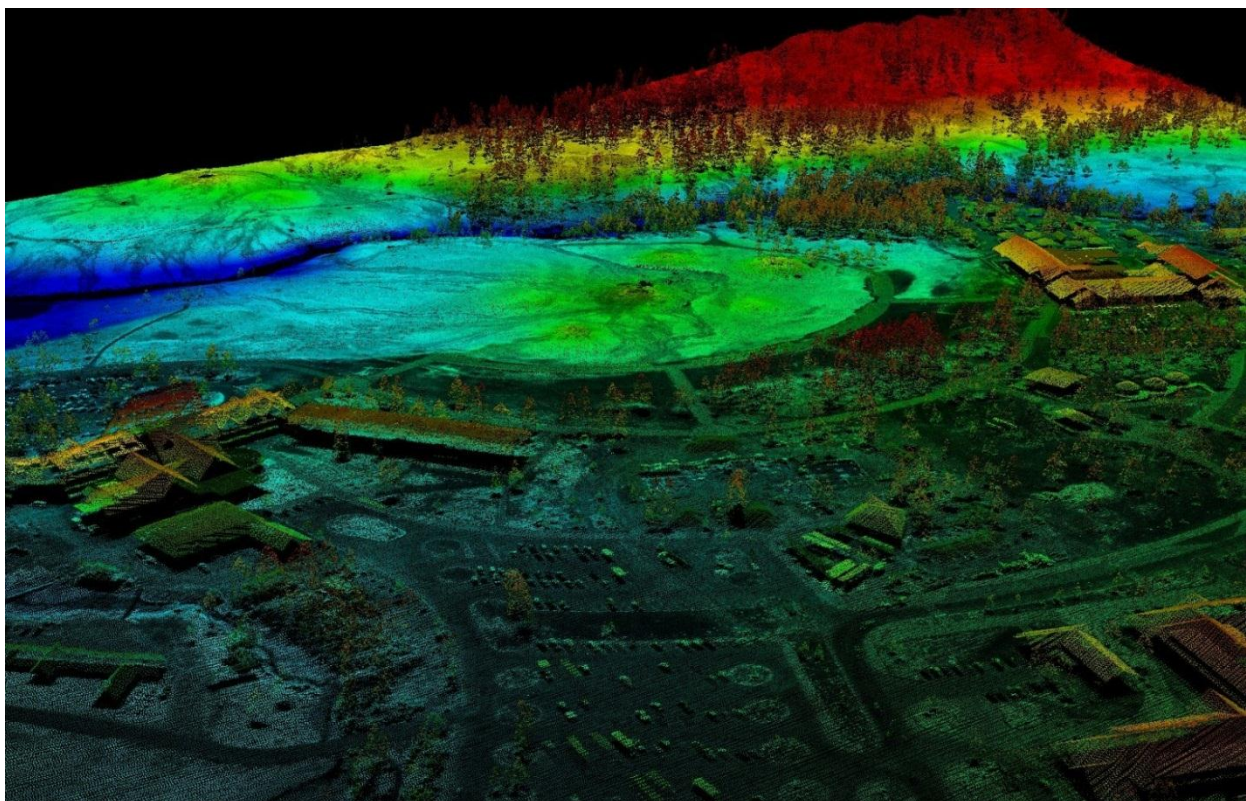




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ**

**ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LiDAR ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΦΡΑΓΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘ. ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ
LiDAR ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΦΡΑΓΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘ. ΕΜΠ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χαράλαμπος Ιωαννίδης
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Γεώργιος Καρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013

Παναγιώτης Λ. Φράγκος

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Λ. Φράγκος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν τις θέσεις του συγγραφέα και όχι τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Φωτογραφία εξώφυλλου : « Νέφος σημείων LiDAR της περιοχής Old Faithful στο εθνικό πάρκο Yellowstone των ΗΠΑ».

Πηγή: EarthScope

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας στο αντικείμενο των εναέριων σαρωτών LiDAR, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους εκείνους οι οποίοι συνέβαλλαν καθ' οποιονδήποτε τρόπο, υλικό και άυλο στην προσπάθεια αυτή.

Πρωτίστως ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας, Αν. Καθηγητή κ. Ιωαννίδη Χαράλαμπο, τόσο για την ανάθεση του θέματος όσο και για την καθοριστική καθοδήγησή του κατά τη διαδικασία της εκπόνησης. Ευχαριστώ για την ελευθερία που μου έδωσε σε επιλογές για την τελική διαμόρφωση του αντικειμένου, καθώς και για το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που έδειξε προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αντιξοότητες που συναντήθηκαν.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Παραδείση για την καθοριστική συμβολή του αλλά και τα μέλη των εργαστηρίων Φωτογραμμετρίας Σοφία Σοϊλέ και Γεωδαισίας Βασίλη Μασίνα για την πολύτιμη τεχνική υποστήριξή τους.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στη μητέρα μου Ασημίνα, για την μοναδική υποστήριξή της καθ' όλη την μέχρι τώρα πορεία μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την ενασχόληση με το αντικείμενο των εναέριων σαρωτών LiDAR. Σκοπός της είναι αφενός να επιδείξει την χρησιμότητα των δεδομένων της εναέριας σάρωσης για παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων, και αφετέρου να προσθέσει στην ελληνόγλωσση βιβλιογραφία, η οποία αφορά τα συστήματα LiDAR και η οποία είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Αναπτύσσεται η τεχνολογία των συστημάτων LiDAR, καθώς και οι βασικές αρχές που διέπουν την λειτουργία τους, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται μια επισκόπηση των δεδομένων που παράγουν, του τρόπου ελέγχου τους από τους τελικούς χρήστες, καθώς και του τρόπου εκμετάλλευσής τους. Τελικώς, πραγματοποιούνται και αξιολογούνται μια σειρά από εφαρμογές με τα παράγωγα από τα συστήματα αυτά νέφη σημείων, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- ✓ Εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου επιφανείας (DSM) και φιλτράρισμα του νέφους σημείων για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) της περιοχής εργασίας.

- ✓ Συνένωση νέφους σημείων με αεροφωτογραφίες, τεχνική που ονομάζεται διεθνώς Data Fusion (ή Data Integration ή Data Merging), για παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας με φωτοσταθερά σημεία τα οποία εξάγονται από το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας και ταυτόχρονη χρήση του για τη διαδικασία της ορθοαναγωγής.

Παράλληλα, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται και στην τυποποίηση των διαδικασιών, μέσα από τις οποίες μπορεί να πραγματοποιείται η αρχική προετοιμασία και επεξεργασία των δεδομένων της σάρωσης, ανεξάρτητα από το τελικό προϊόν που χρειάζεται να παραχθεί. Η διαδικασία αυτή, αφορά τις απαραίτητες, από το χρήστη, ενέργειες οι οποίες ξεκινούν με την παράδοση των δεδομένων από τον παροχέα και αποσκοπούν τόσο στον έλεγχο ακρίβειας των δεδομένων, όσο και στην αποτελεσματική εκμετάλλευση αυτών.

Μέσα από τις παραπάνω εφαρμογές, σκοπός είναι να αναδειχθεί η χρησιμότητα και η ευελιξία που τα νέφη σημείων δύναται να παρέχουν όσον αφορά την παραγωγή προϊόντων, τόσο για την υποστήριξη της φωτογραμμετρικής διαδικασίας, όσο και για την παραγωγή υποβάθρων για ένα μεγάλο εύρος εργασιών, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται σημαντική οικονομία χρόνου και μέσων. Έτσι, με τη χρήση των σύγχρονων αυτών δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα της αναθεώρησης η και αναδιάρθρωσης των κλασικών φωτογραμμετρικών διαδικασιών από τις οποίες έως σήμερα παράγονται τα διάφορα χαρτογραφικά προϊόντα, ενώ ταυτόχρονα ανοίγεται και ο δρόμος για την παραγωγή νέων ποιο ευέλικτων προϊόντων.

“Operating principles of Airborne Laser Scanners and their applications in the production of photogrammetric products”

ABSTRACT

This Diploma Thesis is dealing with the subject of airborne laser scanners LiDAR. Its purpose is to demonstrate the usefulness of the air scan data for the purposes of photogrammetric data production and also add to the Greek language literature concerning LiDAR systems, which is particularly limited. An overview of the technology of LiDAR systems, as well as the basic principles concerning their operation is been given, along with a review of the data they produce as well as the ways that end users can control and manipulate these data. Finally a number of applications, from the derivatives point clouds of these systems, is been developed and assessed which include:

- ✓ Export of the digital surface model (DSM), and point cloud filtering in order to produce the digital terrain model (DTM) of the study area.

- ✓ Coalescence of point cloud with aerial images, a technique which is known internationally as Data Fusion (or Data Integration or Data Merging), for production of a digital orthophoto with Control Points which are extracted from the digital surface model, as well as use of this surface model for orthorectification.

Simultaneously, this work focuses on the standardization of the processes through which the initial preparation and processing of the scan data can be carried out, regardless of the final derivatives that are intended to be produced. This process, is about the necessary actions that need to be performed by the end user, which begin with the delivery of the scan data from the provider, and are intended for the data's accuracy control, as well as for their exploitation in the most efficient way.

Through these applications, this Thesis aims to highlight the usefulness and flexibility that point clouds may provide in the production of products for supporting the photogrammetric process, as well as for the production of mapping derivatives for use in various project operations, while a significant savings of time and resources is been achieved. Thus, the use of these modern data sets enables the revision and restructuring of the classical photogrammetric procedures, by which various cartographic products currently are been produced, while paving the road for the creation of newer and more flexible products.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xi
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	xiii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. Η αποτύπωση του χώρου, μια έμφυτη ανθρώπινη ανάγκη	1
2. Η «σύγχρονη» φωτογραμμετρία.....	4
3. Διάρθρωση της εργασίας	5
ΜΕΡΟΣ Α΄: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LiDAR ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΟΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LiDAR	7
1.1 Το Laser και η χρήση του για μέτρηση αποστάσεων	7
1.2 Η σάρωση	11
1.3 Το ολοκληρωμένο σύστημα των σαρωτών LiDAR	15
1.3.1 Ο σαρωτής LiDAR	17
1.3.2 Το σύστημα POS	21
1.4 Βαθμονόμηση συστήματος	25
1.5 Άμεση γεωκωδικοποίηση και συγχρονισμός μετρήσεων	29
1.6 Πολλαπλές επιστροφές και ανάλυση πλήρους σήματος.....	32
1.7 Ανακλαστικότητα και ένταση επιστρεφόμενου παλμού	34
1.8 Πηγές σφαλμάτων.....	36
1.9 Μερικά διαθέσιμα εμπορικά συστήματα LiDAR.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LiDAR ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ	45
2.1 Το νέφος σημείων	45
2.2 Προγραμματισμός και εκτέλεση πτήσης	46
2.3 Διασφάλιση και έλεγχος ποιότητας δεδομένων (QA/QC)	48
2.4 Το πρότυπο δεδομένων .las και η συμπίεση .laz	50
2.5 Επεξεργασία δεδομένων	51
2.6 Εφαρμογές με χρήση δεδομένων LiDAR	54
2.6.1 Παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανειών και εδάφους.....	55
2.6.2 Lidargrammetry	56
2.6.3 Fusion με εικόνες και 3-d Modeling.....	57
2.6.4 Χαρτογράφηση διαδρόμων μεταφοράς (corridor mapping).....	60
ΜΕΡΟΣ Β΄: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ LiDAR	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ..	62
3.1 Δεδομένα και συστήματα συλλογής	62
3.2 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν	65
3.3 Επιλογή περιοχής εργασίας	66

3.4 Μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	69
4.1 Έλεγχος εσωτερικής ποιότητας δεδομένων (IQC)	69
4.1.1 Οπτικός έλεγχος.....	69
4.1.2 Έλεγχος επικαλύψεων	71
4.1.3 Υπολογισμός στατιστικών, έλεγχος για μη αποδεκτές μετρήσεις.....	72
4.1.4 Έλεγχος για συστηματικά σφάλματα, εικόνες dZ.....	75
4.2 Προεπεξεργασία δεδομένων	77
4.2.1 Δημιουργία διανομής.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ LiDAR.....	80
5.1 Παραγωγή εικόνας έντασης.....	80
5.2 Φιλτράρισμα νέφους σημείων (ground – non ground)	81
5.3 Παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανείας και εδάφους (DSM - DTM)	85
5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	88
5.4.1 Οριζοντιογραφική ακρίβεια.....	88
5.4.2 Υψομετρική ακρίβεια	93
5.4.3 Σύγκριση DSM-DTM	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑΣ ΜΕ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ ΤΟ DSM	102
6.1 Εισαγωγή	102
6.2 Σχεδιασμός κατασκευής της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας.....	103
6.3 Μέτρηση φωτοσταθερών επί του DSM.....	106
6.4 Επίλυση αεροτριγωνισμού.....	108
6.5 Ορθοαναγωγή	109
6.6 Έλεγχος αποτελεσμάτων	111
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ.....	120

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αρχαίος χάρτης Βαβυλωνίων.....	2
Εικόνα 2: Ο παγκόσμιος χάρτης του	2
Εικόνα 1-1: Σχηματική απεικόνιση συσκευής laser (Wikipedia.org).....	8
Εικόνα 1-2: Σύνοψη λειτουργίας εμπορικών laser στο H/M φάσμα (Wikipedia.org) ..	9
Εικόνα 1-3: (a) Μέτρηση χρόνου TOF από το σύστημα με απλοποιημένη αναπαράσταση παλμού (A.Wehr).....	10
Εικόνα 1-4: Βασικά μεγέθη σάρωσης LiDAR (USDA Forest Service).....	12
Εικόνα 1-5: Η απόκλιση της ακτίνας σε συνδυασμό με την γωνία σάρωσης και την κλίση του εδάφους (R.T. Pack et.al).....	13
Εικόνα 1-6: Ο εκφυλισμός της απόκλισης της ακτίνας laser από κυκλικό ίχνος σε έλλειψη (R.T. Pack et.al).	13
Εικόνα 1-7: Το πλήρες σύστημα LiDAR.....	16
Εικόνα 1-8: Σχηματική αναπαράσταση σαρωτή LiDAR (Riegl LMS Q560).....	17
Εικόνα 1-9: Μηχανισμός ταλαντευόμενου κατόπτρου και μοτίβα σάρωσης μονού (α) και διπλού (β) κατόπτρου	18
Εικόνα 1-10: Μηχανισμός κλωνιζόμενου κατόπτρου και μοτίβο σάρωσης palmer scan	19
Εικόνα 1-11: Μηχανισμός περιστρεφόμενου πολυγωνικού κατόπτρου και μοτίβο σάρωσης παράλληλων γραμμών.....	20
Εικόνα 1-12: Μηχανισμός οπτικών ινών (TopoSys) και μοτίβο σάρωσης επικαλυπτόμενων ιχνών	21
Εικόνα 1-13: Σχηματική απεικόνιση μονάδας IMU ελεύθερης περιστροφής (Gimbale) (King 1998).....	24
Εικόνα 1-14: Σχηματική απεικόνιση μονάδας IMU σταθερής πρόσδεσης (Strapdown) (A. Lawrence 1998)	24
Εικόνα 1-15: Χωρικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών πλαισίων αναφοράς σε ένα σύστημα LiDAR (C.Toth 2009)	26
Εικόνα 1-16: Η γωνιακή απόκλιση (Boresight misalignment) μεταξύ πλαισίων αναφοράς INS και σαρωτή LiDAR.	28
Εικόνα 1-17: Τα πλαίσια αναφοράς και το μοντέλο γεωκωδικοποίησης του συστήματος LiDAR (A. Habib)	30
Εικόνα 1-18: Συγχρονισμός μετρήσεων στο σύστημα ScaLARS (Wehr 1999).....	31
Εικόνα 1-19: Σχηματική απεικόνιση πολλαπλών επιστροφών και ψηφιοποίησης επιστρεφόμενου σήματος (ESRI)	32
Εικόνα 1-20: Δημιουργία προφίλ από ανάλυση πλήρους σήματος (NASA)	34
Εικόνα 1-21: Εικόνα έντασης από σάρωση με σύστημα LiDAR (ASPRS).....	36
Εικόνα 1-22: Η σχέση μεταξύ γεωειδούς, ελλειψοειδούς και φυσικής γήινης επιφάνειας, και η σύνδεση των υψομέτρων (www.geod.nrcan.gc.ca)	39
Εικόνα 1-23: Leica ALS70 (Leica Geosystems)	41
Εικόνα 1- 24: Το σύστημα LiDAR της Riegl (αριστερά) και ο σαρωτής LMS-Q 780 (δεξιά)	42
Εικόνα 1-25: Optech ALTM Orion M (Optech inc.).....	43
Εικόνα 1-26: Trimble Harrier 68i (Trimble).....	44
Εικόνα 2-1: Ορθοφωτογραφία και αντίστοιχο νέφος σημείων (USDA Forest Service)	45
Εικόνα 2-2: Σχέση μεταξύ επιφανειών DSM, DTM και NDSM.....	56

Εικόνα 2-3: Διαδραστικό 3-d pdf (orthoshop.com).....	58
Εικόνα 2-4: Προσομοίωση πλημμύρας σε τρισδιάστατο μοντέλο προερχόμενο από νέφος LiDAR και ορθοφωτογραφία (ERDAS)	59
Εικόνα 2-5: Τρισδιάστατο μοντέλο τμήματος πόλης (Fei Deng et.al.)	60
Εικόνα 2-6: Εκμετάλλευση νέφους σημείων για αποτύπωση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος (ERDAS)	61
Εικόνα 3-1: Επισκόπηση των λωρίδων σάρωσης στη Ν. Μήλο επί υποβάθρου Google Earth.....	63
Εικόνα 3-2: Το σύστημα ALS50-II με την ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format Leica RCD105 (NERC)	65
Εικόνα 3-3: Κατακόρυφη και πλάγια άποψη περιοχής εργασίας, επί υποβάθρου Google Earth.....	67
Εικόνα 4-1: Απεικόνιση του νέφους σημείων με βάση τις τιμές έντασης.....	70
Εικόνα 4-2: Απεικόνιση του νέφους σημείων με βάση την κωδικοποίηση RGB από ορθοφωτογραφία.....	70
Εικόνα 4-3: Έλεγχος κάλυψης περιοχής με την επίθεση των ιχνών των λωρίδων σάρωσης σε περιβάλλον GIS	71
Εικόνα 4-4: Δημιουργία ακίδων (spikes) στο τριγωνισμένο νέφος σημείων, λόγω ύπαρξης μη αποδεκτών μετρήσεων	74
Εικόνα 4-5: Εικόνα υψομετρικών διαφορών απόλυτης τιμής 1m	76
Εικόνα 4-6: Εικόνα υψομετρικών διαφορών απόλυτης τιμής 0,5m	76
Εικόνα 4-7: Εικόνα υψομετρικών διαφορών απόλυτης τιμής 0,25m	77
Εικόνα 4-8: Η διανομή των δεδομένων με την επικάλυψη 50 m και το ωφέλιμο τμήμα της διανομής επί υποβάθρου Google Earth	79
Εικόνα 5-1: Εικόνα έντασης χωρικής ανάλυσης 1m και λεπτομέρεια αυτής.....	81
Εικόνα 5-2: Υπολογισμός παραμέτρων σύγκρισης νέου σημείου και σταδιακή επέκταση του TIN (Axelsson)	84
Εικόνα 5-3: DSM στην περιοχή μελέτης επί υποβάθρου Google Earth και λεπτομέρεια αυτού.....	86
Εικόνα 5-4: DTM στην περιοχή μελέτης επί υποβάθρου Google Earth και λεπτομέρεια αυτού.....	87
Εικόνα 5-5: Υπέρθυση DSM επί της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε.	89
Εικόνα 5-6: Οριζοντιογραφική ταύτιση εικόνας έντασης και σκιασμένου DSM.....	92
Εικόνα 5-7: Μέτρηση του υψομέτρου του DTM με παρεμβολή σημείων στη θαλάσσια περιοχή.....	95
Εικόνα 5-8: Κατανομή τριγωνομετρικών βάθρων της ΓΥΣ επί του DTM της περιοχής εργασίας.....	97
Εικόνα 5-9: Θέση μηκοτομής επί του DSM και λεπτομέρεια αυτής.....	99
Εικόνα 5-10: Ρέμα με απότομα πρανή, στην περιοχή αστοχίας του αλγορίθμου φιλτραρίσματος.....	101
Εικόνα 6-1: Εντοπισμός περιοχής κατασκευής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας επί υποβάθρου Google Earth.....	104
Εικόνα 6-2: Ανάδειξη υπέργειων αντικειμένων επί του DSM με τη χρήση της τεχνικής σκίασης (hilshading)	106

Εικόνα 6-3: Κατανομή μετρηθέντων GCP	107
Εικόνα 6-4: Λεπτομέρεια με τη θέση δύο GCPs	107
Εικόνα 6-5: Ψηφιακό ορθοφωτομωσασικό.....	110
Εικόνα 6-6: Παραμορφώσεις σε ορθοφωτογραφία, λόγω σφαλμάτων DTM (μη συλλογή γραμμών αλλαγών κλίσεων) στην περιοχή της Ν. Σαντορίνης	111
Εικόνα 6-7: Λεπτομέρεια του ψηφιακού ορθοφωτομωσασικού.....	112
Εικόνα 6-8: Οριζοντιογραφική ταύτιση μεταξύ εικόνας έντασης και ψηφιακού ορθοφωτομωσασικού.....	113

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1-1: Η διαχρονική εξέλιξη του ρυθμού επανάληψης των παλμών στα συστήματα LiDAR (ERDAS 2011).....	15
Διάγραμμα 3-1: Το μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας	68
Διάγραμμα 5-1: Υπέρθεση μηκοτομών DSM και DTM	100
Διάγραμμα 5-2: Κατανομή υψομετρικών διαφορών DSM και DTM ανά θέση.....	100

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά συστήματος LiDAR Leica ALS50-II (NERC).....	64
Πίνακας 1-1: Κοινώς χρησιμοποιούμενα ενεργά μέσα στα συστήματα LiDAR και τα χαρακτηριστικά της ακτίνας τους (Weber 1999).....	8
Πίνακας 1-2: Τυπικές τιμές παραμέτρων εμπορικών συστημάτων LiDAR (R. Pack et.al.)	15
Πίνακας 1-3: Πηγές σφαλμάτων και επίδρασή τους στις συντεταγμένες για διαφορετικές τιμές του ύψους πτήσης (E.P. Baltasvias)	39
Πίνακας 1-4: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Leica ALS70.....	41
Πίνακας 1- 5: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Riegl (Riegl)	42
Πίνακας 1-6: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Optech (Optech Inc.)	43
Πίνακας 1-7: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Trimble (Trimble.).....	44
Πίνακας 2-1: Ενδεικτικός πίνακας υπολογισμού αποστάσεων σημείων στο έδαφος, σε σχέση με την παραμετροποίηση του συστήματος και το ύψος πτήσης (B. Morton et.al.)	47
Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη σάρωσης.....	63
Πίνακας 3-2: : Χαρακτηριστικά συστήματος LiDAR Leica ALS50-II (NERC)	64
Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά ψηφιακής φωτομηχανής Leica RCD105 (NERC)	64
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη και στατιστικά δεδομένων εργασίας.....	72
Πίνακας 5-1: Πίνακας εκτίμησης οριζοντιογραφικής μετάθεσης μεταξύ του LiDAR DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε.	91
Πίνακας 5-2: Εκτίμηση υψομετρικής ακρίβειας DTM με βάση τριγωνομετρικά σημεία της ΓΥΣ.....	96
Πίνακας 5-3: Υψομετρική σύγκριση μεταξύ LiDAR/DTM και Κτηματολόγιο Α.Ε./DTM	98
Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα επίλυσης αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο της κατά δέσμες συνόρθωσης	108
Πίνακας 6-2: Πίνακας εκτίμησης οριζοντιογραφικής μετάθεσης μεταξύ του ψηφιακού ορθοφωτομωσαικού και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε.	114

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

SAR	Synthetic Aperture Radar
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
ALS	Airborne Laser Scanners
LiDAR	Light Detection And Ranging
LaDAR	Laser Detection And Ranging
TOF	Time Of Flight (for laser beam)
SW	Swath Width
FOV	Field Of View
IFOV	Instantaneous Field Of View
PRF	Pulse Repetition frequency
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
MMS	Mobile Mapping Systems
MMT	Mobile Mapping Technology
INS	Inertial Measurement System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
DGPS	Differential GPS
POS	Position and Orientation System
IMU	Inertial Measurement Unit
NP	Navigation Processor
ΜΣΘ	Μέση Στάθμη Θάλασσας
UTM	Universal Transverse Mercator
PDOP	Positional Dilution of Precision
QA/QC	Quality Assurance/Quality Control
IQC	Internal Quality Control
EQC	External Quality Control
SA	Strip Adjustment
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
DTM	Digital Terrain Model
DSM	Digital Surface Model
NDSM	Normalized Digital Surface Model
ISP	Inferred Stereo Pairs
RMSE	Root Mean Square Error
EGM	Earth Gravitational Model
IFSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Η αποτύπωση του χώρου, μια έμφυτη ανθρώπινη ανάγκη

Η σχέση του ανθρώπου με τον χώρο υπήρξε από την αρχή της εμφάνισής του σαν είδος ιδιαίτερα στενή. Η προσπάθεια επιβολής στον φυσικό χώρο, αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό μεταξύ όλων των ειδών του πλανήτη, δεδομένου ότι από αυτόν προέρχονται όλα τα απαραίτητα για την επιβίωση υλικά, όπως στέγη, τροφή, νερό κτλ. Θα μπορούσε λοιπόν κανείς να συμπεράνει, ότι η επικυριαρχία στον φυσικό χώρο του πλανήτη, είναι σχεδόν ενστικτώδης, αφού ακόμα και τα άγρια είδη έχουν ή δημιουργούν την αίσθηση της «περιοχής» μέσα στην οποία ασκούν την φυσική δραστηριότητά τους.

Ο άνθρωπος, προικισμένος με την ικανότητα της λογικής σκέψης, δημιούργησε σταδιακά μια συσσώρευση πρακτικών και γνώσεων, οι οποίες μαζί με την ιδέα της δημιουργίας κοινοτήτων οδήγησαν στην ανάπτυξη του λεγόμενου πολιτισμού. Από την ύπαρξη των αρχαίων ακόμα πολιτισμών, η μεθοδική καταγραφή του φυσικού κόσμου υπήρξε κοινή πρακτική, η οποία υπόκειντο στους τεχνολογικούς και γνωστικούς περιορισμούς της κάθε εποχής. Η καταγραφή αυτή πραγματοποιείτο με τους λεγόμενους έως και σήμερα χάρτες, οι οποίοι εφευρέθηκαν πριν από την εφεύρεση της ίδιας της γραφής. Σύμφωνα με τους ιστορικούς, τα αρχαιότερα δείγματα χαρτών χρονολογούνται πίσω στο έτος 2.300 π.Χ. στον πολιτισμό της αρχαίας Βαβυλώνας και αφορούν σχέδια επί πήλινων πλακών με σκοπό την απεικόνιση διαφόρων, τότε γνωστών, τμημάτων της Γης (εικ. 1-1). Οι Αιγύπτιοι, είναι γνωστό ότι δημιουργούσαν χάρτες πριν από το 3.000 π.Χ. οι οποίοι εξυπηρετούσαν στον να επανακαθορίζονται τα σημεία των ορίων των εκτάσεων τους, τα οποία καταστρέφονταν από τις πλημμύρες του Νείλου. Από τους αρχαίους αυτούς κτηματογραφικούς χάρτες, δεν σώζεται κανένας σήμερα. Ο πρώτος παγκόσμιος χάρτης (με βάση τον τότε γνωστό κόσμο), σχεδιάστηκε από τον Αναξίμανδρο τον Μιλήσιο τον 6^ο αι. π.Χ. και είχε την μορφή ενός κυκλικού πίνακα, ενώ ο επόμενος «παγκόσμιος χαρτογράφος» ήταν ο Εκαταίος ο Μιλήσιος, ο οποίος το 500

π.Χ. κατασκεύασε ποιο πλήρη και ποιο ακριβή χάρτη του τότε γνωστού κόσμου από τον προκάτοχο του (εικ. 1-2).

Οι χαρτογραφήσεις εξυπηρετούσαν πολλαπλούς σκοπούς και πρόσθεταν συνεχώς στην γνώση της εποχής και στην αντίληψη για τον κόσμο. Ο Μέγας Αλέξανδρος, χαρτογραφούσε συστηματικά τις νέες κατακτήσεις του, χρησιμοποιώντας τα μέσα της εποχής που δεν ήταν άλλα από τον ίδιο τον άνθρωπο. Οι λεγόμενοι «βηματιστές» μετρούσαν τις αποστάσεις δια βημάτων και οι μετρήσεις τους καταγράφονταν από τους χαρτογράφους της εποχής στις λεγόμενες «εφημερίδες» για περαιτέρω επεξεργασία. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι η πρακτική αυτή, δηλαδή η συστηματική συλλογή δεδομένων στο πεδίο και η μετέπειτα επεξεργασία τους για την παραγωγή χαρτογραφικών προϊόντων είναι ακριβώς η ίδια η οποία ακολουθείται ακόμα και σήμερα, με τη διαφορά της τεχνολογικής εξέλιξης των μέσων συλλογής και επεξεργασίας.



Εικόνα 1: Αρχαίος χάρτης Βαβυλωνίων



Εικόνα 2: Ο παγκόσμιος χάρτης του
Εκαταίου του Μιλήσιου (H. Bengton et.al 1972)

Η αποτύπωση του χώρου, κατά την έννοια με την οποία αναπτύχθηκε, εξυπηρετούσε όχι μόνο στην κατανόηση του κόσμου, αλλά και στον σχεδιασμό και στη διαχείριση αυτού. Τεχνικά έργα τα οποία πραγματοποιούνταν ήδη από τους αρχαίους πολιτισμούς όπως κατασκευές κτηρίων, χαράξεις δρόμων, ακόμα και σχέδια πόλεων όπως τα πρώτα ορθογωνικά σχέδια των Αιγυπτίων και Μεσοποτάμιων στις αρχές του 2.000π.Χ. και το αρχαίο Ιπποδάμειο σύστημα του 5^{ου} π.Χ. αι. απαιτούσαν εκτεταμένη και λεπτομερή μέτρηση και αποτύπωση του χώρου. Κατά ανάλογο τρόπο, οι μεγάλοι εξερευνητές και θαλασσοπόροι από τον αρχαίο Ανων τον Καρχηδόνο, έως τους μεσαιωνικούς Χριστόφορο Κολόμβο και Βάσκο Ντα Γκάμα, καθώς και τους σύγχρονους Γουίλιαμ Άντερσον και Ζακ Κουστό, χρησιμοποιούσαν χάρτες (τους οποίους συχνά κατασκεύαζαν ταυτόχρονα με τις αποστολές τους) για τις ανάγκες της ναυσιπλοΐας. Είναι σαφώς λοιπόν κατανοητό, ότι η μακρά αυτή σχέση μεταξύ ανθρώπου και χώρου, καθώς και η ανάγκη για την αποτύπωση αυτού προς εξυπηρέτηση κάθε

ανθρώπινης δραστηριότητας, δεν θα μπορούσαν παρά να γίνονται ολοένα και ποιο σύνθετες με την εξέλιξη του πολιτισμού και της τεχνολογίας στην περίπλοκη σύγχρονη εποχή. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η φωτογραμμετρία

Όπως είναι λογικό, η συνεχώς συσσωρευόμενη ανθρώπινη γνώση, οδήγησε κατά καιρούς σε μεγάλα τεχνολογικά άλματα. Έτσι, με την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης στις αρχές του 18^{ου} αι. έγινε η απαρχή για την δημιουργία συνεχώς πιο πολύπλοκων μηχανικών συστημάτων, τα οποία αντικαθιστούσαν καθημερινές εργασίες των ανθρώπων. Ήδη οι μαθηματικές θεωρίες που προϋπήρχαν, βρήκαν εφαρμογές στην δημιουργία τέτοιων συστημάτων, ενώ νέα πεδία έρευνας συνεχώς άνοιγαν. Αυτός ο κύκλος γνώσης και εφαρμογής, δεν θα μπορούσε να μην επηρεάσει και τις μεθόδους με τις οποίες ο άνθρωπος συνέχιζε να αποτυπώνει τον κόσμο, ο οποίος γινόταν ολοένα και πιο «μικρός».

Η κλασικές λοιπόν μέθοδοι αποτύπωσης ακόμα και μετά την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης, βασίζονταν κυρίως σε επίγειες μετρήσεις, γεγονός το οποίο καθιστούσε την διαδικασία ιδιαίτερα δυσχερή και επίπονη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συλλογής μετρητικών δεδομένων για μεγάλες περιοχές. Η κλασική τοπογραφία, χρησιμοποιούσε μεθόδους μετρήσεων γωνιών και αποστάσεων (πολικές συντεταγμένες), με τη βοήθεια μηχανικών και εξαιρετικά ευαίσθητων οργάνων, προκειμένου να προσδιοριστούν γεωμετρικά οι καρτεσιανές συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων των προς απόδοση αντικειμένων. Από την απόδοση των σημείων αυτών σε χαρτί και τη γραφική τους ένωση, προέκυπτε τελικά μια γραφική, υπό κλίμακα αναπαράσταση του αντικειμένου.

Η εξέλιξη της επιστήμης της φωτογραμμετρίας πριν από περίπου 150 χρόνια, έφερε τεράστια αλλαγή στον τρόπο συλλογής μετρητικών πληροφοριών. Η «νέα» αυτή ιδέα, αντιμετώπισε τα προβλήματα της εξαγωγής μετρητικής πληροφορίας από φωτογραφίες, οι οποίες μπορούν να λαμβάνονται τόσο επίγεια όσο και εναέρια. Το γεωμετρικό μοντέλο της κεντρικής προβολής, στο οποίο βασίζεται η λήψη της φωτογραφίας αναλύθηκε διεξοδικά και κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα και τεχνικές δημιουργήθηκαν, προκειμένου να αναιρούνται τα διάφορα σφάλματα που προκαλούν την αδυναμία ακριβούς μέτρησης στις εικόνες (μη ενιαία κλίμακα, διαστροφές φακού, εσωτερική γεωμετρία φωτομηχανής κ.α.). Τα αποτελέσματα της τυποποίησης των φωτογραμμετρικών διαδικασιών στην συλλογή γεωγραφικών δεδομένων, ήταν τεράστια, δεδομένου ότι πλέον ήταν δυνατή η ταχεία εξαγωγή μετρητικών πληροφοριών για πολύ μεγάλες περιοχές και σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα.

Η ταχεία όμως εξέλιξη της τεχνολογίας συνεχίστηκε (και συνεχίζεται ακόμα και σήμερα), φέρνοντας την πραγματική επανάσταση στον τομέα των πληροφοριών, που δεν ήταν άλλη από την δημιουργία του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. Στη νέα αυτή ηλεκτρονική εποχή, τα ψηφιακά συστήματα ικανοποίησαν την ανάγκη για γρήγορους και σύνθετους μαθηματικούς υπολογισμούς ενώ μαζί με αυτά δημιουργήθηκε και ένας νέος τρόπος αναπαράστασης του φυσικού κόσμου, η ψηφιακή αναπαράσταση.

Σταδιακά μέχρι τις μέρες μας, ο Η/Υ αντικατέστησε όλα τα μηχανικά συστήματα (αναλογικά, ημιαναλυτικά και αναλυτικά όργανα) τα οποία χρησιμοποιούσε η επιστήμη της φωτογραμμετρίας, κάνοντας την όλη φωτογραμμετρική διαδικασία ολοένα και πιο απλή, γρήγορη και περισσότερο αποδοτική.

Η σύγχρονη ψηφιακή εποχή, έχει την δυνατότητα να αναπαραστήσει με ιδιαίτερη λεπτομέρεια το φυσικό και ανθρωποποίητο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας δύο είδη ψηφιακών δεδομένων που είναι τα διανυσματικά (vector) και τα ψηφιδωτά (raster) δεδομένα. Τα διανυσματικά δεδομένα συγκροτούνται από σημεία, γραμμές και πολύγωνα, ενώ τα ψηφιδωτά δεδομένα αφορούν κυρίως ψηφιακές απεικονίσεις οι οποίες προορίζονται για χρήση στην οθόνη του Η/Υ. Ένα τρίτο είδος ψηφιακών δεδομένων έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των σαρωτών laser. Πρόκειται για το προϊόν της σάρωσης των συγκεκριμένων οργάνων, το οποίο συνιστά ένα νέφος σημείων (point cloud), που δύναται να περιγράψει με μεγάλη πιστότητα και με χρήση 3-d συντεταγμένων τις οντότητες της περιοχής σάρωσης.

2. Η «σύγχρονη» φωτογραμμετρία

Όπως είναι αναμενόμενο, καμία επιστήμη δεν παραμένει «στεγανή» με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της γνώσης. Το αντίθετο, είναι μάλλον συχνό φαινόμενο να αναπτύσσονται επιστημονικοί κλάδοι και εργαλεία, τα οποία λειτουργούν διεπιστημονικά, δηλαδή βασίζονται για την ανάπτυξή τους πάνω σε θεωρητικά αλλά και πρακτικά υπόβαθρα τα οποία δύναται να προέρχονται από διαφορετικές ήδη υπάρχουσες επιστήμες. Με τον τρόπο αυτό, η επιστήμη της φωτογραμμετρίας βρέθηκε να ξεπερνά σταδιακά την χρήση αναλογικών φωτογραφιών και επεκτάθηκε στην εκμετάλλευση νέων δεδομένων. Με την ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας και των διαστημικών προγραμμάτων, η φωτογραμμετρία άρχισε σταδιακά να ενσωματώνει στην διαδικασία της παραγωγής ψηφιακές ηλεκτροπτικές εικόνες οι οποίες λαμβάνονται από δορυφορικές πλατφόρμες ή και από σύγχρονες ψηφιακές αεροφωτομηχανές, αντικαθιστώντας την κλασική λήψη με φιλμ (αναλογικές εικόνες). Η εκμετάλλευση των εικονιστικών αυτών δεδομένων, επεκτάθηκε και σε επίπεδο πέρα του τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αφορά το ορατό φως (400 με 700 nm) με μελέτη του εγγύς υπέρυθρου, του μακρού υπέρυθρου και του θερμικού τμήματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πολλά χρήσιμα συμπεράσματα και πρωτότυπες τεχνικές αναδύθηκαν από αυτή τη διαδικασία, τα οποία δημιούργησαν ένα ολόκληρο νέο κλάδο, αυτό της Τηλεπισκόπησης. Παράλληλα, οι ψηφιακές αεροφωτογραφίες και οι δορυφορικές εικόνες, με την εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων, μπορούν πλέον να παρέχουν πολύ υψηλή ανάλυση (50cm για τις δορυφορικές εικόνες και <10cm για τις ψηφιακές αεροφωτογραφίες), γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες ακόμα και για τις πιο απαιτητικές σε ακρίβεια χαρτογραφικές εργασίες.

Ταυτόχρονα, νέες μορφές δεδομένων προερχόμενες από ενεργητικούς δέκτες εμφανίστηκαν, διευρύνοντας ακόμη περισσότερο το πεδίο εφαρμογής της

φωτογραμμετρίας. Ως ενεργητικοί δέκτες, ορίζονται τα συστήματα τα οποία δεν καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, αλλά ακτινοβολούν τον στόχο με μια ανεξάρτητα δημιουργούμενη ενεργειακή ακτινοβολία ενώ καταγράφουν την ανακλώμενη από το στόχο ποσότητά της μαζί με τις μεταβολές που υφίσταται το αρχικό εκπεμπόμενο σήμα από την ανάκλαση. Τέτοια δεδομένα είναι οι εικόνες RaDAR (Radio Detection And Ranging) που προέρχονται από πομποδέκτες μικροκυματικής ακτινοβολίας που ονομάζονται Radar συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar) ή SAR καθώς και τα νέφη σημείων που προέρχονται από πομποδέκτες laser ακτινοβολίας που ονομάζονται σαρωτές laser (Laser Scanners). Η τεχνολογία laser, αφορά τη χρήση φωτός με συγκεκριμένο μήκος κύματος (σύμφωνα μονοχρωματικό φως) το οποίο διαδίδεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σχηματίζοντας στενές δέσμες. Ο όρος laser που αποδόθηκε στην τεχνολογία αυτή, είναι ακρωνύμιο του Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, το οποίο στην ελληνική αποδίδεται ως «ενίσχυση φωτός από εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Η τεχνική της χρήσης ακτίνων laser για την μέτρηση αποστάσεων ξεκίνησε από το 1960 καταλήγοντας στην αλματώδη ανάπτυξη των σύγχρονων σαρωτών laser στα τέλη της δεκαετίας του 90 κυρίως λόγω εξελίξεων σε τεχνολογίες οι οποίες υποστηρίζουν το σύστημα. Οι σαρωτές laser δύναται να είναι επίγειοι οπότε ονομάζονται Terrestrial Laser Scanners ή και αερομεταφερόμενοι που ονομάζονται Airborne Laser Scanners ή ALS. Η παρούσα διπλωματική εργασία, θα ασχοληθεί με εκμετάλλευση δεδομένων τα οποία προέρχονται από τα συστήματα ALS. Συγγενής και ποιο ευρέως διαδεδομένος όρος για τα συστήματα ALS είναι ο όρος LiDAR, ακρωνύμιο της φράσης Light Detection and Ranging, ενώ για τον χαρακτηρισμό της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί άλλοι συγγενείς όροι, όπως LaDAR (Laser Detection And Ranging), Laser Altimetry κ.α. Ο όρος LiDAR είναι ποιο ευρέως διαδεδομένος και συνεπώς θα χρησιμοποιηθεί στο εξής για όλες τις αναφορές στην εν λόγω τεχνολογία.

3. Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε δύο κύρια μέρη, το καθένα από τα οποία αποτελείται από ξεχωριστά κεφάλαια. Στο μέρος Α' παρουσιάζεται η τεχνολογία των συστημάτων LiDAR καθώς επίσης και γενικές πληροφορίες για την φύση και τον χειρισμό των δεδομένων που παράγουν. Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι αρχές λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων από τα οποία συντίθεται το ολοκληρωμένο σύστημα LiDAR (σαρωτής και σύστημα POS) και περιγράφονται τα βασικά μεγέθη κατά τη διαδικασία της σάρωσης καθώς και το μαθηματικό μοντέλο λειτουργίας του συστήματος. Αναπτύσσονται οι διαδικασίες βαθμονόμησης και συγχρονισμού των μετρήσεων και οι δυνατότητες καταγραφής που παρουσιάζουν, ενώ παράλληλα καταγράφονται οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων καθώς και τα κυριότερα διαθέσιμα εμπορικά συστήματα που διατίθενται στην αγορά την παρούσα χρονική στιγμή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου νέφους σημείων καθώς και οι κύριοι παράμετροι που λαμβάνουν χώρα

κατά τον προγραμματισμό και εκτέλεση των αποστολών συλλογής δεδομένων LiDAR. Περιγράφονται οι διαδικασίες ελέγχου και διασφάλισης της ποιότητας των δεδομένων και αναπτύσσεται το πρότυπο το οποίο έχει καθιερωθεί για την μεταφορά, επεξεργασία και αποθήκευση αυτών. Τελικώς, προσδιορίζεται η μεθοδολογία για την παραγωγική εκμετάλλευση των δεδομένων, στη βάση των επιμέρους απαραίτητων εργασιών (έλεγχος, φιλτράρισμα, ταξινόμηση κ.α.), ενώ τελικώς αναπτύσσονται συνοπτικά μερικές κύριες εφαρμογές που την παρούσα χρονική στιγμή εμφανίζουν ζήτηση στην αγορά των δεδομένων LiDAR.

Στο μέρος Β΄ της παρούσης, πραγματοποιείται ένα σύνολο εφαρμογών, με βάση δεδομένα που αποκτήθηκαν από το εργαστήριο φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ, οι οποίες αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση στην εκμετάλλευση των συστημάτων LiDAR, δεδομένης της απουσίας προϋπάρχουσας εργασίας επί του αντικειμένου. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που διατέθηκαν για την εφαρμογή, τα συστήματα με τα οποία πραγματοποιήθηκε η συλλογή τους, καθώς επίσης και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο έλεγχος ποιότητας των δεδομένων και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη (επικαλύψεις, πυκνότητα, αριθμός σημείων, στατιστικά κ.α.) τα οποία επηρεάζουν τα μετέπειτα προϊόντα που δύναται να παραχθούν. Παράλληλα λαμβάνει χώρα η προετοιμασία των δεδομένων για την μετέπειτα επεξεργασία, ο εντοπισμός και η διόρθωση χονδροειδών σφαλμάτων και η δημιουργία της εικόνας έντασης από το νέφος σημείων, ως υπόβαθρο για την υποβοήθηση των εργασιών.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις εργασίες για την παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας (DSM) και Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM) από το νέφος σημείων μέσω της τεχνικής του φιλτραρίσματος, ο έλεγχος υψομετρικής ακρίβειας αυτού μέσω επίγειων σημείων ελέγχου και τελικώς η σύγκριση των δύο επιφανειών.

Στο έκτο κεφάλαιο, προτείνεται μια διαδικασία για την παραγωγή έγχρωμης ψηφιακής ορθοεικόνας, επί της οποίας διερευνάται η δυνατότητα συλλογής φωτοσταθερών σημείων απευθείας από το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DSM) που παράχθηκε, καθώς και η καταλληλότητα του για χρήση στη διαδικασία της ορθοαναγωγής, παρακάμπτοντας την χρονοβόρα διαδικασία της φωτογραμμετρικής συλλογής ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) και την ενίσχυση αυτού με την συλλογή γραμμών αλλαγής κλίσης. Τελικώς πραγματοποιείται η αξιολόγηση και ο έλεγχος του αποτελέσματος, τόσο ως εσωτερική ακρίβεια της διαδικασίας, όσο και ως εξωτερική στη βάση σύγκρισης με εξωγενή δεδομένα.

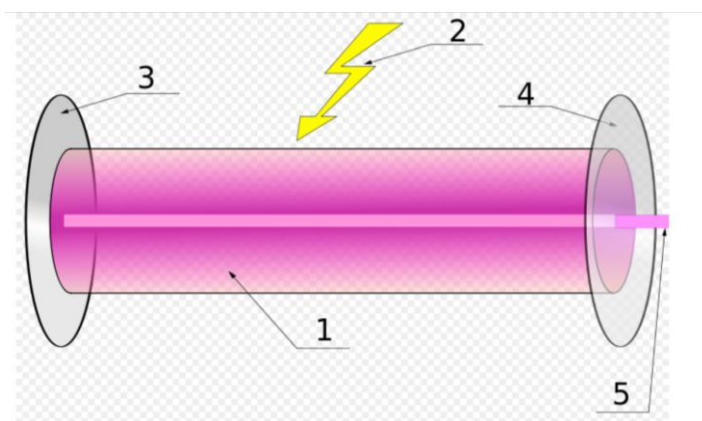
Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία, ενώ προτείνονται μελλοντικά ερευνητικά θέματα τα οποία μπορούν να διερευνηθούν στηριζόμενα στην παρούσα μελέτη.

ΜΕΡΟΣ Α΄: **ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ** **ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ** **LiDAR ΚΑΙ** **ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ** **ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΟΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ Η **ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LiDAR**

1.1 Το Laser και η χρήση του για μέτρηση αποστάσεων

Το ακρωνύμιο laser, αντιπροσωπεύει τον όρο “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ή στα ελληνικά “ ενίσχυση φωτός από εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας” όπως προαναφέρθηκε. Στις αρχές της δεκαετίας του 60 κατασκευάστηκε και επιδείχτηκε η πρώτη συσκευή laser από τον Theodor Maiman στα ερευνητικά εργαστήρια Hughes Research Laboratories, ενώ από τότε, η τεχνολογία των laser έχει εξελιχθεί κατά πολύ. Αφορά την παραγωγή φωτός το οποίο είναι μονοχρωματικό (έχει συγκεκριμένο μήκος κύματος), παρουσιάζει υψηλή συνοχή (δηλαδή δεν διαχέεται) και μεταδίδεται ευθύγραμμα. Για την παραγωγή του συγκεκριμένου είδους φωτός, απαιτείται ένα ενεργό ή διεγερτικό μέσο (medium), το οποίο όταν διεγείρεται από μια εξωτερική πηγή ενέργειας, υπεισέρχεται σε μια διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Αυτό λειτουργεί ως ενισχυτής για το διερχόμενο από το ενεργό μέσο αυτό φως, το οποίο εξέρχεται με τα χαρακτηριστικά της δέσμης laser. Στην εικόνα 1-1 σημειώνονται επί της σχηματικής απεικόνισης μιας συσκευής laser, το ενεργό υλικό του laser (1), η προσφερόμενη ενέργεια άντλησης (2), το υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο (3), η διάταξη εξόδου της δέσμης (4) και η εξερχόμενη δέσμη laser (5).

