gould, W.A., Martinuzzi, S., Clawges, R.M., 2008. Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. *Front. Ecol. Environ.* 6 (2), 90–98. <https://doi.org/10.1890/070001>
- Vogeler, J., Hudak, A., Vierling, L., Evans, J., Green, P., Vierling, K., 2014. Terrain and vegetation structural influences on local avian species richness in two mixed-conifer forests. *Remote Sens. Environ.* 147, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.006>
- Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C., Kraus, K., 2004. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat. Inf Sci* 35 (Part B3), 201–206
- Wang, Y., Ni, W., Sun, G., Chi, H., Zhang, Z., Guo, Z., 2019. Slope-adaptive waveform metrics of large footprint lidar for estimation of forest aboveground biomass. *Remote Sens. Environ.* 224, 386–400. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.017>
- Warren, S.D., Alt, M., Olson, K.D., Irl, S.D.H., Steinbauer, M.J., Jentsch, A., 2014. The relationship between the spectral diversity of satellite imagery, habitat heterogeneity, and plant species richness. *Ecol. Inform.* 24, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.08.006>
- Wehr, A., Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54 (2), 68–82. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8)
- Zellweger, F., Braunisch, V., Baltensweiler, A., Bollmann, K. 2013. Remotely sensed forest structural complexity predicts multi species occurrence at the landscape scale. *Forest Ecology and Management.* 307, 303-312, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.023>
- Zhao, Yujin, Sun, Y., Chen, W., Zhao, Yanping, Liu, X., Bai, Y., 2021. The potential of mapping grassland plant diversity with the links among spectral diversity, functional trait diversity, and species diversity. *Remote Sens.* 13. <https://doi.org/10.3390/rs13153034>
- Zheng, S., Cao, C., Dang, Y., Xiang, H., Zhao, J., Zhang, Y., Wang, X., Guo, H., 2014. Retrieval of forest growing stock volume by two different methods using Landsat TM images. *Int. J. Remote Sens.* 35, 29–43. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.860567>
- Zhou, T., Chen, B.-M., Liu, G., Huang, F.-F., Liu, J.-G., Liao, W.-B., Wang, Y.-Y., Ren, S.-J., Chen, C.-Q., Peng, S.-L. 2015. Biodiversity of Jinggangshan Mountain: The importance of topography and geographical location in supporting higher biodiversity. *PloS One*, 10(3), 15p
- Zhu, X., Nie, S., Wang, C., Xi, X., Lao, J., Li, D., 2022. Consistency analysis of forest height retrievals between GEDI and ICESat-2. *Remote Sens. Environ.* 281, 113244. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113244>



-
- Zhu, Z., Wang, S., Woodcock, C.E., 2015. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sens. Environ.* 159, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.014>
- Zianis, D., 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *For. Ecol. Manage.* 256, 1400–1407. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.002>
- Zianis, D., Mencuccini, M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *For. Ecol. Manage.* 187, 311–332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>
- Ziemer, J., Dubois, C., Thiel, C., Bueso-Bello, J.-L., Rizzoli, P., Schmulius, C., 2023. Relationship between Lidar-Derived Canopy Densities and the Scattering Phase Center of High-Resolution TanDEM-X Data. *Remote Sens.* 15, 3589. <https://doi.org/10.3390/rs15143589>
- Zvloff, A., 2016. Calculate Textures from Grey-Level Co-Occurrence Matrices (GLCMs). Package ‘glcm’