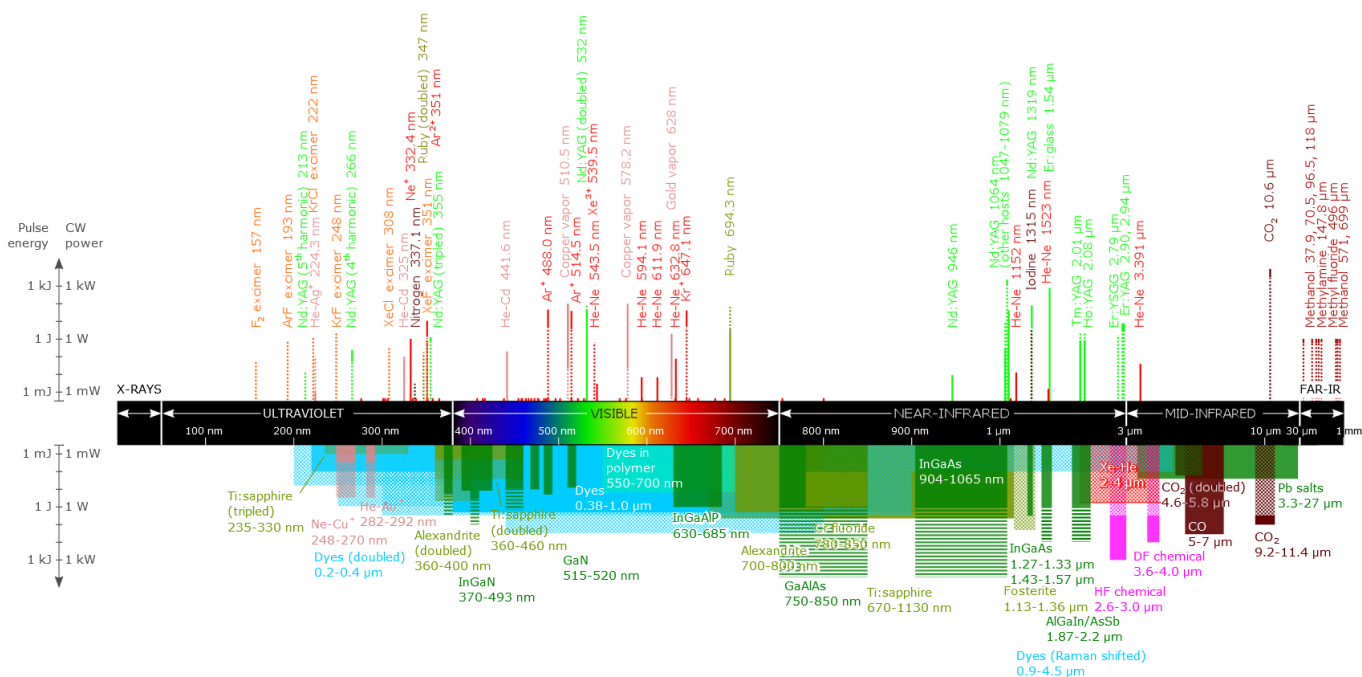


Εικόνα 1-1: Σχηματική απεικόνιση συσκευής laser (Wikipedia.org)

Η εκπομπή laser ακτινοβολίας, γίνεται σε ένα μήκος κύματος (μονοχρωματική), αλλά όχι σε κάποιο συγκεκριμένο. Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο ενεργό υλικό, δύναται να παραχθούν ακτίνες laser οι οποίες καλύπτουν ένα μεγάλο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έτσι laser ακτινοβολίες μπορούν να δημιουργούνται με μήκη κύματος που ανήκουν από το υπεριώδες τμήμα του φάσματος έως και το μακρό υπέρυθρο τμήμα (εικ. 1-2). Τα laser διακρίνονται με βάση το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο ενεργό υλικό και με αυτό τον τρόπο σε εμπορικές εφαρμογές κανείς μπορεί να συναντήσει laser υγρής βαφής (liquid dye), αερίου (gas lasers), στερεάς κατάστασης (solid state lasers), ημιαγωγών (semiconductor's lasers) κ.α. Στα συστήματα LiDAR, τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα είδη laser είναι τα στερεάς κατάστασης (ss) και τα ημιαγωγών (sc). Σε κάθε περίπτωση, το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου laser, είναι συνάρτηση του χρησιμοποιούμενου ενεργού μέσου (Weber 1999) και στον πίνακα 1 σημειώνονται τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα lasers ss και sc στα συστήματα LiDAR. Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο ενεργό μέσο οι συσκευές laser μπορούν να παράγουν παλμούς (pulse lasers) ή συνεχείς ακτίνες (continuous wave lasers). Οι δύο αυτές τεχνικές παράγουν ακτίνες οι οποίες παρουσιάζουν διαφορές τόσο σε μαθηματικό υπόβαθρο, όσο και στις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται, με τα παλμικά laser να χρησιμοποιούνται κυρίως στους αερομεταφερόμενους σαρωτές laser LiDAR για τοπογραφικές και χαρτογραφικές εφαρμογές.

Ενεργό υλικό	Τύπος	Μήκος κύματος (nm)	Χρώμα ακτίνας
Nd: YAG (doubled)	SS	523	Πράσινο
InGaAs	SC	900-1100	Εγγύς υπέρυθρο
Nd: YAG	SS	1064	Εγγύς υπέρυθρο
Er-doped glass	SS	1540	Εγγύς υπέρυθρο

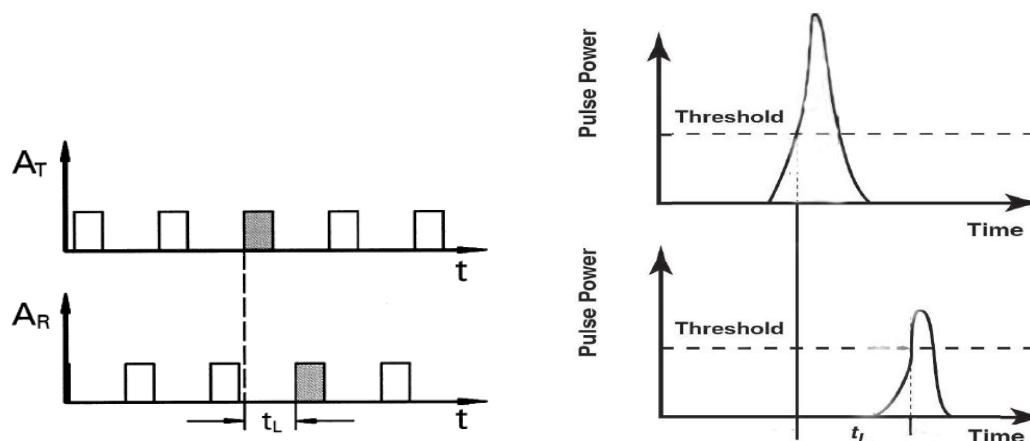
Πίνακας 1-1: Κοινώς χρησιμοποιούμενα ενεργά μέσα στα συστήματα LiDAR και τα χαρακτηριστικά της ακτίνας τους (Weber 1999)



Εικόνα 1-2: Σύνοψη λειτουργίας εμπορικών laser στο Η/Μ φάσμα (Wikipedia.org)

Οι σαρωτές laser χρησιμοποιούν τις ιδιότητες της ακτίνας laser προκειμένου να μετρήσουν την απόσταση από ένα στόχο. Η βασική ιδιότητα την οποία εκμεταλλεύονται, είναι το γεγονός της μη διάχυσής της (υψηλή συνεκτικότητα), λόγω της οποίας η ακτίνα laser δύναται να ταξιδέψει μέχρι το στόχο, να οπισθοσκεδαστεί από αυτόν και τελικώς να επιστρέψει στον σαρωτή. Η απόσταση R μεταξύ σαρωτή και στόχου, υπολογίζεται στη συνέχεια από τη σχέση (1.1) για τα παλμικά laser, όπου t_L ο χρόνος που απαιτείται για την ακτίνα να φτάσει μέχρι το στόχο και να επιστρέψει στο δέκτη (Time of Flight- TOF) και c η ταχύτητα του φωτός (A. Wehr 1999). Στην απλοποιημένη αναπαράσταση των παλμών ως τετραγωνικών της εικ. 1-3(a), ουσιαστικά φαίνεται ότι ο παλμός λαμβάνει ακαριαία την μέγιστη ενέργεια και ως εκ τούτου αποκτά το μέγιστο πλάτος του. Αυτό στην πραγματικότητα δεν ισχύει, δεδομένου ότι οι παλμοί χρειάζονται χρόνο για να αποκτήσουν την μέγιστη ενέργειά τους. Έτσι, για τον υπολογισμό του χρόνου t_L προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση από το στόχο, χρησιμοποιείται ένα εσωτερικό χρονόμετρο που εκκινεί την μέτρηση όταν κατά την έγερση του παλμού προσεγγιστεί μια προκαθορισμένη τιμή ηλεκτρικής τάσης. Ο χρόνος t_L υπολογίζεται έως όταν στο επιστρεφόμενο σήμα προσεγγιστεί το ίδιο περίπου επίπεδο τάσης (εικ. 1.3 (b)).

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_L \quad (1.1)$$



Εικόνα 1-3: (a) Μέτρηση χρόνου TOF από το σύστημα με απλοποιημένη αναπαράσταση παλμού (A. Wehr)
 (b) Μέτρηση χρόνου TOF από το σύστημα με προσέγγιση τιμής τάσης κατά την έγερση και τη λήψη του παλμού.

Από την παραπάνω σχέση, είναι εμφανές, ότι μια μικρή αβεβαιότητα Δt_L στην μέτρηση του χρόνου θα οδηγήσει σε μια αντίστοιχη αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της απόστασης. Η αβεβαιότητα με την οποία μετράται ο χρόνος εξαρτάται από την χρονική ανάλυση του χρονομέτρου του συστήματος, η οποία παρόλο που είναι υψηλή, δεν είναι απολύτως χωρίς σφάλμα. Με τον τρόπο αυτό, από τη σχέση (1.2), ορίζεται η ακρίβεια (precision) της μέτρησης των αποστάσεων από το σύστημα, μέγεθος που αφορά το βαθμό απόκλισης που παρουσιάζει μια σειρά από πολλές επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της ίδιας απόστασης. Γενικά, η ακρίβεια των συστημάτων LiDAR προσδιορίζεται εργαστηριακά, είναι ιδιαίτερα υψηλή και σημαντικά πιο μικρή από την ορθότητα της μέτρησης των αποστάσεων, γεγονός που καθιστά το μέγεθος αυτό δευτερευούσης σημασίας.

$$\Delta R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t_L \quad (1.2)$$

Η ορθότητα (accuracy) της μέτρησης των αποστάσεων με τη χρήση laser, αφορά το βαθμό προσέγγισης της μέτρησης στην ορθή τιμή της απόστασης και σύμφωνα με τους Baltsavias, 1999, Wehr και Lohr, 1999, δίνεται από την σχέση (1.3). Τα μεγέθη που συμμετέχουν είναι t_{rise} ο χρόνος έγερσης του παλμού (δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να πιάσει ο παλμός τη μέγιστη ενέργειά του), B_{pulse} ο θόρυβος που δημιουργείται στον παλμό από το σύστημα κατά την έγερσή του (noise input bandwidth) και P_{Rpeak} η μέγιστη ισχύς του επιστρεφόμενου σήματος. Για ένα σύστημα που παράγει παλμούς σταθερού πλάτους και εισάγει χαμηλό θόρυβο, η ορθότητα των μετρούμενων αποστάσεων μειώνεται όσο μειώνεται η ενέργεια που φέρει ο επιστρεφόμενος παλμός.

$$\sigma_{R_{pulse}} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_{rise} \cdot \frac{\sqrt{B_{pulse}}}{P_{Rpeak}} \quad (1.3)$$

Η ορθότητα μέτρησης αποστάσεων στα συστήματα LiDAR, παρουσίασε μια μεγάλη αύξηση κατά την έλευση της δεκαετίας του 1990, κυρίως λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας των χρησιμοποιούμενων διατάξεων laser και στα σύγχρονα συστήματα δύναται να είναι μικρότερη των 5 cm. Το μέγεθος αυτό, μαζί με την αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης την οποία επιτελούν δευτερεύοντα συστήματα, αποτελεί και την αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των μετρούμενων σημείων από το σύστημα, στη βάση του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου συστήματος αναφοράς.

Εξίσου σημαντικό μέγεθος αποτελεί η χωρική διακριτική ικανότητα (range discrimination) ΔR_{tar} κατά την διεύθυνση μέτρησης των αποστάσεων (range). Είναι γενικά αποδεκτό, ότι περισσότεροι από ένας στόχος μπορούν να βρίσκονται στο εύρος της ίδιας ακτίνας και ως εκ τούτου υφίσταται το ερώτημα του κατά πόσο οι διαφορετικοί αυτοί στόχοι μπορούν να γίνουν διακριτοί από το σύστημα. Η χωρική διακριτική ικανότητα, είναι το μέτρο για την απάντηση στο ερώτημα αυτό και σύμφωνα με τον A. Wehr 2008, εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια T_p των εκπεμπόμενων παλμών και δίνεται από τη σχέση (1.4) για τα παλμικά laser. Έτσι, διαδοχικοί στόχοι κατά τη διεύθυνση πτήσης της ακτίνας laser μπορούν να διακριτοποιηθούν από το σύστημα, αν ο χρόνος T_p είναι μικρότερος από το ήμισυ της απόστασης μεταξύ των στόχων αυτών. Με βάση αυτή την αναλογία, για ένα σύστημα που εκπέμπει παλμούς ανά 10 ns, η χωρική διακριτική ικανότητα είναι $\Delta R_{tar}=1,5m$. Ιδεατά, η χρονική διάρκεια T_p των παλμών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

$$\Delta R_{tar} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_p \quad (1.4)$$

1.2 Η σάρωση

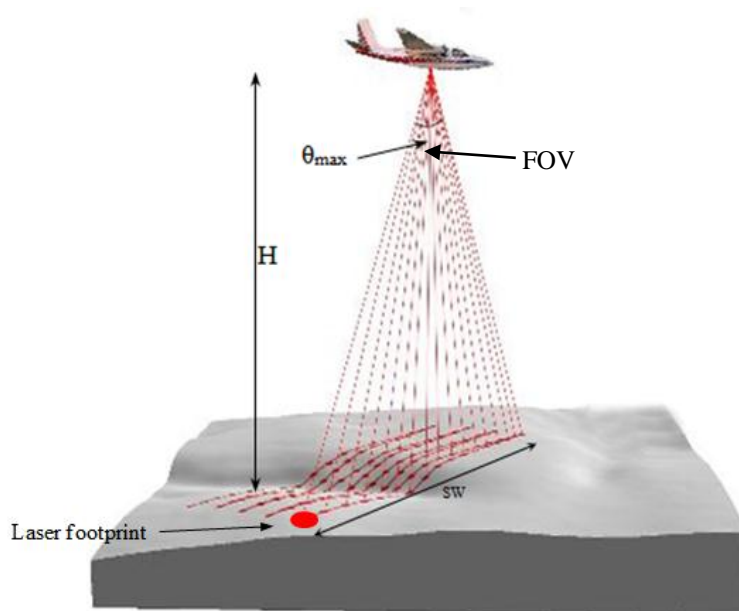
Η μέτρηση αποστάσεων με τη χρήση laser όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι το κύριο χαρακτηριστικό στα συστήματα LiDAR. Η μέτρηση αυτή, πραγματοποιείται επαναλαμβανόμενα από το σύστημα με την διαδοχική εκπομπή παλμών laser και την εκτροπή τους υπό ορισμένες γωνίες μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό ένα συγκεκριμένο πρότυπο. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής ονομάζεται σάρωση και δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιούνται πολύ γρήγορες μετρήσεις αποστάσεων καθώς και των γωνιών υπό τις οποίες πραγματοποιούνται αυτές, έτσι ώστε να πραγματοποιείται πυκνή δειγματοληψία σημείων, καλύπτοντας μεγάλες περιοχές μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα (Wehr & Lohr 1999).

Κύριοι παράμετροι της διαδικασίας της σάρωσης, είναι το **εύρος της γωνίας σάρωσης** (θ_{max}), το οποίο καθορίζει το **πεδίο ορατότητας** του σαρωτή (**Field Of View** ή **FOV**) και σε συνδυασμό με το **ύψος πτήσης (H)**, το **εύρος της λωρίδας σάρωσης (Swath)**

Width ή SW) στο έδαφος (εικ. 1-4). Η τιμή του εύρους της λωρίδας σάρωσης υπολογίζεται από τον τύπο (1.5).

$$SW = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (1.5)$$

Είναι εμφανές ότι μεγάλες τιμές SW έχουν ως αποτέλεσμα την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος με μικρότερο αριθμό «περασμάτων» του αεροσκάφους, οδηγώντας εν γένει σε μικρότερο χρόνο πτήσης και συμβάλλοντας στην οικονομικότητα της εργασίας. Παράλληλα, μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης κενών μεταξύ των λωρίδων πτήσης, γεγονός το οποίο μπορεί να διαπιστωθεί μόνο με έλεγχο των δεδομένων μετά το πέρας της αποστολή σάρωσης και το οποίο διορθώνεται μόνο με την εκτέλεση συμπληρωματικής αποστολής. Το ύψος πτήσης και το εύρος της σάρωσης καθορίζονται ανάλογα με τις προδιαγραφές και τον προγραμματισμό πτήσης της κάθε αποστολής και ένας προσεκτικός καθορισμός των προδιαγραφών ακρίβειας του τελικού νέφους σημείων και σχεδιασμός πτήσης είναι πάντα απαραίτητος να γίνεται για τον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού των παραμέτρων H και SW.

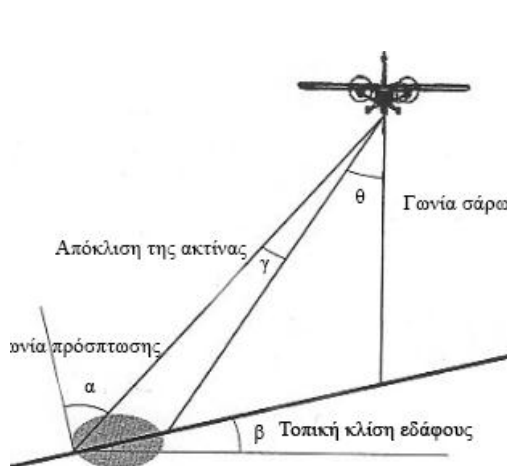


Εικόνα 1-4: Βασικά μεγέθη σάρωσης LiDAR (USDA Forest Service)

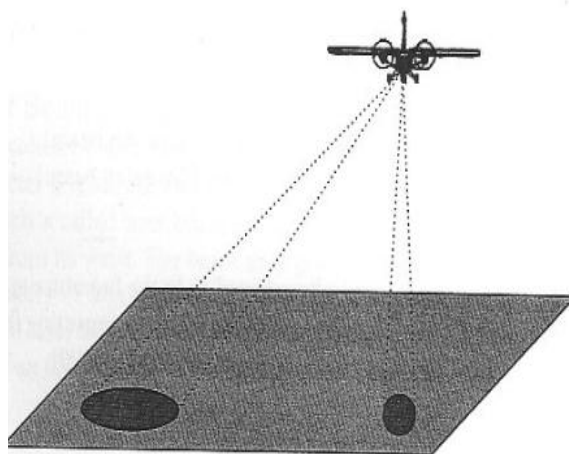
Ένα μεγάλο εύρος γωνίας σάρωσης οδηγεί σε μια σταδιακή μείωση της ορθότητας των μετρήσεων των αποστάσεων, καθώς η ακτίνες κατευθύνονται από το ναδιρικό σημείο προς τα άκρα των λωρίδων σάρωσης. Ο λόγος μείωσης της ακρίβειας της μέτρησης σχετίζεται με την **απόκλιση γ (divergence)** την οποία παρουσιάζει η εκπεμπόμενη ακτίνα laser και η οποία ανάλογα το σύστημα κυμαίνεται από 0,25 έως 2 miliradian (R.Pack et.al. 2012). Η απόκλιση αυτή υφίσταται, παρόλο που η ακτινοβολία laser

παρουσιάζει υψηλή συνεκτικότητα, κατά όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 1.1 και συνεπάγεται ένα μη σημειακό **ίχνος (laser footprint)** της εκπεμπόμενης ακτίνας στο έδαφος (εικ.1-5 και 1-6). Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το ίχνος της ακτίνας στο έδαφος, τόσο μικρότερη είναι η ορθότητα της μέτρησης, γεγονός που οφείλεται στην κατανομή της ενέργειας του παλμού σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα, ο επιστρεφόμενος παλμός είναι χαμηλότερης ενέργειας, γεγονός το οποίο με βάση τη σχέση (1.3) οδηγεί σε αύξηση της αβεβαιότητας της μέτρησης της απόστασης. Το ίχνος της ακτίνας στο έδαφος είναι κύκλος στο ναδιρικό σημείο και σταδιακά εκφυλίζεται σε έλλειψη λόγω της τοπικής κλίσης του εδάφους αλλά και καθώς η ακτίνα εκτρέπεται υπό στιγμιαία γωνία θ_{inst} με $-\theta_{max} \leq \theta_{inst} \leq \theta_{max}$.

Η στιγμιαία γωνία θ_{inst} υπό την οποία εκτρέπεται η δέσμη κατά τη στιγμή της μέτρησης, υπολογίζεται από ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις που φέρονται επί του μηχανισμού εκτροπής και ονομάζονται γωνιακοί κωδικοποιητές. Με βάση αυτή, ορίζεται για την κάθε χρονική στιγμή και το μέγεθος του **στιγμιαίου πεδίου ορατότητας (Instantaneous Field of View ή IFOV)**.



Εικόνα 1-5: Η απόκλιση της ακτίνας σε συνδυασμό με την γωνία σάρωσης και την κλίση του εδάφους (R.T. Pack et.al)



Εικόνα 1-6: Ο εκφυλισμός της απόκλισης της ακτίνας laser από κυκλικό ίχνος σε έλλειψη (R.T. Pack et.al).

Το ίχνος της δέσμης laser στο έδαφος, είναι ανάλογο του ύψους πτήσης και σχετίζεται με το εύρος σάρωσης, καθώς μικρότερες γωνίες σάρωσης οδηγούν σε μικρότερο ίχνος. Ο Baltsavias 1999, αναφέρει ότι η διάμετρος A_L του ίχνους της δέσμης αυξάνεται κατά 1/10 της απόκλισης γ της ακτίνας για κάθε 100m ύψους πτήσης ή αλλιώς $A_L = H \cdot \gamma / 1000$ m, με την υπόθεση επίπεδου εδάφους. Ο βέλτιστος συνδυασμός ύψους πτήσης και μέγιστης γωνίας σάρωσης διαφέρει για κάθε αποστολή συλλογής δεδομένων LiDAR, έχοντας υπόψη ότι μικρό ίχνος της ακτίνας στο έδαφος εξυπηρετεί την λεπτομερή και ακριβή τοπική αποτύπωση, καθώς και τη διαπεραστικότητα του παλμού μεταξύ των φυλλωμάτων των δέντρων, ενώ μεγαλύτερο ίχνος της ακτίνας προσφέρει ποιο πλήρη κάλυψη και πολλαπλές επιδράσεις της κάθε ακτίνας με τα υπερκείμενα της επιφάνειας

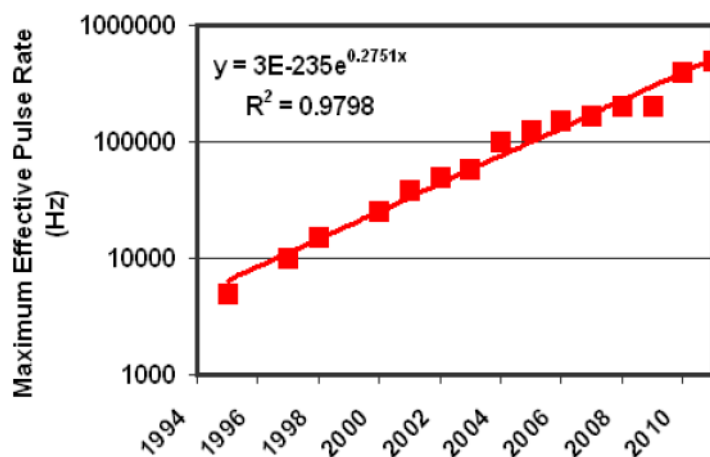
του εδάφους αντικείμενα (πολλαπλές επιστροφές), σε βάρος βέβαια της επιτυγχανόμενης ορθότητας στη μέτρηση των αποστάσεων. Σύμφωνα με τους Wehr & Lohr 1999, η διάμετρος του ίχνους της ακτίνας laser στο έδαφος, δίνεται από τον τύπο (1.6).

$$A_L = \frac{H}{\cos^2(\theta_{inst})} \cdot \gamma \quad (1.6)$$

Σημαντική επίσης παράμετρος του σαρωτή είναι ο **ρυθμός επανάληψης των παλμών (Pulse Repetition Frequency ή PRF)**. Οι φυσικές και ανθρωποποίητες επιφάνειες θεωρούνται συνεχή φαινόμενα του χώρου και η λεπτομέρεια με την οποία μπορούν να αποδοθούν ψηφιακά από τα συστήματα LiDAR εξαρτάται από την πυκνότητα της δειγματοληψίας την οποία μπορούν τα τελευταία δύνανται να πραγματοποιήσουν. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών αφορά την δυνατότητα δειγματοληψίας που παρουσιάζουν τα εν λόγω συστήματα, δεδομένου ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των εκπεμπόμενων παλμών, τόσο περισσότερα τα μετρούμενα σημεία και ως εκ τούτου τόσο καλύτερη είναι και η λεπτομέρεια με την οποία αναπαρίσταται η προς σάρωση επιφάνεια. Στα παλιότερα συστήματα LiDAR, ο χρησιμοποιούμενος ρυθμός επανάληψης παλμών έχει άμεση σχέση με το ύψος πτήσης. Από ένα σταθερό ύψος, ο χρόνος TOF της ακτίνας laser είναι συγκεκριμένος και με δεδομένο ότι ο πρώτος παλμός πρέπει να έχει επιστρέψει, προκειμένου να γίνει εκπομπή του επόμενου παλμού, ο ρυθμός εκπομπής πρέπει να ρυθμίζεται ανάλογα έτσι ώστε μόνο ένας παλμός να υπάρχει κάθε φορά στον αέρα. Στα σύγχρονα συστήματα, νέα λογισμικά έχουν αναπτυχθεί και ο περιορισμός αυτός έχει ξεπεραστεί. Έτσι, συστήματα όπως το Leica ALS70, έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν όλο το εύρος του PRF από όλα τα ύψη πτήσης, αφού μπορούν να διαχειρίζονται την ταυτόχρονη ύπαρξη πολλών παλμών στον αέρα (MPiA). Ο ρυθμός εκπομπής παλμών μετριέται σε KHz και χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μια σάρωση με PRF 50 KHz σημαίνει την εκπομπή 50.000 παλμών laser το δευτερόλεπτο.

Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας τα οποία μπορούν να καταγραφούν από το σύστημα, σχετίζονται εκτός από την ανακλαστικότητα τους και με το ρυθμό επανάληψης των παλμών. Έτσι για παράδειγμα ένας ρυθμός παλμών που οδηγεί σε δειγματοληψία ανά 1m (αποστάσεις των μετρούμενων σημείων στο έδαφος), θα αδυνατούσε να αποδώσει μία λεπτομέρεια με πλάτος 0,5m όπως είναι για παράδειγμα το χαρακτηριστικό πλάτος των τοιχιών. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών αυξάνεται ραγδαία στα σύγχρονα συστήματα, λόγω και πάλι της εξέλιξης των ηλεκτρονικών συστημάτων και ενώ το 1993 ήταν στα 2 KHz στις μέρες μας έχει ανέλθει σε τιμές που φτάνουν και τα 500 KHz. Στα πιο σύγχρονα συστήματα LiDAR, ο ρυθμός συλλογής δεδομένων, δύναται να είναι μεγαλύτερος του ρυθμού επανάληψης των παλμών, λόγω καταγραφής πολλαπλών επιστροφών για κάθε παλμό, χαρακτηριστικό που θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο. Σε κάθε περίπτωση, αυτό θα διευκρινίζεται από τον κατασκευαστή ξεχωριστά (Riegl 2009). Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών δεν πρέπει να συγχέεται με το **ρυθμό σάρωσης (scan rate - f_{sc})** ο οποίος μετράται και αυτός σε Hz αλλά εκφράζει τον αριθμό

των γραμμών σάρωσης που πραγματοποιεί το σύστημα σε χρόνο 1 sec ή αλλιώς τον αριθμό πλήρους κάλυψης του FOV που πραγματοποιεί ο σαρωτής στο χρόνο αυτό.



Διάγραμμα 1-1: Η διαχρονική εξέλιξη του ρυθμού επανάληψης των παλμών στα συστήματα LiDAR (ERDAS 2011)

Χαρακτηριστικό	Τυπική τιμή
Μήκος κύματος	1064 nm
Συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF)	100-500 KHz
Ενέργεια παλμού	100 μJ
Πλάτος παλμού	10 ns
Απόκλιση ακτίνας	0,25-2 mradian
Γωνία σάρωσης	Συνήθως 40° (max 75°)
Ρυθμός σάρωσης	100-400 Hz
Συχνότητα GNSS	0,1-10 μετρήσεις/sec
Συχνότητα INS	50-200 μετρήσεις/sec
Λειτουργικό ύψος πτήσης	80m – 5.000m
Ίχνος ακτίνας	0,25-2 m
Πολλαπλές επιστροφές	1 έως 5
Αποστάσεις μετρούμενων σημείων	0,2 – 2 m
Υψομετρική αβεβαιότητα	5+ cm
Οριζοντιογραφική αβεβαιότητα	10 - 100 cm

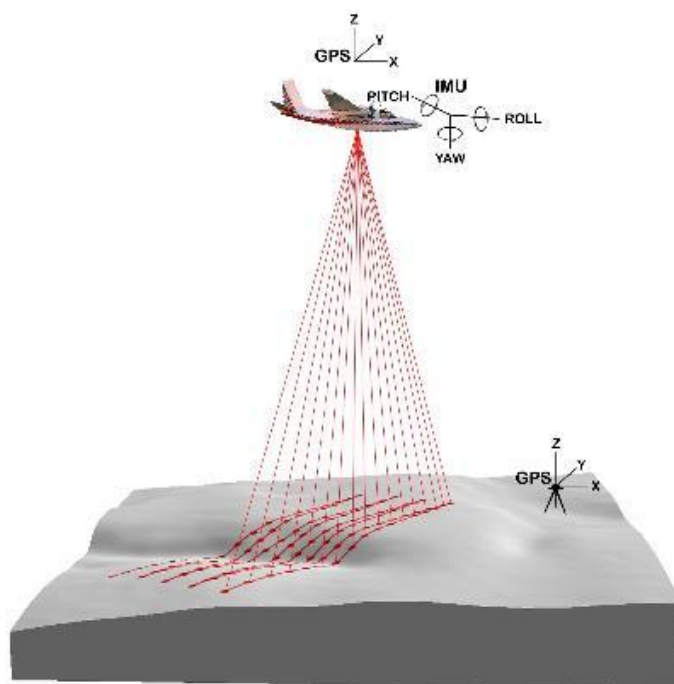
Πίνακας 1-2: Τυπικές τιμές παραμέτρων εμπορικών συστημάτων LiDAR (R. Pack et.al.)

1.3 Το ολοκληρωμένο σύστημα των σαρωτών LiDAR

Ο σαρωτής LiDAR διασυνδέεται με μια σειρά από δευτερεύοντα συστήματα, τα οποία φέρονται επί της πλατφόρμας μεταφοράς (αεροσκάφος, ελικόπτερο, UAV κ.α.) και επιτελούν σημαντικές λειτουργίες για την παραγωγή του τελικού νέφους σημείων από τις διαδοχικές μετρήσεις της σάρωσης. Η φιλοσοφία της εν λόγω διασύνδεσης συγκεκριμένων υποσυστημάτων, αναπτύχθηκε την δεκαετία του 90, κυρίως λόγω της νέας δυνατότητας του συστήματος δορυφορικού προσδιορισμού θέσης GPS, να παρέχει

προσδιορισμό θέσης για κινητές πλατφόρμες (Novak 1993). Με τον τρόπο αυτό, αναπτύχθηκαν τα συστήματα κινητής χαρτογράφησης (Mobile Mapping System ή MMS), τα οποία στα μέσα της πρώτης δεκαετίας του 2000 μετονομάστηκαν σε τεχνολογία κινητής χαρτογράφησης (Mobile Mapping Technology ή MMT), όρος πιο ευρύς ώστε να περιλάβει όλη την σύγχρονη, πολύπλοκη τεχνολογία και τις πιο εκλεπτυσμένες μεθόδους και διαδικασίες για συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, καθώς και για εξαγωγή πληροφοριών από αυτά (Schwartz and El-Sheimy 2007). Τα συστήματα LiDAR, ανήκουν στην κατηγορία MMT (εικ.1-7) και διασυνδέουν τα εξής υπομέρους συστήματα:

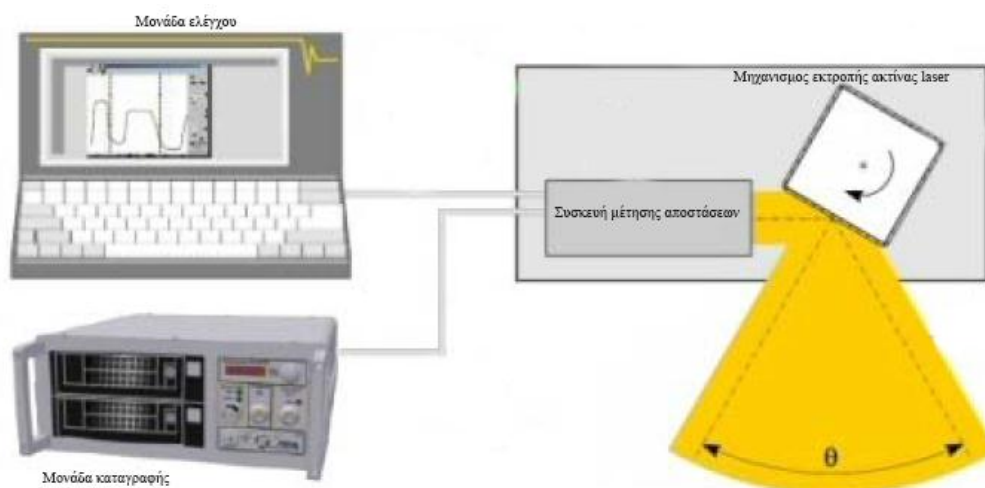
- ✓ Το σαρωτή laser.
- ✓ Τη μονάδα δορυφορικού προσδιορισμού θέσης (Global Navigation Satellite System ή GNSS) και τον αντίστοιχο σταθμό εδάφους, με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζεται διαφορικά η θέση του σαρωτή ως προς το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.
- ✓ Τ αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (Inertial Navigation System ή INS) με την οποία υπολογίζονται οι στροφές του σαρωτή ως προς τις τρεις διευθύνσεις roll, pitch, yaw κατά την πτήση (μαζί με το σύστημα GNSS αναφέρονται ως σύστημα θέσης και προσανατολισμού POS).
- ✓ Υψηλής ακρίβειας χρονόμετρο για τον συγχρονισμό όλων των υποσυστημάτων.
- ✓ Τη μονάδα αποθήκευσης δεδομένων και συστήματα χειρισμού και ελέγχου.



Εικόνα 1-7: Το πλήρες σύστημα LiDAR

1.3.1 Ο σαρωτής LiDAR

Η κυρίως μονάδα του σαρωτή LiDAR (εικ. 1-8), αποτελείται από το μηχανισμό μέτρησης των αποστάσεων, ο οποίος εκπέμπει και δέχεται την οπισθοσκεδαζόμενη ακτίνα laser και τον μηχανισμό εκτροπής της ακτίνας, προκειμένου να υλοποιηθεί η μέτρηση αποστάσεων υπό διαφορετικές γωνίες δηλαδή η σάρωση. Τα τμήματα αυτά, διασυνδέονται με τη μονάδα ελέγχου και την μονάδα καταγραφής και περιλαμβάνουν πολύπλοκές ηλεκτρονικές διατάξεις καθώς και μηχανισμούς κίνησης, η ανάλυση των οποίων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας.



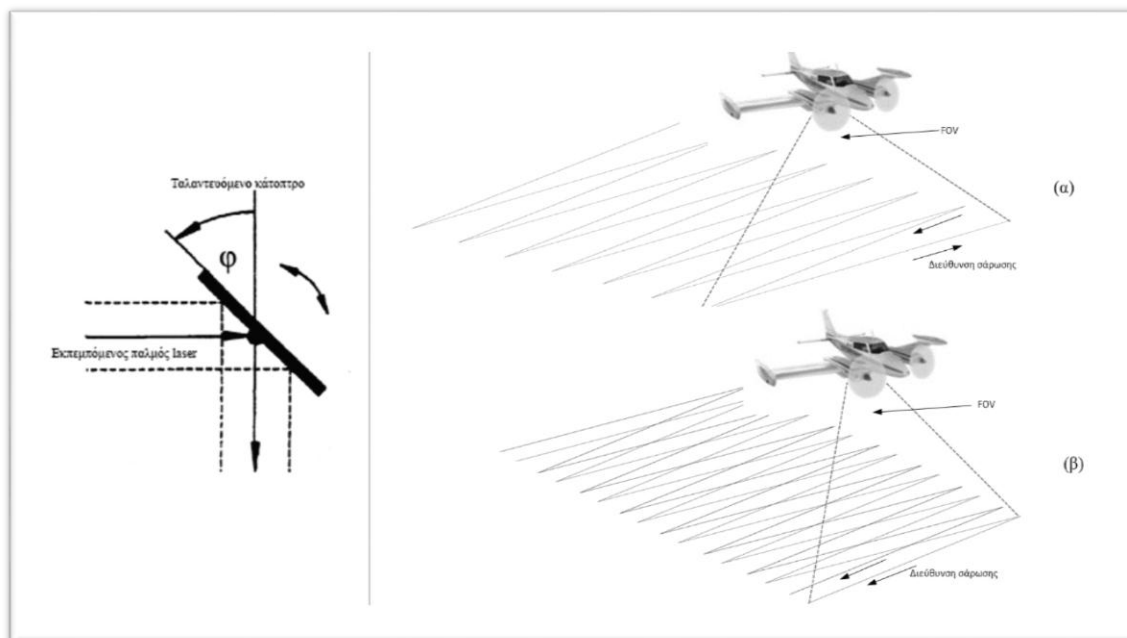
Εικόνα 1-8: Σχηματική αναπαράσταση σαρωτή LiDAR (Riegl LMS Q560)

Σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των διαθέσιμων συστημάτων LiDAR, παρουσιάζει η τεχνική εκτροπής των παλμών laser, η οποία εξαρτάται από τον αντίστοιχο χρησιμοποιούμενο μηχανισμό και μπορεί να πραγματοποιείται προς μια ή και δύο διευθύνσεις. Το άμεσο αποτέλεσμα των διαφορετικών τεχνικών αυτών, σε συνδυασμό με την προώθηση της πλατφόρμας μεταφοράς του σαρωτή υπό κάποια ταχύτητα καθώς και την τοπογραφία του ανάγλυφου, είναι η πραγματοποίηση της σάρωσης του εδάφους υπό άλλο κάθε φορά πρότυπο. Γενικά χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί μηχανισμοί οι οποίοι είναι:

✓ Ταλαντευόμενο κάτοπτρο (oscillating mirror):

Αποτελεί και τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μηχανισμό, ο οποίος αποτελείται από ένα επίπεδο κάτοπτρο που εκτελεί ταλάντωση με γωνιακό εύρος $-\theta_{\max} / 2 \leq \theta_{\text{inst}} \leq \theta_{\max} / 2$. Το πρότυπο σάρωσης που δημιουργεί η τεχνική αυτή, είναι συνήθως μια ημιτονοειδής γραμμή (σάρωση δύο κατευθύνσεων). Η ταχύτητα του κατόπτρου μηδενίζεται στις ακραίες θέσεις, όπου και η κίνησή του αλλάζει φορά, ενώ είναι μέγιστη στην κατακόρυφη θέση, με αποτέλεσμα το διάστημα μεταξύ των μετρούμενων σημείων στο έδαφος να μειώνεται σταδιακά από το ναδιρικό σημείο προς τα άκρα της γραμμής σάρωσης (across track). Το πρόβλημα της μεταβαλλόμενης αυτής πυκνότητας των μετρήσεων (μεγαλύτερη πυκνότητα στα άκρα των λωρίδων σάρωσης), έχει λυθεί από

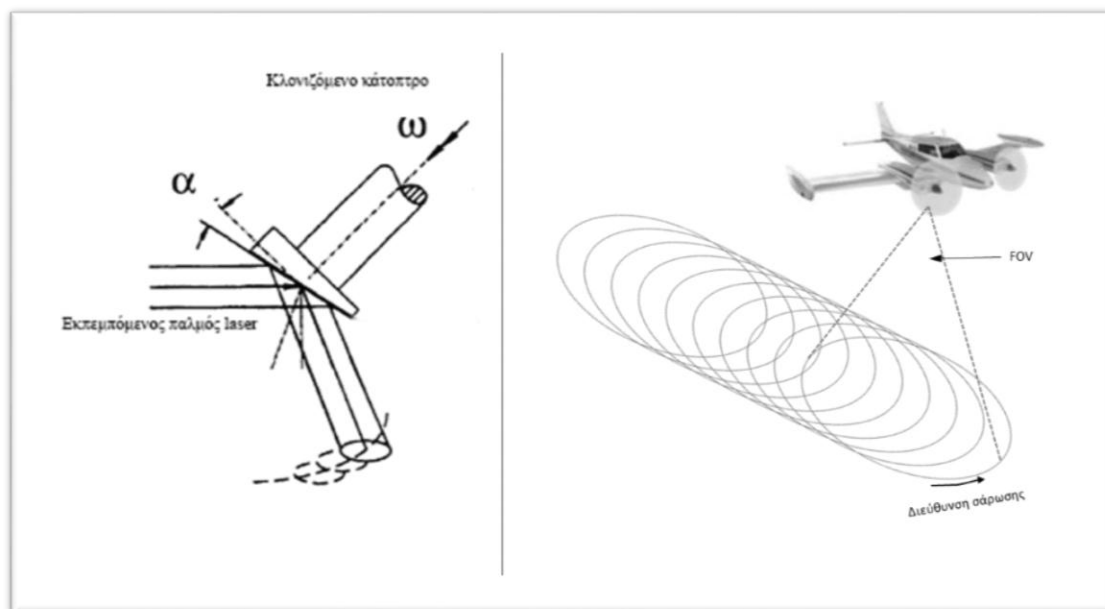
τους κατασκευαστές με την αφαίρεση των ακραίων σημείων, από αυτές, τα οποία έχουν μετρηθεί και με το μεγαλύτερο σφάλμα (§ 1.2). Η τεχνική αυτή δημιουργεί και άνισες αποστάσεις μεταξύ μετρήσεων και κατά τη διεύθυνση πτήσης (along track), γεγονός που βρίσκει λύση με την χρήση διπλών κατόπτρων σε μερικά συστήματα όπως το Leica ALS70. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται δύο ημιτονοειδή μοτίβα στο έδαφος, τα οποία παρουσιάζουν μια μετάθεση μεταξύ τους και έχουν ως αποτέλεσμα την ποιο ομοιόμορφη κατανομή των μετρήσεων.



Εικόνα 1-9: Μηχανισμός ταλαντευόμενου κατόπτρου και μοτίβα σάρωσης μονού (α) και διπλού (β) κατόπτρου

✓ Κλωνιζόμενο κάτοπτρο (nutating mirror):

Ο μηχανισμός αυτός, αποτελείται από ένα κάτοπτρο το οποίο αρχικά σχηματίζει με την διεύθυνση της ακτίνας laser γωνία 45° . Το κάτοπτρο ενώ περιστρέφεται ως προς τον άξονά του, ταυτόχρονα μεταβάλλει κατά λίγο την γωνία αυτή και ως αποτέλεσμα διαγράφει μια κωνοειδή κίνηση στο χώρο που ονομάζεται κλωνισμός. Ο τρόπος αυτός εκτροπής της ακτίνας, σε συνδυασμό με την προώθηση της πλατφόρμας μεταφοράς του σαρωτή, δημιουργεί ένα πρότυπο σάρωσης στο έδαφος από σημεία διατεταγμένα σε επικαλυπτόμενες ελλείψεις. Η εν λόγω τεχνική, η οποία ονομάζεται και σάρωση Palmer, χρησιμοποιείται μόνο από τα συστήματα ScaLARS και TopEye MK II και σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι ότι τα περισσότερα σημεία στο έδαφος μετρώνται δύο φορές, μια κατά την εμπρόσθια φορά και μία κατά την οπίσθια φορά σάρωσης. Με τον τρόπο αυτό, ένας σημαντικός αριθμός πλεοναζουσών παρατηρήσεων γίνεται διαθέσιμος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγγενή βαθμονόμηση του συστήματος POS αλλά και του σαρωτή (A. Wehr, U. Lohr 1999).

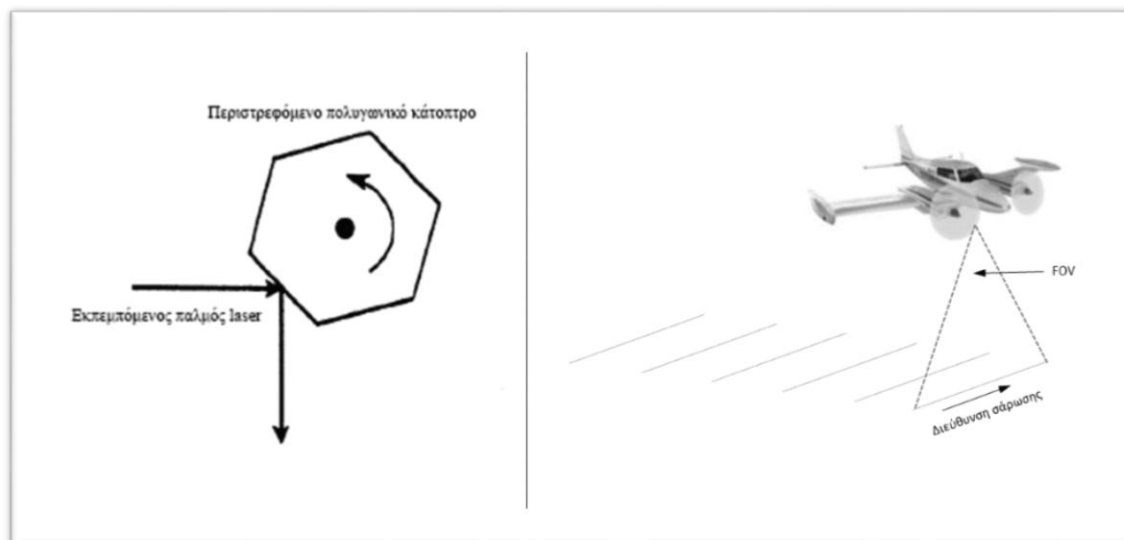


Εικόνα 1-10: Μηχανισμός κλινοζόμενου κατόπτρου και μοτίβο σάρωσης palmer scan

✓ Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο (Rotating Mirror):

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ως μηχανισμός εκτροπής της ακτίνας χρησιμοποιείται ένα πολυγωνικό κάτοπτρο, το οποίο έχει επίπεδες έδρες και περιστρέφεται ως προς τον άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους του. Καθώς το κάτοπτρο περιστρέφεται, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της εκάστοτε έδρας και της προσπίπτουσας ακτίνας μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό και ως αποτέλεσμα δημιουργείται μια γραμμή σάρωσης στο έδαφος. Υποθέτοντας αριστερόστροφη κίνηση, όταν η πλευρά του κατόπτρου έρθει σε θέση παράλληλη με την διεύθυνση της ακτίνας, τότε παύει να έχει επαφή με αυτή και η αμέσως επόμενη πλευρά αποκτά επαφή και αναλαμβάνει να εκτρέψει τους παλμούς laser, με ένα πανομοιότυπο τρόπο. Μια νέα γραμμή σάρωσης δημιουργείται, η οποία λόγω της ταχύτητας προώθησης της πλατφόρμας του σαρωτή, παρουσιάζει μια παράλληλη μετάθεση ως προς την προηγούμενη. Με τον τρόπο αυτό, παρουσιάζεται ένα μοτίβο σάρωσης στο έδαφος, το οποίο αποτελείται από παράλληλες γραμμές ίσων αποστάσεων, εφόσον η ταχύτητα τόσο του κατόπτρου όσο και της πλατφόρμας παραμένουν σταθερές. Βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου μηχανισμού, είναι ότι από την κάθε έδρα του κατόπτρου μόνο ένα τμήμα της είναι ωφέλιμο, δηλαδή θα προκαλέσει εκτροπή του laser προς το στόχο και όχι προς άλλη διεύθυνση. Δεδομένου ότι ο στόχος βρίσκεται κατακόρυφα προς τα κάτω και αν υποθέσουμε αριστερόστροφη κίνηση του πολυγώνου, τότε καθώς η κάθε έδρα παραλαμβάνει τους εκπεμπόμενους παλμούς τους εκτρέπει αρχικά υπό γωνίες που δεν οδηγούν στην περιοχή του στόχου, στη συνέχεια εντός αυτής και τελικώς πάλι εκτός αυτής. Το σύστημα λοιπόν, δεν συλλέγει μετρήσεις για αρκετό χρονικό διάστημα όπου οι παλμοί δεν εκτρέπονται προς την περιοχή του στόχου. Σύμφωνα με τους R.T. Pack et.al. 2012 ένα σύστημα περιστρεφόμενου πολυγωνικού κατόπτρου μπορεί να εκπέμπει 200.000 παλμούς το δευτερόλεπτο και οι 140.000 να κατευθύνονται εκτός στόχου,

γεγονός που καθιστά την συγκεκριμένη τεχνική κατάλληλη μόνο για συστήματα πολύ υψηλού ρυθμού επανάληψης παλμών, όπως οι σαρωτές της κατασκευάστριας εταιρίας Riegl. Μειονέκτημα επίσης αποτελεί το γεγονός ότι τα συστήματα που χρησιμοποιούν περιστρεφόμενα πολυγωνικά κάτοπτρα δεν παρουσιάζουν προσαρμοζόμενο FOV, δεδομένου ότι η περιστροφή πρέπει να είναι πλήρης (360°).

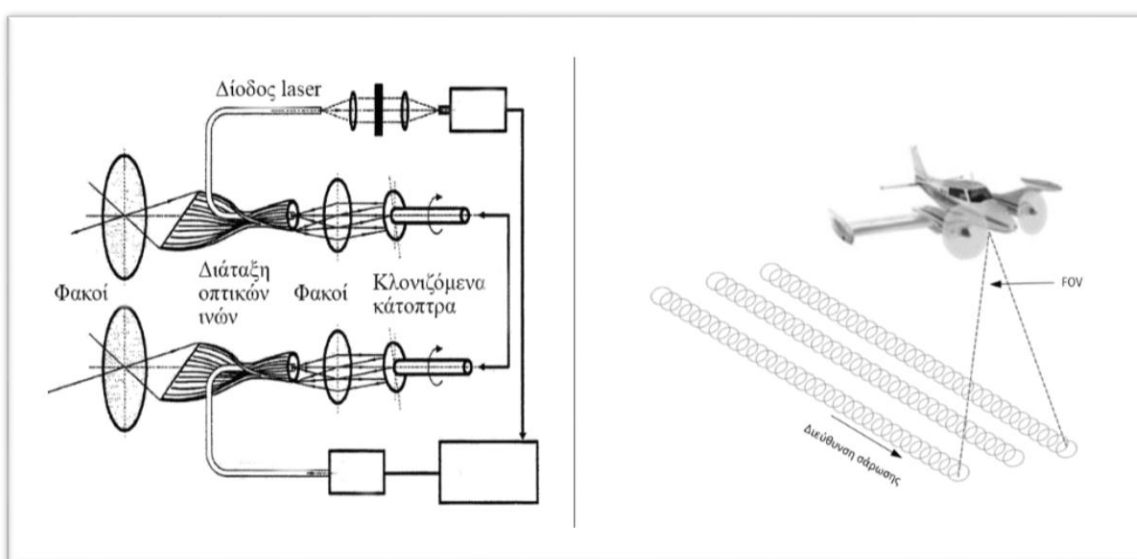


Εικόνα 1-11: Μηχανισμός περιστρεφόμενου πολυγωνικού κατόπτρου και μοτίβο σάρωσης παράλληλων γραμμών

✓ Σαρωτής οπτικών ινών (fiber scanner):

Η τεχνολογία αυτή δεν χρησιμοποιεί κινητές κατοπτρικές επιφάνειες για να πραγματοποιήσει την σάρωση, αλλά μια σταθερή διάταξη από γειτονικές οπτικές ίνες. Οι οπτικές ίνες βρίσκονται σε κυκλική διάταξη, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε γραμμική, στην περιοχή εξόδου των εκπεμπόμενων ακτίνων και εισόδου των οπισθοσκεδαζόμενων. Η απόσταση μεταξύ των ινών στις περιοχές αυτές είναι σταθερή, ενώ είναι τοποθετημένες στα εστιακά κέντρα των φακών που χρησιμοποιούνται για την εκπομπή των ακτίνων υπό καθορισμένη γωνία και της συλλογής αυτών με την επιστροφή τους στο σύστημα. Ο παλμός Laser, αρχικά παράγεται από την παλμογεννήτρια και διοχετεύεται μέσω μιας διόδου Laser η οποία είναι τοποθετημένη στο κέντρο του κυκλικού τμήματος της διάταξης των οπτικών ινών. Εκεί εκπέμπεται προς ένα κλωνιζόμενο στρογγυλό κάτοπτρο, δια μέσου ενός συστήματος φακών. Η ακτίνα ανακλάται από το κάτοπτρο και αφού διέλθει μέσω του ίδιου συστήματος φακών κατευθύνεται προς μια οπτική ίνα της αρχικής κυκλικής διάταξης του συστήματος εκπομπής. Η οπτική ίνα, αναλαμβάνει να διοχετεύσει την ακτίνα Laser, η οποία εξέρχεται της φέρουσας ίνας στην περιοχή γραμμικής διάταξης και κατευθύνεται προς την περιοχή του στόχου αφού υποστεί εκτροπή υπό ορισμένη γωνία, μέσω ενός φακού ο οποίος βρίσκεται υπό γωνία με το έδαφος. Η ακτίνα οπισθοσκεδαζεται από το στόχο και συλλαμβάνεται από τον αντίστοιχο φακό του συστήματος λήψης, ο οποίος και την οδηγεί στην αντίστοιχη οπτική ίνα που την μεταφέρει στη διάταξη ψηφιοποίησης ακολουθώντας την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία από αυτή της εκπομπής. Λόγω της

σταθερής γεωμετρίας του συστήματος, η σάρωση στο έδαφος πραγματοποιείται σε ένα μοτίβο παράλληλων μεταξύ τους γραμμών, σε απόσταση που εξαρτάται μόνο από την απόσταση των ινών της γραμμικής διάταξης εξόδου και κυμαίνεται στα 6 cm για σάρωση σε επίπεδο έδαφος, ενώ το συνολικό πλάτος της λωρίδας σάρωσης εξαρτάται μόνο από το ύψος πτήσης. Σε συνδυασμό με υψηλό ρυθμό επανάληψης παλμών, η μέθοδος αυτή σάρωσης οδηγεί σε επικαλυπτόμενα ίχνη των ακτινών στο έδαφος κατά την διεύθυνση της πτήσης (along track), και σε μικρή απόσταση μεταξύ τους κατά την κάθετη διεύθυνση (across track), γεγονός που δημιουργεί μια ομοιόμορφη κάλυψη της περιοχής σάρωσης και με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που παράγεται από αυτή να είναι υψηλών προδιαγραφών ακριβείας. Η εν λόγω τεχνική εφαρμόζεται μόνο από την εταιρία TopoSys στο σύστημα LiDAR Falcon.



Εικόνα 1-12: Μηχανισμός οπτικών ινών (TopoSys) και μοτίβο σάρωσης επικαλυπτόμενων ιχνών

1.3.2 Το σύστημα POS

Ο σαρωτής LiDAR, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, συλλέγει μετρήσεις αποστάσεων που πραγματοποιούνται υπό συγκεκριμένη γωνία. Τα πρωτογενή αυτά δεδομένα αποτελούν ζεύγη πολικών συντεταγμένων (γωνία και απόσταση), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των μετρούμενων σημείων, στο πλαίσιο κάποιου συστήματος αναφοράς. Για να είναι αυτό εφικτό, απαιτείται η πραγματοποίηση μιας μαθηματικής επίλυσης, η οποία προϋποθέτει την γνώση της θέσης (X_0, Y_0, Z_0) του σαρωτή ως προς το χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς, κατά την χρονική στιγμή της κάθε μέτρησης, καθώς και του αντίστοιχου προσανατολισμού του, δηλαδή τις στροφές ω , φ , κ που παρουσιάζει ως προς τους άξονες X, Y, Z του συστήματος. Το σύνολο των επικουρικών μεν, απαραίτητων δε στοιχείων αυτών, τα οποία ονομάζονται εξωτερικός προσανατολισμός δίνεται από το σύστημα θέσης και προσανατολισμού POS, η βασική σύνθεση του οποίου περιλαμβάνει ένα δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης

GNSS (Global Navigational Satellite System) και ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (Inertial Navigation System).

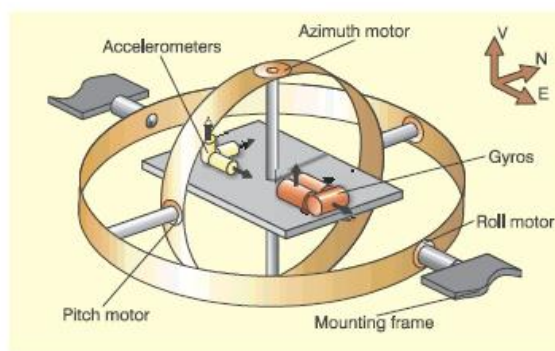
Το σύστημα GNSS προσδιορίζει τη θέση, βάσει του σήματος που λαμβάνει από τους αστερισμούς των δορυφόρων του GPS (ανήκει στην Αμερική), του GLONASS (ανήκει στην Ρωσία), του GALILEO (ανήκει στην Ευρωπαϊκή Ένωση) ή του COMPASS (ανήκει στην Κίνα). Η μέθοδος προσδιορισμού θέσης έχει ως γενική αρχή την μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ του δέκτη GNSS και περισσότερων από τεσσάρων δορυφόρων κάποιου αστερισμού, η οποία επιτυγχάνεται με την χρονική ανάλυση του συνεχώς εκπεμπόμενου σήματος από κάθε δορυφόρο. Το σήμα αυτό μεταφέρεται δια μέσου της ατμόσφαιρας επί ενός φέροντος κύματος, λαμβάνεται από κάθε δέκτη GNSS, στη συνέχεια αποκωδικοποιείται και βάση του εσωτερικού χρονομέτρου ακριβείας τόσο του δέκτη, όσο και του δορυφόρου, προσδιορίζεται η απόσταση από τον δορυφόρο αφού υπολογιστεί η μετατόπιση φάσης η οποία πραγματοποιείται μεταξύ της εκπομπής και της λήψης του σήματος. Ο προσδιορισμός θέσης με τη χρήση δεκτών GNSS πραγματοποιείται με διάφορες τεχνικές, η οποίες όμως παρουσιάζουν και διαφορετική αβεβαιότητα. Στην περίπτωση των αερομεταφερόμενων συστημάτων έχει κριθεί ως καταλληλότερη μέθοδος ο διαφορικός, κινηματικός προσδιορισμός θέσης, με τη χρήση σταθμού εδάφους. Λόγω της κυριαρχίας του NAVSTAR GPS των ΗΠΑ (που είναι και το μόνο πλήρως λειτουργικό GNSS σύστημα), έχει επικρατήσει η χρήση του όρου GPS για την περιγραφή όλων των δεκτών GNSS και ως εκ τούτου, το σύστημα διαφορικού προσδιορισμού θέσης στις κινούμενες πλατφόρμες αναφέρεται συχνά ως Differential GPS ή DGPS. Οι ανεξάρτητες μετρήσεις τόσο από τον σταθμό εδάφους όσο και από τον δέκτη επί της πλατφόρμας μεταφοράς του σαρωτή, συμμετέχουν σε μια διαδικασία επίλυσης post-processing ώστε να αρθούν τα σφάλματα χρόνου από τα χρονόμετρα των δεκτών και των δορυφόρων, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό συντεταγμένων για την θέση του κινητού δέκτη στην πλατφόρμα μεταφοράς με ακρίβεια την τάξης μερικών εκατοστών (5cm - 15cm). Η μέθοδος αυτή έχει επιλεγεί για χρήση στις περισσότερες περιπτώσεις υπολογισμού στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού για κινούμενα συστήματα, αλλά ιδιαίτερα στην περίπτωση των συστημάτων LiDAR είναι η μοναδική κατάλληλη, δεδομένου ότι η ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων στα σύγχρονα συστήματα κυμαίνεται από 1cm - 5cm (A.Nayegandhi 2007) και ως εκτούτου η αντίστοιχη ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης πρέπει να είναι τουλάχιστον ανάλογης τάξης μεγέθους. Ο σταθμός εδάφους πρέπει να βρίσκεται σε σταθερό σημείο γνωστών συντεταγμένων και σε απόσταση όχι μεγαλύτερη των 25 Km από την εκάστοτε θέση της πλατφόρμας. Κατά το στάδιο της εκκίνησης των μετρήσεων και πριν την απογείωση της εναέριας πλατφόρμας μεταφοράς του σαρωτή, είναι απαραίτητο να προηγηθεί ένα στάδιο αρχικοποίησης των μετρήσεων του DGPS ($\approx 5\text{min}$ στατικών ταυτόχρονων μετρήσεων), με σκοπό τον προσδιορισμό των ακέραιων κύκλων του σήματος (ασάφειες φάσης) για περιπτώσεις διακοπής λήψης αυτού κατά την διάρκεια της αποστολής, γεγονός που θα σήμαινε αδυναμία επίλυσης των μετρήσεων του δέκτη.

Βάσει των συχνότερα χρησιμοποιούμενων συστημάτων GNSS από τις μεγαλύτερες κατασκευάστριες εταιρίες στο χώρο, υπάρχει η κοινή παραδοχή, ότι οι αρχικές, εγγενείς

μετρήσεις του κάθε συστήματος αναφέρονται στο ίδιο δορυφορικό σύστημα αναφοράς. Ως τέτοιο ορίζεται το γεωκεντρικό καρτεσιανό τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς που ονομάζεται WGS84 (World Geodetic System 1984). Κάθε θέση ως προς το σύστημα αυτό, ορίζεται από μια τριπλέτα συντεταγμένων (X, Y, Z) που αντιπροσωπεύουν και το αντίστοιχο διάνυσμα θέσης στο 3d χώρο. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα GNSS που χρησιμοποιείται καταγράφει ανά χρονικό διάστημα το οποίο έχει προκαθοριστεί από το χρήστη (συνήθως ανά 1sec), τις τριπλέτες συντεταγμένων της θέσης της κεραίας του δέκτη.

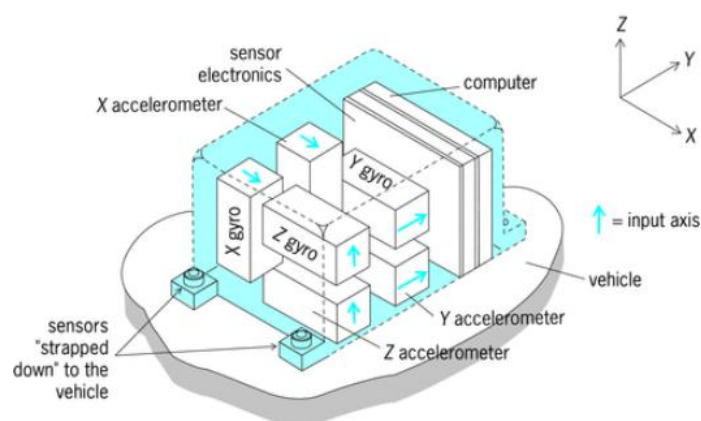
Δεύτερο και εξίσου σημαντικό συστατικό του συστήματος POS είναι το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης INS. Αποτελείται από δύο συστατικά, τα οποία είναι η μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (Inertial Measurement Unit ή IMU) και ο επεξεργαστής πλοήγησης (Navigation Processor ή NP) (B.Scherzinger et.al. 2012). Η μονάδα IMU ένα ενιαίο σύστημα που αποτελείται από τρία επιταχυνσιόμετρα, τρία γυροσκόπια και προαιρετικά από τρία μαγνητόμετρα (εικ.1-13). Χρησιμοποιούνται δύο τύποι μονάδων IMU, η ελεύθερης περιστροφής (gimbale) και η σταθερής πρόσδεσης (strapdown). Τα συστήματα INS χρησιμοποιούνται γενικά στην πλοήγηση για προσδιορισμό θέσης, αλλά ο κύριος σκοπός τους στα συστήματα LiDAR, όπως και στα λοιπά συστήματα πολλαπλών δεκτών, είναι να προσδιορίζουν τον λεγόμενο εξωτερικό γωνιακό προσανατολισμό του δέκτη, δηλαδή τις γωνιακές μετατοπίσεις που παρουσιάζει ως προς κάποιο πλαίσιο αναφοράς.

Τα gimbaled IMU είναι και τα πρώτα που αναπτύχθηκαν (εικ.1-13) και χρησιμοποιούν κινητά μηχανικά μέρη (γυροσκοπικούς μηχανισμούς). Η βασική αρχή λειτουργίας και των δύο τύπων είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση της πλατφόρμας, από μια αρχική γνωστή θέση. Στα gimbaled IMU, τα επιταχυνσιόμετρα είναι τοποθετημένα σε κάθετη μεταξύ τους διάταξη και προσανατολισμένα κατά τη διεύθυνση βορά-νότου, ανατολής-δύσης και κατά την κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζουν οι δύο αυτές διευθύνσεις. Μετρούν τις μεταβολές της επιτάχυνσης κατά τις τρεις αυτές διευθύνσεις οι οποίες συντελούνται κατά την πτήση και από τις οποίες με μια μαθηματική ολοκλήρωση προκύπτουν οι μεταβολές της ταχύτητας, ενώ με μια δεύτερη ολοκλήρωση προκύπτουν οι μετατοπίσεις (μεταβολές της θέσης) από την αρχική θέση της μονάδας, πάντα σε σχέση με τις τρεις διευθύνσεις που προαναφέρθηκαν. Τα τρία γυροσκόπια κρατούν την παραπάνω διάταξη πάντα προσανατολισμένη ως προς τις τρεις διευθύνσεις, αντισταθμίζοντας τις μεταβολές που δημιουργούν οι ελιγμοί και οι κλίσεις της πλατφόρμας μεταφοράς τους. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό είναι η μέτρηση των γωνιακών τάσεων περιστροφής της πλατφόρμας, από τις οποίες με μία μαθηματική ολοκλήρωση, προκύπτουν οι τάσεις για γωνιακές μετατοπίσεις του συστήματος. Στην συνέχεια δίνεται η εντολή στους αντίστοιχους σερβομηχανισμούς να τις αντισταθμίσουν, περιστρέφοντας το σύστημα ανάλογα.



Εικόνα 1-13: Σχηματική απεικόνιση μονάδας IMU ελεύθερης περιστροφής (Gimbale) (King 1998)

Η εξέλιξη της τεχνολογίας laser μετά την δεκαετία του 60, έδωσε τη δυνατότητα της ανάπτυξης των strapdown IMU, στα οποία τα κινητά μηχανικά μέρη των gimbale IMU αντικαταστάθηκαν από γυροσκόπια laser. Κύριο χαρακτηριστικό των strapdown IMU (εικ. 1-14) είναι ότι περιστρέφονται μαζί με την πλατφόρμα μεταφοράς τους, λόγω της πάκτωσής τους σε αυτήν. Η διάταξη των επιταχυνσιόμετρων είναι η ίδια με τα gimbale IMU, αλλά η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις αυτών αναφέρονται στο πλαίσιο αναφοράς που ορίζεται από την ίδια την μονάδα IMU και όχι στο σύστημα North-East-Down. Οι μετρήσεις από τα γυροσκόπια laser, δημιουργούν ένα μαθηματικό πίνακα ο οποίος περιγράφει τον προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς του IMU, ως προς ένα σύστημα αναφοράς πλοήγησης, το οποίο ορίζεται από ένα τοπικό οριζόντιο επίπεδο προσανατολισμένο προς τον γεωγραφικό βορά. Γενικά τα strapdown IMU κυριαρχούν πλέον στην αγορά, ενώ χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε αεροσκάφη.



Εικόνα 1-14: Σχηματική απεικόνιση μονάδας IMU σταθερής πρόσδεσης (Strapdown) (A. Lawrence 1998)

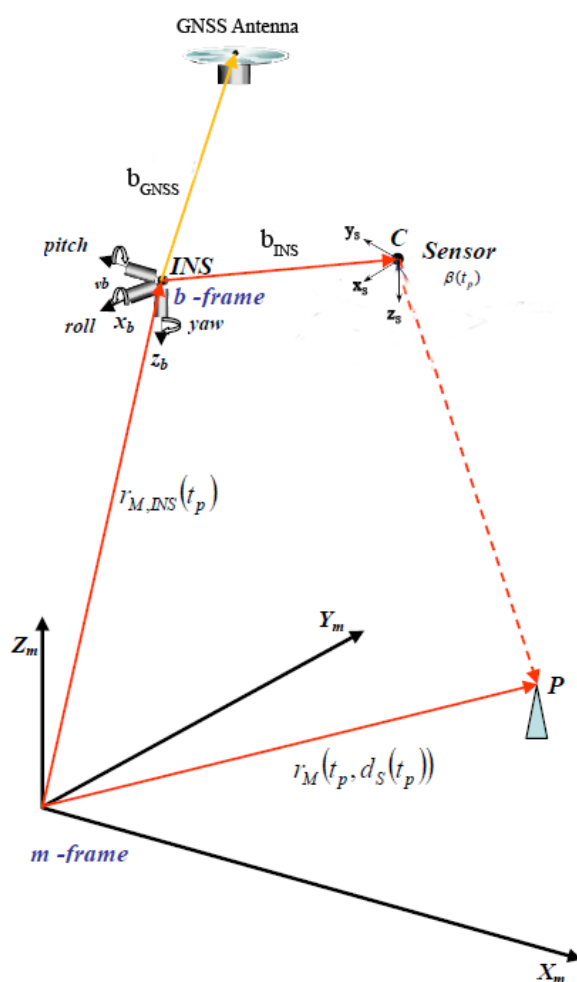
Μειονέκτημα των IMU είναι το λεγόμενο σφάλμα των μετρήσεων των επιταχυνσιόμετρων, το οποίο στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως drift. Πρόκειται για ένα προσθετικό σφάλμα, το οποίο όσο μικρό και να είναι, συσσωρεύεται από σημείο σε σημείο και αυξάνει με το χρόνο. Το σφάλμα αυτό είναι διαφορετικό για τις τρεις διευθύνσεις Roll-Pitch-Yaw και ρυθμίζεται αφενός με καλή αρχικοποίηση του συστήματος και αφετέρου με την εκτέλεση ελιγμών κατά τη διάρκεια της πτήσης και

την αποφυγή μεγάλης διάρκειας, σταθερών πτήσεων. Η αρχικοποίηση του IMU γίνεται σε δύο φάσεις, την οριζοντίωση (leveling) και τον προσανατολισμό (gyrocompassing). Κατά την οριζοντίωση σκοπός είναι να προσδιοριστεί όσο τον δυνατόν καλύτερα το τοπικό οριζόντιο επίπεδο (μηδενισμός σφαλμάτων Roll και Pitch), γεγονός που γίνεται με επίπεδη πτήση για τουλάχιστον 3 min (Α.Πόθου 2012). Κατά τον προσανατολισμό, σκοπός είναι να προσδιοριστεί όσο τον δυνατόν καλύτερα η διεύθυνση του βορά, προς την οποία πρέπει να βρίσκεται προσανατολισμένο διαρκώς το παραπάνω οριζόντιο επίπεδο. Το σφάλμα αυτό αποτελεί το σφάλμα Yaw, δηλαδή τις στροφές ως προς την κάθετη στο οριζόντιο επίπεδο διεύθυνση. Είναι το σφάλμα το οποίο λειτουργεί προσθετικά με την πάροδο του χρόνου και απαιτεί την εκτέλεση ελιγμών προκειμένου να επαναφέρεται σε ανεκτά επίπεδα.

1.4 Βαθμονόμηση συστήματος

Με τον όρο βαθμονόμηση, εννοούμε τον προσδιορισμό των αποκλίσεων που μπορεί να παρουσιάζει ένα σύστημα από την ιδανική κατάσταση λειτουργίας του. Παράλληλα, για τα συστήματα πολλαπλών δεκτών ο όρος βαθμονόμηση περιλαμβάνει και τον προσδιορισμό των χωρικών εκείνων παραμέτρων, οι οποίες οφείλονται στη διάταξη του συστήματος και η γνώση τους είναι απαραίτητη για την μαθηματική επίλυση του μοντέλου που συνδέει τις μετρήσεις από το κάθε υποσύστημα (§ 1.5). Τόσο οι αποκλίσεις από την ιδανική λειτουργία κάποιου συστήματος, όσο και ο μη ακριβής προσδιορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων του συστήματος, οδηγούν στην δημιουργία συστηματικών σφαλμάτων στις μετρήσεις, τα οποία συσσωρεύονται στα τελικά δεδομένα, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την αξιοπιστία τους. Στα συστήματα LiDAR, τόσο ο σαρωτής όσο και το σύστημα POS πρέπει να έχουν υποστεί αρχική βαθμονόμηση, η οποία σχετίζεται με τις εργοστασιακές προδιαγραφές του κάθε συστήματος ανεξάρτητα. Συγκεκριμένα, η κεραία του δέκτη GNSS πρέπει να έχει ελεγχθεί και να ελέγχεται περιοδικά για τυχόν μετατοπίσεις του κέντρου φάσης της, δηλαδή του σημείου ως προς το οποίο πραγματοποιείται ο δορυφορικός προσδιορισμός της θέσης. Τέτοιες μετατοπίσεις είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν, λόγω πολύχρονης χρήσης, κραδασμών και πτώσεων και παρόλο που μπορεί να είναι μικρές, δημιουργούν σημαντικό σφάλμα δεδομένης της τάξης ακρίβειας του διαφορικού προσδιορισμού θέσης (μερικά εκατοστά). Παράλληλα, η μονάδα INS πρέπει να αρχικοποιείται σωστά, με βάση όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και κατάλληλες ενέργειες πρέπει να γίνονται (πτήσεις μικρής διάρκειας, εκτέλεση ελιγμών μεταξύ λωρίδων πτήσης), ώστε το σφάλμα των μετρήσεων που πραγματοποιεί να παραμένει σε ανεκτά επίπεδα. Ο σαρωτής LiDAR, δύναται να παρουσιάζει αποκλίσεις ως προς το μετρούμενο ναδιρικό σημείο της ακτίνας laser και το αντίστοιχο πραγματικό. Αυτές οι γωνιακές αποκλίσεις μετρούνται εργοστασιακά από τον κατασκευαστή και θεωρούνται γνωστές.

Εφόσον με τα παραπάνω έχει εξασφαλιστεί η καλή λειτουργία του κάθε υποσυστήματος ανεξάρτητα, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν και οι χωρικές σχέσεις που συνδέουν τα υποσυστήματα αυτά. Ο λόγος είναι ότι το κάθε υποσύστημα πραγματοποιεί μετρήσεις κάποιου μεγέθους (θέση, χρόνος, απόσταση, γωνία κ.α.) ως προς κάποιο διαφορετικό σύστημα αναφοράς, αλλά ο συνδυασμός όλων των ανεξάρτητων αυτών μετρήσεων παράγει το τελικό προϊόν που είναι το 3d νέφος σημείων. Όπως είναι αντιληπτό, οι χωρικές σχέσεις μεταξύ των υποσυστημάτων είναι απαραίτητες, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μετατροπή των εκάστοτε μετρήσεων μεταξύ των διαφόρων συστημάτων αναφοράς, ώστε να είναι εφικτός ο παραπάνω συνδυασμός τους. Στα συστήματα LiDAR, όπως και στα λοιπά χαρτογραφικά εναέρια συστήματα πολλαπλών δεκτών, τα χρησιμοποιούμενα πλαίσια αναφοράς είναι το πλαίσιο αναφοράς του INS, του GNSS και του σαρωτή (εικ.1-15). Πρόκειται για διαφορετικά τρισσορθόγωνα καρτεσιανά συστήματα αναφοράς, τα οποία παρουσιάζουν μεταξύ τους στροφές και μετατοπίσεις.



Εικόνα 1-15: Χωρικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών πλαισίων αναφοράς σε ένα σύστημα LiDAR (C.Toth 2009)

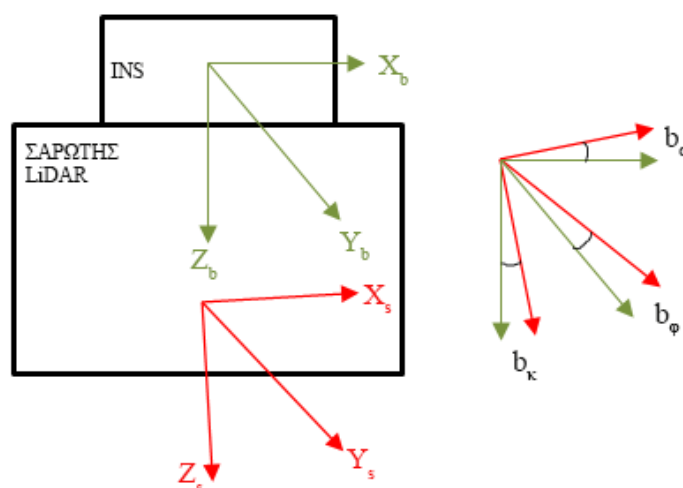
Τα κρίσιμα μεγέθη κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης είναι τα διανύσματα εκκεντρότητας τόσο του σαρωτή (b_{INS}), όσο και της κεραίας του GNSS (b_{GNSS}) από το

πλαίσιο αναφοράς του INS, τα οποία στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζονται **lever arms**, καθώς και η στροφή που παρουσιάζει το σύστημα αναφοράς του σαρωτή (s-frame) από αυτό του INS (b-frame) η οποία στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζεται **boresight misalignment**. Σημειώνεται, ότι το lever arm μεταξύ του INS και του σαρωτή (b_{INS}) αναφέρεται πολλές φορές και ως boresight offset στη διεθνή βιβλιογραφία. Για λόγους απλότητας, στην παρούσα εργασία τα διανύσματα μετάθεσης ονομάζονται lever arms, ενώ ως boresight θα χαρακτηρίζεται μόνο η στροφή (γωνιακή απόκλιση) μεταξύ του πλαισίου αναφοράς του σαρωτή και του INS. Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται αλλιώς και παράμετροι τοποθέτησης του συστήματος (mounting parameters) και πρέπει να επανυπολογίζονται **κάθε** φορά που το σύστημα αφαιρείται και επανατοποθετείται στην πλατφόρμα μεταφοράς του.

Τα lever arms στα σύγχρονα συστήματα είναι πολύ μικρά, δεδομένου ότι οι διάφοροι δέκτες τοποθετούνται πολύ κοντά, όμως ο μηδενισμός τους είναι πρακτικά αδύνατος για κατασκευαστικούς λόγους. Έτσι, ακόμα και τα μικρά μεγέθη τους, που είναι της τάξης των cm, εισάγουν και το αντίστοιχο συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις. Είναι κατανοητό, ότι για ένα σύστημα όπως το LiDAR, το οποίο παράγει νέφη σημείων με οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξεως των cm, το συστηματικό αυτό σφάλμα είναι πολύ μεγάλο και συνεπώς πρέπει να υπολογιστεί και να αφαιρεθεί. Μάλιστα, η ακρίβεια με την οποία πρέπει να υπολογιστούν τα lever arms, πρέπει να είναι μια τάξη μεγέθους καλύτερη της ακρίβειας του συστήματος LiDAR. Έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την μέτρηση των lever arms, και οι κυριότερες σύμφωνα με την Α. Πόθου 2012 είναι:

- Η απευθείας μέτρησή τους στο έδαφος με τη χρήση μεθόδων βιομηχανικής γεωδαισίας (μετρήσεις με total station).
- Αναλυτικά με την εφαρμογή του φίλτρου Kalman στις διαφορές που εμφανίζονται στις μετρήσεις του GNSS και του INS.
- Έμμεσα με την εκτέλεση συνόρθωσης, στην οποία το lever arm INS/LiDAR προστίθεται ως άγνωστη παράμετρος, διαδικασία αρκετά πολύπλοκη.

Το INS είναι συνήθως πακτωμένο επάνω στο σαρωτή LiDAR με τους άξονές των πλαισίων αναφοράς τους να είναι παραλληλισμένοι. Ωστόσο, μια μικρή γωνιακή απόκλιση $b_\omega, b_\phi, b_\kappa$ εξακολουθεί πάντα να υπάρχει (εικ 1-16), η οποία αποτελεί και το boresight misalignment. Θεωρείται ίσως η πιο σημαντική πηγή εισαγωγής συστηματικών σφαλμάτων στα τελικά δεδομένα, ενώ έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της. Η διαδικασία στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως boresight calibration. Ουσιαστικά πρόκειται για διαδικασία, μέσω της οποίας υπολογίζεται ένας μαθηματικός πίνακας στροφής $R_{b_\omega, b_\phi, b_\kappa}$, με τη βοήθεια του οποίου (και με γνωστό το lever arm INS/LiDAR) μπορεί να γίνει ο μετασχηματισμός των μετρήσεων από το πλαίσιο αναφοράς του σαρωτή στο αντίστοιχο του INS. Οι παραπάνω γωνίες στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζονται και Roll-error για την b_ω , Pitch-error για την b_ϕ , Yaw-error (ή πολλές φορές και heading error) για την b_κ , κατ' αντιστοιχία των αξόνων Roll-Pitch-Yaw του INS.



Εικόνα 1-16: Η γωνιακή απόκλιση (Boresight misalignment) μεταξύ πλαισίων αναφοράς INS και σαρωτή LiDAR.

Ο υπολογισμός του boresight misalignment, εφόσον αρχικά έχει πραγματοποιηθεί η εργαστηριακή ρύθμιση από τον κατασκευαστή, δύναται να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

- Με διαδικασία συνόρθωσης και την χρήση επίγειων πεδίων βαθμονόμησης.
- Απευθείας από τα δεδομένα, εφόσον έχουν ληφθεί επικαλυπτόμενες λωρίδες σάρωσης με αντίθετη φορά για τον υπολογισμό των b_ω, b_ϕ και παράλληλες επικαλυπτόμενες λωρίδες για τον υπολογισμό της b_κ .

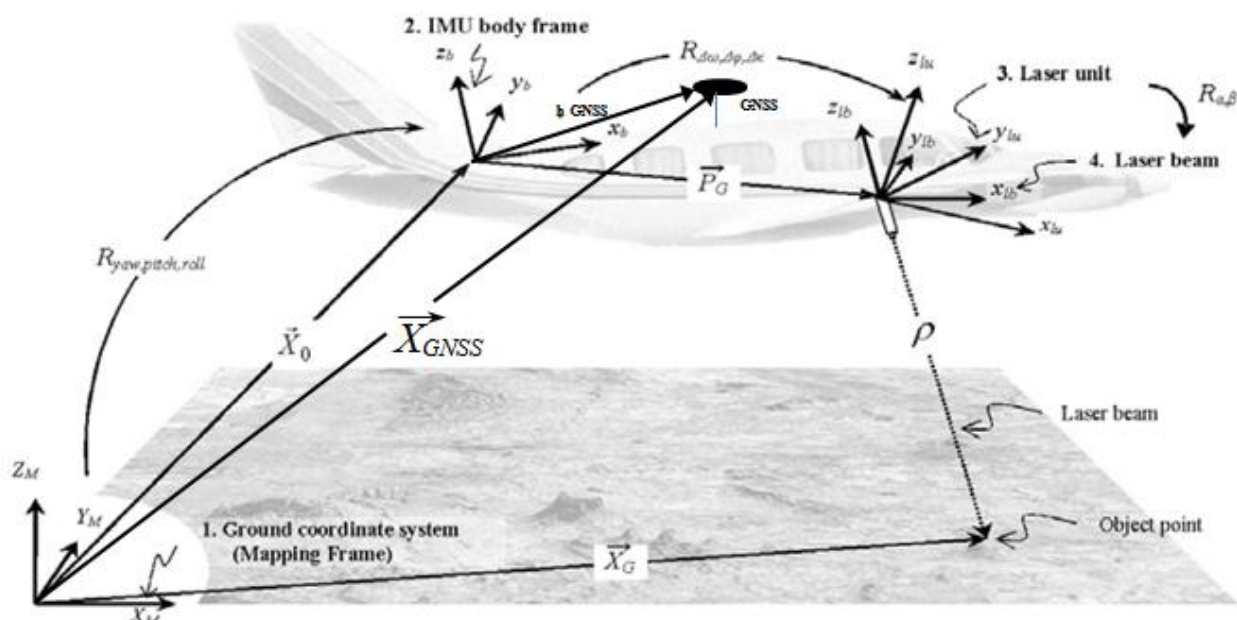
Η δεύτερη μέθοδος, που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως in flight calibration, είναι και η πιο ευρέως διαδεδομένη και ειδικές διαδικασίες για την πραγματοποίησή της ενσωματώνονται στα λογισμικά των κατασκευαστών LiDAR. Σύμφωνα με τους Morton B. και Young J. 2012, η μέθοδος αυτή βαθμονόμησης οδηγεί σε πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα και βρίσκεται σε εφαρμογή για περίπου 15 χρόνια. Η τυπική in flight calibration μέθοδος, ιδανικά ξεκινά πριν την εκτέλεση της κυρίως σάρωσης και μια επίπεδη επιφάνεια απαιτείται να χρησιμοποιείται ως πεδίο βαθμονόμησης, δεδομένου ότι σε επίπεδο έδαφος τα συστηματικά σφάλματα είναι πιο εύκολα εντοπίσιμα από ότι σε κεκλιμένο. Αρχικά το αεροσκάφος, με ενεργό το δέκτη GNSS στο σταθμό εδάφους, εκτελεί μια τροχοδρόμηση στο διάδρομο προσαπογειώσεως ή σε κάποιο άλλο δευτερεύον διάδρομο τροχοδρόμησης του αεροδρομίου, την οποία και επαναλαμβάνει τρεις φορές. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται ένας κινηματικός προσδιορισμός ο οποίος μπορεί να λυθεί και να υπολογιστούν οι τιμές των υψομέτρων του διαδρόμου, στοιχεία επίγειου ελέγχου. Στη συνέχεια, το αεροσκάφος απογειώνεται και λαμβάνει τις λεγόμενες λωρίδες βαθμονόμησης, σαρώνοντας τον εν λόγω διάδρομο σε δύο λωρίδες με αντίθετη φορά και ακόμα δύο λωρίδες κάθετες στις πρώτες. Η λήψη των σαρώσεων αυτών γίνεται από το ίδιο ύψος στο οποίο θα πραγματοποιηθεί και η κυρίως σάρωση της περιοχής ενδιαφέροντος. Μετά το τέλος της αποστολής, λαμβάνεται άλλο ένα σετ λωρίδων βαθμονόμησης, μια παράλληλα με το διάδρομο και μια κάθετη σε αυτόν. Η

διαδικασία αυτή, παρέχει τη δυνατότητα να υπολογιστούν όλες εκείνες οι μεταβλητές οι οποίες χρειάζονται για την αναίρεση των συστηματικών σφαλμάτων στα δεδομένα, τόσο λόγω boresight misalignment, όσο και σε περίπτωση που το INS παρουσιάσει drift error. Το τελευταίο θα φανεί από τις διαφορές μεταξύ αρχικών και τελικών λωρίδων βαθμονόμησης. Παρόλο που η διαδικασία αυτή είναι λεπτομερής και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, εντούτοις εφαρμόζεται από τους διάφορους παροχείς δεδομένων LiDAR σε διάφορες παραλλαγές. Το ποιο σύνηθες, είναι να λαμβάνονται μια ή δύο λωρίδες σάρωσης, κάθετες στις κανονικές λωρίδες, διασταυρώνοντας τες είτε στα δύο ακραία τμήματα, είτε στη μέση πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος.

1.5 Άμεση γεωκωδικοποίηση και συγχρονισμός μετρήσεων

Η γνώση των χωρικών σχέσεων μεταξύ των υποσυστημάτων του συστήματος LiDAR, όπως αυτές προκύπτουν από τις διαδικασίες βαθμονόμησης της προηγούμενης παραγράφου, χαρακτηρίζεται κρίσιμη διότι ολοκληρώνουν το μαθηματικό μοντέλο με βάση το οποίο είναι εφικτή η διαδικασία της άμεσης γεωκωδικοποίησης (γεωαναφοράς). Με τον όρο άμεση γεωκωδικοποίηση, χαρακτηρίζεται η διαδικασία με την οποία το σύστημα δύναται να εκτελεί τους κατάλληλους υπολογισμούς, ώστε να μετατρέπει τις πρωταρχικές μετρήσεις πολικών συντεταγμένων σημείων του εδάφους από το σαρωτή, σε συντεταγμένες των σημείων αυτών με βάση το χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό ή χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία αυτή είναι και το κύριο χαρακτηριστικό το οποίο κάνει το σύστημα LiDAR να αποτελεί ένα πολύ ανταγωνιστικό μέσο για χρήση σε σύγχρονες χαρτογραφικές εργασίες, αφού τα παράγωγα 3d νέφη σημείων είναι ήδη γεωαναφερόμενα λόγω των διαδικασιών από τις οποίες παράγονται. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται διαγραμματικά στην εικ. 1-17 και περιγράφεται από τη σχέση (1.7) σύμφωνα με τους Vaughn et al., 1996; Schenk, 2001, El-Sheimy et al., 2005.

$$\overline{X}_G = \overline{X}_0 + R_{yaw,pitch,roll} \cdot \overline{P}_G + R_{yaw,pitch,roll} \cdot R_{b_\omega, b_\phi, b_\kappa} \cdot R_{\alpha,\beta} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (1.7)$$



Εικόνα 1-17: Τα πλαίσια αναφοράς και το μοντέλο γεωκωδικοποίησης του συστήματος LiDAR (A. Habib)

Αναλύοντας το παραπάνω μοντέλο, παρατηρούμε ότι το διάνυσμα θέσης \overline{X}_G ενός μετρούμενου σημείου στο έδαφος ως προς το χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (συνήθως το δορυφορικό WGS84 λόγω χρήσης GPS), προκύπτει από το άθροισμα των τριών διανυσμάτων \overline{X}_0 , \overline{P}_G , $\overline{\rho}$, αφού πρώτα εφαρμοστούν οι κατάλληλες στροφές $R_{yaw,pitch,roll}$, $R_{b_{\omega},b_{\phi},b_{\kappa}}$ και $R_{\alpha,\beta}$. Τα μεγέθη που συμμετέχουν είναι:

\overline{X}_0 : Διάνυσμα θέσης του κέντρου μέτρησης του INS ως προς το χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Προκύπτει από το αντίστοιχο διάνυσμα θέσης της κεραίας του GNSS \overline{X}_{GNSS} και το υπολογισμένο από τη διαδικασία βαθμονόμησης lever arm \overline{b}_{GNSS} μεταξύ GNSS και INS.

\overline{P}_G : Το υπολογισμένο από τη διαδικασία βαθμονόμησης lever arm μεταξύ INS και σαρωτή LiDAR.

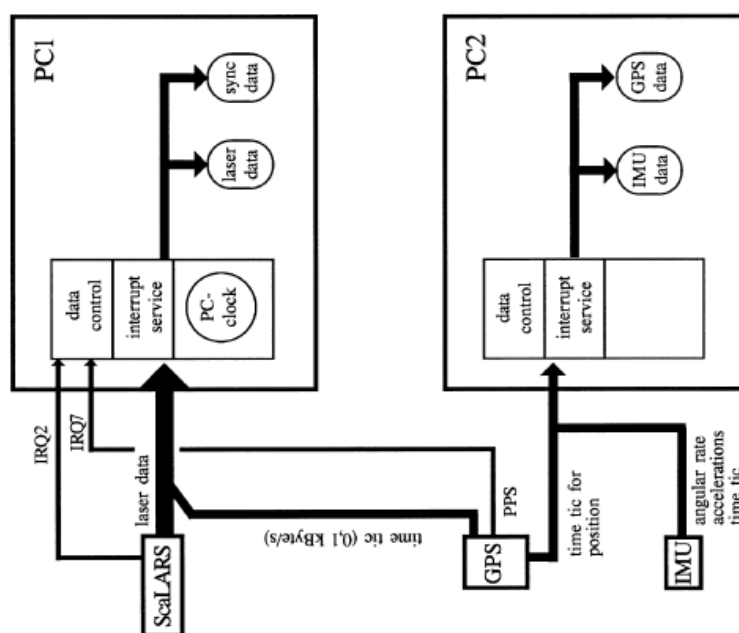
$\overline{\rho}$: Το διάνυσμα από το σημείο εκπομπής της ακτίνας laser στο μετρούμενο επίγειο σημείο. Το μέτρο του συγκεκριμένου διανύσματος είναι η απόσταση μεταξύ σημείου και σαρωτή.

$R_{yaw,pitch,roll}$: Ο πίνακας στροφής μεταξύ γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς και συστήματος INS.

$R_{b_{\omega}, b_{\phi}, b_{\kappa}}$: Ο πίνακας στροφής (boresight misalignment) μεταξύ πλαισίου αναφοράς INS και πλαισίου αναφοράς σαρωτή LiDAR.

$R_{\alpha, \beta}$: Ο πίνακας στροφής μεταξύ της μονάδας laser του σαρωτή LiDAR και της εκτρεπόμενης υπό γωνία α και β ακτίνας (σε γραμμικούς σαρωτές όπου το κάτοπτρο περιστρέφεται προς μία μόνο κατεύθυνση, η γωνία α είναι μηδέν).

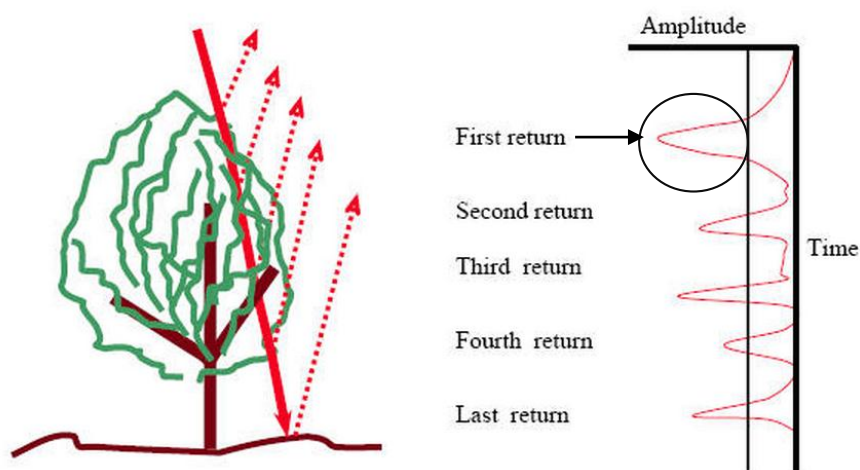
Ο συνδυασμός των μετρήσεων του σαρωτή του INS και του GNSS, προκειμένου να είναι εφικτή η διαδικασία της γεωκωδικοποίησης, απαιτεί να προηγηθεί μια διαδικασία συγχρονισμού. Σύμφωνα με τον A.Wehr 1999, οι μετρήσεις από το σαρωτή και το σύστημα POS αποθηκεύονται σε διαφορετικά αποθηκευτικά μέσα, τα οποία φέρονται επί διαφορετικών υπολογιστικών μονάδων. Ως συνέπεια, ο χρόνος που επιδεικνύει η κάθε μονάδα είναι διαφορετικός και το ίδιο συμβαίνει και με τη χρονοσφραγίδα την οποία παίρνει η κάθε μέτρηση από το σύστημα. Έτσι, αν PC1 είναι η υπολογιστική μονάδα η οποία καταγράφει τις μετρήσεις του σαρωτή LiDAR και PC2 η αντίστοιχη για τα δεδομένα από το σύστημα POS, τότε στο σύστημα υπάρχουν δύο διαφορετικοί χρόνοι. Ο χρόνος της PC1 ο οποίος είναι ο τοπικός χρόνος του υπολογιστή αυτού και ο χρόνος της PC2, ο οποίος είναι ο εξαιρετικά ακριβής χρόνος που προέρχεται από το σύστημα GNSS. Στην αρχή της κάθε σάρωσης ένα λογισμικό εκτελεί παρεμβολή στον χρόνο τόσο του συστήματος GNSS, όσο και στον τοπικό χρόνο που παρέχεται από τη μονάδα αποθήκευσης των δεδομένων σάρωσης. Οι δύο αυτές δειγματοληψίες χρόνων αποθηκεύονται ταυτόχρονα σε ξεχωριστό αρχείο με τη βοήθεια του οποίου τα δεδομένα POS μπορούν να επεξεργαστούν ανεξάρτητα από τα δεδομένα σάρωσης. Συγχρονισμός με παρεμβολή ανά 1 sec συνήθως, οδηγεί σε διόρθωση των χρονικών αποκλίσεων των δεδομένων λόγω χρήσης διαφορετικών χρονομέτρων.



Εικόνα 1-18: Συγχρονισμός μετρήσεων στο σύστημα ScaLARS (Wehr 1999)

1.6 Πολλαπλές επιστροφές και ανάλυση πλήρους σήματος

Τα πρώτα συστήματα LiDAR μπορούσαν να καταγράφουν μόνο μια επιστροφή (οπισθοσκέδαση) για τον κάθε εκπεμπόμενο παλμό laser. Είναι εύκολα κατανοητό όμως, ότι εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει ο φυσικός κόσμος, τμήματα ενός παλμού από το σύστημα ο οποίος κατευθύνεται προς το έδαφος μπορούν να οπισθοσκεδαστούν από διάφορα υπέργεια χαρακτηριστικά (δέντρα, κατασκευές κ.α.) ενώ το υπόλοιπο του παλμού, εφόσον είναι ενεργειακά επαρκές, δύναται να οπισθοσκεδαστεί από άλλα τμήματα των χαρακτηριστικών αυτών τα οποία βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο επί του μονοπατιού που ακολουθεί η ακτίνα. Τα σύγχρονα συστήματα LiDAR έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν πολλαπλές επιστροφές (3 έως 5) ανά εκπεμπόμενο παλμό, οι οποίες αντιστοιχούν σε αντικείμενα διαφορετικού υψομέτρου. Οι επιστροφές αυτές παρουσιάζονται ως τοπικά μέγιστα στο επιστρεφόμενο σήμα, τα οποία προσδιορίζονται από το σύστημα με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων. Ένα προκαθορισμένο όριο για το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος λειτουργεί ως διακόπτης για την έναρξη και λήξη της ψηφιοποίησης που λαμβάνει χώρα από το σύστημα και κάθε φορά που η ο ψηφιοποιητής αναγνωρίζει υπέρβαση του ορίου αυτού καταγράφει το υπερβαίνων τμήμα του σήματος ως επιστροφή. Αυτό δύναται να πραγματοποιηθεί έως και 5 φορές στα σύγχρονα συστήματα LiDAR (εικ.1-19).

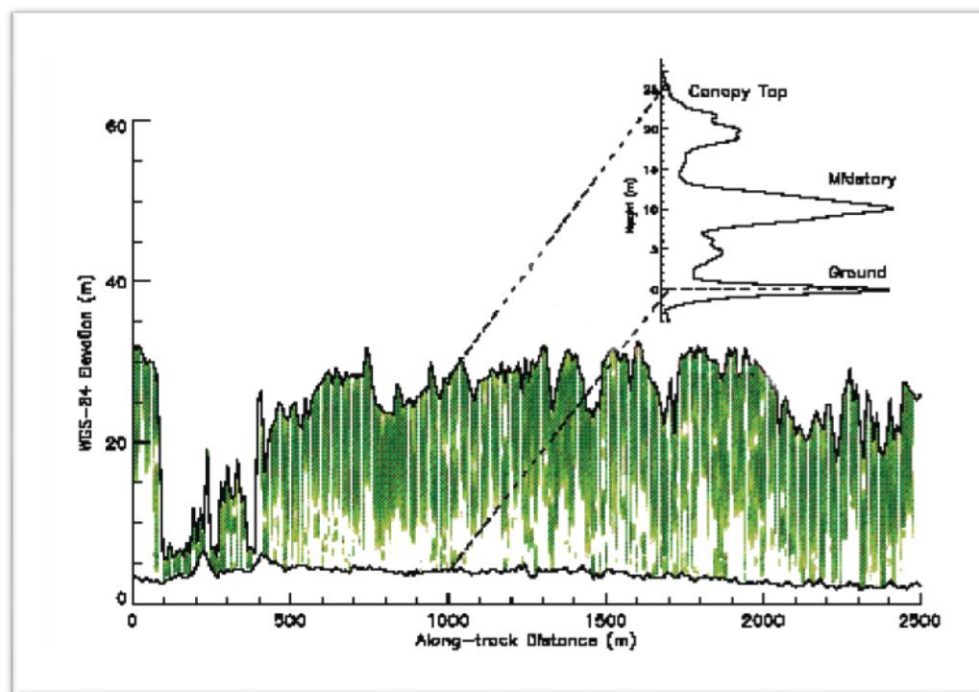


Εικόνα 1-19: Σχηματική απεικόνιση πολλαπλών επιστροφών και ψηφιοποίησης επιστρεφόμενου σήματος (ESRI)

Η φυσική σημασία των πολλαπλών επιστροφών είναι ότι οι πρώτες αντιπροσωπεύουν σημεία στις υψηλότερες επιφάνειες της περιοχής σάρωσης, όπως κορυφές δέντρων και σκεπές κτηρίων, οι ενδιάμεσες επιστροφές αντιστοιχούν σε χαμηλότερα τμήματα των παραπάνω αντικειμένων, ενώ οι τελευταίες επιστροφές αντιστοιχούν, ως επί το πλείστο, στην επιφάνεια του εδάφους. Οι τελευταίες επιστροφές των εκπεμπόμενων παλμών, δεν αντιστοιχούν πάντα σε οπισθοσκέδασεις από το έδαφος, αφού κάποιο υπέργειο αντικείμενο (κλαδί δέντρου, τμήμα κατασκευής κ.α.) μπορεί να την προκαλέσει. Με την απλή αυτή διακριτοποίηση των δεδομένων που καταγράφονται από το σύστημα LiDAR, δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστούν διαφορετικές επιφάνειες από το νέφος

σημείων, όπως το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας DSM της περιοχής σάρωσης και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους DTM αυτής. Οι διαφορές τους είναι ότι το πρώτο αποτελεί την επιφάνεια που σχηματίζει το ανάγλυφο της περιοχής μαζί με τα υπερκείμενα του φυσικού εδάφους αντικείμενα, ενώ το δεύτερο αποτελεί την επιφάνεια που σχηματίζει το ανάγλυφο της περιοχής, αφού αφαιρεθούν όλα τα υπέργεια αντικείμενα. Τα συστήματα LiDAR τα οποία καταγράφουν τις παραπάνω οπισθοσκεδάσεις από το επιστρεφόμενο σήμα ως ξεχωριστά σημεία, ονομάζονται και συστήματα διακριτών επιστροφών (Discrete Return LiDAR). Όπως μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό, η σάρωση με υψηλό PRF (συχνότητα αρκετών χιλιάδων παλμών το δευτερόλεπτο) οδηγεί στην καταγραφή μεγάλου όγκου δεδομένων από το σύστημα και συνεπώς στην δημιουργία μεγάλων και δύσχρηστων σετ δεδομένων. Ο όγκος αυξάνεται γεωμετρικά όταν για κάθε εκπεμπόμενο παλμό καταγράφονται περισσότερες από μια επιστροφές σήματος, γεγονός που αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής.

Η τελευταία εξέλιξη στα συστήματα LiDAR, από το 2003 και έπειτα, είναι η ανάλυση πλήρους σήματος (αναφέρεται και ως ανάλυση πλήρους κυματομορφής, αγγλ. full waveform analysis). Πρόκειται για μια νέα δυνατότητα, η οποία δεν έχει καταστεί ακόμα «ώριμη», ενώ αναμένεται να δώσει το έναυσμα για πολλές νέες εφαρμογές. Τα συστήματα LiDAR με τη δυνατότητα αυτή, όπως το LMS-Q560 της RIEGL, δεν δημιουργούν νέφος σημείων με βάση την καταγραφή των τοπικών μεγίστων στο επιστρεφόμενο σήμα όπως τα συστήματα διακριτών επιστροφών, αλλά ψηφιοποιούν ολόκληρο το επιστρεφόμενο σήμα ως συνάρτηση του χρόνου (J. Reitberger et.al. 2007), δημιουργώντας ένα σχεδόν συνεχές προφίλ του αντικειμένου που σαρώνεται. Η ψηφιοποίηση του επιστρεφόμενου σήματος μπορεί να είναι ιδιαίτερα λεπτομερής, με δειγματοληψία ακόμα και ανά 1ns. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι δύνανται να αποτυπώνονται τόσο τα γεωμετρικά, όσο και τα φυσικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων που σαρώνονται, δεδομένης της υψηλής ανάλυσης δειγματοληψίας που πραγματοποιείται, και με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εξαγωγή πολύ ποιο λεπτομερών πληροφοριών κατά το στάδιο της επεξεργασίας του νέφους σημείων Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την ανάλυση του επιστρεφόμενου σήματος όπως μπορεί να διερευνηθεί στις δημοσιεύσεις των Hofton et.al., 2000, Jutzi and Stilla, 2005, J. Reitberger et.al. 2007 κ.α. Σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής, είναι ότι ο επεξεργαστικός φόρτος που δημιουργείται για την ανάλυση του παραγόμενου νέφους σημείων είναι έως και 60 (!) φορές μεγαλύτερος, λόγω της πυκνής δειγματοληψίας που πραγματοποιείται στο επιστρεφόμενο σήμα. Τα διαθέσιμα εμπορικά λογισμικά παρουσιάζουν περιορισμούς όσον αφορά την επεξεργασία τόσο μεγάλων σετ δεδομένων και η χρήση της τεχνικής αυτής δεν συνίσταται για χαρτογραφικές εφαρμογές ευρείας κλίμακας. Επί του παρόντος, τέτοια δεδομένα βρίσκουν εφαρμογή σε εξειδικευμένες αναλύσεις που αφορούν την εκτίμηση της ποσότητας της βλαστικής βιομάζας, τη χαρτογράφηση εγγενών πληθυσμών άγριων ζώων, τη χαρτογράφηση της υγιούς από τη νεκρή βλάστηση, χαρτογράφηση κατακόρυφων κατασκευών όπως πυλώνες μεταφοράς ρεύματος κ.α.



Εικόνα 1-20: Δημιουργία προφίλ από ανάλυση πλήρους σήματος (NASA)

1.7 Ανακλαστικότητα και ένταση επιστρεφόμενου παλμού

Τα αντικείμενα στα οποία προσπίπτουν οι κατευθυνόμενοι προς το έδαφος παλμοί laser, απορροφούν ένα μέρος της ακτινοβολίας και ταυτόχρονα οπισθοσκεδάζουν ένα άλλο, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τις επιστροφές των παλμών που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η ποσότητα της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μήκος κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας, καθώς και από το είδος του υλικού στο οποίο προσπίπτει ο παλμός. Παράλληλα, μπορούν να την επηρεάσουν και επιπλέον παράμετροι που σχετίζονται με το εξωτερικό περιβάλλον, όπως η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, η κατάσταση της ατμόσφαιρας κ.α. Είναι προφανές, ότι η ανακλαστικότητα που παρουσιάζουν τα αντικείμενα σε μια περιοχή, θα μεταβάλλεται μεταξύ σαρώσεων με σύστημα LiDAR σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Στον πίνακα 1-3 παρατίθενται τα ποσοστά ανακλαστικότητας τα οποία εμφανίζουν διάφορες κατηγορίες αντικειμένων. Τα σύγχρονα συστήματα έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν μια τιμή έντασης για κάθε επιστρεφόμενο παλμό, η οποία σχετίζεται με την ανακλαστικότητα του αντικειμένου το οποίο προκάλεσε την οπισθοσκέδαση του παλμού. Ο όρος ένταση δεν είναι ακριβής, μια και το μέγεθος που στην ακρίβεια καταγράφεται είναι η διακύμανση σε πλάτος του επιστρεφόμενου παλμού. Με άλλα λόγια, δεν καταγράφεται απλώς η επιστροφή του παλμού, αλλά και η «δύναμη» με την οποία επιστρέφει.

Αντικείμενο	Ποσοστό ανακλαστικότητας
Λευκό χαρτί	Έως 100%
Χιόνι	80-90%
Αφρός μύρας	88%
Φυλλοβόλα δέντρα	~ 60%
Κωνοφόρα δέντρα	~ 30%
Στεγνή άμμος	57%
Υγρή άμμος	41%
Άσφαλτος ενισχυμένη με αδρανή	17%
Μαύρο νεοπρένιο	5%
Καθαρό νερό	<5%

Πίνακας 1-3: Παραδείγματα ανακλαστικότητας αντικειμένων κατά την σάρωση με σύστημα LiDAR

Αντικείμενα με μεγάλη ανακλαστικότητα όπως μεταλλικές οροφές και χιόνι εμφανίζουν υψηλότερες τιμές έντασης από ότι αυτά με μικρότερη ανακλαστικότητα, όπως νερό, ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι κ.α. Οι καταγραφόμενες αυτές τιμές έντασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση του νέφους σημείων με τη χρήση μιας greyscale χρωματικής παλέτας 8-bit (0-255). Η απεικόνιση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας με τη χρήση ενός κατάλληλου 3d viewer, αλλά και μέσω της δημιουργίας μιας εικόνας raster με την επίθεση ενός κανάβου πάνω στο νέφος σημείων και υπολογίζοντας τον μέσο όρο των τιμών των εντάσεων για όσα σημεία του νέφους εμπίπτουν στο κάθε εικονοστοιχείο του raster. Το παραγόμενο αυτό raster ονομάζεται εικόνα έντασης και παρουσιάζει ομοιότητα με μια παγχρωματική ορθοφωτογραφία, χωρίς ωστόσο να έχει την ίδια ευκρίνεια με αυτή (εικ. 1-21).

Ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό των εικόνων έντασης, είναι το γεγονός ότι κατά τη δημιουργία τους εγγράφονται αυτόματα στο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται και από το νέφος σημείων. Έτσι οι εικόνες είναι αυτόματα γεωαναφερμένες και μάλιστα «κληρονομώντας» την πολύ υψηλή οριζοντιογραφική ακρίβεια του νέφους (μερικά εκατοστά), ενώ αποτελούν ορθές προβολές του πραγματικού κόσμου, αφού δεν παρουσιάζουν τις οριζοντιογραφικές μεταθέσεις των ηλεκτροπτικών εικόνων που οφείλονται στο χρησιμοποιούμενο γεωμετρικό μοντέλο της κεντρικής προβολής. Οι εικόνες έντασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υπόβαθρα για την εκάστοτε εργασία, από τα οποία είναι δυνατή η εξαγωγή διανυσματικών δεδομένων, η υποβοήθηση της ταξινόμησης του νέφους σημείων και γενικά να καλύψουν την απουσία οπτικά αναγνωρίσιμης πληροφορίας, στις περιπτώσεις απουσίας οπτικών εικόνων. Παράλληλα, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν στερεοζεύγη εικόνων έντασης, με την χρήση της τεχνικής των stereomates που προέρχεται από την κλασική φωτογραμμετρία. Από μια εικόνα έντασης δημιουργείται μια δεύτερη εικόνα, στην οποία έχει εφαρμοστεί τεχνητά χ-παράλλαξη. Οι δύο αυτές εικόνες αποτελούν ένα στερεοζεύγος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό για 3d απόδοση διανυσματικών δεδομένων όπως δρόμοι, γραμμές αλλαγών κλίσης (breaklines) κ.α. Η τεχνική αυτή στην διεθνή ορολογία ονομάζεται Lidargrammetry.



Εικόνα 1-21: Εικόνα έντασης από σάρωση με σύστημα LiDAR (ASPRS)

1.8 Πηγές σφαλμάτων

Η έννοια ακρίβεια για τα δεδομένα ενός συστήματος LiDAR, αφορά την τελική αβεβαιότητα των 3d συντεταγμένων των σημείων που έχουν προσδιοριστεί από τη σάρωση και τα οποία παραδίδονται ως νέφος σημείων. Η αβεβαιότητα αυτή προέρχεται από ένα σύνολο παραγόντων, αλλά οι κύριες συνιστώσες της σύμφωνα με τον Baltsavias 1999, για ένα καλά βαθμονομημένο σύστημα είναι:

- ✓ Η αβεβαιότητα στην μέτρηση της απόστασης.
- ✓ Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού από το σύστημα POS.
- ✓ Η γωνία εκτροπής της δέσμης laser.
- ✓ Τα σφάλματα χρόνου κατά τον συνδυασμό των μετρήσεων των διαφόρων υποσυστημάτων.
- ✓ Το σφάλμα μετατροπής των υψομέτρων από γεωμετρικά σε ορθομετρικά με τη χρήση μοντέλου γεωειδούς.
- ✓ Σφάλματα μετατροπών από το WGS84 στο εκάστοτε χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό σύστημα.

Η αβεβαιότητα στην μέτρηση αποστάσεων εξαρτάται κυρίως από τεχνικούς περιορισμούς στο σύστημα, όπως την επιλογή του ίδιου σημείου τόσο στο εκπεμπόμενο όσο και στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα, προκειμένου να μετρηθεί ο ενδιάμεσος χρόνος,

τα σφάλματα των χρονομέτρων και η ακρίβεια με την οποία αυτά μπορούν να είναι γνωστά κ.α. Είναι η ποιο σύνθετη πηγή σφαλμάτων από όλες, όμως αν το σύστημα δεν παρουσιάζει λειτουργικά προβλήματα, τότε η αβεβαιότητα αυτή έχει την μικρότερη συνεισφορά στην ακρίβεια των τελικών 3d συντεταγμένων, δεδομένων των μεγεθών των υπολοίπων σφαλμάτων. Σε περιπτώσεις σαρώσεων από μικρά ύψη και με μικρές γωνίες, η συνεισφορά του παράγοντα αυτού στην τελική ακρίβεια αυξάνει.

Η αβεβαιότητα του προσδιορισμού της θέσης αφορά το σύστημα GNSS. Αναφέρεται στην ακρίβεια με την οποία μπορούν να επιλυθεί ο διαφορικός προσδιορισμός θέσης, ο οποίος πραγματοποιείται με το συνδυασμό μετρήσεων από σταθμό GNSS εδάφους και του φερόμενου σταθμού επί του αεροσκάφους. Εδώ οι παράγοντες που υπεισέρχονται είναι η γεωμετρία των δορυφόρων από τους οποίους το GNSS λαμβάνει σήμα, η απόσταση από το σταθμό εδάφους και η διανομή των σταθμών εδάφους στην περίπτωση χρήσης πολλαπλών τέτοιων, το ίδιο το χρησιμοποιούμενο σύστημα GNSS κ.α. Τυπικές τιμές ακρίβειας που μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση διαφορικού προσδιορισμού θέσης και post processing επίλυσης των δεδομένων, είναι 5 - 15cm. Παράλληλα, η ακρίβεια με την οποία έχουν μετρηθεί οι παράμετροι βαθμονόμησης μεταξύ GNSS και INS, καθώς και μεταξύ σαρωτή LiDAR και INS (lever arms και boresight misalignment) είναι σημαντική πηγή σφάλματος.

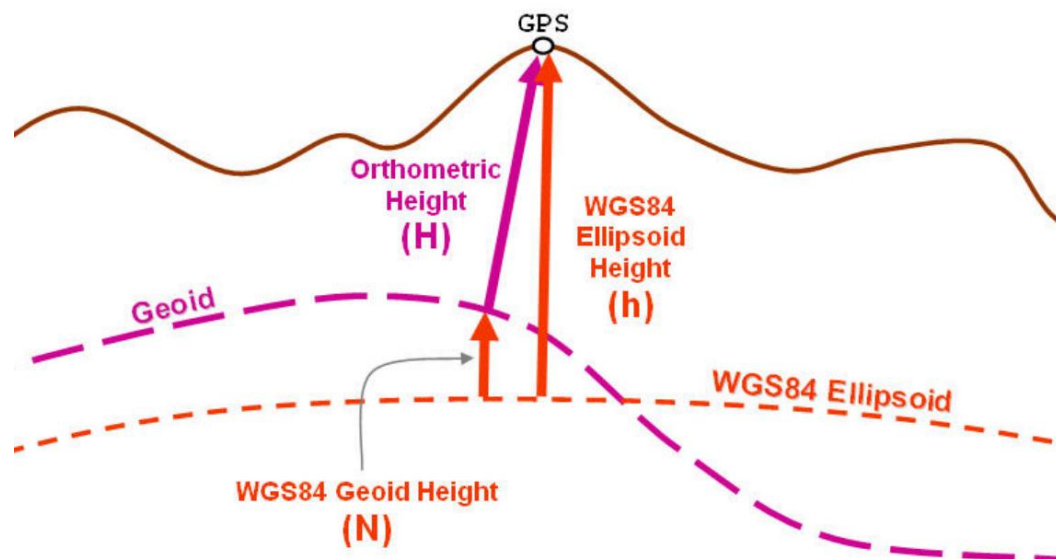
Η μέτρηση της γωνίας υπό την οποία εκτρέπεται κάθε φορά η ακτίνα laser, πραγματοποιείται από μια συσκευή η οποία ονομάζεται γωνιακός κωδικοποιητής. Ως ηλεκτρονική διάταξη παρουσιάζει ατέλειες και συνεπώς δημιουργεί μια αβεβαιότητα στην μέτρηση των γωνιών. Το γωνιακό σφάλμα ουσιαστικά αποτελεί την απόκλιση μεταξύ μετρημένης και πραγματικής θέσης του κέντρου του κατόπτρου του σαρωτή και επιδρά στις κατακόρυφες συντεταγμένες (Z) και στις συντεταγμένες κατά τη διεύθυνση σάρωσης (Y).

Η ύπαρξη χρονικών αποκλίσεων μεταξύ των χρόνων του συστήματος POS και της υπολογιστικής μονάδας που καταγράφει τις μετρούμενες αποστάσεις και τις αντίστοιχες γωνίες του κατόπτρου, δημιουργεί ένα μεταβλητό σφάλμα το οποίο επηρεάζει την ακρίβεια των τελικών 3d συντεταγμένων. Το σφάλμα αυτό αυξάνει αρκετά σε περιπτώσεις πτήσεων με αναταραχές, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία αστάθειας στο αεροσκάφος.

Τελικώς το πρόβλημα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου γεωειδούς κρίνεται αρκετά σημαντικός παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα αν δεν ληφθεί υπόψη. Λόγω της ανάγκης για χρήση συντεταγμένων που να συνάδουν με την μετρική αντίληψη του ανθρώπου, δηλαδή τη χρήση μονάδων μέτρησης που γίνονται εύκολα αντιληπτές από αυτόν (π.χ. m, ft κ.α.), καθώς και της ανάγκης απεικόνισης των συντεταγμένων σε χάρτες, απαιτείται η μετατροπή των αρχικών X,Y,Z συντεταγμένων. Ο λόγος είναι διότι το διάνυσμα θέσης αυτό δεν μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από τον άνθρωπο, καθώς αυτός δεν παρατηρεί το γεωκέντρο και το ισημερινό επίπεδο, αλλά άλλες επιφάνειες αναφοράς ποιο εύκολα προσδιορίσιμες (π.χ. η Μέση Στάθμη της

Θάλασσας - ΜΣΘ). Χωρίς εκτενή ανάλυση των γεωδαιτικών μεθόδων και μετασχηματισμών που χρησιμοποιούνται, δεδομένου ότι ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσης διπλωματικής εργασίας, η διαδικασία μετασχηματισμού για ένα σετ συντεταγμένων, είναι η αλλαγή του τρισσορθογώνιου καρτεσιανού διανύσματος θέσης X, Y, Z , αρχικά σε ελλειψοειδείς συντεταγμένες φ, λ, h , στο χρησιμοποιούμενο ελλειψοειδές εκ περιστροφής (για το σύστημα WGS84 χρησιμοποιείται το GRS80). Στο στάδιο αυτό, τα υψόμετρα των σημείων υπολογίζονται από την επιφάνεια του ελλειψοειδούς και ονομάζονται γεωμετρικά. Στη συνέχεια, οι ελλειψοειδείς συντεταγμένες μετασχηματίζονται σε επίπεδες συντεταγμένες x, y, H^0 , στην χαρτογραφική προβολή που χρησιμοποιείται και η οποία για το σύστημα WGS84 είναι η παγκόσμια εγκάρσια μερκατορική προβολή (Universal Transverse Mercator - UTM). Στη μορφή αυτή, οι συντεταγμένες παραδίδονται για χρήση και τα υψόμετρα έχουν μετασχηματιστεί ώστε να μετρώνται από την επιφάνεια που ορίζει η μέση στάθμη της θάλασσας και η οποία προσεγγίζει το γεωειδές (ισοδυναμική επιφάνεια του πεδίου βαρύτητας της Γης). Τα υψόμετρα αυτά ονομάζονται ορθομετρικά και είναι αυτά που έχουν καθημερινή εφαρμογή, δεδομένου ότι σε κάθε χώρα όλες οι εργασίες πραγματοποιούνται με υψομετρική αφετηρία το επίπεδο της θάλασσας. Για τον μετασχηματισμό αυτό των γεωμετρικών υψομέτρων σε ορθομετρικά ($h \rightarrow H^0$), ένα τρίτο υψόμετρο πρέπει να είναι γνωστό, το οποίο καλείται υψόμετρο (ή αποχή) του γεωειδούς N και εκφράζει την απόκλιση σε μέτρα που παρουσιάζει τοπικά η επιφάνεια του γεωειδούς από τη μαθηματική επιφάνεια του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής το οποίο χρησιμοποιείται για να την προσομοιάσει. Γενικά ισχύει ότι $H^0 = h - N$.

Το παγκόσμιο τρισσορθογώνιο γεωκεντρικό σύστημα WGS 84, πρέπει να μετατοπιστεί κατά ένα διάνυσμα $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z] = [199.87, -74.79, -246.62]$, ώστε το ελλειψοειδές GRS 80, από μια μέση προσαρμογή που παρουσιάζει στο γεωειδές σε παγκόσμιο επίπεδο, να προσαρμοστεί καλύτερα στον ελληνικό χώρο, ελαχιστοποιώντας την αποχή του γεωειδούς. Στις επιλύσεις των μετρήσεων από συστήματα GNSS χρησιμοποιείται ένα παγκόσμιο καλά προσδιορισμένο μοντέλο γεωειδούς (Earth Gravitational Model 2008 - EGM2008), με βάση το οποίο γίνεται ο μετασχηματισμός των υψομέτρων από γεωμετρικά σε ορθομετρικά. Η ακρίβεια με την οποία είναι γνωστή η αποχή του γεωειδούς N σε κάθε περιοχή είναι υπό αίρεση και όπως είναι κατανοητό, οτιδήποτε πάνω από μερικά cm απόκλιση προσθέτει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό των τελικών υψομέτρων. Για την αποφυγή μετασχηματισμών μεταξύ των διαφόρων συστημάτων αναφοράς και της συσσώρευσης των σφαλμάτων από αυτές στις τελικές συντεταγμένες των σημείων, είναι καλό οι σταθμοί GNSS εδάφους να τοποθετούνται σε σημεία των οποίων οι συντεταγμένες έχουν υπολογιστεί στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ87, ώστε η γεωκωδικοποίηση των δεδομένων του συστήματος LiDAR να γίνεται απευθείας στο σύστημα αυτό, μετά την επίλυση των δεδομένων του GNSS. Γενικά η ορθή χρήση του EGM2008, κατά αυτή την έννοια, οδηγεί σε μια υψομετρική ακρίβεια της τάξης των 5-10cm.



Εικόνα 1-22: Η σχέση μεταξύ γεωειδούς, ελλειψοειδούς και φυσικής γήινης επιφάνειας, και η σύνδεση των υψομέτρων (www.geod.nrcan.gc.ca)

Το αποτέλεσμα των διαφόρων πηγών σφάλματος στις συντεταγμένες των μετρούμενων σημείων στο δορυφορικό σύστημα αναφοράς (τρισορθογώνιο καρτεσιανό γεωκεντρικό σύστημα WGS84), δίνονται στον πίνακα 1.4 από τον Baltsavias 1999, για δύο διαφορετικά ύψη πτήσης (400 και 1000 m) και για δύο διαφορετικές τιμές της γωνίας κ (0° και 45°).

Coordinate error	Flying height (m)	Scan angle β (deg)	Error due to Δω	Error due to Δψ	Error due to Δκ	Error due to Δβ	Error due to ΔR	Error due to Δx ₀	Error due to Δy ₀	Error due to Δz ₀	Total error	
ΔX	400	0			0/0		0/0				22.4/24.5	
		-7.5			3.7/2.6		0/-0.5				22.7/24.7	
		-15	0/14.8	20.9/14.8	7.5/5.3	0/9.9	0/-0.9				23.6/25.1	
	-30			16.1/11.4		0/-1.8					27.6/27.1	
	1000	0			0/0		0/0	8/5.7	0/-5.7	0		53.0/58.4
		-7.5			9.2/6.5		0/-0.5					53.8/58.8
-15		0/37.0	52.4/37.0	18.7/13.2	0/24.7	0/-0.9					56.2/59.9	
-30			40.3/28.5		0/-1.8					66.6/65.0		
ΔY	400	0			0/0		0/0				26.4/24.5	
		-7.5			0/2.6		0.7/0.5				26.4/24.7	
		-15	-20.9/-14.8	0/14.8	0/5.3	-14/-9.9	1.3/0.9				26.4/25.1	
	-30			0/11.4		2.5/1.8					26.5/27.1	
	1000	0			0/0		0/0	0/5.7	8/5.7	0		63.5/58.4
		-7.5			0/6.5		0.7/0.5					63.5/58.8
-15		-52.4/-37.0	0/37.0	0/13.2	-35/-24.7	1.3/0.9					63.5/59.9	
-30			0/28.5		2.5/1.8					63.6/65.0		
ΔZ	400	0	0			0	5				9.4	
		-7.5	2.8			2	5				10.0	
		-15	5.6			4	5				11.7	
	-30	12.1			8	4				17.0		
	1000	0	0	0 (very small)	0	0	5	0	0	0	8	9.4
		-7.5	6.9			5	5					12.7
-15		14			9	5					19.1	
-30	30.2			20	4					37.3		

Values given for κ = 0 deg/45 deg.

Πίνακας 1-4: Πηγές σφαλμάτων και επίδρασή τους στις συντεταγμένες για διαφορετικές τιμές του ύψους πτήσης (E.P. Baltsavias)

1.9 Μερικά διαθέσιμα εμπορικά συστήματα LiDAR

Η αγορά των LiDAR θεωρείται αρκετά ώριμη και ένας ικανός αριθμός συστημάτων έχει αναπτυχθεί ολοκληρωμένα, ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί στις παραγωγικές διαδικασίες φορέων και ιδιωτικών εταιριών που ασχολούνται με συλλογή και εκμετάλλευση γεωχωρικών δεδομένων. Πολλές μεγάλες εταιρίες ανάπτυξης συστημάτων συλλογής πληροφοριών και αντίστοιχων λογισμικών πακέτων για ανάλυση και εκμετάλλευση αυτών, διεκδικούν μερίδιο στην αγορά των συστημάτων LiDAR, η κάθε μια αναπτύσσοντας το δικό της σύστημα με βάση τις αρχές και την αρχιτεκτονική οι οποίες διατυπώθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Έτσι έχει αναπτυχθεί μια σειρά από εμπορικά συστήματα LiDAR, ενώ υπάρχει ένας ακόμα αριθμός συστημάτων τα οποία έχουν αναπτυχθεί για ίδια χρήση από κάποιους παροχείς, καθώς και για ερευνητικούς σκοπούς. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση μερικών από τα πιο γνωστά εμπορικά συστήματα στην αγορά, τα οποία συγκεντρώνουν και το μεγαλύτερο ποσοστό ενδιαφέροντος και θα αναφερθούν οι χαρακτηριστικοί παράμετροι λειτουργίας και οι δυνατότητές τους. Γενικά τα συστήματα LiDAR προορίζονται για χρήση σε διαφορετικές πλατφόρμες μεταφοράς, δηλαδή τόσο ελικόπτερα όσο και αεροσκάφη.

➤ Leica Geosystems

Η εταιρία Leica Geosystems έχει αναπτύξει μια σειρά από συστήματα LiDAR με κύριες κατηγορίες μοντέλων το ALS60, το ALS Corridor Mapper και το ALS70. Η παλιότερη σειρά ALS60 έχει πάψει πλέον να βρίσκεται σε παραγωγή και έχει αντικατασταθεί από τη νέα σειρά ALS70, ενώ τα διαθέσιμα ALS60 συστήματα δύνανται να αναβαθμιστούν. Η σειρά ALS70, παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερο μέγεθος από τα λοιπά εμπορικά συστήματα LiDAR και περιλαμβάνει τα μοντέλα :

- ✓ ALS70-CM, το οποίο είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές σε αστικό ιστό, καθώς και χαρτογράφηση διαδρόμων μεταφοράς, με σάρωση από χαμηλά ύψη πτήσης. Πολύ υψηλές πυκνότητες σημείων είναι εφικτές με το σύστημα αυτό, όταν φέρεται επί μικρών αεροσκαφών και επί ελικοπτέρων.
- ✓ ALS70-HP, το οποίο είναι σχεδιασμένο για χαρτογραφήσεις γενικών σκοπών, από τα συνήθη ύψη πτήσης και μπορεί να σαρώνει μεγαλύτερες περιοχές λόγω του μεγαλύτερου μέγιστου ύψους πτήσης.
- ✓ ALS70-HA, το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση σε πολύ μεγάλα ύψη πτήσης και για χαρτογραφήσεις πολύ μεγάλης κλίμακας, όπως σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.



Εικόνα 1-23: Leica ALS70 (Leica Geosystems)

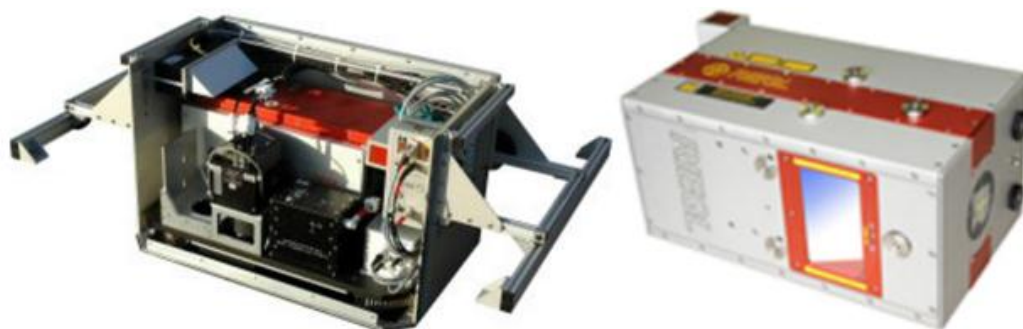
Χαρακτηριστικό	ALS70-CM	ALS70-HP	ALS70-HA
Μηχανισμός εκτροπής ακτίνας laser	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο
Πρότυπο σάρωσης	Ημιτονοειδές	Ημιτονοειδές	Ημιτονοειδές
Λειτουργικό ύψος πτήσης (m)	1600	3500	5000
Maximum PRF (KHz)	500	500	250
FOV	0° - 75°	0° - 75°	0° - 75°
f _{sc} (Hz)	200	200	100
Απόκλιση ακτίνας (mrad)	0,22	0,22	0,22
Αριθμός επιστροφών	Απεριόριστος	Απεριόριστος	Απεριόριστος
Οριζοντιογραφική ακρίβεια (cm) (3500 m (CM,HP) και 5000 m (HA) ύψος πτήσης και 40° FOV)	5 - 38	5 - 38	5 - 54
Υψομετρική ακρίβεια (cm) (3500 m (CM,HP) και 5000 m (HA) ύψος πτήσης και 40° FOV)	7 - 16	7 - 16	7 - 21
Μήκος κύματος laser (nm)	1064	1064	1064
Χωρητικότητα δίσκων δεδομένων (ώρες σε μέγιστο PRF)	6	6	12
Full Waveform Analysis	Ναι	Ναι	Ναι
Βάρος (Kg)	107,4	107,4	107,4
Ισχύς εισόδου (Watt)	937,2 - 972,4	937,2 - 972,4	937,2 - 972,4
Συνιστώμενη απόσταση μέτρησης (m)	Min=200 Max=4412	Min=200 Max=4412	Min=200 Max=6302

Πίνακας 1-5: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Leica ALS70

➤ Riegl

Η εταιρία Riegl παρέχει μια μεγάλη γκάμα ολοκληρωμένων συστημάτων LiDAR, κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι το μικρό μέγεθος και βάρος. Το γεγονός αυτό τους καθιστά κατάλληλους για τοποθέτηση τόσο εντός της καμπίνας των αεροσκαφών, όσο

και σε ειδικά διαμορφωμένες κάψουλες στο εξωτερικό αυτών (χρήσιμο για μικρά αεροσκάφη) και σε ελικόπτερα. Παράλληλα η εταιρία λειτουργεί και ως OEM (Original Equipment Manufacturer), διαθέτοντας τους σαρωτές της και σε άλλες εταιρίες έτσι ώστε αυτοί να μπορούν να ενσωματώνονται στα συστήματα LiDAR που αναπτύσσει η κάθε μια. Έχει αναπτύξει πολλά μοντέλα σαρωτών με ξεχωριστά χαρακτηριστικά, τα οποία στοχεύουν σε διαφορετικές αγορές χρηστών και είναι κατάλληλα για ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως χαρτογραφήσεις μεγάλων περιοχών, πλυμμηρικών ζωνών, ακτογραμμών, διαδρόμων μεταφοράς, χιονοσκεπών περιοχών, τοπογραφία και μεταλλωρυχία, δασολογία, γεωργία κ.α. Τα μοντέλα σαρωτών που αναπτύσσει είναι τα LMS-Q240i, VQ-380i, VQ-480-U, VQ-480i, VQ-580, LMS-Q560, LMS-Q680i, VQ-820-G και LMS-Q780. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα LiDAR παρέχεται από την Riegl, με την χρήση κάποιου σαρωτή από τους παραπάνω και τον συνδυασμό του με ένα σύστημα POS και επιπλέον μιας μεσαίου format ψηφιακής φωτομηχανής, για ταυτόχρονη λήψη εικόνων.



Εικόνα 1-24: Το σύστημα LiDAR της Riegl (αριστερά) και ο σαρωτής LMS-Q 780 (δεξιά)

Χαρακτηριστικό	LMS-Q560	LMS-Q680i	LMS-Q 780
Μηχανισμός εκτροπής ακτίνας laser	Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο	Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο	Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο
Πρότυπο σάρωσης	Παράλληλες γραμμές	Παράλληλες γραμμές	Παράλληλες γραμμές
Μέγιστο ύψος πτήσης (AGL) (m)	1000	1600	2420
Maximum PRF (KHz)	240	240	400
FOV	0° - 60°	0° - 60°	0° - 60°
f _{sc} (Hz)	160	200	200
Απόκλιση ακτίνας (mrad)	0,3	0,4	0,3
Αριθμός επιστροφών	Απεριόριστος	Απεριόριστος	Απεριόριστος
Οριζοντιογραφική ακρίβεια (cm)	5 - 30	5 - 30	5 - 30
Υψομετρική ακρίβεια (cm)	<15	<15	<15
Μήκος κύματος laser (nm)	1550	1550	1550
Χωρητικότητα δίσκων δεδομένων (ώρες σε μέγιστο PRF)	8	8	8
Full Waveform Analysis	Ναι	Ναι	Ναι
Ισχύς εισόδου (Watt)	120	170	N/A
Συνιστώμενη απόσταση μέτρησης (m)	Min= 30 Max=1800	Min=30 Max=3000	Min=50 Max=5400

Πίνακας 1-6: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Riegl (Riegl)

➤ Optech

Η εταιρία Optech έχει συνθέσει αρκετά ολοκληρωμένα συστήματα LiDAR, τα οποία είναι διαθέσιμα στην αγορά και τα πιο γνωστά από αυτά είναι τα ALTM Gemini, ALTM Orion M και ALTM Pegasus. Το ALTM Gemini είναι κατάλληλο για χαρτογραφήσεις μεγάλης κλίμακας, ενώ έχει πολύ καλά αποτελέσματα και στις χαρτογραφήσεις διαδρόμων μεταφοράς. Το ALTM Orion M θεωρείται πολύ ολοκληρωμένο σύστημα και κατάλληλο για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, δεδομένου ότι και σε σαρώσεις μεγάλων περιοχών, αλλά και σε πιο ακριβείς εργασίες όπως η χαρτογράφηση διαδρόμων μεταφοράς, δίνει εξίσου καλά αποτελέσματα. Παράλληλα, το σύστημα είναι αρκετά μικρό και φορητό, σε σχέση με άλλα συστήματα.



Εικόνα 1-25: Optech ALTM Orion M (Optech inc.)

Χαρακτηριστικό	ALTM Gemini	ALTM Orion M	ALTM Pegasus
Μηχανισμός εκτροπής ακτίνας laser	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο
Πρότυπο σάρωσης	Ημιτονοειδές	Ημιτονοειδές	Ημιτονοειδές
Μέγιστο ύψος πτήσης (AGL) (m)	4000	4000	5000
Maximum PRF (KHz)	167	300	500
FOV	0° - 50°	0° - 50°	
f _{sc} (Hz)	70	90	140
Απόκλιση ακτίνας (mrad)	0,25	0,25	0,25
Αριθμός διακριτών επιστροφών	4	4	4
Οριζοντιογραφική ακρίβεια (cm) (1000 m Ύψος πτήσης)	18	18	18
Υψομετρική ακρίβεια (cm) (3500 m (CM,HP) και 5000 m (HA) ύψος πτήσης και 40° FOV)	5 - 35	3 - 10	5 - 20
Μήκος κύματος laser (nm)	1064	1064	1064
Χωρητικότητα δίσκων δεδομένων (ώρες σε μέγιστο PRF)	N/A	N/A	N/A
Full Waveform Analysis	Προαιρετικά	Προαιρετικά	
Ισχύς εισόδου (Watt)	900	300	800
Συνιστώμενη απόσταση μέτρησης (m)	N/A	N/A	

Πίνακας 1-7: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Optech (Optech Inc.)

➤ Trimble

Η εταιρία Trimble δραστηριοποιείται πλέον και στην αγορά των συστημάτων LiDAR, έχοντας μάλιστα εξαγοράσει και την γερμανική εταιρία TopoSys. Η TopoSys είχε κατασκευάσει τον σαρωτή οπτικών ινών Falcon, ο οποίος δεν γνώρισε μεγάλη επιτυχία στην αγορά καθώς και άλλα συστήματα LiDAR, τα οποία χρησιμοποιούσαν σαρωτές της Riegl. Η Trimble πλέον διαθέτει στην αγορά τα ολοκληρωμένα συστήματα Harrier 48, Harrier 56, Harrier 68i, επίσης με χρήση σαρωτών της Riegl. Το πρώτο είναι ένα ελαφρύ και μικρό σύστημα, το οποίο είναι προσανατολισμένο σε εργασίες ακριβείας όπως η χαρτογράφηση διαδρόμων μεταφοράς. Το δεύτερο είναι το μέσο σύστημα της εταιρίας, για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, ενώ το τρίτο είναι το σύστημα το οποίο προσανατολίζεται για εργασίες που απαιτούν την χαρτογράφηση πολύ μεγάλων περιοχών.



Εικόνα 1-26: Trimble Harrier 68i (Trimble)

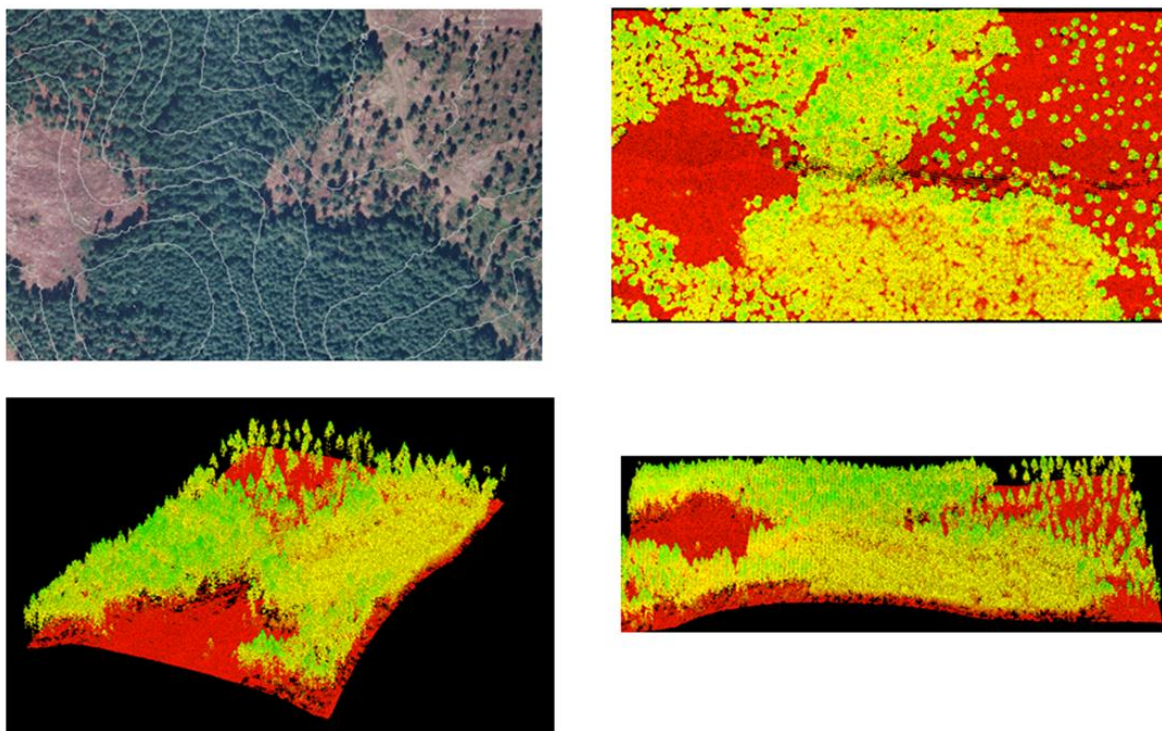
Χαρακτηριστικό	Harrier 56	Harrier 68i
Μηχανισμός εκτροπής ακτίνας laser	Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο	Περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο
Πρότυπο σάρωσης	Παράλληλες γραμμές	Παράλληλες γραμμές
Μέγιστο ύψος πτήσης (AGL) (m)	1000	1600
Maximum PRF (KHz)	240	400
FOV	45° - 60°	45° - 60°
f _{sc} (Hz)	160	200
Απόκλιση ακτίνας (mrad)	0,5	0,5
Αριθμός επιστροφών	Απεριόριστος	Απεριόριστος
Οριζοντιογραφική ακρίβεια (cm)	<25	<25
Υψομετρική ακρίβεια (cm)	<15	<15
Μήκος κύματος laser (nm)	1064	
Χωρητικότητα δίσκων δεδομένων (ώρες σε μέγιστο PRF)	>8	>8
Full Waveform Analysis	NAI	NAI
Ισχύς εισόδου (Watt)	616	650
Συνιστώμενη απόσταση μέτρησης (m)	N/A	N/A

Πίνακας 1-8: Τυπικά χαρακτηριστικά συστημάτων LiDAR Trimble (Trimble.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LiDAR ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ

2.1 Το νέφος σημείων

Το σύστημα LiDAR, όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, συνδυάζει τις μετρήσεις από τα διασυνδεδεμένα υποσυστήματα του και με τη διαδικασία της άμεσης γεωκωδικοποίησης δημιουργεί ένα σύνολο από σημεία με συντεταγμένες στον 3d χώρο. Το τελικώς λαμβανόμενο αυτό προϊόν είναι γνωστό ως νέφος σημείων. Η πυκνή διάταξη των σημείων μέσα στο νέφος αυτό, συνιστά μια πυκνή δειγματοληψία της περιοχής που σαρώνεται, μαζί με το σύνολο των φυσικών και τεχνητών οντοτήτων που υπάρχουν σε αυτή. Ως εκ τούτου, παρόλο που είναι δύσκολο να αναγνωρίσει κανείς συγκεκριμένα σημεία εντός του νέφους (π.χ. ένα σημείο που αντιστοιχεί στην γωνία ενός κτηρίου), δημιουργείται ένα σύνολο που ανάλογα με την πυκνότητα των σημείων μπορεί να αποδίδει με εξαιρετική λεπτομέρεια την περιοχή σάρωσης σε τρισδιάστατη απεικόνιση, χωρίς να ενσωματώνει καμία πληροφορία για την υφή των απεικονιζόμενων οντοτήτων και σχέση σύνδεσης μεταξύ των σημείων. Η δημιουργία του νέφους σημείων αποτέλεσε μια επέκταση των μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενων ψηφιακών δεδομένων για την απεικόνιση του χώρου (φυσικού και ανθρωποποίητου), οι οποίες μέχρι πρότινος ήταν η διανυσματική (raster) και η ψηφιδωτή (vector). Το νέφος σημείων, παρόλο που αποτελείται από σημεία, τα οποία έγκειται στο χώρο των διανυσματικών δεδομένων, αναφέρεται συχνά ως μια νέα, τρίτη προσέγγιση στην απεικόνιση του χώρου.



Εικόνα 2-1: Ορθοφωτογραφία και αντίστοιχο νέφος σημείων (USDA Forest Service)

Για να χαρακτηριστεί η ποιότητα ενός νέφους σημείων όσον αφορά το εύρος των εφαρμογών για τις οποίες είναι κατάλληλο, ορίζεται το μέγεθος της πυκνότητας σημείων ανά μονάδα εμβαδού στο έδαφος d_{\min} , η οποία αποτελείται από δύο κυρίως συνιστώσες, την απόσταση των σημείων κατά τη διεύθυνση της πτήσης d_{Xalong} και την απόσταση των σημείων κατά την κάθετη σε αυτή διεύθυνση $d_{Yacross}$, η οποία συμπίπτει με τη διεύθυνση σάρωσης. Η πυκνότητα των σημείων στο νέφος εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εργασίας που πραγματοποιείται και καθορίζεται από το είδος του συστήματος LiDAR, την ταχύτητα πτήσης, τη γωνία σάρωσης και την χρησιμοποιούμενη συχνότητα επανάληψης παλμών PRF. Οι σχέσεις υπολογισμού των παραπάνω μεγεθών σύμφωνα με τους E.P. Baltsavias, 1999 κα Wehr, 2008 είναι οι ακόλουθες:

$$d_{Xalong} = \frac{u}{f_{sc}} \quad (2.1)$$

$$d_{Yacross} = \frac{SW}{N} \quad (2.2)$$

$$d_{\min} = \frac{1}{d_{Xalong} \cdot d_{Yacross}} \quad (2.3)$$

Όπου:

u : Η ταχύτητα πτήσης

f_{sc} : Ο ρυθμός σάρωσης

SW : Το πλάτος της λωρίδας σάρωσης

N : Ο αριθμός σημείων ανά γραμμή σάρωσης, που υπολογίζεται από τον ρυθμό επανάληψης παλμών και το ρυθμό σάρωσης σύμφωνα με την σχέση $N = \frac{PRF}{f_{sc}}$

2.2 Προγραμματισμός και εκτέλεση πτήσης

Προκειμένου να εκτελεστεί κάθε αποστολή σάρωσης με σύστημα LiDAR, ένας προσεκτικός προγραμματισμός πρέπει να προηγηθεί, για τον καθορισμό όλων εκείνων των απαραίτητων παραμέτρων που θα οδηγήσουν στην απόκτηση του νέφους σημείων με τις κατάλληλες προδιαγραφές. Κύριος γνώμονας για τον προγραμματισμό, είναι το είδος της εργασίας το οποίο χρειάζεται να πραγματοποιηθεί με τα δεδομένα που πρόκειται να αποκτηθούν. Σαρώσεις για χαρτογραφήσεις αστικών περιοχών χρειάζονται διαφορετική παραμετροποίηση από τις αντίστοιχες για αγροτικές περιοχές, όπως και δασικές περιοχές με πυκνή φυτοκάλυψη. Γενικά, η τοπογραφία και η κάλυψη της περιοχής σάρωσης παίζουν τον πρωτεύοντα ρόλο στην τελική πυκνότητα των σημείων. Για παράδειγμα, ορεινές περιοχές απαιτούν πτήση σε διαφορετικά ύψη, το οποίο σε τελική ανάλυση επηρεάζει την πυκνότητα σημείων, το εύρος της λωρίδας σάρωσης, το ίχνος της ακτίνας στο έδαφος και τελικώς την ακρίβεια που επιτυγχάνεται. Πυκνά δασωμένες περιοχές, απαιτούν παραμετροποίηση του συστήματος LiDAR με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η διαπεραστικότητα των παλμών Laser μεταξύ των

φυλλωμάτων των δέντρων, για την αποτελεσματική καταγραφή τόσο του εδάφους όσο και του βλαστικού όγκου. Σε αστικές περιοχές, είναι απαραίτητο οι λωρίδες σάρωσης να σχεδιάζονται με μεγάλες επικαλύψεις, ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής δειγματοληψία, κυρίως στις περιοχές μεταξύ υψηλών κτηρίων. Γενικά, οι παροχές δεδομένων LiDAR χρησιμοποιούν έτοιμους πίνακες (πίνακας 2-1) οι οποίοι ανταποκρίνονται στο χρησιμοποιούμενο σύστημα LiDAR και με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζουν τις τιμές των παραμέτρων που απαιτούνται (όπως γωνία σάρωσης, ρυθμός επανάληψης παλμών, ρυθμός σάρωσης, ύψος πτήσης κ.α.) για να καθορίσουν την απόσταση μεταξύ σημείων στο έδαφος και την αντίστοιχη ακρίβεια που θα επιτευχθεί. Σημαντικός παράγοντας είναι η καθοριζόμενη κάθε φορά επικάλυψη μεταξύ των λωρίδων σάρωσης, η οποία επιβάλλεται να υπάρχει για την διασφάλιση της πλήρους κάλυψης της περιοχής. Περιοχές με πιο έντονο ανάγλυφο απαιτούν υψηλότερο ποσοστό επικάλυψης, ενώ πολλές φορές η επικάλυψη αυξάνεται προκειμένου για εργασίες που απαιτούν μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων.

Απόσταση μεταξύ σημείων (m)	Υψομετρική ακρίβεια (cm)	Οριζοντιογραφική ακρίβεια (cm)	Υψος πτήσης (m)	Γωνία σάρωσης (μοίρες)	Ταχύτητα πτήσης (knots)	PRF (KHz)	f_{sc} (Hz)	Επικάλυψη (%)	SW (m)
1	15	14	1067	10	130	76,5	57	50	376
1,5	15	18	1524	12,5	130	61,5	50	40	676
2	15	20	1829	15	130	54,0	44	30	980
3	15-16	26	2438	15	130	48,5	30	30	1307
4	15-19	30	3048	20	130	44,1	20	25	2219
5	16-22	40	3658	22,5	145	30,8	15	20	3030

Πίνακας 2-1: Ενδεικτικός πίνακας υπολογισμού αποστάσεων σημείων στο έδαφος, σε σχέση με την παραμετροποίηση του συστήματος και το ύψος πτήσης (B. Morton et.al.)

Τα στάδια του προγραμματισμού και της εκτέλεσης μιας πτήσης για σάρωση LiDAR, είναι σε γενικές γραμμές αντίστοιχα με αυτά μιας τυπικής αεροφωτογράφισης, με κύρια διαφορά την απαιτούμενη παραμετροποίηση του συστήματος, ανάλογα του επιδιωκόμενου αποτελέσματος. Τυπικά μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Καθορισμός των απαιτήσεων της εργασίας και της αντίστοιχης πυκνότητας σημείων και επικάλυψης.
- ✓ Επιλογή παραμέτρων συστήματος και πτήσης (PRF, f_{sc} , γωνία σάρωσης, ύψος πτήσης κτλ.)
- ✓ Σχεδίαση των λωρίδων σάρωσης σε κατάλληλο υπόβαθρο (χάρτη, ορθοφωτογραφία, Google Earth κ.α.) για οπτικοποίησή του και αναγραφή των στοιχείων πτήσης (αζιμούθιο και υψόμετρο εισόδου και εξόδου) σε κάθε γραμμή.

- ✓ Επιλογή χρόνου πτήσης, ώστε βάσει των εφημερίδων των δορυφόρων του GNSS να εξασφαλίζεται επαρκής λήψη δορυφόρων με καλή γεωμετρία θέσης (Position Dilution of Precision – PDOP).
- ✓ Σχεδίαση και προετοιμασία των θέσεων των σταθμών GNSS εδάφους, προκειμένου να εξασφαλίζονται μετρήσεις βάσεων μικρότερες των 20 Km (προδιαγραφή της Federal Emergency Management Agency των ΗΠΑ) ή 10-50 Km τυπική τιμή, καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής.
- ✓ Εκτέλεση αρχικοποίησης συστήματος GNSS (3 min στατικών μετρήσεων) και τροχοδρόμηση σε ένα διάδρομο του αεροδρομίου για συλλογή δεδομένων ελέγχου εδάφους με το σύστημα GNSS και δια της κινηματικής μεθόδου.
- ✓ Εκτέλεση των αρχικών λωρίδων βαθμονόμησης (§1.4).
- ✓ Εκτέλεση της αποστολής σάρωσης.
- ✓ Εκτέλεση των τελικών λωρίδων βαθμονόμησης (§1.4).

2.3 Διασφάλιση και έλεγχος ποιότητας δεδομένων (QA/QC)

Όπως συμβαίνει σε κάθε αποστολή συλλογής γεωχωρικών δεδομένων, έτσι και στις σαρώσεις με συστήματα LiDAR, απαιτείται η εφαρμογή μιας σειράς ενεργειών οι οποίες αποσκοπούν τόσο στην εκτίμηση, όσο και στην εξακρίβωση της ποιότητας των δεδομένων που συλλέγονται. Γενικά, με τον όρο ποιότητα χαρακτηρίζεται η απόκλιση μεταξύ των ψηφιακών γεωχωρικών δεδομένων και του πραγματικού κόσμου τον οποίο αντιπροσωπεύουν (Τσούλος 2010). Ο όρος που χρησιμοποιείται διεθνώς για την διασφάλιση της ποιότητας είναι ο Quality Assurance – QA, ενώ για την εξακρίβωση (ή τον έλεγχο) αυτής είναι ο Quality Control – QC. Οι διαδικασίες QA συνήθως λαμβάνουν χώρα πριν από την εκτέλεση της αποστολής, κατά το στάδιο του σχεδιασμού και της προετοιμασίας, ενώ οι διαδικασίες QC πραγματοποιούνται μετά την συλλογή δεδομένων με σκοπό να ελεγχθεί ο βαθμός στον οποίο επιτεύχθηκαν οι επιθυμητές προδιαγραφές ακριβείας των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Οι διαδικασίες αυτές διασφάλισης και ελέγχου πρέπει να διενεργούνται κάθε φορά από τους παροχείς και μια έκθεση QA/QC πρέπει να παραδίδεται στους χρήστες των δεδομένων LiDAR υπέρ των οποίων συλλέχθηκαν, μαζί με την παράδοση των δεδομένων. Οι διαδικασίες QA που συνήθως πρέπει να πραγματοποιούνται περιλαμβάνουν:

- ✓ Την μελέτη της περιοχής σάρωσης, με σκοπό τον καθορισμό των ιδανικών τιμών των παραμέτρων του συστήματος (ρυθμός επανάληψης παλμών, ρυθμός σάρωσης, ποσοστό επικάλυψης, ύψος πτήσης κ.α.), ώστε να διασφαλιστεί η επιθυμητή πυκνότητα των σημείων στο έδαφος, καθώς και η απαραίτητη διαπεραστικότητα των παλμών laser σε περιπτώσεις δασωμένων περιοχών.
- ✓ Η επιλογή κατάλληλου χρόνου για την εκτέλεση της αποστολής, μέσω της μελέτης των εφημερίδων των δορυφόρων του συστήματος GNSS, ώστε να υπάρχει επαρκής κάλυψη δορυφόρων και καλή γεωμετρία λήψης. Μια τυπική απαίτηση στον τομέα αυτό είναι να υπάρχουν τουλάχιστον 4 δορυφόροι διαθέσιμοι, οι οποίοι είναι καλά διανεμημένοι στο χώρο (καλός δείκτης Positional Dilution Of Precision – PDOP) και οι

οποίοι σχηματίζουν γωνία με τον ορίζοντα πάνω από 15° καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής.

✓ Εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος, μέσω πρόσφατου εργοστασιακού ελέγχου και βαθμονόμησης, καθώς και ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων βαθμονόμησης όλου του συστήματος (§ 1.4).

Ο έλεγχος QC της ποιότητας του νέφους σημείων το οποίο παράχθηκε μετά το πέρας της αποστολής, αφορά την εκτίμηση της εσωτερικής (ή σχετικής) ακρίβειας (Internal Quality Control – IQC), αλλά και της εξωτερικής (ή απόλυτης) ακρίβειας (External Quality Control – EQC). Με βάση τις καθιερωμένες φωτογραμμετρικές μεθόδους, κανείς θα μπορούσε να σκεφτεί την εκτίμηση της εσωτερικής ακρίβειας IQC, να πραγματοποιείται με την χρήση στατιστικών μεγεθών όπως η *a-posteriori* μεταβλητότητα της μονάδας βάρους και ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας. Η επίλυση όμως των μετρήσεων του συστήματος LiDAR δεν περιλαμβάνει διαδικασία συνόρθωσης, οπότε αυτό δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί. Σημαντική διαδικασία IQC αποτελεί το αναφερόμενο στην διεθνή βιβλιογραφία “Strip Adjustment - SA”. Σκοπός της διαδικασίας αυτής, είναι η ανίχνευση συστηματικών σφαλμάτων στα επικαλυπτόμενα τμήματα των λωρίδων σάρωσης. Στις περιοχές αυτές, αντίστοιχα (ή πολύ κοντινά) σημεία τα οποία έχουν μετρηθεί από γειτονικές λωρίδες, θεωρητικά θα έπρεπε να παρουσιάζουν ίδιο υψόμετρο. Εν τούτοις, είναι σύνηθες στις περιοχές αυτές να ανιχνεύονται υψομετρικές διαφορές μεταξύ κοντινών σημείων, οι οποίες οδηγούν στο ασφαλές συμπέρασμα της ύπαρξης συστηματικών σφαλμάτων κατά την σάρωση. Η μέτρηση σημείων στις ίδιες περιοχές από διαφορετικές λωρίδες πτήσης, δίνει τη δυνατότητα του υπολογισμού και της αναίρεσης αυτών των διαφορών, αυξάνοντας την ποιότητα των δεδομένων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί και από τον τελικό χρήστη των δεδομένων, χωρίς να απαιτείται πρόσβαση στην πρωτογενή μορφή αυτών. Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την πραγματοποίηση της διαδικασίας SA, οι οποίες έδειξαν ότι είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά επίπεδα ή συνεχείς γραμμές τα οποία θα αναγνωρίζονται στο νέφος σημείων και στις δύο υπό σύγκριση λωρίδες πτήσης, παρά να αναζητούνται μεμονωμένα σημεία (όπως γωνίες κτηρίων) τα οποία δεν είναι εύκολο να διακριθούν μέσα στο νέφος. Παραδείγματα τέτοιων εργασιών είναι των Kager (2004), Vosselman (2004), Pfeifer et al. (2005) κ.α.

Η απόλυτη ακρίβεια του νέφους EQC μπορεί να ελεγχθεί, με την χρήση σημείων ελέγχου (GCP) τα οποία έχουν μετρηθεί στο έδαφος με γεωδαιτικές μεθόδους και συνεπώς παρουσιάζουν μεγάλη αξιοπιστία. Τα σημεία αυτά πρέπει να παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη κατανομή σε όλο το εύρος της περιοχής σάρωσης, ώστε να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα για την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια του νέφους. Η συνήθης αυτή διαδικασία, δεν κρίνεται ιδιαίτερα ευέλικτη, δεδομένου ότι παρουσιάζει μεγάλο κόστος λόγω των απαιτούμενων εργασιών υπαίθρου, καθώς και για το λόγο ότι εξαιτίας της φύσης του νέφους σημείων, χαρακτηριστικά σημεία είναι αδύνατο να αναγνωρισθούν στο νέφος σημείων (εκτός αν πρόκειται για ειδικούς στόχους σε πεδίο βαθμονόμησης). Η αναγνώρισή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί σε

raster παράγωγα από το νέφος σημείων, με ένα βαθμό αβεβαιότητας που οφείλεται στην μειωμένη ευκρίνεια αυτών, γεγονός που υποβιβάζει την αξιοπιστία της μεθόδου.

Οι διαδικασίες QA απαιτούν την πρόσβαση στα πρωτόγεννη δεδομένα των μετρήσεων (μετρήσεις GNSS, IMU, αποστάσεις και γωνίες), καθώς και πρόσβαση στις διαδικασίες ελέγχου του συστήματος και τα στοιχεία προγραμματισμού πτήσης, τα οποία δεν είναι πάντα διαθέσιμα στον τελικό αποδέκτη των δεδομένων. Τις περισσότερες φορές, το σύστημα λειτουργεί σαν «μαύρο κουτί» για τον τελικό χρήστη, δεδομένου ότι οι παροχές των δεδομένων LiDAR δεν δίνουν πρόσβαση σε αυτά. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο για όλη την κοινότητα χρηστών να υπάρχουν διαδικασίες QC που μπορούν να εκτελεστούν, ως το μοναδικό μέσο για τη διασφάλιση της ποιότητας του νέφους σημείων που παραδίδεται από τον κάθε παροχέα. Οι διαδικασίες αυτές είναι περιορισμένες και αφορούν ελέγχους επικαλύψεων, ελέγχους πλήρους κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, ελέγχους για ύπαρξη εναπομεινάντων συστηματικών σφαλμάτων και εξωτερικό έλεγχο της ακρίβειας του νέφους στο βαθμό που αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί λόγω διαθεσιμότητας εξωγενών δεδομένων, πυκνότητας του νέφους και ευκρίνειας των raster παραγώγων .

2.4 Το πρότυπο δεδομένων .las και η συμπίεση .laz

Η χρήση διαφορετικών συστημάτων LiDAR από τους διάφορους παροχείς, οι διαφορετικές τεχνικές για τη δημιουργία του νέφους σημείων από τα πρωτογενή δεδομένα, καθώς και τα διαφορετικά λογισμικά επεξεργασίας των νεφών σημείων, κατέστησαν απαραίτητη την προτυποποίηση του μορφότυπου του νέφους, προκειμένου να είναι εφικτή η απροβλημάτιστη ανταλλαγή δεδομένων LiDAR μεταξύ των διάφορων χρηστών και παροχέων. Προς την κατεύθυνση αυτή, η Αμερικανική Κοινότητα Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS), τελειοποίησε την προσπάθεια την οποία ξεκίνησαν οι εταιρίες Leica Geosystems, Optech και Z/I Imaging, για τη δημιουργία ενός τέτοιου προτύπου ανταλλαγής δεδομένων. Έτσι το 2003 δημοσιεύτηκε σε ένα τεύχος της ASPRS το πρότυπο LAS 1.0, με το όνομά του να προέρχεται από το ακρωνύμιο LASer. Έκτοτε το πρότυπο έχει αναθεωρηθεί σε διάφορες εκδόσεις, με ποιο πρόσφατη την LAS 1.4 που εκδόθηκε το Νοέμβριο του 2011.

Στη γενική του μορφή, το πρότυπο αρχείο δεδομένων .las, είναι αρχείο δυαδικής μορφής (binary) και όχι ASCII (text). Οι χαρακτήρες ASCII είναι 128, οπότε χρειάζονται μόνο 7 bit για την αναπαράσταση ενός χαρακτήρα (2^7 δυνατοί συνδυασμοί των 0 και 1). Δεδομένου ότι κάθε χαρακτήρας αποθηκεύεται σε 1 byte=8 bit, γίνεται εμφανές ότι η ASCII αναπαράσταση των δεδομένων χάνει 1 bit σε κάθε byte. Το γεγονός αυτό, κάνει τα ASCII αρχεία λιγότερο ευέλικτα στην περίπτωση μεγάλου αριθμού εγγραφών, όπως συμβαίνει με τα δεδομένα LiDAR. Σε αντίθεση, τα binary αρχεία δεν έχουν τέτοιο περιορισμό, μια και χρησιμοποιείται όλο το εύρος των 256 συνδυασμών (2^8 δυνατοί

συνδυασμοί των 0 και 1), προκειμένου να αποθηκευτούν οι διάφορες εγγραφές. Στην παρούσα του έκδοση (1.4), το αρχείο .las είναι δομημένο ως κάτωθι:

- ✓ **Public Header Block:** Στο τμήμα αυτό περιλαμβάνονται γενικές πληροφορίες, όπως ο αριθμός των μετρημένων σημείων, η ημερομηνία λήψης, ο αριθμός σημείων που αποτελούν πρώτες, δεύτερες κτλ επιστροφές, οι συντεταγμένες των ορίων της περιοχής που καλύπτεται από τα δεδομένα του αρχείου κ.α. Χρήζει ιδιαίτερης αναφοράς το γεγονός ότι δεν έχουν ενσωματωθεί ακόμα στο τμήμα αυτό πληροφορίες για το γεωδαιτικό ή χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς στο οποίο αναφέρονται τα δεδομένα.
- ✓ **Variable Length Records:** Στο τμήμα αυτό περιέχονται πληροφορίες όπως η χρησιμοποιούμενη χαρτογραφική προβολή και τα μεταδεδομένα, ενώ ο συνολικός διαθέσιμος όγκος για το τμήμα αυτό περιορίζεται σε 65.535 bytes.
- ✓ **Point Data Records:** Στο τμήμα αυτό εγγράφονται τα κυρίως δεδομένα, που είναι οι συντεταγμένες των σημείων, η τιμή έντασης του κάθε σημείου, ο αριθμός επιστροφής που αντιπροσωπεύει το σημείο, και η θέση την οποία καταλαμβάνει το σημείο μετά την ταξινόμηση στις διάφορες προκαθορισμένες από την ASPRS κλάσεις.
- ✓ **Extended Variable Length Records:** Το τμήμα αυτό αποτελεί επέκταση του δεύτερου τμήματος, επιτρέποντας μεγαλύτερο όγκο μεταδεδομένων. Έχει σχεδιαστεί σκόπιμα στο τέλος του αρχείου, ώστε να δύναται να εμπλουτίζεται χωρίς να απαιτείται η επανεγγραφή όλου του αρχείου LAS, στην περίπτωση προσθήκης πληροφοριών μεταδεδομένων.

Γενικά, τα αρχεία LAS είναι ιδιαίτερα μεγάλα, λόγω του μεγάλου αριθμού εγγραφών που περιέχουν, γεγονός που δυσχεράνει τη μεταφορά τους, ιδιαίτερα όταν αυτή πραγματοποιείται μέσω δικτύων. Μια σύγχρονη και ιδιαίτερα ευέλικτη λύση στη μεταφορά αρχείων LAS, δόθηκε από τον καθηγητή Martin Isenburg, ο οποίος δημιούργησε την βιβλιοθήκη συμπίεσης LASzip. Στη παρούσα φάση, η βιβλιοθήκη αυτή είναι ενσωματωμένη σε μια ανεξάρτητη εφαρμογή, η οποία διατίθεται ελεύθερα για χρήση ενώ έχει υιοθετηθεί μερικώς από την αγορά, ώστε υποστηρίζεται μόνο από μερικά μεγάλα εμπορικά πακέτα διαχείρισης δεδομένων LiDAR (FME, Global Mapper, QT Modeler κ.α.). Το αρχείο .laz το οποίο δημιουργεί η εν λόγω εφαρμογή, αποτελεί μια συμπίεση του αρχικού .las αρχείου, χωρίς ωστόσο να υπάρχει απώλεια οποιασδήποτε πληροφορίας. Το κύριο πλεονέκτημα, είναι ότι επιτυγχάνεται μείωση του όγκου του αρχείου κατά 7-20%, γεγονός που διευκολύνει την μεταφορά, την αντιγραφή, την αποθήκευση και την αρχειοθέτηση των δεδομένων LiDAR.

2.5 Επεξεργασία δεδομένων

Οι τελικοί χρήστες των δεδομένων LiDAR, επιδιώκουν κυρίως την άμεση εκμετάλλευση αυτών, προκειμένου να παραχθούν γεωχωρικά δεδομένα για χρήση σε μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών που θα αναφερθούν σε επόμενη παράγραφο. Ως εκ

τούτου, κατά την παράδοση των δεδομένων από τους παροχείς, θα πρέπει να έχουν προηγηθεί όλες οι απαραίτητες ενέργειες για την προετοιμασία αυτών, όπως η γεωμετρική διόρθωσή τους, η διόρθωση των εναπομεινάντων συστηματικών σφαλμάτων μέσω της διαδικασίας strip adjustment και ο έλεγχος της ακρίβειας αυτών QA.

Κάνοντας την υπόθεση ότι η παραπάνω διαδικασία έχει ολοκληρωθεί από τον παροχέα και ότι τα δεδομένα είναι έτοιμα προς χρήση, προτείνεται η ακόλουθη γενική ροή εργασιών χάριν της τυποποίησης και του πληρέστερου ελέγχου της εκμετάλλευσής τους.

✓ Έλεγχος κάλυψης περιοχής σάρωσης. Το στάδιο αυτό αποτελεί στην ουσία μια διεργασία QC η οποία πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί από τον παροχέα, εντούτοις είναι ιδιαίτερα απλή και μπορεί να πραγματοποιηθεί και από το χρήστη για λόγους βεβαιότητας, μιας και ένα κενό σάρωσης στην περιοχή μελέτης, μπορεί να προκαλέσει ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα στην διεκπεραίωση της επιθυμητής εφαρμογής. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει με την απεικόνιση όλων των λωρίδων σάρωσης, οι οποίες συνήθως αποτελούν ξεχωριστά αρχεία .las. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα περιβάλλον GIS, η σε κατάλληλο λογισμικό απεικόνισης και μάλιστα με τη χρήση διαφορετικού χρωματισμού για κάθε λωρίδα γίνονται αμέσως αντιληπτά τα επικαλυπτόμενα τμήματα, καθώς και τυχόν κενά που μπορεί να υφίστανται.

✓ Δημιουργία διανομής των δεδομένων. Στο στάδιο αυτό, δημιουργείται μια κατάτμηση των δεδομένων σε τμήματα μιας διανομής (tiles), τα οποία πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους χωρίς κενό. Τα όρια των τμημάτων μπορούν να εξαχθούν σε κατάλληλη μορφή (π.χ. shp) και να απεικονιστούν σε ένα περιβάλλον GIS, στο οποίο θα δύναται να συντεθεί μια πλήρης εικόνα της θέσης των διαθέσιμων δεδομένων LiDAR, επί κατάλληλου εικονιστικού υποβάθρου. Η κατάτμηση του νέφους σημείων σε ένα αριθμό αρχείων μικρότερου όγκου, οδηγεί σε σημαντική μείωση του υπολογιστικού φόρτου, εξοικονομώντας πόρους στους Η/Υ που συνθέτουν τα συστήματα εργασίας. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα της δημιουργίας διανομής στα δεδομένα LiDAR, είναι η δυνατότητα της διαφοροποίησης των αλγόριθμων επεξεργασίας σε κάθε τμήμα αυτής. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία του φιλτραρίσματος, δηλαδή του διαχωρισμού των σημείων του εδάφους από αυτά που ανήκουν σε υπέργεια αντικείμενα, παραμετροποιούνται διαφορετικά ανάλογα με την κάλυψη γης και την τοπογραφία της περιοχής εργασίας, προκειμένου για τη βέλτιστη απόδοσή τους. Με τον τρόπο αυτό, σε εργασίες οι οποίες αφορούν μεγάλες περιοχές με μικτή κάλυψη γης (όπως δασική έκταση, αραιό και πυκνό αστικό ιστό κ.α.), η δημιουργία διανομής δίνει τη δυνατότητα να χωρίζεται η περιοχή σε μικρότερα τμήματα, στα οποία η κάλυψη γης μπορεί, κατά βάση, να θεωρηθεί ομοιογενής. Επί του κάθε τμήματος της διανομής ο αλγόριθμος φιλτραρίσματος δύναται να παραμετροποιείται διαφορετικά, ανάλογα με την επικρατούσα κάλυψη και το τελικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας όλων των τμημάτων να είναι συγκριτικά πολύ ποιοτικότερο από το αντίστοιχο αποτέλεσμα που θα είχε επέλθει από την επεξεργασία ολόκληρου του νέφους σημείων με τις ίδιες παραμέτρους.

✓ Φιλτράρισμα και ταξινόμηση σημείων. Κατά το στάδιο αυτό, επιτελείται ίσως η πιο κρίσιμη από τις διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR. Τα σημεία που αποτελούν το νέφος, ταξινομούνται σε διαφορετικές κλάσεις, ώστε να μπορούν να διαχωριστούν στην συνέχεια, προκειμένου να εξαχθούν οντότητες από το νέφος σημείων. Ενσωματωμένες στο πρότυπο LAS 1.4 υφίστανται 18 προκαθορισμένες κλάσεις για τα σημεία του νέφους. Ο υπόλοιπος αριθμός μέχρι το όριο των 255 δυνατών υπαρκτών κλάσεων οι οποίες μπορούν να περιγραφούν σε ένα binary αρχείο όπως το .las, είναι κατά ένα μέρος δεσμευμένος για μελλοντική χρήση από την ASPRS, ενώ κατά το υπόλοιπο ελεύθερος για χρήση από το χρήστη. Στον πίνακα 2-2 παρατίθενται οι κλάσεις του προτύπου LAS 1.4.

Τιμή	Κλάση
0	Σημεία που δεν επιχειρήθηκε να ταξινομηθούν
1	Σημεία που επιχειρήθηκε να ταξινομηθούν, αλλά δεν ταξινομήθηκαν από τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο
2	Έδαφος
3	Βλάστηση χαμηλού ύψους
4	Βλάστηση μέσου ύψους
5	Βλάστηση μεγάλου ύψους
6	Κτήρια
7	Χαμηλός θόρυβος
8	Δεσμευμένη για μελλοντική χρήση
9	Υδάτινες επιφάνειες
10	Σιδηροδρομικές γραμμές
11	Επιφάνεια δρόμου
12	Δεσμευμένη για μελλοντική χρήση
13	Σύρμα σε μεταλλικά κλουβιά
14	Σύρμα σε αγωγούς
15	Πύργοι εκπομπής (κεραίες)
16	Μονωμένο σύρμα σε αγωγούς
17	Οδόστρωμα γέφυρας
18	Υψηλός θόρυβος
19-63	Δεσμευμένες για μελλοντική χρήση
64-255	Διαθέσιμες για καθορισμό από το χρήστη

Πίνακας 2-2: Διαθέσιμες και δεσμευμένες κλάσεις του προτύπου LAS 1.4 της ASPRS, για την ταξινόμηση των σημείων του νέφους LiDAR. (ASPRS)

Ιδανικά, η ταξινόμηση των σημείων του νέφους πραγματοποιείται στην βάση διακριτών βημάτων. Αρχικά, γίνεται διαχωρισμός των σημείων που ανήκουν στο φυσικό έδαφος, από αυτά τα οποία ανήκουν στα υπερκείμενα του εδάφους αντικείμενα (ground – non ground), τεχνική η οποία στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως φιλτράρισμα (filtering) του νέφους σημείων. Οι κύριες προσεγγίσεις των αλγόριθμων φιλτραρίσματος αφορούν την εξέταση των υψομετρικών διαφορών μεταξύ γειτονικών

σημείων (Kraus and Pfeifer 1998, Zhang and Cui 2007), την εξέταση των κλίσεων (Vosselman 2000, Roggero 2001, Sithole 2001, Zhang and Witman 2005 κ.α.), τη χρήση μορφολογικών φίλτρων (Zhang et.al. 2003, Zhang and Cui 2007, Chen et.al. 2007 κ.α.) και την multiscale κατάτμηση (Silvan and Wang 2006, Evans and Hudak 2007 κ.α.).

Τα σημεία επί του εδάφους θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του ΨΜΕ, ενώ σε δεύτερη φάση τα υπέργεια σημεία μπορούν να διανεμηθούν περεταίρω στις διάφορες κλάσεις (κτήρια, βλάστηση διαφόρων υψών κ.α.), τεχνική η οποία διεθνώς αναφέρεται ως ταξινόμηση (classification).

✓ Χειροκίνητη επεξεργασία. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την παρέμβαση του χρήστη, προκειμένου να διορθωθούν τα σφάλματα της αυτόματης ταξινόμησης που δημιουργείται αυτόματα από τον αλγόριθμο που κάθε φορά χρησιμοποιείται. Τα σφάλματα είναι πάντα παρόντα, δεδομένων των αδυναμιών του κάθε αλγόριθμού και για το λόγο αυτό η διαδικασία της διόρθωσης θεωρείται και η πιο χρονοβόρα, καταναλώνοντας σύμφωνα με τους F. Yuan et.al. 2009, το 60% με 80% του συνολικού χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων. Ο χρήστης καλείται να ελέγξει τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ταξινόμησης και να αλλάξει κλάσεις στα τμήματα εκείνα τα οποία δεν ταξινομήθηκαν σωστά, να καθορίσει τις κλάσεις για τα αταξινομήτα τμήματα του νέφους και να διορθώσει ενδεχομένως τα όρια κάποιων κλάσεων. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας τα διάφορα αντικείμενα δύναται στη συνέχεια να απομονωθούν και να εξαχθούν από το σύνολο των σημείων του νέφους.

✓ Παραγωγή προϊόντων από το νέφος σημείων. Στο στάδιο αυτό, είναι πλέον εφικτή η εξαγωγή οντοτήτων, όπως κτήρια, βλαστικός όγκος σε δασικές περιοχές, γυμνό έδαφος κ.α. Εφόσον έχει προηγηθεί μια σχολαστική ταξινόμηση και διόρθωση αυτής, η διαδικασία της εξαγωγής είναι ιδιαίτερα απλή και αυτοματοποιημένη. Στο στάδιο αυτό δημιουργούνται τα διάφορα παράγωγα του νέφους σημείων τα οποία απαιτεί η κάθε εφαρμογή, όπως ψηφιακά μοντέλα εδάφους, raster εικόνες, εικόνες έντασης κ.α.

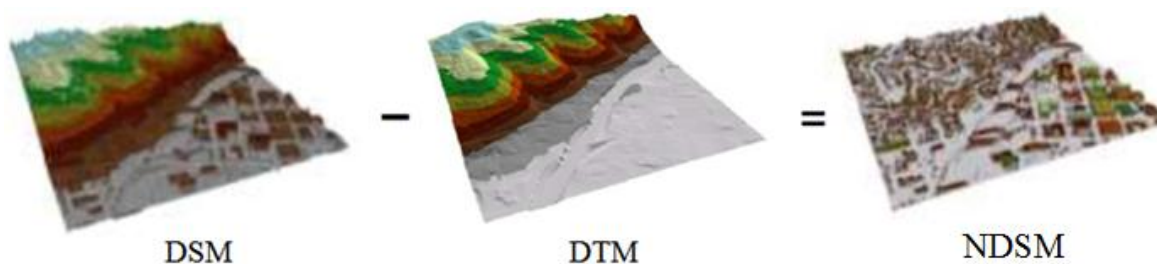
2.6 Εφαρμογές με χρήση δεδομένων LiDAR

Η συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία των LiDAR και η ευελιξία που προσφέρει το παραγόμενο από αυτά νέφος σημείων, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός ευρέως πεδίου εφαρμογών που βασίζονται σε δεδομένα τέτοιου είδους. Με τον τρόπο αυτό και μετά από αρκετή έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί σε τομείς όπως η ταξινόμηση του νέφους και η εξαγωγή οντοτήτων από αυτό, έχουν αναπτυχθεί αρκετές εφαρμογές οι οποίες αφορούν διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους και μη. Τέτοιες εφαρμογές είναι η παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων, η χαρτογράφηση της ποσότητας της βιομάζας της βλάστησης, η παρακολούθηση των διαβρώσεων σε παραποτάμιες περιοχές, η ανίχνευση μετακινήσεων και αλλαγών στο γήινο ανάγλυφο, η χαρτογράφηση φυσικών καταστροφών όπως πλημύρες, η χαρτογράφηση αγωγών και δικτύων μεταφοράς ενέργειας, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της αυθαίρετης δόμησης και πολλές άλλες.

Στη συνέχεια της παραγράφου θα αναφερθούν συνοπτικά μερικές από τις ποιο διαδεδομένες εφαρμογές, στις οποίες λαμβάνει χώρα η εκμετάλλευση των δεδομένων από συστήματα LiDAR και οι οποίες προσανατολίζονται περισσότερο στο αντικείμενο του τοπογράφου μηχανικού.

2.6.1 Παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανειών και εδάφους

Η ποιο διαδεδομένη εφαρμογή για την εκμετάλλευση των νεφών σημείων τα οποία παράγονται από τα δεδομένα LiDAR, είναι η μοντελοποίηση τόσο της φυσικής γήινης επιφάνειας, όσο και της επιφάνειας που αποτελείται από την φυσική επιφάνεια μαζί με τα υπερκείμενα αυτής αντικείμενα (τεχνητά και μη). Η πρώτη επιφάνεια ονομάζεται ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Terrain Model – DTM) και αντιπροσωπεύει το γυμνό έδαφος αφού αφαιρεθούν όλα τα υπερκείμενα αυτού αντικείμενα, ενώ η δεύτερη αποτελεί το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (Digital Surface Model – DSM) και αναπαριστά την επιφάνεια που σχηματίζεται από το έδαφος σε συνδυασμό με τα υπερκείμενα αντικείμενα. Η τεχνολογία των LiDAR αρχικά αποσκοπούσε στην ύπαρξη μιας μεθόδου δημιουργίας DTM υψηλής ακρίβειας και με κάλυψη μεγάλων περιοχών (περιφερειακό και εθνικό επίπεδο), η οποία θα ήταν πολύ οικονομικότερη από την κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία με τη χρήση στερεοζευγών. Η σάρωση LiDAR προσφέρει πολύ υψηλότερη πυκνότητα σημείων (και συνεπώς μεγαλύτερη δειγματοληψία του εδάφους), τη δυνατότητα της ύπαρξης μετρήσεων για το έδαφος σε περιοχές με πυκνή βλάστηση, μικρότερο χρόνο επεξεργασίας για την παραγωγή του DTM, ενώ ταυτόχρονα αίρεται ο περιορισμός της εκτέλεσης πτήσεων μόνο την ημέρα και με καλές συνθήκες φωτισμού που απαιτείται από την κλασική αεροφωτογράφιση. Το DSM προκύπτει συνήθως με την χρήση μόνο των πρώτων επιστροφών σε περιοχές με πυκνή κάλυψη (π.χ. δασωμένες ή αστικές περιοχές) Το DTM προκύπτει με τη χρήση μόνο των τελευταίων επιστροφών ή με εξελιγμένους αλγόριθμους οι οποίοι κατά τη διαδικασία του φιλτραρίσματος διαχωρίζουν τα σημεία του εδάφους από τα σημεία που ανήκουν σε υπέργεια αντικείμενα. Από την αφαίρεση των δύο αυτών επιφανειών, με την παράλληλη αναγωγή των υψομέτρων σε μηδενικό επίπεδο (κανονικοποίηση υψομέτρων), παράγεται μια τρίτη επιφάνεια, η οποία αντιπροσωπεύει μόνο τα υπερκείμενα του εδάφους αντικείμενα, όπως κτήρια, δέντρα, κατασκευές κ.α. και ονομάζεται κανονικοποιημένο ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (Normalized Digital Surface Model – NDSM) εικ 2-2. Από την επιφάνεια αυτή μπορούν να υπολογιστούν τα πραγματικά ύψη των υπερκειμένων του εδάφους αντικειμένων, δεδομένου ότι οι υψομετρικές διαφορές λόγω της τοπογραφίας έχουν αφαιρεθεί από τη διαδικασία της κανονικοποίησης.



Εικόνα 2-2: Σχέση μεταξύ επιφανειών DSM, DTM και NDSM

Το DTM που παράγεται από το νέφος σημείων του συστήματος LiDAR παρουσιάζει α priori πολύ μεγάλη υψομετρική ακρίβεια, δεδομένης της ακρίβειας των μετρήσεων τις οποίες πραγματοποιεί το σύστημα, καθώς και μεγάλη πιστότητα λόγω της εξαιρετικά πυκνής δειγματοληψίας του εδάφους η οποία πραγματοποιείται κατά τη σάρωση. Εν τούτοις, η πιστότητα του DTM δύναται να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο, με την χρήση γραμμών αλλαγής κλίσης (breaklines) οι οποίες μπορούν να έχουν προέρθει από ετερογενείς πηγές. Τέτοιες γραμμές μπορούν να είναι τα όρια δρόμων, το υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής, ακόμα και τα περιγράμματα των κτηρίων. Βασική προϋπόθεση για οποιοδήποτε breakline χρησιμοποιηθεί και η οποία έχει προέρθει από έταιρη πηγή, είναι να παρουσιάζει την ίδια η και καλύτερη ακρίβεια (οριζοντιογραφική και υψομετρική) με αυτή του νέφους σημείων. Συνεπώς, η ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου μιας περιοχής από χάρτες κλίμακας 1:50.000 και η χρήση του για την ενίσχυση ενός DTM που προέρχεται από σάρωση LiDAR, θα ήταν ένα παράδειγμα λανθασμένης πρακτικής.

2.6.2 Lidargrammetry

Η δυνατότητα των συστημάτων LiDAR να καταγράφουν την ένταση του κάθε επιστρεφόμενου παλμού, εισήχθη το 2000 από τους κατασκευαστές και γρήγορα υιοθετήθηκε από τους παροχείς των δεδομένων, ως επιπλέον πληροφορία, η οποία μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την παραγωγική διαδικασία δεδομένων από τα νέφη σημείων. Κύρια χρήση της καταγραφής του χαρακτηριστικού της έντασης ήταν αρχικά η δημιουργία των λεγόμενων εικόνων έντασης (όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.7). Οι εικόνες αυτές προκύπτουν όταν σε κάθε εικονοστοιχείο τους δοθεί τιμή ίση με το μέσο όρο των τιμών έντασης για όσα σημεία του νέφους εμπίπτουν εντός αυτού και στη συνέχεια η τιμή αυτή κανονικοποιηθεί στην κλίμακα 0-255 (8-bit). Αρχικά, οι εικόνες έντασης δεν χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή εμπορικά εκμεταλλεύσιμων χαρτογραφικών προϊόντων προερχόμενων απευθείας από το νέφος σημείων, αλλά κυρίως σαν βοηθητικά εικονιστικά υπόβαθρα της περιοχής εργασίας και σαν δευτερεύοντα δεδομένα για την υποβοήθηση της αυτόματης ταξινόμησης των σημείων του νέφους. Κύριος λόγος για τον αρχικά καθαρά βοηθητικό χαρακτήρα των εικόνων έντασης ήταν η χαμηλοί ρυθμοί επανάληψης των παλμών (PRF) των πρώιμων συστημάτων LiDAR, τα οποία πραγματοποιούσαν σχετική αραιή δειγματοληψία του εδάφους και συνεπώς εικόνες έντασης με χαμηλή διακριτική ικανότητα. Με άλλα λόγια, ενώ κανείς μπορούσε να παρατηρήσει στοιχεία όπως δρόμοι, περιγράμματα κτηρίων

κ.α. επί των εικόνων έντασης, εντούτοις δεν ήταν εφικτό να προσδιορίσει τα ακριβή όριά τους λόγω της χαμηλής ανάλυσης. Η πυκνή δειγματοληψία που δύναται να πραγματοποιούν στις μέρες μας τα σύγχρονα συστήματα LiDAR, ανοίγει νέες προοπτικές για την χρήση των εικόνων έντασης ως υπόβαθρα για την εξαγωγή παραδοσιακών γεωχωρικών δεδομένων υψηλής ακρίβειας.

Η τεχνική Lidargrammetry αποτελεί μια σχετικά σύγχρονη προσέγγιση στην εκμετάλλευση των δεδομένων LiDAR. Η αρχή της εν λόγω τεχνικής, είναι η εκμετάλλευση των καταγεγραμμένων τιμών της έντασης, ως δεδομένα για την παραγωγή στερεοζευγών της περιοχής εργασίας, τα οποία προέρχονται απευθείας από το νέφος σημείων και όχι από την κλασική φωτογραμμετρική επεξεργασία αεροφωτογραφιών. Τα στερεομοντέλα αυτά μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν σε ένα τυπικό ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό για την πραγματοποίηση απόδοσης 3-d γεωχωρικών δεδομένων, με βάση τις καθιερωμένες πρακτικές της φωτογραμμετρίας. Στην παρούσα φάση, η παραγωγή των εν λόγω στερεομοντέλων απαιτεί πρωτίστως τη δημιουργία εικόνων (rasterization) από το νέφος σημείων με βάση τις τιμές έντασης. Μια ενδιαφέρουσα εξέλιξη που αναμένεται στο μέλλον, σύμφωνα με τους Flood et.al. 2012, είναι η απεικόνιση του νέφους απευθείας σε ψηφιακό περιβάλλον και με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η άμεση απόδοση 3-d διανυσματικής γεωχωρικής πληροφορίας από αυτό, χωρίς να απαιτείται η μεσολάβηση δημιουργίας εικόνων. Η τεχνική αυτή θα αποτελέσει και την διεύρυνση του όρου Lidargrammetry στο μέλλον. Επί του παρόντος, η τεχνική βασίζεται στην δημιουργία raster στερεοζευγών με βάση την καθιερωμένη πρακτική των stereomates. Τα στερεοζεύγη αυτά ονομάζονται inferred stereo pairs (ISP) και προκύπτουν όταν από την αρχική εικόνα έντασης παραχθεί μια δεύτερη εικόνα στην οποία έχει εισαχθεί τεχνητά x-παράλλαξη (μετατόπιση των εικονοστοιχείων κατά την διεύθυνση x). Η ποσότητα της παράλλαξης είναι ανάλογη της διαφοράς που παρουσιάζει το υψόμετρο του κάθε εικονοστοιχείου, από μια σταθερή τιμή υψομέτρου (για παράδειγμα η μέση υψομετρική τιμή σε όλη την εικόνα). Η απαιτούμενη υψομετρική πληροφορία δύναται να εξαχθεί από το DTM το οποίο είναι και αυτό παράγωγο του νέφους σημείων και παρουσιάζει απόλυτη οριζοντιογραφική ταύτιση με το στερεοζεύγος.

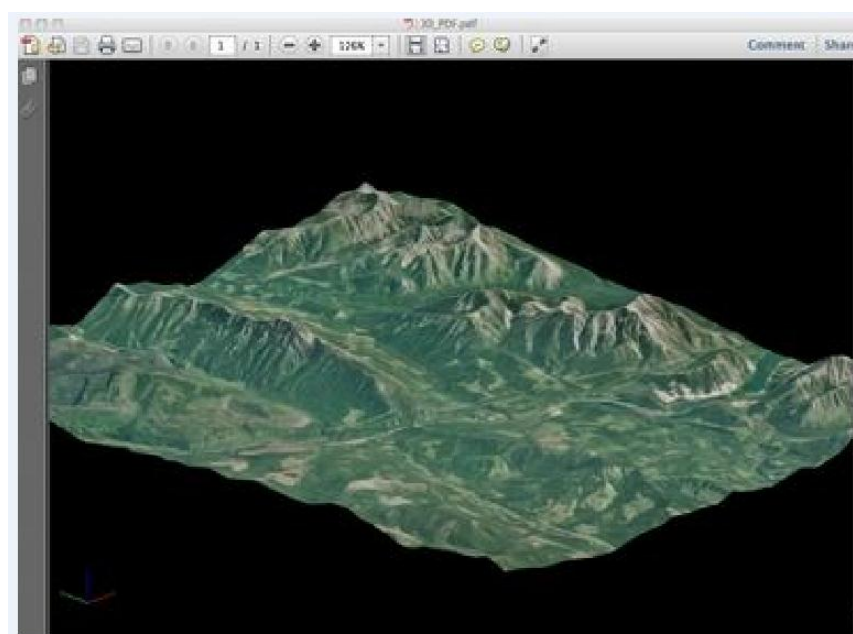
Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής Lidargrammetry, είναι ότι το παραγόμενο στερεοζεύγος κληρονομεί αυτόματα και χωρίς καμία επιπλέον διόρθωση, την οριζοντιογραφική ακρίβεια του νέφους σημείων. Ως αποτέλεσμα, η 3-d απόδοση διανυσματικής πληροφορίας η οποία πραγματοποιείται επ' αυτών, οδηγεί σε γεωχωρικά δεδομένα πολύ υψηλής ακρίβειας (breaklines, οδικό δίκτυο, ακτογραμμές, υδρογραφικό δίκτυο κ.α.), κατάλληλα για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

2.6.3 Fusion με εικόνες και 3-d Modeling

Ο όρος fusion χρησιμοποιείται διεθνώς για να χαρακτηρίσει την διαδικασία μέσα από την οποία πραγματοποιείται συνδυασμός δεδομένων τα οποία προέρχονται από

διαφορετικές πηγές, προκειμένου να παραχθούν πολύπλοκα γεωχωρικά δεδομένα. Προς την κατεύθυνση αυτή και στην περίπτωση των δεδομένων LiDAR, είναι συνήθης πρακτική να λαμβάνονται ταυτόχρονα με τη σάρωση και αεροφωτογραφίες. Οι περισσότεροι κατασκευαστές LiDAR, έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένα συστήματα τα οποία ενσωματώνουν ψηφιακές φωτομηχανές μεσαιού format και με μέγεθος σημαντικά πολύ μικρότερο από τις κλασικές μηχανές αεροφωτογραφήσεων. Δεδομένου ότι το σύστημα λειτουργεί ενιαία και η λήψη των φωτογραφιών γίνεται ταυτόχρονα με την σάρωση, είναι συνήθης πρακτική να εξάγονται από το σύστημα POS και στοιχεία για τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων, τα οποία με τη σειρά τους υποβοηθούν σε πολύ μεγάλο βαθμό την μετέπειτα φωτογραμμετρική επεξεργασία. Ακόμα όμως και στην περίπτωση όπου δεν λαμβάνονται αεροφωτογραφίες ταυτόχρονα με τη σάρωση, διαδικασίες fusion μπορούν να πραγματοποιηθούν και με ετερογενή δεδομένα όπως δορυφορικές απεικονίσεις, ψηφιακοί τοπογραφικοί χάρτες, υπάρχοντα ορθοφωτομωσαικά κ.α.

Τα προϊόντα τα οποία συνήθως αφορούν την διαδικασία fusion παράγονται είτε με την απευθείας κωδικοποίηση του νέφους σημείων με χρωματική πληροφορία που προέρχεται από ορθοεικόνες, είτε με την συνένωση των παραγώγων από το νέφος επιφανειών (DSM, DTM κ.α.) με ορθοεικόνες. Οι 3-d απεικονίσεις οι οποίες δημιουργούνται, μπορούν να διατεθούν στους χρήστες και να αποτελέσουν υπόβαθρο για την υποβοήθηση εργασιών και λήψεων αποφάσεων με τη χρήση GIS, η απλά σαν διαδραστικά 3d pdf για οπτικοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος.(εικ.2-3).

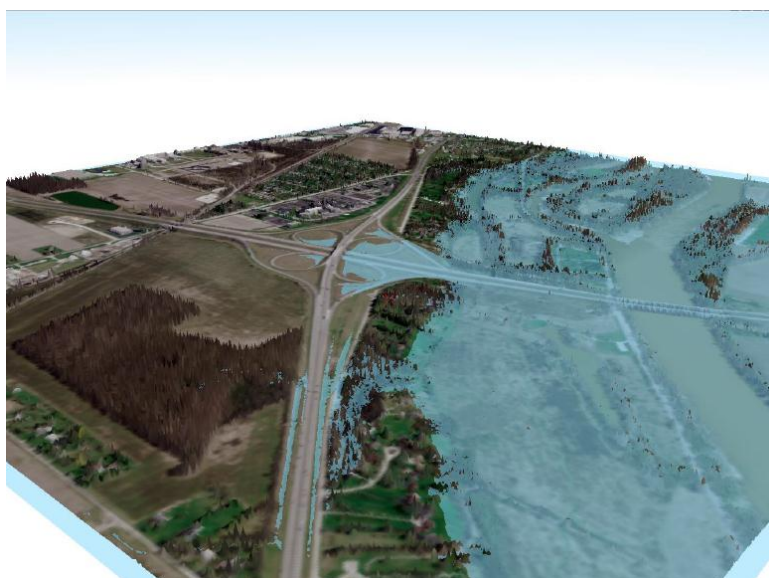


Εικόνα 2-3: Διαδραστικό 3-d pdf (orthoshop.com)

Οι τρισδιάστατες ρεαλιστικές απεικονίσεις από την συνένωση ορθοφωτογραφιών και επιφανειών από νέφη σημείων αποκτούν ολοένα και περισσότερη ζήτηση, για σκοπούς όπως η λήψη αποφάσεων, η κατάστρωση σχεδίων εκτάκτων αναγκών από τους

κρατικούς φορείς, η εθνική ασφάλεια κ.α. Η ομοσπονδιακή υπηρεσία διαχείρισης εκτάκτων αναγκών των ΗΠΑ (FEMA), βασίζεται σε προϊόντα τέτοιου είδους προκειμένου να καταστρώσει σενάρια εκκενώσεων πόλεων, εκτίμησης επιπτώσεων και χαρτογράφησης/διαχείρισης φυσικών καταστροφών (τυφώνες, πλημμύρες κ.α.), ενώ αντίστοιχες υπηρεσίες ασφαλείας (Homeland Security) δημιουργούν και ελέγχουν σενάρια εκτάκτων αναγκών για την αντιμετώπιση ασύμμετρων απειλών. Με τον τρόπο αυτό, ένα τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο μιας περιοχής, το οποίο προέρχεται από τη συνένωση ορθοφωτογραφιών και νεφών σημείων, μπορεί να εισαχθεί σε ένα σύστημα GIS και να πλημμυριστεί τεχνητά, με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων και των απωλειών από μια ενδεχόμενη άνοδο της στάθμης της θάλασσας, την κατάρρευση ενός φράγματος, την πλημμύρα ρεμάτων ή ποταμών κ.α. (εικ2-4).

Τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να απεικονίζουν τόσο μεγάλες εκτάσεις, με γενική λεπτομέρεια απεικόνισης, όσο και αστικούς ιστούς (πόλεις ή τμήματα πόλεων και οικισμών). Στην πρώτη περίπτωση απαιτείται συνδυασμός κατακόρυφων αεροφωτογραφιών μικρής κλίμακας και νεφών σημείων μέσης και χαμηλής πυκνότητας (2-4 σημεία ανά m^2), ενώ στη δεύτερη περίπτωση απαιτούνται κατακόρυφες και πλάγιες αεροφωτογραφίες μεγάλης κλίμακας, καθώς και πυκνότερα νέφη σημείων (10 σημεία ανά m^2) για την απόδοση λεπτομερειών και την πλήρη κάλυψη στις περιοχές μεταξύ των κτηρίων.



Εικόνα 2-4: Προσομοίωση πλημμύρας σε τρισδιάστατο μοντέλο προερχόμενο από νέφος LiDAR και ορθοφωτογραφία (ERDAS)



Εικόνα 2-5: Τρισδιάστατο μοντέλο τμήματος πόλης (Fei Deng et.al.)

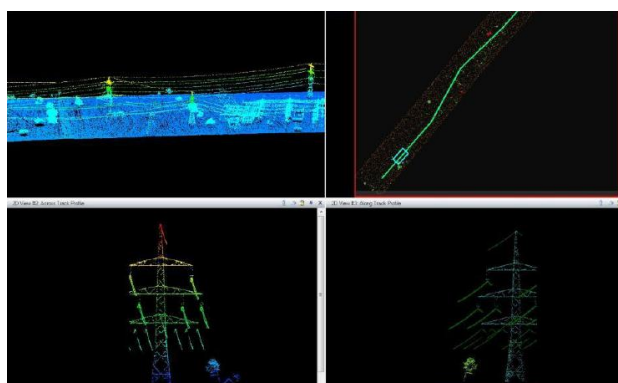
2.6.4 Χαρτογράφηση διαδρόμων μεταφοράς (corridor mapping)

Η χαρτογράφηση διαδρόμων μεταφοράς, αφορά την αποτύπωση αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου, ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων, δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος και άλλων παρόμοιων στοιχείων τα οποία αναπτύσσονται γραμμικά στο χώρο. Αποτελεί μια εφαρμογή στην οποία παρουσιάζει ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση, δεδομένου ότι από τα δεδομένα LiDAR δύναται να προκύπτει διανυσματική πληροφορία για τις γραμμές μεταφοράς, η οποία δεν μπορεί να αποδοθεί από την εκμετάλλευση αεροφωτογραφιών και δορυφορικών απεικονίσεων. Πριν την καθιέρωση των συστημάτων LiDAR ως μέσο συλλογής πληροφορίας, οι εταιρίες παροχών ρεύματος, αερίου, καυσίμων κτλ. βασιζόνταν σε επίγειες μεθόδους προκειμένου να σχεδιάσουν, να αποτυπώσουν και να παρακολουθούν τα δίκτυά τους. Η αποτύπωση όμως των δικτύων αυτών, δύναται πλέον να γίνεται με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο, με δεδομένα που προέρχονται από σάρωση LiDAR, τόσο με τη χρήση ελικοπτέρων όσο και αεροσκαφών σταθερών πτερύγων. Οι εταιρίες κατασκευής συστημάτων LiDAR, δημιουργούν συστήματα τα οποία προορίζονται εξειδικευμένα για εργασίες χαρτογράφησης διαδρόμων μεταφοράς, καθώς και αντίστοιχων εργασιών (αστικές αποτυπώσεις) που απαιτούν συλλογή νεφών σημείων μεγάλης πυκνότητας και από χαμηλό ύψος πτήσης.

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού, απαιτείται η λεπτομερής γνώση της επιφάνειας του εδάφους από την οποία θα διέλθει το δίκτυο, ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι τοπικές κλίσεις. Η γνώση αυτή του εδάφους μπορεί εύκολα και με ιδιαίτερα οικονομικό τρόπο να προέλθει από την εκμετάλλευση δεδομένων LiDAR, για την κατασκευή ενός ΨΜΕ υψηλής ακρίβειας, επί του οποίου θα σχεδιαστούν οι θέσεις των πυλώνων και θα υπολογιστεί η απόσταση των αγωγών μεταφοράς από το έδαφος.

Κατά το στάδιο της συντήρησης των δικτύων, διαχρονικά δεδομένα LiDAR δύναται να συλλέγονται, ενώ η εκμετάλλευσή τους αφορά τόσο τον έλεγχο των θέσεων των πυλώνων και των αγωγών (για αντιμετώπιση περιπτώσεων καθιζήσεων), όσο και την χαρτογράφηση της βλάστησης που αναπτύσσεται στη γύρω περιοχή. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνονται γνωστές οι θέσεις κατά μήκος του δικτύου όπου αναπτύσσεται βλάστηση, δεδομένου ότι το έδαφος για κάποια συγκεκριμένη απόσταση εκατέρωθεν του δικτύου πρέπει να είναι αποψιλωμένο. Σε αντίθετη περίπτωση, το ενδεχόμενο εκδήλωσης πυρκαγιάς, ιδιαίτερα στην περίπτωση δικτύων ηλεκτρικού ρεύματος, γίνεται πολύ πιθανό, λόγω της υπερθέρμανσης των αγωγών τους καλοκαιρινούς μήνες και σε περιόδους μεγάλου ενεργειακού φόρτου (αυξημένη ζήτηση). Η πρακτική που ακολουθείτο πριν την χρήση των συστημάτων LiDAR, ήταν η επίγεια παρατήρηση από συνεργεία τα οποία διέτρεχαν το δίκτυο και σήμαιναν τις θέσεις όπου χρειαζόταν να πραγματοποιηθεί αποψίλωση. Πλέον οι θέσεις αυτές μπορούν εύκολα να χαρτογραφηθούν από το νέφος σημείων, μέσω της διαδικασίας της ταξινόμησης, ενώ επιπλέον πληροφορία όπως η απόσταση των κλαδιών των δέντρων από τους αγωγούς μπορεί να γίνει διαθέσιμη. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία συντήρησης λόγω της περιφερειακής του δικτύου βλάστησης, μπορεί να πραγματοποιείται ποιο στοχευμένα και με σημαντικά χαμηλότερο κόστος από την πρωθύστερη πρακτική.

Ιδιαίτερα σημαντική δυνατότητα της εκμετάλλευσης των δεδομένων LiDAR για την χαρτογράφηση των διαδρόμων μεταφοράς, είναι η δημιουργία προφίλ του δικτύου, από το οποίο μπορούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια να μετρηθούν τα ακριβή ύψη των πυλώνων στήριξης καθώς και οι αποστάσεις των αγωγών μεταφοράς από το έδαφος οι οποίες μεταβάλλονται λόγω των κοίλων που δημιουργούνται από την κρέμαση. Η πλειονότητα των δικτύων που υφίστανται έχουν κατασκευαστεί αρκετό καιρό πριν την έλευση των συστημάτων LiDAR στην αγορά και συνεπώς μετά τον αρχικό σχεδιασμό και τις απαραίτητες μετρήσεις υπαίθρου για την χάραξή τους, κατασκευάστηκαν χωρίς να αποτυπωθεί το τελικό αποτέλεσμα στο σύνολό του. Συνεπώς, η χρήση των σαρώσεων LiDAR, προσφέρει πλέον τη δυνατότητα της ακριβούς αποτύπωσης του συνόλου του δικτύου, ώστε να εξακριβωθεί η κατάστασή του σε σχέση με τις προδιαγραφές και να σχεδιαστεί με τρόπο αποδοτικό και οικονομικό η συντήρησή του.



Εικόνα 2-6: Εκμετάλλευση νέφους σημείων για αποτύπωση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος (ERDAS)

ΜΕΡΟΣ Β΄: **ΠΑΡΑΓΩΓΗ** **ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΑΠΟ** **ΔΕΔΟΜΕΝΑ LiDAR**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ **ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ**

3.1 Δεδομένα και συστήματα συλλογής

Τα δεδομένα με τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι εφαρμογές της παρούσης εργασίας, αποτελούνται από ένα νέφος σημείων, το οποίο συλλέχθηκε υπέρ του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), από το Συμβούλιο Ερευνών Φυσικού Περιβάλλοντος (Natural Environment Research Council – NERC) του Ηνωμένου Βασιλείου. Το νέφος σημείων συλλέχθηκε σε 29 παράλληλες λωρίδες σάρωσης και 2 κάθετες, οι οποίες και χρησιμεύουν στην in flight βαθμονόμηση του συστήματος, κατά τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4. Η σάρωση παραμετροποιήθηκε όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 3-1, σύμφωνα με το φύλλο καταγραφής πτήσης, ενώ οι λωρίδες σάρωσης, οι οποίες διατέθηκαν σε αυτόνομα αρχεία .las, καλύπτουν ολόκληρη την Ν. Μήλο (Εικόνα 3-1).

Για την πραγματοποίηση της σάρωσης, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα LiDAR ALS50-II (Εικ.3-2) της εταιρίας Leica Geosystems, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρατίθενται στον πίνακα 3-2. Το σύστημα, για την παράλληλη λήψη αεροφωτογραφιών, διαθέτει ενσωματωμένη την ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format Leica RCD105 (Εικ.3-2), της οποίας τα ονομαστικά αλλά και βαθμονομημένα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 3-3.

Επικουρικά, χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση των εφαρμογών της παρούσης εργασίας τα κάτωθι εξωγενή δεδομένα:

- ✓ ΦΧ 1:50.000 Μήλος και Κίμωλος της ΓΥΣ (γενικής χρήσεως).
- ✓ 7 τριγωνομετρικά σημεία της ΓΥΣ τα οποία εμπίπτουν εντός της περιοχής εργασίας.
- ✓ Τμήμα ψηφιακής ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο ΑΕ, με μέγεθος εδαφοψηφίδας 0,5 m.
- ✓ Τμήμα του ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε. με βήμα κανάβου 5 m.



Εικόνα 3-1: Επισκόπηση των λωρίδων σάρωσης στη Ν. Μήλο επί υποβάθρου Google Earth

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ρυθμός επανάληψης παλμών (PRF)	99900 Khz
Συχνότητα σάρωσης (f_{sc})	52,8 Hz
Πεδίο ορατότητας (FOV)	18°
Ποσοστό επιστροφών	Min: 32,1 % Max: 100,0 % Mean: 67,2%
Πολλαπλές επιστροφές στον αέρα (MPiA)	NAI
Ύψος πτήσης (H)	2500 m
Ταχύτητα πτήσης	140 knots
Μέση τιμή ποιότητας προσδιορισμού θέσης GPS (PDOP)	1,4
Μέση τιμή παρακολουθούμενων δορυφόρων GPS	14

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη σάρωσης

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μηχανισμός εκτροπής ακτίνας	Ταλαντευόμενο κάτοπτρο
Πρότυπο σάρωσης	Ημιτονοειδές
Μήκος κύματος laser	1064 nm
Απόκλιση ακτίνας	0,22 mrad
Max FOV	75°
Ισχύς laser	0-8 Watt (ρυθμιζόμενη από το χειριστή)
Αριθμός διακριτών επιστροφών	4
Διάρκεια παλμών	4ns ή 9ns
Διαχωριστική ικανότητα στόχων	2,7m
Διάμετρος ίχνους laser (από 1000m)	22cm
Ύψος πτήσης	Min 650 m Max 6000 m (Χρησιμοποιείται έως τα 2000m. Για ύψη >2000m οι επιστροφές των παλμών αρχίζουν να είναι ανεπαρκείς σε δασωμένες περιοχές. Για μέγιστο ύψος πτήσης απαιτούνται ιδανικές συνθήκες.)
Ανάλυση πλήρους σήματος	NAI (μέσω αναβάθμισης το 2010)

Πίνακας 3-2: : Χαρακτηριστικά συστήματος LiDAR Leica ALS50-II (NERC)

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ανάλυση (ονομαστική)	7216 x 5412 (39 Mega-pixels)
Ανάλυση (βαθμονόμηση)	7212 x 5408
Διάσταση CCD (βαθμονόμηση)	49,0416 mm x 36,7744 mm
Διάσταση pixel (βαθμονόμηση)	6,8 μm
Εστιακή απόσταση (c) (ονομαστική)	60 mm
Εστιακή απόσταση (c) (βαθμονόμηση)	59,799 mm
Ακτινική διαστροφή (βαθμονόμηση)	$K_0=8,57325 \times 10^{-3}$ $K_1=-2,01969 \times 10^{-8}$ $K_2=5,13135 \times 10^{-11}$
Απόκλιση πρωτεύοντος σημείου (βαθμονόμηση)	$x_0=-0,0025$ mm $y_0=-0,3247$ mm
Χρόνος έκθεσης	Έως 1/4000
FOV	44.2° x 34.0°

Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά ψηφιακής φωτομηχανής Leica RCD105 (NERC)



Εικόνα 3-2: Το σύστημα ALS50-II με την ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format Leica RCD105 (NERC)

3.2 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν

Για την πραγματοποίηση των εφαρμογών της παρούσης εργασίας, πραγματοποιήθηκε έρευνα στο διαδίκτυο για την διερεύνηση της ύπαρξης κατάλληλων λογισμικών για την επεξεργασία των δεδομένων LiDAR. Την παρούσα χρονική στιγμή, βρέθηκε ένας ικανός αριθμός λογισμικών, τα οποία παρουσιάζουν δυνατότητες χειρισμού νεφών σημείων προερχόμενα από εναέριους σαρωτές, τόσο ελεύθερα προς χρήση όσο και με άδειες χρήσης επί πληρωμή. Ωστόσο, όλα τα ελεύθερα λογισμικά που εντοπίστηκαν παρουσιάζουν σοβαρούς περιορισμούς στη χρήση τους, καθώς και στη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων νεφών σημείων και ως εκτούτου κρίνονται κατάλληλα μόνο για βοηθητική χρήση ή εξειδικευμένες μικρής κλίμακας εργασίες. Τέτοια λογισμικά είναι το FUSION/LDV που διατίθεται από τη U.S. Forest Service και είναι προσανατολισμένο σε εφαρμογές δασολογίας, το BCAL LiDAR που διατίθεται δωρεάν από το Boise Center for Aerospace Laboratory του Idaho State University και αποτελεί επέκταση στην πλατφόρμα του εμπορικού λογισμικού ENVI, το ALDPAT που διατίθεται από το International Hurricane Research Center του Florida International University, το MCC-LIDAR, το GRASS GIS, η δωρεάν έκδοση των LASTools του καθηγητή Martin Isenburg κ.α.

Πιο ολοκληρωμένες παραγωγικές διαδικασίες και αυξημένες δυνατότητες χειρισμού και επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR, προσφέρουν μερικά από τα εμπορικά πακέτα γεωχωρικής ανάλυσης όπως είναι το ERDAS της Leica Geosystems (έκδοση 2012 πιο σύγχρονες), το FME της Safe Software, το TerraScan της 3D Laser Mapping, το LP360 της QCoherent η αδειοδοτημένη έκδοση των LASTools, το Global Mapper (έκδοση 14 και πιο σύγχρονες) της Blue Marble Geographics κ.α.

Κατά την εκπόνηση του πειραματικού μέρους της παρούσης εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι λογισμικά, τόσο για τον χειρισμό των δεδομένων LiDAR, όσο και για την πραγματοποίηση βοηθητικών ενεργειών και υπολογισμών.

- ✓ ERDAS Imagine 2013 για την οπτικοποίηση του νέφους σημείων, τις απαραίτητες γεωμετρικές μετατροπές και την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας.
- ✓ LASTools (δωρεάν έκδοση) για την πραγματοποίηση του μεγαλύτερου μέρους των διαδικασιών (υπολογισμό στατιστικών, φιλτράρισμα νέφους, δημιουργία διανομής, δημιουργία επιφανειών DSM και DTM κ.α.).
- ✓ Global Mapper για την οπτικοποίηση του DSM με hillshade effect και την μέτρηση των φωτοσταθερών επ' αυτού, καθώς και για την παραγωγή της εικόνας έντασης.
- ✓ ArcGIS 10.0 για την επίθεση και σύγκριση των παραγόμενων σε κάθε στάδιο κύριων και βοηθητικών προϊόντων (raster και vector), καθώς και για διαδικασίες ανάλυσης.
- ✓ MS Excel για την δημιουργία γραφημάτων και την εκτέλεση υπολογισμών.

3.3 Επιλογή περιοχής εργασίας

Για την πραγματοποίηση των εφαρμογών της παρούσης εργασίας, επιλέχθηκε τμήμα της Ν. Μήλου, ώστε να ελαττωθεί ο υπολογιστικός φόρτος που θα απαιτούσε η επεξεργασία όλων των διαθέσιμων δεδομένων. Η τμηματική αυτή εργασία δεν επηρεάζει τα παραγόμενα αποτελέσματα, καθώς η επέκταση των διαδικασιών που θα περιγραφούν στη συνέχεια, για την κάλυψη μεγαλύτερων χερσαίων τμημάτων, απαιτεί μόνο πρόσθετο χρόνο και υπολογιστική ισχύ. Οι μέθοδοι που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια, δύναται να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες και για εργασίες μεγαλύτερης κλίμακας.

Στη βάση της απαίτησης της μείωσης του υπολογιστικού φόρτου, χωρίς ταυτόχρονα να υπάρξει ευνόηση των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων λόγω ήπιας τοπογραφίας η έλλειψης υπέργειων αντικειμένων, επιλέχθηκε τμήμα στην βόρεια πλευρά της Νήσου εικ. 3-3. Η συγκεκριμένη περιοχή εργασίας, έχει έκταση 21,9 Km² και περιλαμβάνει τους όγκους του Κάστρου, το Κλιματοβούνι, τα Νύχια, το Βουνό και το Φουρκοβούνι, οι οποίοι δημιουργούν ένα μεταβαλλόμενο ανάγλυφο με έντονες αλλαγές κλίσης στο έδαφος. Παράλληλα, περιλαμβάνεται η πλειοψηφία των συγκεντρώσεων του αστικού ιστού που υφίσταται στη Νήσο και αφορά τους οικισμούς του Αδάμαντα, της Πλάκας, του Τριοβάσαλου, του Πέρα Τριοβάσαλου και της Τρυπητής.

Εντός του πολυγώνου της περιοχής εργασίας, και με κατανομή περιμετρικά του χερσαίου τμήματος, περιλήφθηκε τμήμα της θάλασσας προκειμένου να ελεγχθεί υψομετρικά και να διορθωθεί λόγω αποχής γεωειδούς το DTM που θα παραχθεί. Με τον τρόπο αυτό, το υψόμετρο της περιοχής διαμορφώθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 0 m και 254 m, με μέση τιμή τα 100 m περίπου. Τα στοιχεία αυτά αφορούν ορθομετρικά

υψόμετρα, όπως αυτά εξήχθησαν από τους αντίστοιχους χάρτες της ΓΥΣ. Η περιοχή εργασίας ορίστηκε με πολύγωνο, το οποίο αποτέλεσε και το όριο περικοπής του συνόλου των διαθέσιμων δεδομένων (νέφη σημείων LiDAR και εικονιστικά υπόβαθρα).



Εικόνα 3-3: Κατακόρυφη και πλάγια άποψη περιοχής εργασίας, επί υποβάθρου Google Earth

3.4 Μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας

Όπως σε κάθε περίπτωση επεξεργασίας γεωχωρικών δεδομένων, έτσι και η αξιοποίηση των δεδομένων LiDAR, πρέπει να γίνεται στη βάση μιας προκαθορισμένης ροής εργασιών, η οποία εξασφαλίζει τον έλεγχο της ορθότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων, αλλά και βελτιστοποιεί την παραγωγικότητα στο κάθε στάδιο. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε και προτείνεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας, το οποίο εφαρμόστηκε στο πειραματικό τμήμα της παρούσης εργασίας. Το συγκεκριμένο διάγραμμα ροής εργασιών, δύναται να εφαρμοστεί κατά τα στάδια των ελέγχων και της προεπεξεργασίας, για κάθε εφαρμογή που περιλαμβάνει χρήση δεδομένων LiDAR, ενώ με τις κατάλληλες προσθήκες μπορεί να επεκταθεί ώστε να καλύψει την παραγωγή όλων των προϊόντων που δύναται να προέλθουν από το συγκεκριμένο είδος γεωχωρικών δεδομένων. Το μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσης εργασίας αναπτύχθηκε σε τέσσερα στάδια, όπως αυτά απεικονίζονται στο διάγραμμα 3-1.

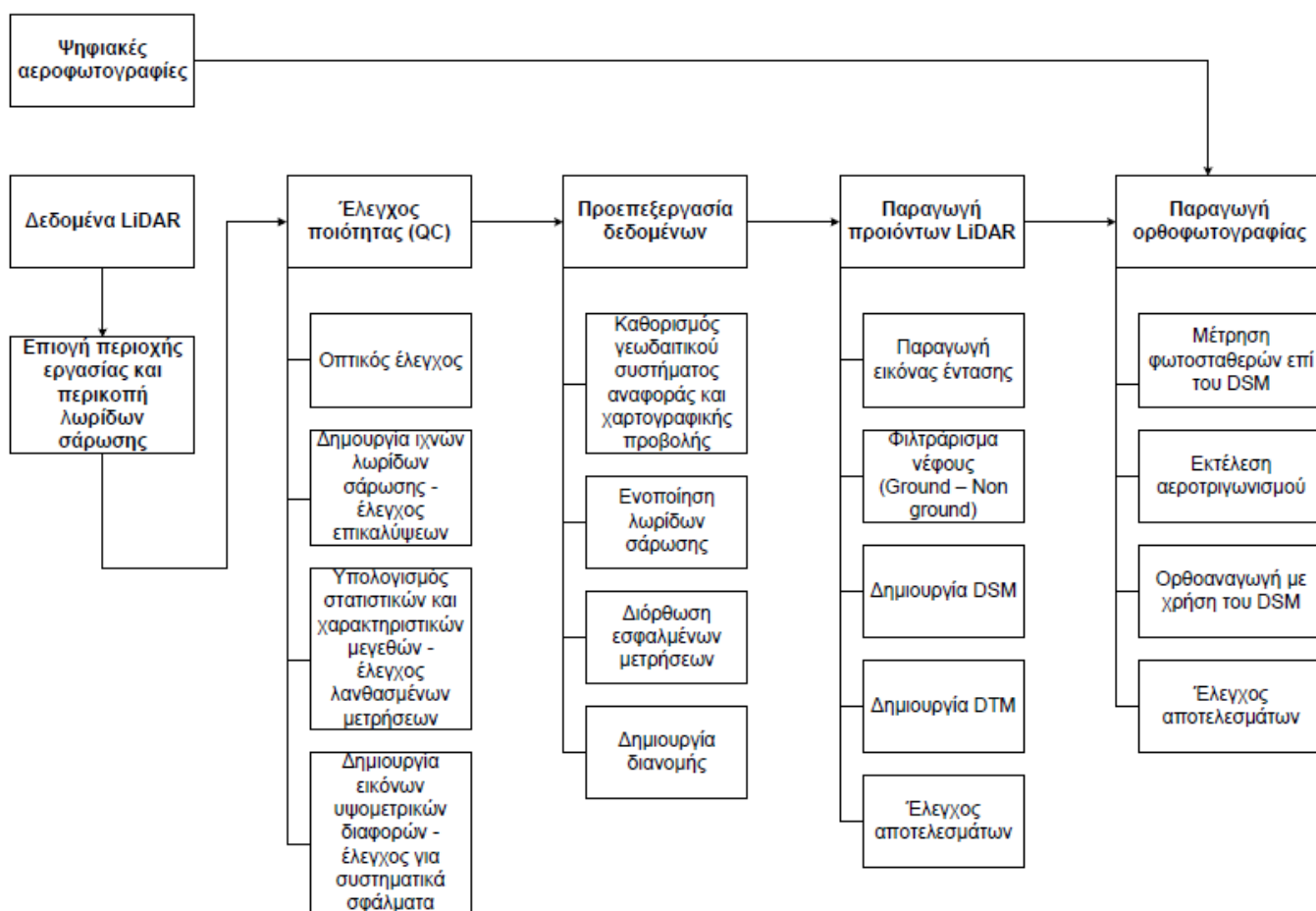
Από τα αρχικά δεδομένα και μετά την επιλογή και οριοθέτηση της περιοχής εργασίας, αποκόπτονται τα κατάλληλα τμήματα των λωρίδων σάρωσης, δημιουργώντας ένα υποσύνολο δεδομένων το οποίο καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος και με το οποίο θα πραγματοποιηθούν οι επόμενες εργασίες. Στο πρώτο στάδιο, πραγματοποιείται ένας έλεγχος της εσωτερικής ποιότητας των δεδομένων (IQC), ο οποίος αφορά συγκεκριμένα τον οπτικό έλεγχο των δεδομένων με τη χρήση 3-d συστημάτων απεικόνισης, την δημιουργία και υπέρθεση των ιχνών των λωρίδων σάρωσης για έλεγχο των επικαλύψεων, τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών και στατιστικών των δεδομένων, καθώς και τον έλεγχο για μη αποδεκτές μετρήσεις και τελικώς την δημιουργία των εικόνων υψομετρικών διαφορών για έλεγχο ύπαρξης συστηματικών σφαλμάτων μεταξύ των λωρίδων σάρωσης.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιούνται μια σειρά από ενέργειες, οι οποίες αποσκοπούν στην προετοιμασία των δεδομένων για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Οι ενέργειες

αυτές περιλαμβάνουν τον καθορισμό του γεωδαιτικού συστήματος και της χρησιμοποιούμενης χαρτογραφικής προβολής, της ενοποίησης των λωρίδων σάρωσης σε ένα αρχείο και τελικώς την δημιουργία διανομής των δεδομένων.

Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η παραγωγή των προϊόντων, που περιλαμβάνουν την εξαγωγή της εικόνας έντασης, το φιλτράρισμα του νέφους για τον διαχωρισμό των επίγειων σημείων από αυτά που ανήκουν σε υπέργεια αντικείμενα, την δημιουργία του DSM και του DTM και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο και τελευταία στάδιο, ενσωματώνεται στη διαδικασία η χρήση των αεροφωτογραφιών, οι οποίες ελήφθησαν παράλληλα με τη σάρωση για την παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας. Αρχικώς πραγματοποιείται κατάλληλη απεικόνιση του DSM που παρήχθη πρωτίστως και μετρούνται επ’ αυτού πλήθος φωτοσταθερών σημείων (GCP). Εκτελείται ο αεροτριγωνισμός και η διαδικασία ολοκληρώνεται με την ορθοαναγωγή του μπλοκ εικόνων με τη χρήση του ίδιου DSM. Τελικώς αξιολογείται η αποτελεσματικότητα και οι δυνατότητες της εν λόγω προτεινόμενης διαδικασίας.



Διάγραμμα 3-1: Το μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Έλεγχος εσωτερικής ποιότητας δεδομένων (IQC)

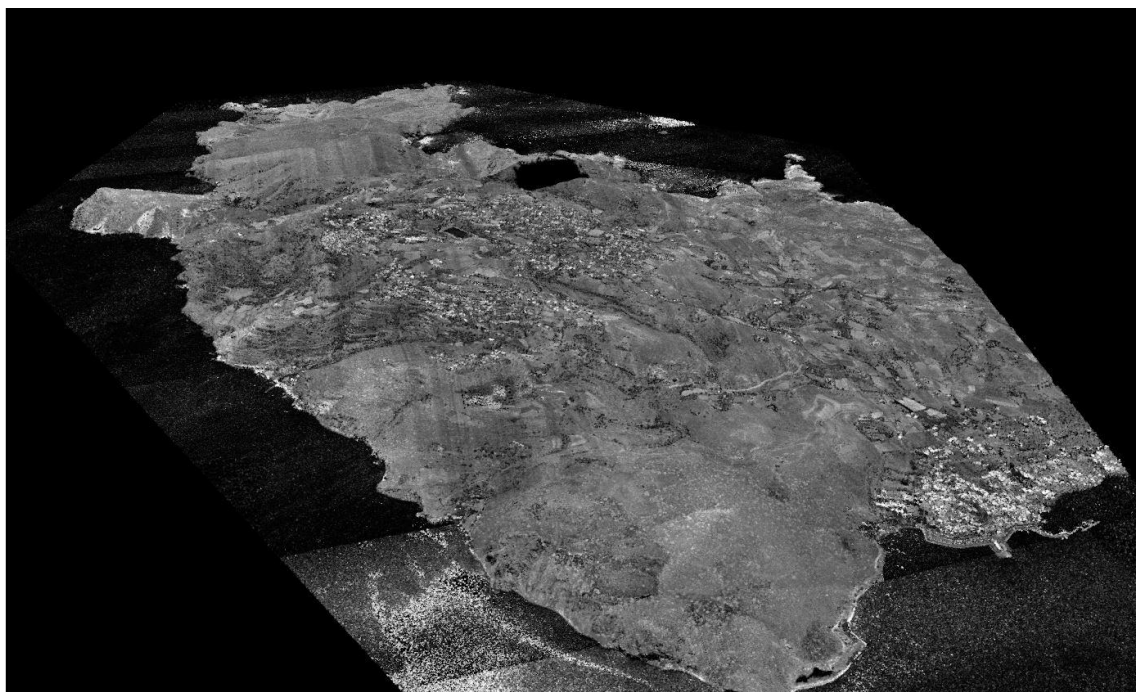
Ο έλεγχος της εσωτερικής ποιότητας των δεδομένων πραγματοποιείται με σκοπό την εξακρίβωση του βαθμού στον οποίο τα δεδομένα LiDAR πληρούν τις προδιαγραφές με τις οποίες ζητήθηκαν από τον παροχέα. Κατά τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3, οι ενέργειες στις οποίες δύναται να προβεί ο χρήστης για να διαπιστώσει το βαθμό ποιότητας των δεδομένων είναι ιδιαίτερα περιορισμένες, εφ' όσον δεν υπάρχει πρόσβαση στα αρχικά σετ μετρήσεων και στα αντίστοιχα λογισμικά επεξεργασίας τους. Παράλληλα, δεδομένου ότι η διαδικασία ελέγχου με επίγεια σημεία δεν είναι εφικτή, λόγω αδυναμίας αναγνώρισης των επί του νέφους, αλλά και λόγω του γεγονότος ότι τέτοια σημεία δεν είναι πάντα διαθέσιμα, ο έλεγχος περιορίζεται μόνο σε τομείς όπως οι επικαλύψεις, η συστηματική απόκλιση κοντινών μετρήσεων μεταξύ γειτονικών λωρίδων σάρωσης κ.α. Οι έλεγχοι αυτοί αναλύονται στην συνέχεια.

4.1.1 Οπτικός έλεγχος

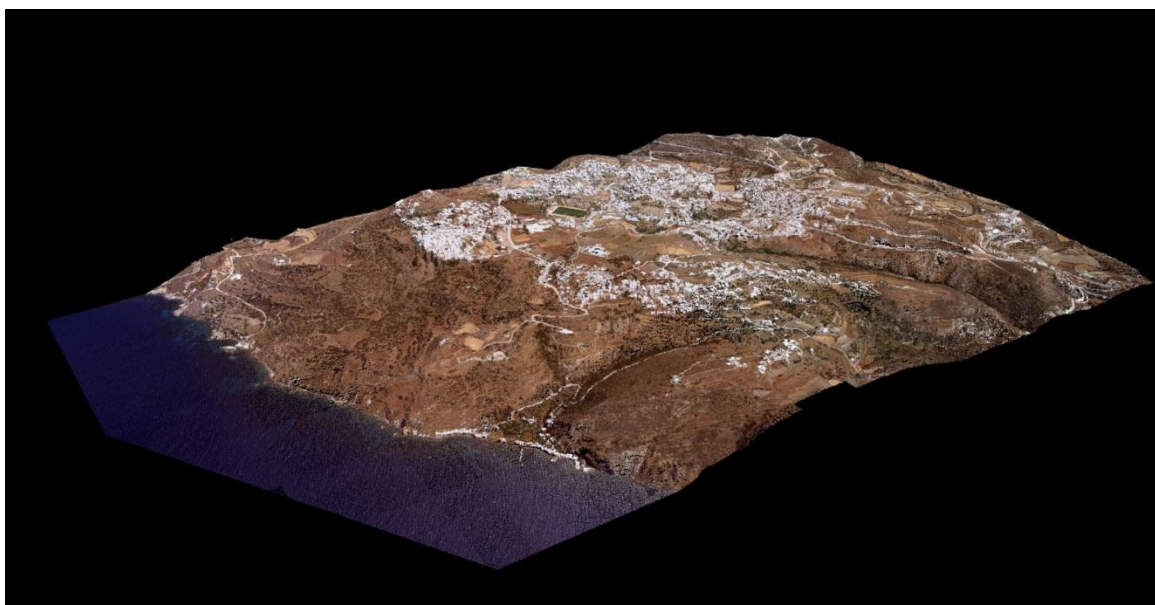
Η οπτικοποίηση των δεδομένων LiDAR μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με την χρήση 3-d συστημάτων απεικόνισης (viewers). Πολλά λογισμικά για επεξεργασία νεφών σημείων παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης τέτοιων συστημάτων, τα οποία δύναται να διαφέρουν ως προς τις δυνατότητές τους. Οπτικοποιώντας το νέφος σημείων, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αποκτήσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της περιοχής που σαρώθηκε και να διαπιστώσει το βαθμό λεπτομέρειας με τον οποίο αποδίδονται τα διάφορα αντικείμενα (κτίρια, βλάστηση κ.α.). Οι δυνατότητες απεικόνισης του νέφους σημείων οι οποίες είναι κοινές στα περισσότερα λογισμικά που εξετάστηκαν, είναι η απεικόνιση με βάση την κλάση των δεδομένων (εφ' όσον έχει προσδιοριστεί), η απεικόνιση με βάση το υψόμετρο, με βάση τον αριθμό της επιστροφής, με βάση τιμές RGB (εφ' όσον υπάρχει διαθέσιμη ορθοφωτογραφία ώστε να κωδικοποιηθεί το νέφος) και με βάση τις τιμές έντασης. Οι δύο τελευταίες επιλογές (τιμές RGB και τιμές έντασης) αποτελούν και τους καλύτερους τρόπους απεικόνισης για οπτική εξέταση των δεδομένων, αφού το αποτέλεσμα που δημιουργούν είναι ποιο κατανοητό από τον άνθρωπο.

Η απεικόνιση του νέφους σημείων ως 3-d μοντέλου είναι δυναμική και με τον τρόπο αυτό ο χειριστής μπορεί να επιτελεί όλους τους απαραίτητους χειρισμούς, όπως μεγέθυνση και σμίκρυνση, στροφές και μεταθέσεις, ώστε να εξετάζει τις επιθυμητές λεπτομέρειες. Μόνος περιορισμός στην συγκεκριμένη διαδικασία είναι η μεγάλη υπολογιστική ισχύς η οποία απαιτείται προκειμένου τα λογισμικά εργασίας να διαχειριστούν με άνεση το πολύ μεγάλο πλήθος σημείων από το οποίο αποτελείται το

νέφος. Η απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ αυξάνουν υπερβολικά όσο μεγαλύτερα νέφη σημείων χρησιμοποιούνται και είναι σύνηθες το φαινόμενο πολλά λογισμικά να μην δύναται να ανταπεξέλθουν. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να ξεπερασθεί με την δημιουργία διανομής, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο. Στις εικόνες 4-1 και 4-2, παρατίθενται παραδείγματα απεικόνισης του νέφους σημείων της περιοχής εργασίας με βάση τις τιμές έντασης, αλλά και με βάση την RGB κωδικοποίηση με την χρήση ορθοφωτογραφίας.



Εικόνα 4-1: Απεικόνιση του νέφους σημείων με βάση τις τιμές έντασης

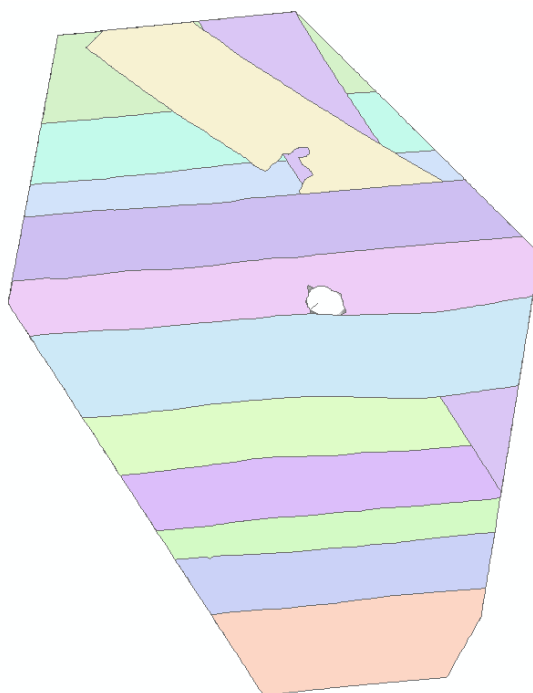


Εικόνα 4-2: Απεικόνιση του νέφους σημείων με βάση την κωδικοποίηση RGB από ορθοφωτογραφία

4.1.2 Έλεγχος επικαλύψεων

Η επικάλυψη των δεδομένων LiDAR είναι σημαντικός παράγοντας, ο οποίος είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί με κάθε τρόπο κατά την εκτέλεση της αποστολής συλλογής των δεδομένων και πρέπει να ελέγχεται πάντα από τους χρήστες. Η πραγματοποίηση των σωστών επικαλύψεων βάση του προγραμματισμού, εξασφαλίζει την πληρότητα των δεδομένων και την κάλυψη ολόκληρης της περιοχής εργασίας. Τυχόν τμηματικές αποτυχίες στον τομέα αυτό, οδηγούν σε έλλειψη πρωτογενών δεδομένων στα συγκεκριμένα τμήματα και συνεπώς μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων (π.χ. παραγωγή ενός DTM με μεγάλα κενά τμήματα), έως και να οδηγήσουν στην συλλογή συμπληρωματικών δεδομένων, αυξάνοντας το κόστος της εργασίας. Η πληρότητα της κάλυψης της περιοχής εργασίας μπορεί εύκολα να ελεγχθεί με την εξαγωγή των ιχνών των λωρίδων σάρωσης σε κατάλληλη διανυσματική μορφή και την επίθεσή τους σε ένα περιβάλλον GIS.

Εξάγοντας τα ίχνη των λωρίδων σάρωσης σε μορφή .shp με τη βοήθεια του λογισμικού LASTools, και περικόπτοντας τα εντός των ορίων του πολυγώνου της περιοχής εργασίας λαμβάνουμε το αποτέλεσμα της εικ. 4-3. Είναι εύκολα αντιληπτό, ότι εντός της περιοχής ενδιαφέροντος υπάρχει πλήρης κάλυψη, ενώ το κενό που εμφανίζεται αφορά απόσβεση διαβαθμισμένης περιοχής η οποία επιτελέστηκε κατά τον έλεγχο των δεδομένων από την ΓΥΣ.



Εικόνα 4-3: Έλεγχος κάλυψης περιοχής με την επίθεση των ιχνών των λωρίδων σάρωσης σε περιβάλλον GIS

4.1.3 Υπολογισμός στατιστικών, έλεγχος για μη αποδεκτές μετρήσεις

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη και τα στατιστικά των δεδομένων LiDAR μπορούν να υπολογίζονται από τα περισσότερα πακέτα λογισμικά και είναι απαραίτητα προκειμένου να ελεγχθεί ο βαθμός επίτευξης των προδιαγραφών σάρωσης. Μεγέθη όπως η απόσταση μεταξύ των σημείων (spacing), η μέση πυκνότητα (density), ο αριθμός των σημείων, τα ελάχιστα και μέγιστα μετρημένα υψόμετρα, μπορούν να υπολογιστούν από τα δεδομένα και να διασταυρωθούν με τις αρχικές απαιτήσεις, ώστε να διασφαλιστεί η καταλληλότητα αυτών για την εκάστοτε προγραμματισμένη εργασία. Παράλληλα, υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά αυτά μεγέθη, δίνεται η δυνατότητα της αξιολόγησης σετ δεδομένων των οποίων οι συνθήκες λήψης είναι άγνωστες (π.χ. ελεύθερα δεδομένα, δεδομένα που διακινούνται μέσω τρίτων κ.α.) και να προσδιοριστεί ο βαθμός καταλληλότητας τους για την εκάστοτε επιθυμητή εργασία.

Τα στατιστικά των δεδομένων της παρούσης εργασίας υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού LASTools και παρατίθενται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4-1.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αριθμός σημείων	54812045
Αριθμός σημείων που αποτελούν τελευταία επιστροφή	54597798
1 ^{ος} Επιστροφές	54385887
2 ^{ος} Επιστροφές	419206
3 ^{ος} Επιστροφές	6852
4 ^{ος} Επιστροφές	100
Απόσταση μεταξύ σημείων	0,63 m
Μέση πυκνότητα σημείων	2,51 σημεία/m ²
Ελάχιστο X	268015,368 m
Μέγιστο X	272951,692 m
Ελάχιστο Y	4066629,059 m
Μέγιστο Y	4072975,008 m
Ελάχιστο Z	-15,755 m
Μέγιστο Z	889,994 m
Εμβαδό καλυπτόμενης περιοχής	21,9 Km ²
Αριθμός αταξινόμητων σημείων (class 1)	54812045

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη και στατιστικά δεδομένων εργασίας

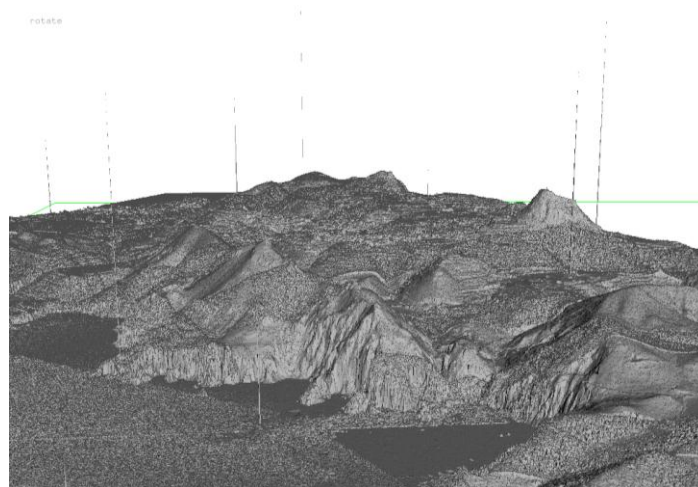
Ο αριθμός των σημείων αναφέρεται στο τμήμα εκείνο του αρχικού νέφους σημείων (ολόκληρης της Ν. Μήλου) το οποίο περικόπηκε εντός των ορίων της περιοχής εργασίας. Η συντριπτική πλειοψηφία των σημείων αποτελούν πρώτες επιστροφές, ενώ σημαντικά λιγότερες είναι οι επόμενες επιστροφές που προκαλούνται από πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις των παλμών Laser. Από την κατανομή αυτή ο χρήστης μπορεί να συμπεράνει ότι η περιοχή την οποία καλύπτει το νέφος δεν παρουσιάζει υψηλή βλάστηση, ούτε περίπλοκο και πυκνό αστικό ιστό, μιας και στην περίπτωση αυτή οι πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις θα ήταν ιδιαίτερα αυξημένες.

Η απόσταση μεταξύ των σημείων και συνεπώς η πυκνότητα του νέφους η οποία υπολογίζεται από αυτή (σχέση 2.3) είναι τα δύο σημαντικότερα μεγέθη με βάση τα οποία δύναται να εκτιμηθεί η καταλληλότητα του νέφους για την εκάστοτε εφαρμογή. Η πυκνότητα των 2,5 σημείων/m² θεωρείται χαμηλή και είναι κατάλληλη για ευρείας έκτασης χαρτογραφικές εργασίες, καθώς και κατασκευή ΨΜΕ, αλλά δεν είναι επαρκής για εργασίες αυξημένης ακρίβειας όπως αστικές αποτυπώσεις κτηρίων κ.α. Η απόσταση των 0,63 m μεταξύ των σημείων τα οποία μετρώνται στο έδαφος, συνιστά μια αρκετά πυκνή δειγματοληψία για τις εργασίες που προαναφέρθηκαν και ως μέγεθος αποτελεί μια ένδειξη για τα μικρότερα αντικείμενα που δύναται να αποδοθούν από το νέφος σημείων. Ως παράδειγμα, η συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των σημείων είναι κατάλληλη για να αποδοθούν σημαντικές λεπτομέρειες της τοπογραφίας του εδάφους (όπως μικρές πτυχώσεις πλάτους 1 - 1,5 m), ενώ δεν είναι επαρκής για την απόδοση αντικειμένων μικρότερου πλάτους (π.χ. τοιχίο πλάτους 0,5 m).

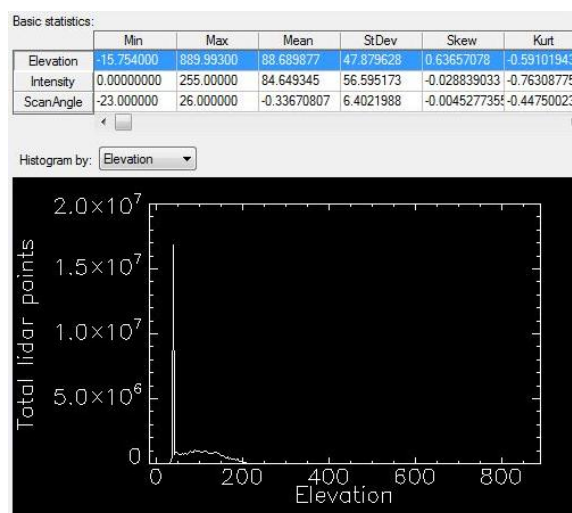
Από τα μέγιστα και ελάχιστα των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων, μπορεί να προσδιοριστεί η ευρύτερη περιοχή που καλύπτεται από το νέφος σημείων, ενώ ιδιαίτερα σημαντικότερα είναι τα μέγιστα και ελάχιστα υψόμετρα που δείχνουν ότι έχουν μετρηθεί από το σύστημα σάρωσης. Το συγκεκριμένο μέγεθος αποκαλύπτει την ύπαρξη μετρήσεων οι οποίες βρίσκονται εκτός αποδεκτών ορίων και μπορούν να οφείλονται σε οπισθοσκεδάσεις που έχουν προέλθει από εισχώρηση των παλμών εντός υδάτινων επιφανειών (αρνητικές τιμές) και από οπισθοσκεδάσεις λόγω ιπτάμενων αντικειμένων (π.χ. σμήνη πτηνών). Οι τιμές αυτές στα δεδομένα της εργασίας, κυμαίνονται από - 15,755 m έως 889,994 m. Οι αρνητικές τιμές προφανώς οφείλονται σε σημεία που μετρήθηκαν εντός της θάλασσας, ενώ η μέγιστη τιμή, η οποία ξεπερνά κατά πολύ το μέγιστο υψόμετρο των 254 m της περιοχής, οφείλεται στην οπισθοσκέδαση από κάποιο αντικείμενο στον αέρα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εφ' όσον το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής εκτιμάται από κάποιο χάρτη, αυτό θα αποτελεί ορθομετρικό υψόμετρο, ενώ συνήθως τα υψόμετρα τα οποία αναφέρονται στα δεδομένα LiDAR είναι γεωμετρικά. Συνεπώς, προς αποφυγή εσφαλμένων εκτιμήσεων, το υψόμετρο της αποχής του γεωειδούς πρέπει να συνεκτιμάται όταν πραγματοποιείται ο έλεγχος για μη αποδεκτές μετρήσεις. Στην περίπτωση της παρούσης εργασίας, τα υψόμετρα του νέφους σημείων αναφέρονται στο ελλειψοειδές GRS 80 του γεωδαιτικού συστήματος WGS 84 (γεωμετρικά) και η αποχή του γεωειδούς στην περιοχή της Ν. Μήλου είναι περίπου 40 m. Με τον τρόπο αυτό, αν το μέγιστο ορθομετρικό υψόμετρο της περιοχής (όπως εκτιμάται από τους χάρτες της ΓΥΣ) είναι 254 m, τότε το μέγιστο αποδεκτό γεωμετρικό υψόμετρο που θα έπρεπε να παρουσιάζεται στο νέφος σημείων είναι 254 m + 40 m = 294 m. Τα σημεία τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερο υψόμετρο από αυτό είναι προφανώς μη αποδεκτές μετρήσεις και πρέπει να αφαιρεθούν από το νέφος σημείων, διαδικασία η οποία πραγματοποιείται κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων. Η παράλειψη αφαίρεσης τέτοιων σημείων θα δημιουργήσει ακίδες (spikes) κατά την εκτέλεση του τριγωνισμού για την παραγωγή επιφάνειας από το σύνολο των σημείων του νέφους εικ. 4-4. Παράλληλα, υπολογίζοντας τον αριθμό των σημείων τα οποία βρίσκονται εκτός του αποδεκτού υψομετρικού εύρους, δύναται να ελεγχθεί και κάποια τυχόν δυσλειτουργία του συστήματος. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο αριθμός των

μετρήσεων εκτός του αποδεκτού υψομετρικού εύρους θα μπορούσε να εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένος, σε αντίθεση με τον αριθμό των οπισθοσκεδάσεων από ιπτάμενα αντικείμενα, ο οποίος πρέπει να είναι ελάχιστος σε σχέση με το σύνολο των σημείων του νέφους. Υπολογίζοντας την κατανομή των σημείων του νέφους της περιοχής εργασίας (εικ. 4-5) στο εύρος των μετρημένων υψομέτρων, η παραπάνω θεώρηση επιβεβαιώνεται από τον μικρό αριθμό των σημείων με υψόμετρο μεγαλύτερο του μεγίστου της περιοχής.

Η κατανομή του συνόλου των σημείων του νέφους στις διάφορες κλάσεις (σύμφωνα με το πρότυπο .las της ASPRS) δίδεται παράλληλα με τον υπολογισμό των υπόλοιπων μεγεθών. Τα δεδομένα της παρούσης εργασίας δεν έχουν υποστεί σε αυτό το στάδιο καμία ταξινόμηση και συνεπώς το σύνολο των σημείων ανήκουν στην κλάση 1 (σημεία που δεν επιχειρήθηκε να ταξινομηθούν). Σε περίπτωση επεξεργασμένων δεδομένων, ο χρήστης δύναται να ελέγξει την κατανομή των σημείων στις διάφορες κλάσεις (ιστόγραμμα ταξινόμησης) και να εξαγάγει ακόμα και συμπεράσματα για το είδος της κάλυψης της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4-4: Δημιουργία ακίδων (spikes) στο τριγωνισμένο νέφος σημείων, λόγω ύπαρξης μη αποδεκτών μετρήσεων



Εικόνα 4-5: Ιστόγραμμα κατανομής σημείων του νέφους ανά υψόμετρο

4.1.4 Έλεγχος για συστηματικά σφάλματα, εικόνες dZ

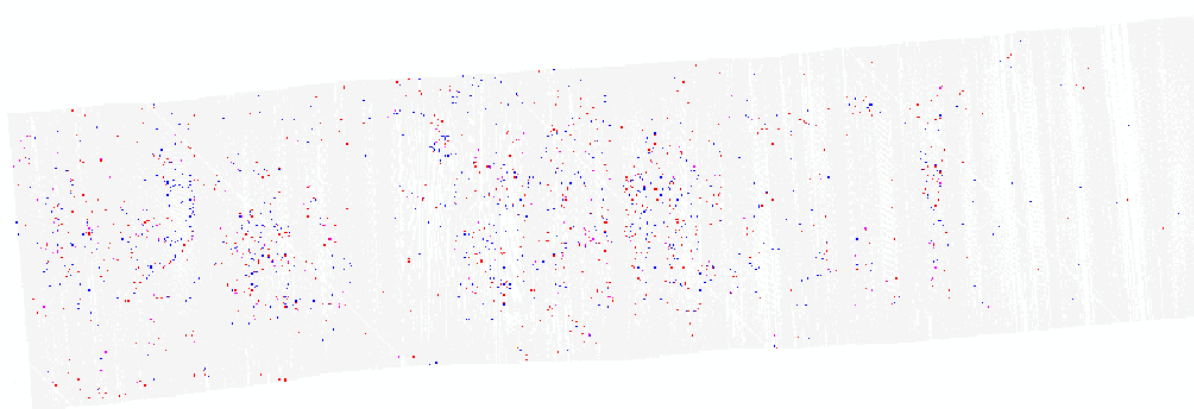
Μέρος της διαδικασίας διασφάλισης ποιότητας (QA) είναι και η σωστή βαθμονόμηση του συστήματος σάρωσης, προκειμένου να αναιρεθούν τα συστηματικά σφάλματα τα οποία προκαλούνται από την στροφή μεταξύ του πλαισίου αναφοράς του σαρωτή LiDAR και του INS. Η ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων στα δεδομένα LiDAR μπορεί να ελεγχθεί από τους χρήστες αυτών, χωρίς να υπάρχει πρόσβαση στις αρχικές μετρήσεις, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία αυτή ένα σημαντικό μέρος του ελέγχου εσωτερικής ποιότητας IQC.

Η πρακτική που ακολουθείται είναι η δημιουργία των εικόνων υψομετρικών διαφορών dZ. Πρόκειται για ψηφιδωτές (rater) εικόνες, που δημιουργούνται στα επικαλυπτόμενα τμήματα των λωρίδων σάρωσης, με σκοπό να ελεγχθούν οι υψομετρικές αποκλίσεις μεταξύ ίδιων (ή πολύ κοντινών) σημείων τα οποία έχουν μετρηθεί από δύο γειτονικές λωρίδες. Οι εικόνες dZ δημιουργούνται από ένα κάναβο στο επικαλυπτόμενο τμήμα, με μέγεθος εικονοστοιχείου που ορίζεται από το χρήστη. Για όσα σημεία της κάθε λωρίδας εμπίπτουν εντός του κάθε εικονοστοιχείου, υπολογίζεται ένα μέσο υψόμετρο. Συνεπώς, για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας dZ υπάρχουν υπολογισμένες δύο τιμές υψομέτρων, που αντιστοιχούν στα μέσα υψόμετρα των σημείων από την κάθε λωρίδα σάρωσης. Τα υψόμετρα αυτά αφαιρούνται και η διαφορά που προκύπτει συγκρίνεται με ένα δεύτερο μέγεθος, που ορίζεται από το χρήστη και αποτελεί την μέγιστη διαφορά που επιθυμεί να ελεγχθεί. Το εικονοστοιχείο της εικόνας dZ, χρωματίζεται με βάση την τιμή της διαφοράς αυτής, με χρώματα από μια προκαθορισμένη χρωματική παλέτα. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μιας εικόνας, επί της οποίας μπορεί οπτικά να αναγνωριστεί η συγκέντρωση ή μη, υψομετρικών αποκλίσεων οι οποίες στην ιδανική κατάσταση δεν θα έπρεπε να υπάρχουν. Η ύπαρξη απόλυτης ταύτισης μεταξύ των σημείων που έχουν μετρηθεί από γειτονικές λωρίδες σάρωσης, πρακτικά δεν μπορεί να επιτευχθεί ποτέ, οπότε μικρές συγκεντρώσεις υψομετρικών αποκλίσεων πρέπει να αναμένονται πάντα. Το ζητούμενο μέσα από αυτή την πρακτική, είναι να διαπιστωθεί ο βαθμός στον οποίο υφίστανται οι αποκλίσεις αυτές (οι οποίες οφείλονται σε συστηματικά σφάλματα λόγω βαθμονόμησης) και το κατά πόσο επηρεάζουν την ποιότητα των δεδομένων.

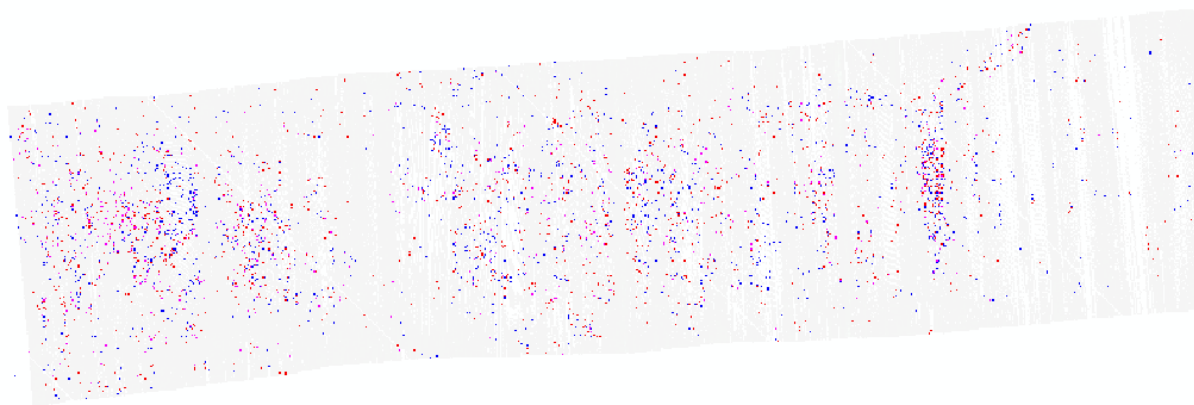
Για τη δημιουργία των εικόνων dZ, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος των δεδομένων της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LASTools και επί του επικαλυπτόμενου τμήματος των δύο κεντρικών λωρίδων, ελέγχθηκαν οι αποκλίσεις των υψομετρικών διαφορών για τρεις διαφορετικές τιμές του ορίου σύγκρισης. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε μια εικόνα dZ για αποκλίσεις μέχρι 1 m, μια για τιμή μέχρι 0,5 m και μια τρίτη για 0,25 m. Το συγκεκριμένο λογισμικό, χρησιμοποιεί μια χρωματική παλέτα μπλε-άσπρο-κόκκινο (με ενδιάμεσες αποχρώσεις αυτών) προκειμένου να χρωματίσει τα εικονοστοιχεία της εικόνας dZ τα οποία αντιστοιχούν σε τιμές υψομετρικής απόκλισης $-n$ προς 0 προς n κατ' αντιστοιχία. Η τιμή n αφορά το επιλεγμένο από το χρήστη όριο σύγκρισης και με τον τρόπο αυτό μια τιμή $n=5$ m θα

χρωμάτιζε μπλε τα εικονοστοιχεία που έχουν υπολογισμένη τιμή υψομετρικής διαφοράς $<-5\text{m}$, άσπρα τα εικονοστοιχεία με διαφορά 0m και κόκκινα τα εικονοστοιχεία με διαφορά $>5\text{m}$, χρησιμοποιώντας φυσικά και αποχρώσεις του μπλε και του κόκκινου για τις ενδιάμεσες τιμές.

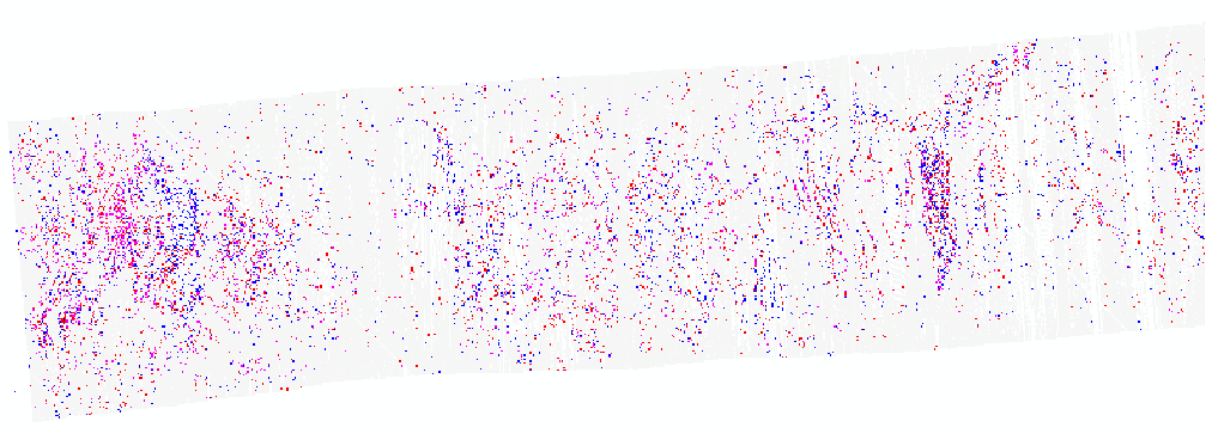
Οι εικόνες dZ που παράχθηκαν για τα δεδομένα της εργασίας (εικ 4-6, 4-7, 4-8), δείχνουν πολύ χαμηλή συγκέντρωση εικονοστοιχείων με διαφορά μεγαλύτερη του 1 m κατ' απόλυτη τιμή, εξίσου χαμηλή συγκέντρωση διαφορών έως $0,5\text{ m}$ και ελαφρώς αυξημένη συγκέντρωση για $0,25\text{ m}$ διαφορά. Μπορούμε να συμπεράνουμε συνεπώς, κατά τα όσα αναφέρθηκαν προτίστως, ότι τα δεδομένα παρουσιάζουν καλή εσωτερική ποιότητα, χωρίς υπολογίσιμα εναπομείναντα συστηματικά σφάλματα. Παράλληλα, η κατανομή των χρωματιστών εικονοστοιχείων φαίνεται να είναι τυχαία και στις τρεις εικόνες dZ, χωρίς να δημιουργεί επαναλαμβανόμενα μοτίβα, γεγονός που θα φανέρωνε κάποια συστηματικότητα στην κατανομή των υψομετρικών αποκλίσεων.



Εικόνα 4-6: Εικόνα υψομετρικών διαφορών απόλυτης τιμής 1m



Εικόνα 4-7: Εικόνα υψομετρικών διαφορών απόλυτης τιμής $0,5\text{m}$



Εικόνα 4-8: Εικόνα υψομετρικών διαφορών απόλυτης τιμής 0,25m

4.2 Προεπεξεργασία δεδομένων

Έχοντας ολοκληρώσει την αξιολόγηση των δεδομένων από πλευράς εσωτερικής ποιότητας, το μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας συνεχίζει με την προεπεξεργασία των δεδομένων. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται κάποιοι χειρισμοί επί των δεδομένων, οι οποίοι αναλύονται ξεχωριστά για λόγους πληρότητας της εργασίας και οι οποίοι έχουν ως σκοπό να διευκολύνουν την μετέπειτα επεξεργασία.

Το χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό σύστημα στο οποίο αναφέρονται τα δεδομένα πρέπει να διευκρινιστεί στο header του αρχείου .las, καθ' όσον από τα περισσότερα λογισμικά ζητείται προκειμένου να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε επεξεργασία αυτών. Τα δεδομένα της παρούσης εργασίας βρέθηκε, μετά από έλεγχο των συντεταγμένων των σημείων, ότι αναφέρονται στην ζώνη 35N της εγκάρσιας μερκατορικής προβολής του παγκόσμιου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς (Z35N UTM WGS84) και το στοιχείο αυτό καταχωρήθηκε στα αρχεία .las που αντιπροσωπεύουν τις λωρίδες σάρωσης.

Ακολούθησε η ενοποίηση (merging) των λωρίδων σάρωσης σε ένα αρχείο, δεδομένου ότι μετά τον έλεγχο των σφαλμάτων στα επικαλυπτόμενα τμήματα αυτών, δεν υφίσταται πλέον ανάγκη για την ταυτόχρονη ύπαρξη του νέφους της περιοχής εργασίας σε πολλά αρχεία. Σε ιδιαίτερα μεγάλα νέφη σημείων, η ενοποίηση των λωρίδων σάρωσης δημιουργεί πολύ μεγάλα και δύσχρηστα αρχεία δεδομένων (για την περιοχή εργασίας, το νέφος των 54812045 σημείων αντιστοιχεί σε ένα αρχείο .las όγκου 1,4 Gb) γεγονός όμως που είναι απαραίτητο βήμα προκειμένου να δημιουργηθεί η διανομή αυτών η οποία θα περιγραφεί τη συνέχεια. Πρέπει να τονιστεί, ότι η ενοποίηση των λωρίδων σάρωσης, απλά προσθέτει όλα τα σημεία από το κάθε αρχείο εισόδου χωρίς να εφαρμόζει οποιαδήποτε διαδικασία επιλογής και αφαίρεσης σημείων και συνεπώς το σύνολο των σημείων στο τελικό αρχείο πρέπει να ισούται με το άθροισμα των σημείων των επιμέρους αρχείων που ενοποιούνται.

Επί του ενοποιημένου αρχείου μπορεί στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί μια επιλογή σημείων τα οποία βρίσκονται έξω από τα αποδεκτά υψομετρικά όρια, όπως αυτά

αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.1.3. Τα σημεία αυτά, τα οποία προσδιορίστηκαν με την εξαγωγή των στατιστικών από τα δεδομένα, αφαιρούνται από το νέφος σημείων ώστε να διορθωθούν τα σφάλματα από μη αποδεκτές μετρήσεις λόγω ιπτάμενων αντικειμένων.

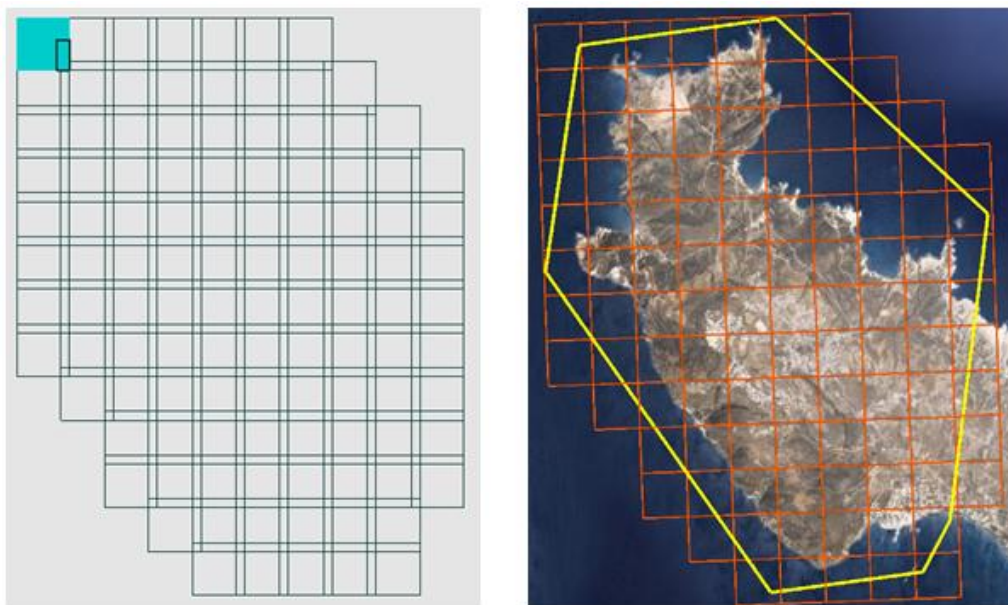
4.2.1 Δημιουργία διανομής

Η διανομή των δεδομένων συνιστά μια δομημένη, χωρικά συνεχή (χωρίς κενά) κατανομή των σημείων του νέφους σε μικρότερα αρχεία, καθένα από τα οποία περιέχει ένα διαχειρίσιμο (λόγω όγκου) αριθμό αυτών. Αποτελεί δε, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πρακτική με σκοπό την αύξηση του ελέγχου τόσο επί των ίδιων των δεδομένων όσο και επί των παραγόμενων προϊόντων (§ 2.5). Το μέγεθος των τμημάτων της διανομής εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα των σημείων (για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων) και από το είδος και την συχνότητα εναλλαγής των καλύψεων γης της περιοχής (για διαφορετική παραμετροποίηση των αλγορίθμων φιλταρίσματος).

Η ακολουθούμενη πρακτική, αφορά τον καθορισμό του μεγέθους n για τη δημιουργία του κάθε $n \times n$ τμήματος της διανομής, τα οποία πρέπει να παρουσιάζουν ένα ποσοστό επικάλυψης. Συνήθως η επικάλυψη αυτή αρκεί να είναι 50 – 100 m από κάθε πλευρά των τμημάτων και αποσκοπεί στην αντιμετώπιση του φαινομένου της δημιουργίας παραμορφώσεων (artifacts) στα όρια των τμημάτων, κατά τη διαδικασία του φιλτραρίσματος. Με τον τρόπο αυτό, από κάθε τμήμα της διανομής μετά την επεξεργασία, κρατείται μόνο το ωφέλιμο μέρος αυτού, το οποίο εμπίπτει εντός των ορίων $n \times n$. Τα δεδομένα συνεχίζουν να παρουσιάζουν συνεχή χωρική κατανομή και τα παραγόμενα προϊόντα (π.χ. τμήματα ενός μεγάλης έκτασης DTM) ταιριάζουν απόλυτα μεταξύ τους ενώ είναι ταυτόχρονα ελεύθερα παραμορφώσεων λόγω της επεξεργασίας.

Η δημιουργία της διανομής πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό LASTools, σε 110 τμήματα διαστάσεων 500x500 m και με επικάλυψη 50 m (εικ. 4-9). Ο λόγος για τη δημιουργία τόσο μικρών τμημάτων, είναι ο εγγενής περιορισμός της δωρεάν έκδοσης του λογισμικού, η οποία παρουσιάζει όριο αριθμού σημείων που μπορούν να υποστούν ταυτόχρονη επεξεργασία. Η ομοιόμορφη τοπογραφία της περιοχής μελέτης, καθώς και η ήπιες εναλλαγές αστικού και φυσικού τοπίου, συνθέτουν μια περιοχή χωρίς ιδιαίτερα απότομες αλλαγές κλίσεων και με αρκετά μεγάλο βαθμό ομοιομορφίας. Συνεπώς, εάν δεν υφίστατο ο περιορισμός του χρησιμοποιούμενου λογισμικού, ο βέλτιστος τρόπος διανομής θα ήταν ενδεχομένως σε τμήματα 1000x1000 m, τα οποία για την πυκνότητα νέφους των 2,5 σημείων/m² δεν θα επιβάρυναν τις υπολογιστικές διαδικασίες, ενώ θα αποτελούσαν μικρό αριθμό αρχείων για επεξεργασία.

Τα footprints των tiles δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον GIS και υπερτέθηκαν σε υπόβαθρο του Google Earth για έλεγχο της πλήρους κάλυψης της περιοχής.



Εικόνα 4-9: Η διανομή των δεδομένων με την επικάλυψη 50 m και το ωφέλιμο τμήμα της διανομής επί υποβάθρου Google Earth

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ LiDAR

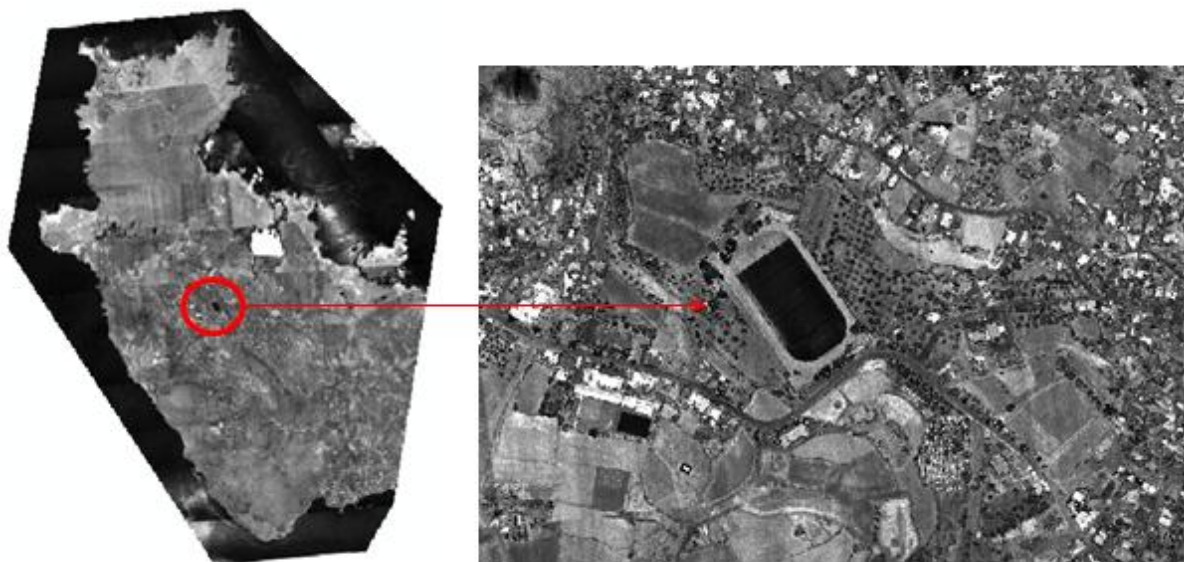
5.1 Παραγωγή εικόνας έντασης

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκαν οι διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων και ολοκληρώθηκαν οι απαραίτητες προπαρασκευαστικές εργασίες, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κύρια επεξεργασία αυτών για την παραγωγή προϊόντων. Ως πρώτο προϊόν εξάγεται η εικόνα της έντασης από το νέφος σημείων, η οποία αποτελεί ένα ψηφιδωτό (raster) αρχείο, με διάσταση εικονοστοιχείου η οποία ορίζεται από το χρήστη. Η δε τιμή του κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας έντασης, υπολογίζεται από τις καταγεγραμμένες τιμές έντασης όλων των σημείων του νέφους τα οποία εμπίπτουν εντός αυτών. Μπορεί με τον τρόπο αυτό να υπολογιστεί η μέση τιμή των εντάσεων των σημείων ενός εικονοστοιχείου ή να χρησιμοποιηθεί η μέγιστη ή η ελάχιστη τιμή εξ' αυτών. Με βάση αυτή την τιμή, η οποία κανονικοποιείται σε μια 8-bit παγχρωματική παλέτα (τιμές 0-255) τα αντικείμενα στην περιοχή σάρωσης χρωματίζονται στις διάφορες αποχρώσεις του γκρι, ανάλογα με την ενέργεια του παλμού laser την οποία οπισθοσκεδάζουν. Στην εικόνα έντασης συνεπώς, με λευκούς τόνους απεικονίζονται αντικείμενα που οπισθοσκεδάζουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας (π.χ. τσιμέντο), ενώ με μαύρους τόνους τα αντικείμενα τα οποία οπισθοσκεδάζουν μικρή ή καθόλου ποσότητα ενέργειας (π.χ. νερό).

Η εικόνα της έντασης χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές ως εικονιστικό υπόβαθρο, όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ορθοφωτογραφία, με σκοπό τον έλεγχο των εργασιών μέσω διαδικασιών επίθεσης σε περιβάλλον GIS. Αποτελεί δε μια εικόνα η οποία είναι ορθή προβολή, δεδομένου ότι προέρχεται απ' ευθείας από το νέφος σημείων και ως εκ τούτου δεν χρειάζεται καμία πρόσθετη διαδικασία γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής για τη διόρθωση της. Επιπλέον, η οριζοντιογραφική ακρίβεια της εικόνας έντασης είναι ταυτόσημη αυτής του νέφους σημείων, που υπό καλές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος GNSS και ακριβούς προσδιορισμού του σταθερού σημείου του σταθμού εδάφους ως προς το οποίο πραγματοποιείται η διαφορική επίλυση, μπορεί να είναι καλύτερη των 20 cm. Η εικόνα έντασης πρέπει να ταυτίζεται οριζοντιογραφικά και με οποιοδήποτε άλλο προϊόν παραχθεί από το νέφος σημείων (DSM, DTM).

Το υπόβαθρο που δημιουργείται με την παραγωγή της εικόνας έντασης δύναται να χρησιμοποιηθεί και για την οπτική αναγνώριση αντικειμένων, διαδικασία όμως που είναι ανάλογη της πυκνότητας των σημείων του νέφους. Εικόνες έντασης από νέφη υψηλής πυκνότητας (π.χ. 10 σημείων/m²) εμφανίζουν χαρακτηριστικά υψηλότερη ευκρίνεια από αντίστοιχες με χαμηλότερη πυκνότητα νεφών (2-4 σημείων/m²) επί των οποίων η διάκριση λεπτομερειών δεν είναι εφικτή. Για το λόγο αυτό, ο ρόλος της εικόνας έντασης είναι κυρίως βοηθητικός και αποσκοπεί στην οπτικοποίηση του πεδίου εργασίας με ένα εύκολα διαχειρίσιμο και ευέλικτο raster αρχείο.

Η παραγωγή της εικόνας έντασης για την περιοχή εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Global Mapper, δεδομένου του περιορισμού της ελεύθερης έκδοσης του λογισμικού LasTools. Δεδομένου ότι η μέση απόσταση μεταξύ σημείων στο νέφος είναι 0,63 m, η χωρική ανάλυση στην εικόνα έντασης επιλέγεται να είναι 1m, με καθορισμό αντίστοιχης διάστασης εδαφοψηφίδας



Εικόνα 5-1: Εικόνα έντασης χωρικής ανάλυσης 1m και λεπτομέρεια αυτής

5.2 Φιλτράρισμα νέφους σημείων (ground - non ground)

Με τον όρο φιλτράρισμα (filtering) αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία η τεχνική με την οποία από το σύνολο των σημείων ενός νέφους, προσδιορίζονται τα σημεία εκείνα τα οποία αφορούν μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και όχι σε κάποιο υπέργειο φυσικό ή τεχνητό αντικείμενο. Σύμφωνα με τη θεώρηση των Meng X. et.al. (2010), οι μετρήσεις σημείων από το σύστημα LiDAR επηρεάζονται από τρεις συνιστώσες, οι οποίες είναι:

- ✓ Το έδαφος
- ✓ Τα υπέργεια του εδάφους αντικείμενα
- ✓ Ο θόρυβος.

Αν θεωρήσουμε ως M_{sensor} τις μετρήσεις από το σύστημα, ως E_{ground} το υψόμετρο του εδάφους, ως $E_{\text{non-ground}}$ το ύψος των υπέργειων αντικειμένων και ως M_{noise} τις ανεπιθύμητες μετρήσεις (λόγω θορύβου από το σύστημα, ιπτάμενα αντικείμενα κ.α.), τότε η σχέση με την οποία συνδέονται αυτές οι συνιστώσες είναι:

$$M_{\text{sensor}} = E_{\text{ground}} + E_{\text{non-ground}} + M_{\text{noise}} \quad (5.1)$$

Για να γίνει εφικτός ο διαχωρισμός των σημείων του εδάφους από τα σημεία των υπέργειων αντικειμένων, κανείς πρέπει να κατανοήσει τα φυσικά χαρακτηριστικά της κάθε μιας κατηγορίας σημείων, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο διαφοροποιούνται (Meng X. et.al.). Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- ✓ Ελάχιστα υψόμετρα: Γενικά, είναι λογικό ότι τα σημεία που ανήκουν στο έδαφος θα παρουσιάζουν τα μικρότερα υψόμετρα, σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία σε μια μικρή γειτονιά αναζήτησης. Βάση του χαρακτηριστικού αυτού, πολλοί αλγόριθμοι φιλτραρίσματος αναζητούν σημεία εκκίνησης, από τα οποία θα αρχικοποιηθεί η διαδικασία αναζήτησης και διαχωρισμού.
- ✓ Κλίση της επιφάνειας που ορίζουν σημεία του εδάφους: Η επιφανειακή κλίση είναι γενικά μικρότερη μεταξύ γειτονικών σημείων του εδάφους, από ότι μεταξύ σημείων του εδάφους και υπέργειων σημείων. Με τον τρόπο αυτό, πολλοί αλγόριθμοι φιλτραρίσματος, εκκινώντας από κάποιο σημείο το οποίο θεωρείται ότι ανήκει στο έδαφος, υπολογίζουν τις κλίσεις προς τα γειτονικά σημεία. Οι κλίσεις αυτές συγκρίνονται με ένα προκαθορισμένο κατώφλι και όσα σημεία παρουσιάζουν τιμή κλίσης μικρότερη του κατωφλίου ταξινομούνται ως επίγεια, ενώ όσα παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή κλίσης ταξινομούνται ως υπέργεια σημεία. Η τιμή κατωφλίου για την κλίση μεταξύ σημείων είναι αυτή που προκαλεί το διαχωρισμό των σημείων και διαφέρει ανάλογα με το είδος κάλυψης που παρουσιάζει η περιοχή εργασίας. Έτσι, σχετικά επίπεδες αστικές περιοχές μπορούν να παρουσιάζουν ένα μικρό κατώφλι κλίσης (π.χ. 30°), ενώ ορεινές περιοχές με έντονη τοπογραφία και υψηλή βλάστηση απαιτούν μεγαλύτερη τιμή κατωφλίου. Λόγω των εντονότερων κλίσεων που παρουσιάζουν.
- ✓ Υψομετρική διαφορά: Γενικά η υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων του εδάφους είναι μικρές, για μια μικρή γειτονιά αναζήτησης, ενώ οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ επίγειων και υπέργειων σημείων είναι πιθανότατα κατά πολύ μεγαλύτερες. Με τον τρόπο αυτό, σημεία τα οποία παρουσιάζουν υψομετρική διαφορά μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο όριο κατωφλίου από ένα αρχικό σημείο (που θεωρείται ως επίγειο σημείο), ταξινομούνται ως υπέργεια, ενώ κατ' αντιστοιχία μικρότερη τιμή υψομετρικής διαφοράς από την τιμή κατωφλίου ταξινομεί το σημείο ως επίγειο.
- ✓ Ομογένεια της επιφάνειας του εδάφους: Γενικά πολλοί αλγόριθμοι βασίζονται σε μορφολογικά χαρακτηριστικά προκειμένου να διαχωρίσουν τα επίγεια από τα υπέργεια σημεία. Τα μορφολογικά φίλτρα (όπως χαρακτηριστικά ονομάζονται οι αλγόριθμοι αυτοί), εξετάζουν την υφή μικρών περιοχών και βασίζονται στο γεγονός ότι γενικά το έδαφος παρουσιάζει συνέχεια και ομαλή υφή, σε αντίθεση π.χ. με μια συστάδα δέντρων, η οποία παρουσιάζει εντονότερη υφή.

Η διαδικασία φιλτραρίσματος του νέφους σημείων γενικά δυσχεραίνει όσο ποιο σύνθετη γίνεται η περιοχή εργασίας από άποψη κάλυψης γης και τοπογραφίας. Με τον τρόπο αυτό, περιοχές εργασίας στις οποίες εναλλάσσονται δασικές ή αγροτικές εκτάσεις με έντονο αστικό ιστό, ενώ το έδαφος είναι ιδιαίτερα ορεινό, αναμένονται να

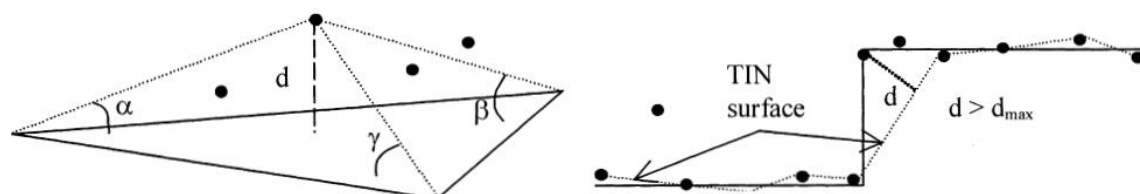
παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη δυσκολία στο διαχωρισμό των επίγειων από τα υπέργεια σημεία. Η αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών πραγματοποιείται με κατάτμηση του συνόλου της περιοχής εργασίας σε τμήματα μιας διανομής (§ 4.2.1), επί των οποίων πρέπει να επιχειρηθεί να υπάρχει όσο το δυνατόν ποιο ομοιόμορφη κάλυψη γης. Η πρακτική αυτή οδηγεί σε σχετική ομοιογένεια του κάθε τμήματος, υποβοηθώντας τους αλγόριθμους φιλτραρίσματος να ελαττώσουν τα σφάλματα ταξινόμησης εξαιτίας των προαναφερθέντων παραγόντων.

Σύμφωνα με τους Meng X. et.al. 2010, οι συχνότερα συναντώμενες κατηγορίες σημείων υπέργειων αντικειμένων που παρουσιάζουν δυσχέρεια στον διαχωρισμό τους από τα επίγεια σημεία, είναι:

- ✓ Οι θάμνοι και ιδιαίτερα αυτοί με ύψος κάτω από 1 m, διότι παρουσιάζουν μικρές κλίσεις και υψομετρικές διαφορές από τα επίγεια σημεία.
- ✓ Μικρά τοιχεία διότι παρουσιάζουν μικρές κλίσεις και υψομετρικές διαφορές από τα επίγεια σημεία.
- ✓ Γέφυρες, διότι παρουσιάζουν μικρές κλίσεις και υψομετρικές διαφορές από τα επίγεια σημεία και επιπλέον συνδέονται με πολύ ομαλό τρόπο με το έδαφος.
- ✓ Κτήρια με διαφορετικό σχήμα και μέγεθος, διότι οι περισσότεροι αλγόριθμοι λειτουργούν με ένα χωρικό φίλτρο διαστάσεων $n \times n$, το οποίο μετακινείται επί του νέφους και συνεπώς εάν η διάσταση του φίλτρου είναι μικρότερη από τη διάσταση κάποιου κτηρίου, τότε το φίλτρο δύναται να περιέχεται εξ' ολοκλήρου εντός της περιμέτρου του κτηρίου, με αποτέλεσμα τα σημεία αυτού να μην αναγνωρίζονται ως υπέργεια. Για το λόγο αυτό, οι διαστάσεις του φίλτρου πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερες από το μεγαλύτερο κτήριο το οποίο υφίσταται στην περιοχή εργασίας.
- ✓ Περιοχές με έντονες κλίσεις, όπως είναι οι όχθες ποταμών, οι απότομες πλαγιές σε ορεινές περιοχές, τα γεωλογικά κάθετα ρήγματα κ.α. Όταν χρησιμοποιούνται φίλτρα κλίσεων για τον διαχωρισμό των επίγειων από τα υπέργεια σημεία σε τέτοιες περιοχές, η επιλογή του κατάλληλου καταωφλίου κλίσης για την επίτευξη του διαχωρισμού είναι ιδιαίτερα δύσκολη και τα σφάλματα τα οποία παρουσιάζονται είναι σημαντικά.

Για το φιλτράρισμα του νέφους σημείων της παρούσης εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LASTools, το οποίο ενσωματώνει παραμετροποιήσιμο αλγόριθμο προσδιορισμού των σημείων της επιφάνειας του εδάφους, με βάση τη διαδικασία της σταδιακής πύκνωσης TIN (progressive TIN densification). Η συγκεκριμένη μέθοδος προτάθηκε αρχικά από τον Peter Axelsson το 2000 και βασίζεται σε μια διαδικασία η οποία εκκινεί από ένα μικρό αριθμό σημείων σε μια μικρή γειτονιά του νέφους και τα οποία ονομάζονται seed data. Τα σημεία αυτά, είναι συνήθως τα σημεία με τα χαμηλότερα υψόμετρα στην γειτονιά και ορίζουν μια αρχική προσέγγιση της επιφάνειας του εδάφους. Ένα δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN) δημιουργείται με βάση τα σημεία αυτά και το οποίο επεκτείνεται κάθε φορά που νέα σημεία ταξινομούνται από τον αλγόριθμο ως επίγεια και προστίθενται στα προηγούμενα. Κάθε νέο σημείο, προκειμένου να ταξινομηθεί, εξετάζεται ως προς την απόστασή του από την επιφάνεια που ορίζει το TIN, αλλά και ως προς τις γωνίες (κλίσεις) που σχηματίζει με τα σημεία

στην κορυφή του τριγώνου πάνω από το οποίο υφίσταται (εικ. 5-2). Ο αλγόριθμος προϋπολογίζει τιμές κατωφλίων, για τα μεγέθη αυτά, οι οποίες προέρχονται από εξαγωγή ενδιάμεσων (median) τιμών από τα ιστογράμματα κατανομής των σημείων για ολόκληρη την περιοχή και με τις οποίες συγκρίνει τις αντίστοιχες υπολογιζόμενες για κάθε νέο σημείο. Μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, το TIN σταδιακά επεκτείνεται, δημιουργώντας τελικώς μια προσέγγιση της επιφάνειας του εδάφους, ταξινομώντας τα σημεία του TIN ως επίγεια (ground) ενώ τα υπόλοιπα ως υπέργεια (non-ground). Τα επίγεια σημεία ταξινομούνται στην προκαθορισμένη κλάση 2 του προτύπου .las, ενώ τα υπόλοιπα σημεία παραμένουν στην κλάση 1 ως αταξινόμητα.



Εικόνα 5-2: Υπολογισμός παραμέτρων σύγκρισης νέου σημείου και σταδιακή επέκταση του TIN (Axelsson)

Ο αλγόριθμος τον οποίο ενσωματώνει το λογισμικό LASTools, απαιτεί αρχικό προσδιορισμό του είδους της κάλυψης της περιοχής μελέτης, προκειμένου να διαμορφώσει ανάλογα το παράθυρο αναζήτησης nxn βάση του οποίου εξετάζονται και φιλτράρονται τα σημεία του νέφους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εάν οι διαστάσεις του παραθύρου αναζήτησης είναι μικρότερες από τις διαστάσεις ενός κτηρίου, τότε δημιουργούνται σφάλματα ταξινόμησης λόγω του ότι σε κάποια συγκεκριμένη θέση, όπου το κτήριο εμπεριέχεται εξ ολοκλήρου εντός του παραθύρου αναζήτησης, τα σημεία που το αποτελούν δεν θα αναγνωριστούν. Στη βάση της λογικής αυτής, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως προκαθορισμένη τιμή της διάστασης του παραθύρου αναζήτησης τα 5m, ενώ αν η περιοχή εργασίας καλύπτεται από μικρή πόλη (town) και με σχετικά επίπεδη τοπογραφία, η διάσταση αυξάνεται σε 10 m. Για μεγαλύτερες πόλεις (cities) και για περιοχές με μεγάλες αποθήκες η διάσταση του παραθύρου αυξάνεται στα 25 m, ενώ στην περίπτωση μεγαλουπόλεων (metro) η διάσταση γίνεται 35 m.

Η περιοχή εργασίας στη Ν. Μήλο, παρουσιάζει εναλλαγή γυμνού εδάφους και αστικού ιστού, με μεταβαλλόμενη τοπογραφία και με χαμηλή σποραδική βλάστηση, ενώ ο αστικός ιστός αποτελείται από σχετικά μικρά κτήρια. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε διαλογή των 110 τμημάτων της διανομής και τα 14 τμήματα αυτής τα οποία εμπεριείχαν τον αστικό ιστό, φιλτραρίστηκαν με διάσταση του παραθύρου αναζήτησης τα 10 m, ενώ τα υπόλοιπα 96 με διάσταση τα 5 m. Το αποτέλεσμα ήταν ο διαχωρισμός των 54812045 σημείων του νέφους, σε 38354004 επίγεια σημεία (class 2) και 16458041 υπέργεια αταξινόμητα σημεία (class 1).

5.3 Παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανείας και εδάφους (DSM - DTM)

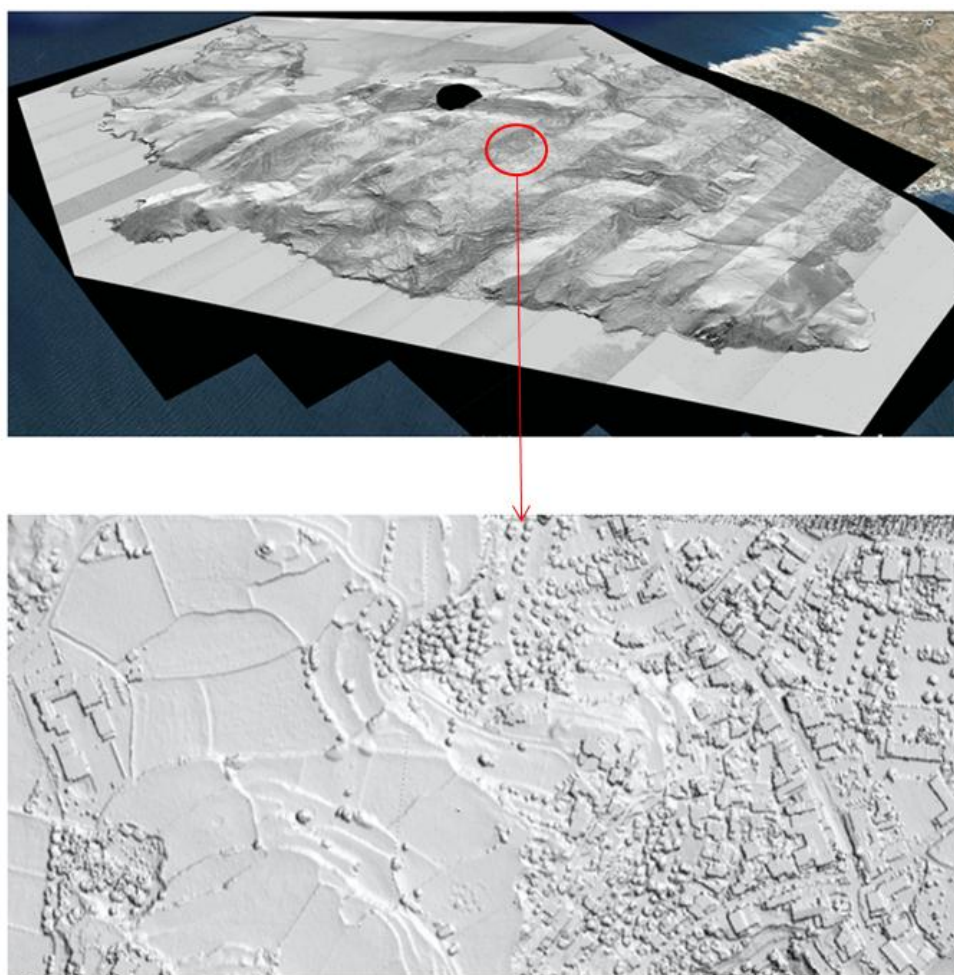
Το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας, είναι μια 2,5 d ψηφιακή αναπαράσταση της επιφάνειας η οποία διαμορφώνεται τόσο από το έδαφος, όσο και από τα αντικείμενα τα οποία υφίστανται υπεράνω αυτού. Επί του DSM, κανείς μπορεί να αναγνωρίσει κτήρια, δέντρα και γενικώς πολλά υπέργεια αντικείμενα, όταν αυτό αναπαρασταθεί σε περιβάλλον GIS με κατάλληλο εφέ σκίασης (hillshading). Η συγκεκριμένη τεχνική αναπαράστασης, προσομοιάζει το αποτέλεσμα της πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός υπό κάποια γωνία και δημιουργεί ένα τρισδιάστατο οπτικό αποτέλεσμα το οποίο είναι εύκολα αναγνωρίσιμο από τον άνθρωπο χειριστή.

Ένα DSM μπορεί να αποδοθεί σε πολλές μορφές με την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη να είναι η ψηφιδωτή (raster) αναπαράσταση. Για τη δημιουργία του, χρησιμοποιούνται μόνο τα σημεία εκείνα του νέφους, τα οποία αποτελούν πρώτες επιστροφές. Ο λόγος για το διαχωρισμό αυτό, είναι το γεγονός ότι ένα DSM αποτελεί κατά κάποιο τρόπο μια «κάτοψη» της περιοχής εργασίας και συνεπώς από κάθε παλμό πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο το τμήμα εκείνο που οπισθοσκεδάστηκε πρώτο. Έστω για παράδειγμα ένας παλμός ο οποίος προσπίπτει αρχικά στην κορυφή ενός δέντρου, ενώ τμήμα αυτού οπισθοσκεδάζεται διαδοχικά από χαμηλότερα τμήματα του ίδιου δέντρου καθώς και από το έδαφος στην βάση του. Θα ήταν λάθος να δημιουργηθεί ένα DSM με χρήση όλων των επιστροφών, καθώς αν κάποιος παρατηρούσε την περιοχή από μια αεροφωτογραφία, σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να διακρίνει το έδαφος στη βάση ή ακόμα και τα χαμηλότερα σημεία ενός δέντρου. Θα μπορούσε να διακρίνει μόνο τον θόλο των δέντρων (canopy) ο οποίος σχηματίζει και την επιφάνεια του μοντέλου στο σημείο αυτό.

Για τη δημιουργία του raster του DSM, ο χρήστης ορίζει το επιθυμητό μέγεθος εδαφοψηφίδας, με βάση το οποίο δημιουργείται ένας κανάβος με κανονικό σχήμα και κατάλληλες διαστάσεις ώστε να περικλείει την περιοχή εντός της οποίας υφίστανται δεδομένα LiDAR. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα υψόμετρα στις κορυφές του κανάβου, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου και με την χρήση διαφόρων τεχνικών παρεμβολής και γεωστατιστικής. Η πιο απλή προσέγγιση είναι ο υπολογισμός της τιμής του υψομέτρου για κάθε εικονοστοιχείο του DSM, ως ο μέσος όρος των υψομέτρων όλων των σημείων του νέφους τα οποία εμπίπτουν εντός αυτού. Τελικώς, οι τιμές υψομέτρων για κάθε εικονοστοιχείο ανάγονται σε μια κλίμακα 8-bit απεικόνισης (τιμές 0-255) και απεικονίζονται με βάση μιας παλέτας αποχρώσεων της κλίμακας του γκρι.

Για τη δημιουργία του DSM στην περιοχή εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LASTools, το οποίο δημιουργεί το raster του DSM αφού πρώτα υπολογίσει ένα δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN) με την εκτέλεση τριγωνισμού Delaunay. Για κάθε εικονοστοιχείο του DSM, με γνωστές τις συντεταγμένες x,y, ο αλγόριθμος ανάγεται για

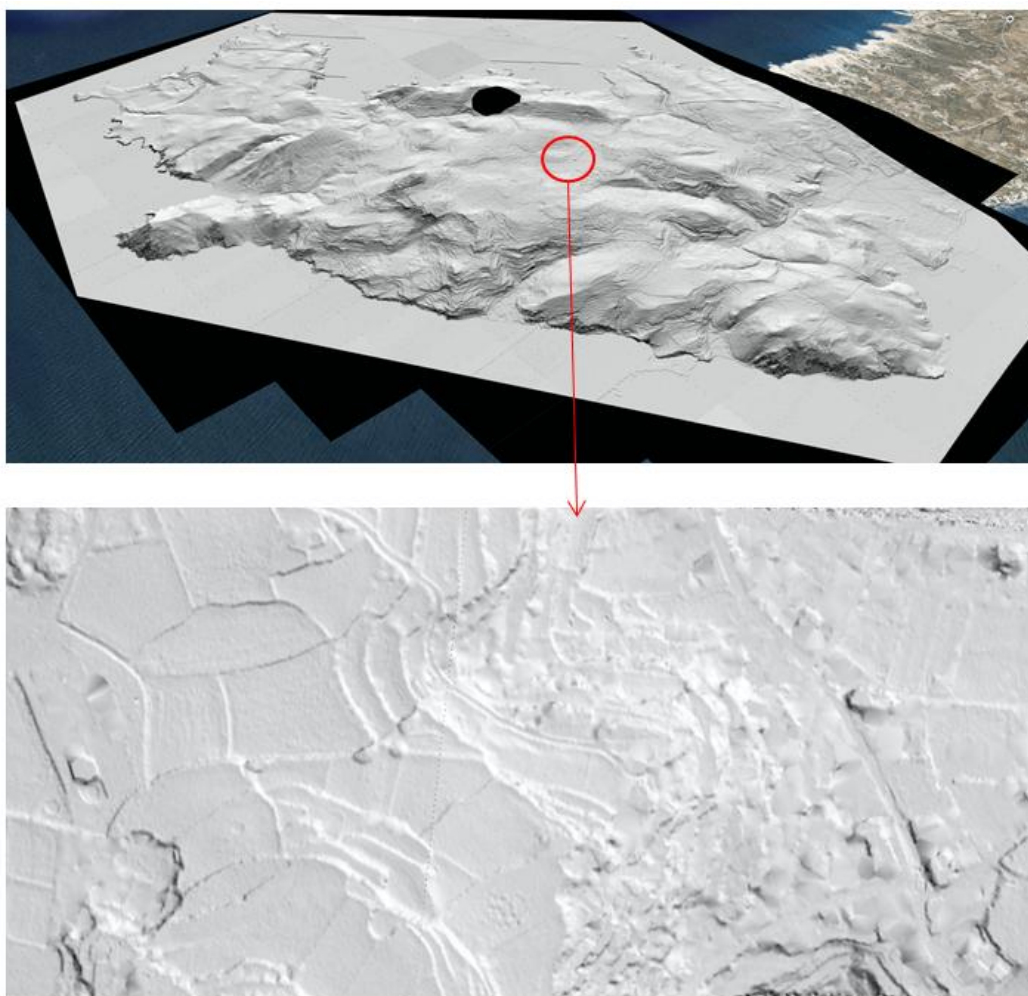
τις ίδιες συντεταγμένες, εντός κάποιου τριγώνου στο TIN και η τιμή υψομέτρου υπολογίζεται με την εκτέλεση γραμμικής παρεμβολής σε αυτό. Οι πρώτες επιστροφές, βάσει των οποίων δημιουργήθηκε το DSM, είναι 54385887 σημεία εκ συνόλου 54812045. Λόγω της μέσης απόστασης 0,63 m μεταξύ των σημείων του νέφους, επιλέχθηκε μέγεθος εδαφοψηφίδας 1 m και το DSM δημιουργήθηκε σε μορφότυπο .tif, εντός των ορίων της διανομής, αποκλείοντας το τμήμα του buffer των 50 m. Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο από 110 τέλεια εφαπτόμενων raster αρχείων, διαστάσεων 500x500 m, τα οποία απεικονιζόμενα με εφέ σκίασης επί του Google Earth παρατίθενται στην εικ. 5-3.



Εικόνα 5-3: DSM στην περιοχή μελέτης επί υποβάθρου Google Earth και λεπτομέρεια αυτού

Για την παραγωγή του DTM, απαιτείται η αφαίρεση όλων των υπέργειων αντικειμένων (βλάστηση, κτήρια, κατασκευές κ.α.) από το DSM που κατασκευάστηκε πρωτίστως, ώστε να δημιουργηθεί η επιφάνεια εκείνη η οποία περιγράφει την τοπογραφία της περιοχής. Το DTM ως προϊόν, παράγεται με συναφείς διαδικασίες με αυτές που περιγράφηκαν κατά την εξαγωγή του DSM, διαφοροποιείται όμως ως προς τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται. Σε αντίθεση με την χρήση των πρώτων επιστροφών για την παραγωγή του DSM, το DTM εξάγεται μόνο με την χρήση των σημείων τα οποία έχουν χαρακτηριστεί ως επίγεια (ground) κατά την διαδικασία του φιλτραρίσματος (§5.2). Το

σύνολο των επίγειων σημείων βρίσκονται ήδη ταξινομημένα στην κλάση 2 του προτύπου .las και συνεπώς η εκμετάλλευσή τους πραγματοποιείται με μια απλή διαδικασία επιλογής. Το DTM της περιοχής εργασίας εξάγεται με τη χρήση του λογισμικού LASTools, και η δημιουργία επιφάνειας πραγματοποιείται κρατώντας μόνο τα σημεία της κλάσης 2, ενώ ακολουθούνται οι ίδιες διαδικασίες τριγωνισμού Delaunay και γραμμικής παρεμβολής που περιγράφηκαν προτίστως. Το μορφότυπο εξαγωγής επιλέγεται να είναι πάλι το .tif και δημιουργούνται 110 τμήματα διανομής για το μοντέλο όλης της περιοχής εργασίας, με μέγεθος εδαφοψηφίδας 1 m. Το τμήμα buffer 50 m του κάθε τμήματος της διανομής αποκόπτεται (για την αποφυγή των παραμορφώσεων στα όρια) και το αποτέλεσμα είναι 110 τέλεια εφαπτόμενα raster αρχεία διαστάσεων 500x500 m. Απεικονίζοντας πάλι τα τμήματα της διανομής σε υπόβαθρο Google Earth και για την ίδια έκταση με αυτή της εικόνας 5-3 (για λόγους σύγκρισης), λαμβάνονται τα αποτελέσματα της εικόνας 5-4.



Εικόνα 5-4: DTM στην περιοχή μελέτης επί υποβάθρου Google Earth και λεπτομέρεια αυτού

5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει την περιγραφή των διαδικασιών για την εξαγωγή των κύριων προϊόντων από τα δεδομένα των εναέριων σαρωτών LiDAR, τα οποία είναι οι ψηφιακές αναπαραστάσεις της επιφάνειας (DSM) αλλά και του εδάφους (DTM) της περιοχής εργασίας, είναι απαραίτητη μια διαδικασία ελέγχου και αξιολόγησης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Η ποιότητα ενός DTM και ομοίως ενός DSM, εξαρτάται από δύο κυρίως συνιστώσες, που είναι η οριζοντιογραφική του ακρίβεια και η υψομετρική του ακρίβεια.

5.4.1 Οριζοντιογραφική ακρίβεια

Η οριζοντιογραφική ακρίβεια ενός DTM εξαρτάται άμεσα από την αντίστοιχη ακρίβεια των δεδομένων από τα οποία παράχθηκε. Κατά την διαδικασία της παραγωγής DTM με φωτογραμμετρικές μεθόδους, το DTM συλλέγεται με μετρήσεις επί των στερεομοντέλων τα οποία δημιουργούνται ύστερα από την επίλυση αεροτριγωνισμού. Η αβεβαιότητα στην επίλυση του αεροτριγωνισμού, η οποία σχετίζεται τόσο με την αβεβαιότητα των γεωδαιτικών συντεταγμένων των GCP, όσο και με την αβεβαιότητα μέτρησης των εικονοστυντεταγμένων των GCP και των tie point, δημιουργεί σφάλμα στην απόλυτη θέση επί του χρησιμοποιούμενου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς στην οποία «τοποθετείται» το κάθε στερεομοντέλο. Ως εκ τούτου, ένα DTM το οποίο συλλέγεται επί των στερεομοντέλων αυτών, κληρονομεί την παραπάνω οριζοντιογραφική αβεβαιότητα. Αντιθέτως, στην περίπτωση των DTM τα οποία παράγονται από δεδομένα σαρωτών LiDAR, δεν πραγματοποιείται τέτοια συσσώρευση σφαλμάτων λόγω ανθρώπινης παρέμβασης (σκοπεύσεις και μετρήσεις) και με τον τρόπο αυτό η μόνη πηγή οριζοντιογραφικής αβεβαιότητας η οποία υφίσταται είναι η απόλυτη οριζοντιογραφική ακρίβεια του νέφους σημείων.

Η οριζοντιογραφική ακρίβεια του νέφους σημείων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται τόσο με τις τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος (ορθότητας αποστασιόμετρου laser, γωνιακού κωδικοποιητή για μέτρηση γωνιών κατόπτρου, συστήματος GNSS, συστήματος INS κ.α.), όσο και με την ακρίβεια με την οποία έχουν επιτελεστεί οι διαδικασίες βαθμονόμησης του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, εφ' όσον πριν και μετά την αποστολή συλλογής δεδομένων LiDAR έχουν ακολουθηθεί οι διαδικασίες διασφάλισης και ελέγχου ποιότητας (QA/QC) της παραγράφου 2.3, η οριζοντιογραφική ακρίβεια ενός νέφους σημείων αναμένεται να είναι της τάξεως των λίγων δεκάδων εκατοστών και η οποία στην περίπτωση ενός καλά βαθμονομημένου συστήματος εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από την απόδοση του συστήματος GNSS. Ως εκ τούτου, το παραγόμενο DTM (ή DSM) από ένα νέφος σημείων, αναμένεται να παρουσιάζει την ίδια οριζοντιογραφική αβεβαιότητα.

Ο έλεγχος της οριζοντιογραφικής ακρίβειας ενός DTM, προερχόμενου από δεδομένα LiDAR, δεν δύναται να πραγματοποιηθεί άμεσα, δεδομένης της αδυναμίας

προσδιορισμού χαρακτηριστικών σημείων, των οποίων οι μετρούμενες συντεταγμένες μπορούν να διασταυρωθούν με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από ακριβείς μετρήσεις πεδίου. Με την ασφαλή παραδοχή όμως ότι το DTM και το DSM που προέρχονται από τα δεδομένα LiDAR είναι ταυτόσημα ως προς την απόλυτη οριζοντιογραφική θέση (λόγω πανομοιότυπων διαδικασιών εξαγωγής τους), είναι δυνατός ο έμμεσος έλεγχος του DTM, μέσω αντίστοιχου ελέγχου του DSM. Ο λόγος για τον οποίο το DSM πλεονεκτεί στην διαδικασία ελέγχου, είναι ότι περιλαμβάνει τα υπέργεια αντικείμενα (κτήρια, δέντρα, κατασκευές κ.α.), τα οποία δύναται να απεικονίζονται με ικανοποιητική λεπτομέρεια όταν χρησιμοποιείται εφέ σκίασης (hillshade). Ο βαθμός λεπτομέρειας φυσικά, είναι συνάρτηση της πυκνότητας των σημείων του νέφους και συνεπώς για νέφη μικρών πυκνοτήτων ο αντίστοιχος έλεγχος ενέχει αρκετό βαθμό αβεβαιότητας, λόγω της δυσχέρειας στον ακριβή προσδιορισμό κάποιου μεμονωμένου χαρακτηριστικού σημείου (π.χ. γωνία κτηρίου). Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, ένας χονδρικός ποιοτικός οριζοντιογραφικός έλεγχος δύναται να πραγματοποιηθεί, με την επίθεση επίγεια μετρημένων σημείων επί του DSM, σε περιβάλλον GIS.

Κατά την εκπόνηση της παρούσης εργασίας, δεν υπήρξε διαθεσιμότητα κατάλληλων επίγειων δεδομένων ελέγχου εντός της περιοχής εργασίας στη Ν. Μήλο, εκτός ενός αριθμού τριγωνομετρικών σημείων της ΓΥΣ τα οποία όμως δεν ήταν δυνατό να αναγνωρισθούν επί του σκιασμένου DSM και ως εκ τούτου ο παραπάνω έλεγχος δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί. Πραγματοποιήθηκε εν τούτοις μια σύγκριση της οριζοντιογραφικής θέσης του raster του DSM και της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας κλίμακας 1:5.000 του Εθνικού Κτηματολογίου με την υπέρθεση τους σε περιβάλλον GIS. Στο στάδιο αυτό διαπιστώθηκε οπτικά μια μετάθεση μεταξύ των δύο raster όπως φαίνεται στην εικόνα 5-5.



Εικόνα 5-5: Υπέρθθεση DSM επί της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε.

Για την ποσοτικοποίηση της μετάθεσης μεταξύ του DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολογίου Α.Ε., αναγνωρίστηκαν και μετρήθηκαν οι συντεταγμένες 10 σημείων και στα δύο υπόβαθρα. Το συνολικό σφάλμα μεταξύ των δύο υποβάθρων, δύναται να

οφείλεται τόσο σε τυχαία σφάλματα, όσο και σε συστηματικά. Υπολογίζοντας την μέση μετάθεση $\overline{\Delta s}$ από τις μέσες τιμές των μεταθέσεων κατά τους άξονες X και Y (σχέση 5.1), γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη (ή μη) συστηματικών σφαλμάτων, δεδομένου ότι μια τιμή του μέσου όρου κοντά στο μηδέν, αναμένεται να εμφανίζεται όταν δεν υπάρχει συστηματική μετατόπιση της μέσης τιμής (συστηματικό σφάλμα).

$$\overline{\Delta s} = \sqrt{\overline{\Delta x}^2 + \overline{\Delta y}^2} \quad (5.1)$$

Η μέση αυτή μετάθεση μεταξύ των δύο υποβάθρων είναι απαραίτητο να συμπληρωθεί και από την ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται. Η ακρίβεια αυτή αφορά την διασπορά των μετρήσεων της μετάθεσης γύρω από τη μέση τιμή της και μαθηματικά προσδιορίζεται από το μέγεθος της τυπικής απόκλισης $\sigma_{\overline{\Delta s}}$ της μέσης τιμής. Εκφράζει τα τυχαία σφάλματα που υπεισέρχονται στη μέτρηση και προκύπτει από εφαρμογή του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων (σχέση 5.2), αφού πρωτίστως υπολογιστούν οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις $\sigma_{\overline{\Delta x}}$ $\sigma_{\overline{\Delta y}}$ των μέσων τιμών $\overline{\Delta x}$ και $\overline{\Delta y}$ της κατά X και Y μετάθεσης αντίστοιχα (σχέση 5.3).

Η αναμενόμενη ακρίβεια προσδιορισμού της μετάθεσης εκτιμάται να είναι της τάξεως του 1-2 m, δεδομένου ότι οι συντεταγμένες των σημείων μετρώνται επί του LiDAR/DSM, το οποίο παρουσιάζει χωρική διακριτική ικανότητα 1 m. Η αναμενόμενη αυτή αβεβαιότητα υπολογίζεται με βάση σφάλμα 1-2 pixel, όσον αφορά την εκτίμηση της θέσης του κάθε μετρούμενου σημείου.

$$\sigma_{\overline{\Delta s}} = \sqrt{\left(\frac{\partial(\overline{\Delta s})}{\partial \overline{\Delta x}} \cdot \sigma_{\overline{\Delta x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial(\overline{\Delta s})}{\partial \overline{\Delta y}} \cdot \sigma_{\overline{\Delta y}}\right)^2} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\Delta x_i, \Delta y_i - \overline{\Delta x}, \overline{\Delta y} \right)^2}{N-1}} \quad (5.3)$$

Ένας καλύτερος δείκτης για το συνολικό σφάλμα μεταξύ των δύο υποβάθρων, είναι το στατιστικό μέγεθος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error - RMSE), από τις διαφορές των μετρούμενων συντεταγμένων (Δx και Δy) μεταξύ του LiDAR/DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε. Το RMSE αποτελεί μια ποσοτικοποίηση του συνόλου των συστηματικών και τυχαίων σφαλμάτων μεταξύ των δύο υποβάθρων, δίνει μια γενική εικόνα για τη σύγκριση μεταξύ δύο dataset και στην

ιδανική περίπτωση της απουσίας συστηματικών σφαλμάτων (ύπαρξη μόνο τυχαίων σφαλμάτων), θα έπρεπε να ισούται με την τιμή της τυπικής απόκλισης $\sigma_{\Delta s}$. Το ολικό RMSE προκύπτει από την εξίσωση 5.5, αφού πρωτίστως υπολογιστούν τα RMSE κατά την X και Y διεύθυνση, με βάση τη σχέση 5.4.

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(x_i, y_{i_{LiDAR/DSM}} - x_i, y_{i_{ο/φ/κτηματολογίου}} \right)^2}{N}} \quad (5.4)$$

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (5.5)$$

Α/Α	LiDAR DSM		Ο/Φ Κτηματολόγιο Α.Ε.		Μέσες τιμές διαφορών		Τυπική απόκλιση		RMSE	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	$\overline{\Delta x}$	$\overline{\Delta y}$	$\sigma_{\overline{\Delta x}}$	$\sigma_{\overline{\Delta y}}$	x	y
1	268878,38	4071749,00	268883,17	4071741,18	-4,73 m	4,80 m	±1,15 m	±1,22 m	±4,85 m	±4,96 m
2	269757,85	4071487,95	269763,41	4071483,63						
3	269071,35	4070704,35	269075,63	4070699,19						
4	270103,18	4070319,78	270105,67	4070316,31						
5	269469,16	4069815,04	269475,11	4069808,49						
6	271252,39	4069773,70	271256,70	4069771,14						
7	270518,57	4068563,06	270524,88	4068556,49						
8	271823,69	4068815,15	271827,74	4068810,76						
9	270401,48	4068176,19	270405,40	4068172,77						
10	271828,69	4067244,65	271834,27	4067238,69						
Συνολικά					$\overline{\Delta s}$	$\sigma_{\overline{\Delta s}}$	RMSE			
					6,75 m	±1,18 m	±6,93 m			

Πίνακας 5-1: Πίνακας εκτίμησης οριζοντιογραφικής μετάθεσης μεταξύ του LiDAR/DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ του LiDAR/DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε., δείχνουν ότι η μετάθεση μεταξύ τους είναι σχεδόν 7m, ενώ έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια της τάξης του 1m. Η ακρίβεια της μέτρησης, είναι εντός των αναμενόμενων ορίων των 1-2 m, ενώ στο σύνολό της η μετάθεση παρουσιάζεται να είναι συστηματική, δεδομένου ότι το ολικό RMSE είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τη συνολική μέση μετάθεση.

Το σφάλμα μετάθεσης, δεδομένης της συστηματικότητάς του, δεν δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα, δεδομένου ότι μπορεί να απαλειφεί με την χρήση ενός μόνον κοινού σημείου, με βάση το οποίο μπορεί να μετατοπιστεί το ένα από τα δύο υπόβαθρα,

προκειμένου να ταυτιστεί οριζοντιογραφικά με το άλλο. Με τον τρόπο αυτό, η τελική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο υποβάθρων εμπίπτει εντός της τάξης του 1m που είναι και η αβεβαιότητα της όλης διαδικασίας σύγκρισης.

Η εσωτερική ακρίβεια των διαδικασιών παραγωγής του DSM (και κατ' επέκταση του DTM) ελέγχθηκε με την επίθεση του σκιασμένου DSM επί της εικόνας έντασης, σε περιβάλλον GIS (εικ. 5-6). Η ταύτιση των δύο υποβάθρων είναι απόλυτη, γεγονός αναμενόμενο, δεδομένης της άμεσης εξαγωγής τους από το νέφος σημείων και με τις ίδιες διαδικασίες παρεμβολής, οι οποίες εισάγουν πολύ μικρά και όμοια σφάλματα και στις δύο απεικονίσεις.

Συνεπώς, η εκτιμώμενη οριζοντιογραφική μετάθεση μεταξύ του DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε., είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι οφείλεται σε εξωγενή αίτια και όχι στις ίδιες τις διαδικασίες βάσει των οποίων εξάγονται τα διάφορα raster προϊόντα από το νέφος σημείων. Πιθανές αιτίες δύνανται να είναι η αβεβαιότητα της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε., κάποια ενδεχόμενη πιθανή απόκλιση κατά τον απόλυτο γεωγραφικό προσδιορισμό του νέφους σημείων, καθώς και πιθανές αποκλίσεις της διαδικασίας βαθμονόμησης του συστήματος LiDAR. Οι ανωτέρω πιθανές αιτίες της συστηματικής μετάθεσης μεταξύ των δύο υποβάθρων, δύνανται να υφίσταται ως μεμονωμένες, αλλά και με διάφορους μεταξύ τους συνδυασμούς και ο προσδιορισμός της ακριβούς φύσης τους δεν δύναται να πραγματοποιηθεί χωρίς την ύπαρξη επίγεια μετρημένων σημείων ελέγχου.



Εικόνα 5-6: Οριζοντιογραφική ταύτιση εικόνας έντασης και σκιασμένου DSM.

5.4.2 Υψομετρική ακρίβεια

Δεύτερη κύρια συνιστώσα της ακρίβειας ενός μοντέλου υψομέτρων, είναι η υψομετρική. Σύμφωνα με τον Maune 2001, η υψομετρική ακρίβεια ενός DTM ορίζεται ως η εγγύτητα που παρουσιάζει ένα μεμονωμένο υψομετρικό σημείο το οποίο μετράται, με μία τιμή η οποία θεωρείται ορθή, βάσει κάποιου γνωστού υψομετρικού συστήματος αναφοράς.

Τα υψομετρικά σφάλματα τα οποία παρουσιάζει ένα DTM, εξαρτώνται από τις διαδικασίες, αλλά και από τα δεδομένα από τα οποία παράγεται. Κατά τη φωτογραμμετρική παραγωγή ενός DTM, η υψομετρική αβεβαιότητα στην απόλυτη θέση των στερεομοντέλων, αλλά και το σφάλμα της εκτίμησης του εδάφους, είτε από το χειριστή με τη διαδικασία της ιπτάμενης μάρκας, είτε από τους αλγόριθμους αυτόματης συσχέτισης μεταξύ ομόλογων σημείων, είναι οι κύριοι παράγοντες των υψομετρικών αποκλίσεων του μοντέλου. Στην περίπτωση του DTM που προέρχεται από δεδομένα LiDAR, ο ανθρώπινος παράγοντας εξαλείφεται, γεγονός που αφαιρεί μια σημαντική πηγή σφαλμάτων. Ο λόγος είναι ότι η προσέγγιση του εδάφους γίνεται με αυτοματοποιημένες διαδικασίες και με βάση ένα σύνολο σημείων τα οποία συνιστούν μια πολύ πυκνή δειγματοληψία του εδάφους. Ως εκ τούτου η απόδοση υψομέτρων στα σημεία στα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις γίνεται ιδιαίτερα ακριβής, μέσω των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων διαδικασιών παρεμβολής στο TIN, οι οποίες αναφέρεται να συνεισφέρουν μικρά σφάλματα της τάξεως των 0,4 cm με 3,3 cm (Hodgson 2004), ενώ η ακρίβεια των διαδικασιών παρεμβολής αυξάνεται, όσο μικρότερο μέγεθος εδαφοψηφίδας επιλέγεται (Wechsler 2011).

Παράλληλα, οι υψομετρικές επιφάνειες που εξάγονται από τα δεδομένα LiDAR, δεν υφίστανται ενδιάμεσες διαδικασίες επεξεργασίας, αντίστοιχες του αεροτριγωνισμού, με αποτέλεσμα την εξάλειψη και άλλης μιας σημαντικής πηγής σφαλμάτων. Ο Hodgson 2004 αναφέρει ότι οι τιμές **RMSE των 15 cm**, τις οποίες προδιαγράφουν οι παροχές δεδομένων LiDAR, μπορούν να επιτευχθούν μόνο υπό τις πλέον ιδανικές συνθήκες (χαμηλό ύψος πτήσης, επίπεδο έδαφος, ελάχιστη έως καθόλου βλάστηση και κατασκευές κ.α.) ενώ σύμφωνα με άλλες μελέτες (Adams and Chandler 2002, Bowen and Waltermire 2001, Hodgson 2004) οι επιτυγχανόμενες τιμές RMSE σε ευρείας έκτασης χαρτογραφήσεις, κυμαίνονται μεταξύ **0,25 m και 1,50 m**.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το DSM που εξάγεται είναι περισσότερο ακριβές από το αντίστοιχα εξαγόμενο DTM, στο οποίο προστίθενται υψομετρικά σφάλματα και λόγω της απόδοσης των αλγορίθμων φιλτραρίσματος. Έτσι, σε περιοχές με απότομα μεταβαλλόμενη τοπογραφία, αλλά και μεγάλα ύψη κτηρίων και κατασκευών, και επίσης λόγω ενδεχόμενης μη βέλτιστης αρχικής παραμετροποίησης των αλγορίθμων φιλτραρίσματος, είναι συχνά παρατηρούμενη η εσφαλμένη ταξινόμηση των σημείων τους νέφους ως επίγεια και μη επίγεια (ground – non ground), γεγονός το οποίο θα προκαλέσει ανεπιθύμητες και εσφαλμένες υψομετρικές αποκλίσεις στο εξαγόμενο, εν

συνεχία, DTM. Συνεπώς, η υψομετρική ακρίβεια ενός DSM που προέρχεται από δεδομένα LiDAR, πρέπει να σχετίζεται μόνο με παράγοντες που αφορούν την απόδοση των συστημάτων σαρωτή, GNSS, INS και τη μεταξύ τους ορθή βαθμονόμηση, ενώ η αντίστοιχη ακρίβεια ενός DTM σχετίζεται επιπλέον και με την απόδοση των αλγορίθμων φιλτραρίσματος του νέφους σημείων.

Η υψομετρική ακρίβεια συνήθως ποσοτικοποιείται με τη χρήση του στατιστικού μεγέθους του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE, το οποίο δίνεται από τη σχέση 5.3 και κατά τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο περιλαμβάνει τόσο τα συστηματικά, όσο και τα τυχαία σφάλματα τα οποία υπεισέρχονται στις διαδικασίες. Ο έλεγχος της υψομετρικής ακρίβειας του DTM που παράχθηκε από τα δεδομένα της παρούσης εργασίας, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια 7 τριγωνομετρικών βάθρων του πλαισίου αναφοράς του ΕΓΣΑ 87, της ΓΥΣ.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(H_{LiDAR/DTM} - H_{ΓΥΣ} \right)^2}{N}} \quad (5.6)$$

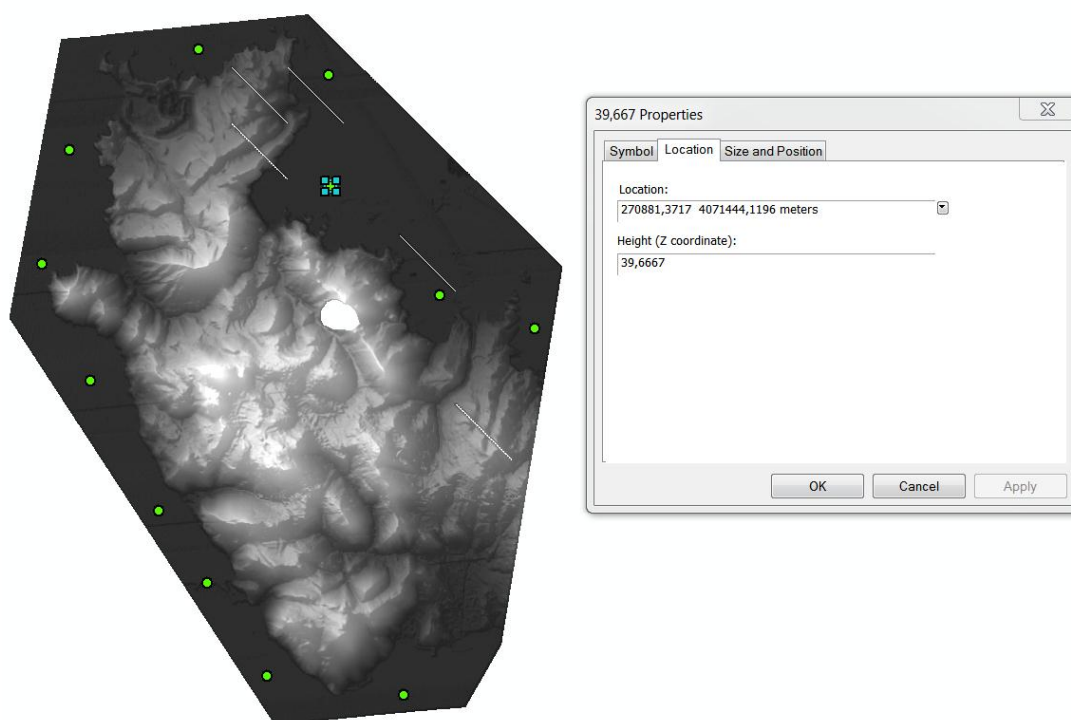
Υπολογίζεται επίσης η μέση υψομετρική μετάθεση $\overline{\Delta H}$ του μοντέλου σε σχέση με τα δεδομένα ελέγχου (που εκφράζει τη συστηματικότητα), καθώς και η τυπική απόκλιση αυτής $\sigma_{\overline{\Delta H}}$, που εκφράζει την ακρίβεια της διαδικασίας. Οι διαδικασίες υπολογισμού είναι παρόμοιες με αυτές τις προηγούμενης παραγράφου, αλλά πιο απλές, δεδομένου ότι στην παρούσα περίπτωση ο έλεγχος πραγματοποιείται προς μια διεύθυνση (υψομετρική). Οι σχέσεις υπολογισμού της μέσης υψομετρικής μετάθεσης και της τυπικής απόκλισης αυτής, είναι οι 5.7 και 5.8.

$$\overline{\Delta H} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(H_{LiDAR/DTM} - H_{ΓΥΣ} \right)}{N} \quad (5.7)$$

$$\sigma_{\overline{\Delta H}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\Delta H_i - \overline{\Delta H} \right)^2}{N-1}} \quad (5.8)$$

Πρέπει να αναφερθεί, ότι τα υψόμετρα στα τριγωνομετρικά βάθρα είναι ορθομετρικά, δηλαδή έχουν ως αφετηρία τη μέση στάθμη της θάλασσας, η οποία ταυτίζεται με την επιφάνεια του γεωειδούς. Σε αντίθεση, τα υψόμετρα του νέφους σημείων και κατ' επέκταση του DTM που εξήχθη είναι γεωμετρικά, έχουν δηλαδή ως υψομετρική αφετηρία το ελλειψοειδές GRS80 του παγκόσμιου συστήματος WGS84 (§1.8), το οποίο προσομοιάζει την επιφάνεια του γεωειδούς, με κάποιες αποκλίσεις (αποχή ή υψόμετρα

γεωειδούς). Η τιμή της αποχής του γεωειδούς από το γεωκεντρικό ελλειψοειδές GRS80 στην περιοχή εργασίας, όπως υπολογίστηκε με βάση το παγκόσμιο μοντέλο βαρύτητας του 2008 (Earth Gravitational Model 2008 – EGM08), είναι $N=35,9$ m. Με βάση την τιμή αυτή, μια αντίστοιχη κατακόρυφη μετάθεση του DTM που εξήχθη, θα μετέτρεπε τα υψόμετρα αυτού σε ορθομετρικά, κάνοντας τα συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα των τριγωνομετρικών βάθρων της ΓΥΣ. Το EGM08 όμως, είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς και συνεπώς δεν παρουσιάζει τη βέλτιστη προσαρμογή στην περιοχή μελέτης. Για το λόγο αυτό, μετρώντας στο περιβάλλον του ArcGIS το υψόμετρο του μοντέλου, με παρεμβολή σε 12 σημεία εντός του θαλάσσιου τμήματος (εικ 5-7), βρέθηκε ότι παρουσιάζει μέση τιμή υψομέτρου 39,9 m. Δεδομένου ότι η ΜΣΘ στην περιοχή είναι η επιφάνεια αναφοράς των ορθομετρικών υψομέτρων, επιλέγεται τελικά ως τιμή διόρθωσης των γεωμετρικών υψομέτρων των δεδομένων LiDAR η τιμή $N=39,9$ m. Η τιμή αυτή παρουσιάζει διαφορά 4 m από την αντίστοιχη που προσδιορίζεται από το EGM08 και πρέπει να αναφερθεί ότι δεν αποτελεί την πραγματική τιμή της αποχής του γεωειδούς στην περιοχή, αφού οι μετρήσεις του συστήματος LiDAR, καταγράφουν το υψόμετρο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (και όχι σε μια χρονοσειρά παρατηρήσεων όπως οι παλιρροιογράφοι) ενώ ταυτόχρονα επηρεάζονται και από την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας (κυματισμοί κ.α.). Παρ' όλα αυτά, η τελικώς επιλεγμένη τιμή $N=39,9$ m, δεν επηρεάζει τον υψομετρικό έλεγχο του μοντέλου, δεδομένου ότι παρουσιάζει συστηματική απόκλιση από την αντίστοιχα προσδιοριζόμενη του EGM08 και η οποία είναι πολύ εύκολο να διορθωθεί.

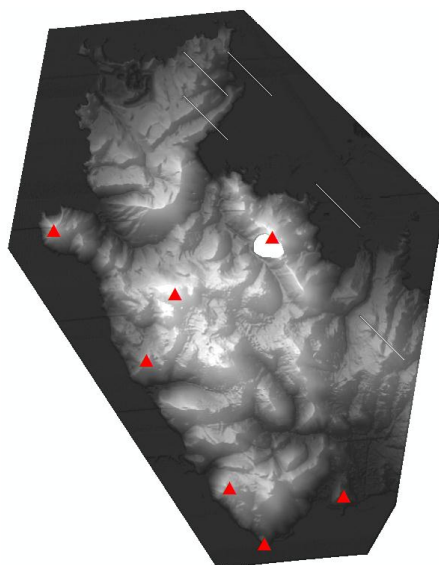


Εικόνα 5-7: Μέτρηση του υψομέτρου του DTM με παρεμβολή σημείων στη θαλάσσια περιοχή

Οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες των τριγωνομετρικών βάθρων της ΓΥΣ, μετατράπηκαν από την εγκάρσια μερκατορική προβολή του ΕΓΣΑ87 στην παγκόσμια μερκατορική προβολή του WGS84, προκειμένου να γίνει η υπέρθεσή τους επί του DTM (εικ. 5-8). Για κάθε θέση επί του DTM στην οποία υπερτίθεται τριγωνομετρικό βάθρο, μετρήθηκε με παρεμβολή μια τιμή υψομέτρου, η οποία διορθώθηκε λόγω υψόμετρου γεωειδούς και τελικώς υπολογίστηκαν οι υψομετρικές διαφορές ΔH , καθώς και τα απαραίτητα στατιστικά μεγέθη (πίνακας 5-2). Πρέπει να αναφερθεί, ότι η εν λόγω διαδικασία αποτελεί μόνο μια εκτίμηση της υψομετρικής ακρίβειας του DTM, δεδομένου ότι οι θέσεις των βάθρων είναι προσεγγιστικές (αφού δεν είναι εφικτή η οπτική αναγνώριση τους επί του DTM) και η κατανομή τους δεν είναι ιδανική. Η τιμή RMSE των 1,56 m εκτιμάται να είναι υψηλή, αλλά φαίνεται να αφορά στο σύνολό της συστηματική μετάθεση, δεδομένου ότι και η μέση υψομετρική μετάθεση του μοντέλου έχει την ίδια τιμή (1,55 m). Ενδέχεται να σχετίζεται είτε με κάποιο εναπομείναν πιθανό συστηματικό σφάλμα στα δεδομένα, το οποίο μπορεί να προκάλεσε και την οριζοντιογραφική μετάθεση που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είτε να αφορά τον μη ακριβή προσδιορισμό της αποχής του γεωειδούς με βάση την οποία μετασχηματίστηκαν τα γεωμετρικά υψόμετρα του μοντέλου σε ορθομετρικά. Η ακρίβεια της διαδικασίας είναι της τάξης των 20 cm, γεγονός που επιβεβαιώνει την υψηλή υψομετρική ποιότητα των επιφανειών που προέρχονται από δεδομένα LiDAR.

	ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΑ ΒΑΘΡΑ ΓΥΣ	ΣΗΜΕΙΑ ΜΕ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΕΠΙ ΤΟΥ DTM				
A/A	H	H	ΔH	$\overline{\Delta H}$	$\sigma_{\overline{\Delta H}}$	RMSE
1	36,28	34,60	-1,68	-1,55	±0.18	±1,56
2	47,13	45,25	-1,48			
3	205,53	203,92	-1,61			
4	132,88	130,95	-1,33			
5	253,54	251,85	-1,69			
6	147,09	145,31	-1,77			
7	142,94	140,94	-1,30			

Πίνακας 5-2: Εκτίμηση υψομετρικής ακρίβειας DTM με βάση τριγωνομετρικά σημεία της ΓΥΣ



Εικόνα 5-8: Κατανομή τριγωνομετρικών βάθρων της ΓΥΣ επί του DTM της περιοχής εργασίας.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια υψομετρική σύγκριση μεταξύ του LiDAR/DTM και του DTM το οποίο διατίθεται από την Κτηματολόγιο Α.Ε. Όπως αναφέρθηκε και κατά την εκτέλεση οριζοντιογραφικών ελέγχων (§ 5.4.1) για να υπάρξει ουσιαστικός έλεγχος, επιβάλλεται η ύπαρξη δεδομένων ακριβείας ή έστω δεδομένων τα οποία λαμβάνονται ως «ορθά» και με βάση τα οποία πραγματοποιείται η αξιολόγηση οποιουδήποτε άλλου σετ δεδομένων. Στη βάση της αρχής αυτής, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε τη σύγκριση των δύο DTM (προερχόμενο από LiDAR και της Κτηματολόγιο Α.Ε.) ως διαδικασία ελέγχου, αφού δεν είναι ασφαλές να εκλάβουμε το μοντέλο της Κτηματολόγιο Α.Ε. σαν «ορθό» μοντέλο υψομέτρων. Το DTM της κτηματολόγιο Α.Ε. έχει προέρθει από φωτογραμμετρικές διαδικασίες και έχει δημιουργηθεί με βήμα κανάβου 5 m, ενώ η υψομετρική του ακρίβεια δεν είναι γνωστή. Με τον τρόπο αυτό, η σύγκριση μεταξύ των δύο επιφανειών αποσκοπεί μόνο στην διαπίστωση και την ποσοτικοποίηση των διαφορών μεταξύ αυτών και εκτελέστηκε έχοντας καθαρά επικουρικό χαρακτήρα.

Βασική δυσχέρεια στην σύγκριση μεταξύ δύο DTM είναι το γεγονός ότι δεν είναι εφικτή η οπτική αναγνώριση αντικειμένων, προκειμένου να γίνει μέτρηση των συντεταγμένων χαρακτηριστικών σημείων και στα δύο υπόβαθρα. Αυτό συμβαίνει γιατί, σε αντίθεση με το DSM, το DTM απεικονίζει μόνο το έδαφος και όχι τα υπέργεια αντικείμενα. Συνεπώς, για την πραγματοποίηση της σύγκρισης, έγινε υπόθεση της καλής οριζοντιογραφικής ταύτισης μεταξύ των δύο μοντέλων και μετρήθηκαν τα υψόμετρα ενός σετ από 30 σημεία ομοιόμορφα κατανομημένα σε όλη την επιφάνεια. Υπολογίστηκαν οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων στα σημεία αυτά, οι οποίες στη συνέχεια διορθώθηκαν λόγω υψόμετρου γεωειδούς (με χρήση της τιμής $N=39.9$ m). Τελικώς υπολογίστηκε η μέση υψομετρική μετάθεση των δύο μοντέλων, η τυπική απόκλιση αυτής, καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης έδειξε μια μικρή συστηματική υψομετρική μετατόπιση μεταξύ των δύο επιφανειών της τάξης των 0,40 m, ενώ η ακρίβεια της μέτρησης αυτής κυμαίνεται στο 1m.

Η μετατόπιση αυτή κρίνεται μάλλον αναμενόμενη, δεδομένου ότι πρόκειται για δύο dataset που έχουν προέλθει από διαφορετικές μεθόδους και παράλληλα η αρχική υπόθεση της οριζοντιογραφικής ταύτισης μεταξύ τους ενέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Αποτέλεσμα της μη οριζοντιογραφικής αυτής ταύτισης, είναι να προσδιορίζονται ουσιαστικά τα υψόμετρα από διαφορετικά σημεία στις δύο επιφάνειες. Τα αναλυτικά αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

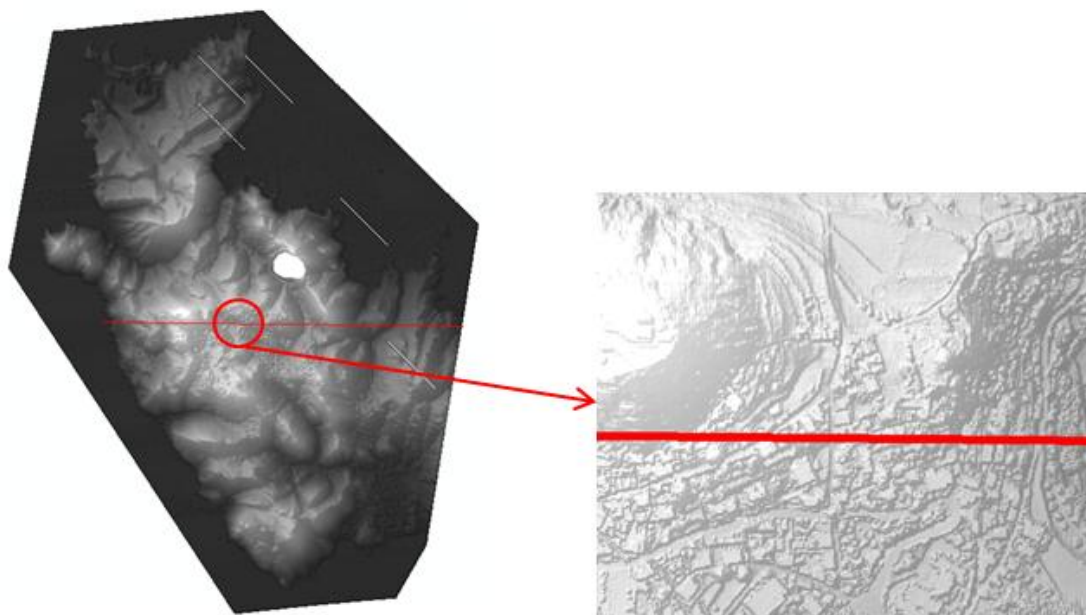
A/A	x	y	H DTM Κτηματ. (ορθ/κο.)	h DTM LiDAR (γεω/κο)	ΔH	ΔH (διορθωμένο)	$\overline{\Delta H}$	$\sigma_{\Delta H}$	RMSE
1	269057.37	4071812.45	27.00	65.94	38.94	-0.96	-0,40	±0,96	1.03
2	269480.15	4071807.23	40.00	79.90	39.90	0.00			
3	269918.60	4071812.45	63.00	103.28	40.28	0.38			
4	269073.03	4071295.72	52.01	92.84	40.84	0.94			
5	269495.81	4071311.37	83.81	122.92	39.11	-0.79			
6	270341.38	4070799.86	58.69	99.43	40.74	0.84			
7	269031.27	4070476.24	26.32	65.00	38.68	-1.22			
8	269652.40	4070450.15	70.95	111.34	40.39	0.49			
9	271150.41	4070763.32	58.41	96.77	38.36	-1.54			
10	269234.83	4069844.68	83.39	123.31	39.92	0.02			
11	270252.65	4069855.12	147.03	186.90	39.87	-0.03			
12	271338.32	4070016.92	125.70	166.54	40.84	0.94			
13	271985.54	4070006.48	23.79	62.84	39.05	-0.85			
14	269344.44	4069239.21	52.91	91.96	39.05	-0.85			
15	269939.47	4069312.28	173.85	212.29	38.44	-1.46			
16	270946.85	4069406.23	104.13	142.89	38.77	-1.13			
17	272032.52	4069500.19	62.06	100.96	38.90	-1.00			
18	270310.06	4068591.98	86.69	127.52	40.84	0.94			
19	269704.59	4068915.60	93.05	131.00	37.95	-1.95			
20	270268.31	4069040.86	153.41	193.36	39.95	0.05			
21	270779.82	4069025.21	88.55	129.29	40.74	0.84			
22	271353.98	4069046.08	147.00	186.79	39.79	-0.11			
23	271896.81	4069093.06	63.75	101.99	38.25	-1.65			
24	272429.21	4069103.50	90.69	128.73	38.04	-1.87			
25	270450.99	4068012.61	88.44	128.57	40.13	0.23			
26	271082.56	4068033.49	54.96	96.27	41.31	1.41			
27	271802.86	4068075.25	12.93	51.62	38.69	-1.21			
28	272220.42	4068096.12	10.00	48.80	38.80	-1.10			
29	270978.17	4067631.58	120.00	159.19	39.19	-0.71			
30	271708.91	4067673.34	9.00	48.12	39.12	-0.78			

Πίνακας 5-3: Υψομετρική σύγκριση μεταξύ LiDAR/DTM και Κτηματολόγιο Α.Ε./DTM

5.4.3 Σύγκριση DSM-DTM

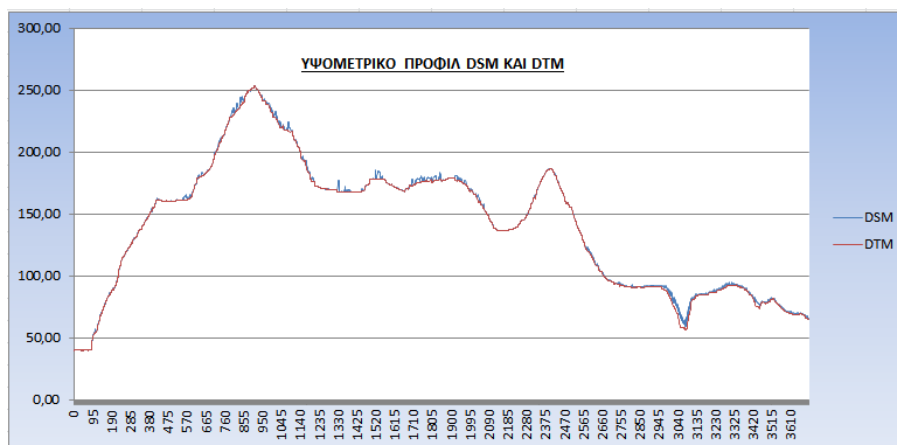
Οι διαφορές μεταξύ του DSM και του DTM τα οποία εξήχθησαν από το νέφος σημείων, αφορούν την αφαίρεση όλων των υπέργειων αντικειμένων μέσω της διαδικασίας του φιλτραρίσματος. Η σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών επιφανειών, μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Ο οριζοντιογραφικός έλεγχος κρίνεται μη απαραίτητος, δεδομένου ότι και οι δύο επιφάνειες έχουν προέλθει από το ίδιο αρχικό σετ δεδομένων και με παρόμοιες διαδικασίες, γεγονός που δεν προκαλεί την εισαγωγή σφαλμάτων μετάθεσης στο επίπεδο. Ο υψομετρικός έλεγχος, αφορά περισσότερο την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας του φιλτραρίσματος και όχι το βαθμό υψομετρικής ταύτισης των δύο επιφανειών, δεδομένης της διαφορετικής τους φύσης.

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτικά, με τη δημιουργία ενός προφίλ υψομέτρων, κατά μήκος μιας γραμμής στο κέντρο της επιφάνειας. Η θέση της γραμμής (εικ. 5-9) επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να διατρέχει εγκάρσια ολόκληρη την περιοχή, ενώ παράλληλα κατά μήκος της να παρατηρούνται εναλλαγές καλύψεων γης (αστικός ιστός, γυμνό έδαφος, περιοχές με βλάστηση), αλλά και μεταβαλλόμενη τοπογραφία του ανάγλυφου (ρέματα, λόφοι κ.α.). Το μήκος της μηκτομής που δημιουργήθηκε είναι 3.700 m και κατά μήκος αυτής εξήχθησαν υψόμετρα τόσο από το DSM όσο και από το DTM ανά απόσταση 1 m.

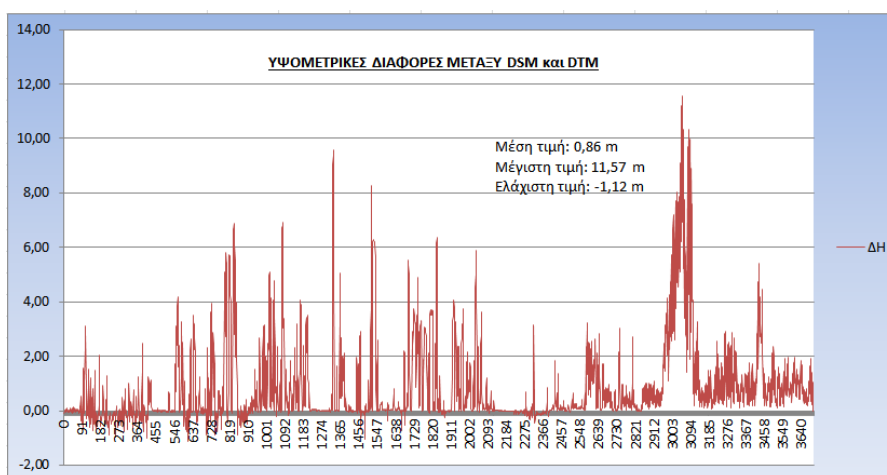


Εικόνα 5-9: Θέση μηκτομής επί του DSM και λεπτομέρεια αυτής

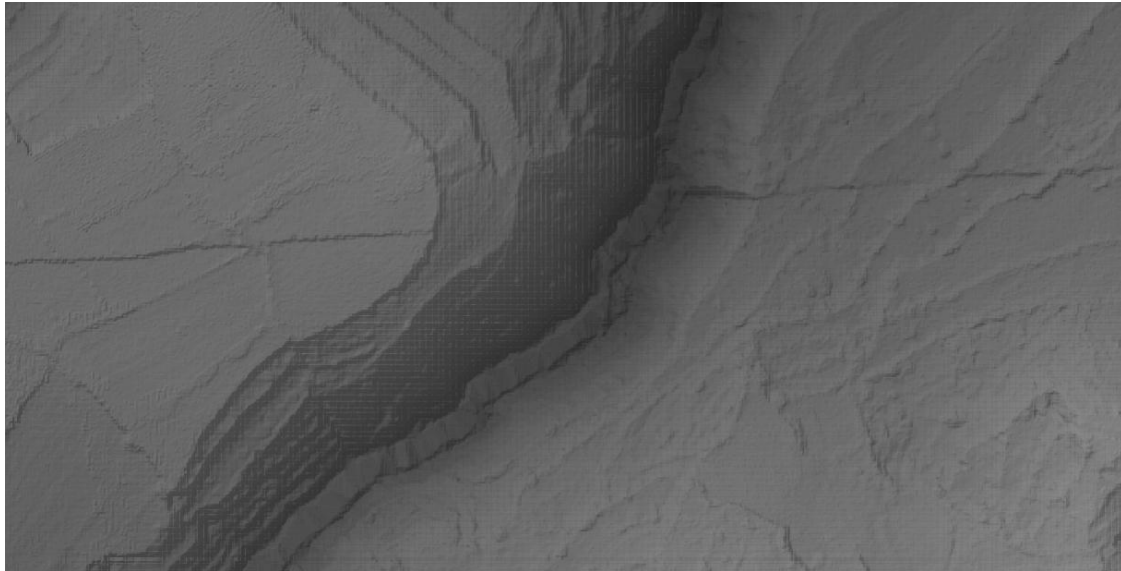
Οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο επιφανειών μετά τη δημιουργία του γραφήματος της μηκοτομής (διάγραμμα 5-1) είναι εμφανείς, με την μπλε γραμμή που αναπαριστά τα υψόμετρα του DSM κατά μήκος του προφίλ να διακρίνεται πάνω από την κόκκινη γραμμή των υψομέτρων του DTM. Η κατανομή των υψομετρικών διαφορών στις διάφορες αποστάσεις από την αρχή της μηκοτομής, καθώς και τα στατιστικά τους, παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5-2. Στις θέσεις όπου παρουσιάζονται χαρακτηριστικές αποκλίσεις, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επί του σκιασμένου DSM στο περιβάλλον GIS και βρέθηκε ότι πρόκειται για θέσεις εντός των κατοικημένων τόπων της Ν. Μήλου, γεγονός που δικαιολογεί τις υψομετρικές αυτές αποκλίσεις. Μια ιδιαίτερη απόκλιση παρουσιάστηκε σε απόσταση περίπου 3.075 m από την αρχή της γραμμής, η οποία ύστερα από έλεγχο βρέθηκε να αναφέρεται σε περιοχή όπου υφίσταται ρέμα με πολύ απότομο πρηνές (εικ. 5-9). Παρόλο που στην περιοχή του ρέματος δεν υφίστανται σημαντικά υπέργεια αντικείμενα με μεγάλο ύψος, ο αλγόριθμος αφαίρεσε αρκετά σημεία από το πρηνές, ταξινομώντας τα ως υπέργεια, δεδομένων των απότομων κλίσεων και των μεγάλων υψομετρικών διαφορών που παρουσιάζουν από τα γειτονικά τους σημεία. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται και η μέγιστη υψομετρική απόκλιση μεταξύ DSM και DTM, που είναι 11,57 m.



Διάγραμμα 5-1: Υπέρθεση μηκοτομών DSM και DTM



Διάγραμμα 5-2: Κατανομή υψομετρικών διαφορών DSM και DTM ανά θέση



**Εικόνα 5-10: Ρέμα με απότομα πρανή, στην περιοχή αστοχίας του αλγορίθμου φιλτραρίσματος TIN
Densification**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑΣ ΜΕ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ ΤΟ DSM

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάζεται η δυνατότητα της παραγωγής ψηφιακών ορθοεικόνων, με χρήση φωτοσταθερών (GCP's) τα οποία συλλέγονται επί του παραγόμενου DSM από το νέφος σημείων. Η διαδικασία της άμεσης γεωαναφοράς αεροφωτογραφιών, αλλά και δορυφορικών απεικονίσεων, αποτελεί ένα αντικείμενο το οποίο βρίσκεται υπό μελέτη και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω του γεγονότος ότι δύναται να παρακάμψει τις ιδιαίτερα απαιτητικές εργασίες υπαίθρου οι οποίες απαιτούνται για την συλλογή των φωτοσταθερών. Τα σύγχρονα συστήματα LiDAR, ενσωματώνουν συνήθως μια ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format, η οποία λαμβάνει αεροφωτογραφίες ταυτόχρονα με τη σάρωση. Για τις αεροφωτογραφίες αυτές, δύναται να είναι διαθέσιμοι οι εξωτερικοί προσανατολισμοί από το σύστημα POS του συστήματος LiDAR, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα και συνεπώς άλλες μέθοδοι πρέπει να αναζητηθούν για την γεωαναφορά των εικόνων.

Σε γενικές γραμμές, η απαραίτητη οριζοντιογραφική και υψομετρική πληροφορία για κάθε σημείο το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί ως GCP, περιέχεται στο νέφος σημείων, καθιστώντας το πρακτικά μια ιδιαίτερα πλούσια πηγή τέτοιων σημείων. Η δυσχέρεια παρουσιάζεται στη διαδικασία αναγνώρισης και εξαγωγής της πληροφορίας αυτής, καθώς είναι πρακτικά αδύνατη η αναγνώριση μεμονωμένων σημείων στο νέφος σημείων, ενώ το ίχνος της δέσμης laser συμπίπτει πολύ σπάνια με ένα μεμονωμένο και χαρακτηριστικά αναγνωρίσιμο σημείο στην αντίστοιχη εικόνα (Baltsavias 1999). Η οπτική αναγνώριση των αντικειμένων τα οποία περιλαμβάνονται στο νέφος σημείων, γίνεται εφικτή με την εκτέλεση τριγωνισμού μεταξύ αυτών, καθώς και με την παραγωγή raster προϊόντων όπως η εικόνα έντασης ή ένα σκιασμένο DSM. Οι Habib et.al. 2005, πρότειναν μια διαδικασία μέτρησης γραμμών και πολυγώνων τα οποία αποτελούν τα πρωτογενή δεδομένα γεωαναφοράς (registration primitives), δεδομένης της δυσκολίας μέτρησης μεμονωμένων σημείων. Τα δεδομένα αυτά αναγνωρίζονται τόσο επί των raster παραγώγων του νέφους σημείων (οριζοντιογραφικά από την εικόνα έντασης και υψομετρικά από την εικόνα αποστάσεων), όσο και επί των αεροφωτογραφιών, ενώ στη συνέχεια επιτελείται μια μεταξύ τους συνόρθωση, η οποία οδηγεί στην γεωαναφορά των αεροφωτογραφιών. Οι Lee et.al. 2010, προτείνουν μια διαδικασία γεωαναφοράς δορυφορικών απεικονίσεων υψηλής ανάλυσης (IKONOS-2 και Quickbird) με τη ταύτιση ακμών, οι οποίες εξάγονται με χρήση κατάλληλων φίλτρων τόσο από την εικόνα έντασης όσο και από τις δορυφορικές σκηνές. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Mastin et.al. 2009, Fei et.al. 2008, Wang et.al. 2009.

Οι προσεγγίσεις που περιγράφηκαν πρωτίστως για την άμεση γεωαναφορά εικόνων, δείχνουν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα για το μέλλον, βρίσκονται όμως ακόμα σε

αποτελούν ερευνητικό επίπεδο, αδυνατώντας επί της παρούσης να υποστηρίξουν τις μεγάλες φωτογραμμετρικές παραγωγικές διαδικασίες, οι οποίες επιτελούνται από του διάφορους γεωχωρικούς φορείς. Προς την κατεύθυνση αυτή, η παρούσα εργασία προτείνει και διερευνά μια μέθοδο παραγωγής ορθοεικόνας, η οποία στηρίζεται και ενσωματώνει τις κλασικές και μέχρι τώρα ευρέως χρησιμοποιούμενες φωτογραμμετρικές διαδικασίες της συλλογής σημείων σύνδεσης, του αεροτριγωνισμού και της ορθοαναγωγής, οι οποίες βρίσκονται ενσωματωμένες σε κάθε γραμμή παραγωγής φωτογραμμετρικών δεδομένων. Η διαδικασία βελτιώνονται με την απευθείας μέτρηση των συντεταγμένων των φωτοσταθερών σημείων από το σκιασμένο DSM το οποίο εξάγεται με ιδιαίτερα γρήγορες διαδικασίες και συνιστά ένα οικονομικά αποδοτικότερο τρόπο συλλογής από τις αποστολές επίγειων μετρήσεων.

Επιπλέον, στη συγκεκριμένη μεθοδολογία διερευνάται και η απευθείας χρήση του DSM από τα δεδομένα LiDAR, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της ορθοαναγωγής. Η πρακτική αυτή οδηγεί σε σημαντική οικονομία χρόνου και μέσω επεξεργασίας, σε σχέση με τη χειροκίνητη φωτογραμμετρική συλλογή DTM και την ταυτόχρονη ενίσχυσή του με γραμμές αλλαγής κλίσης (breaklines).

Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί, ότι οι ακρίβειες τόσο στον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης, όσο και στη μέτρηση των συντεταγμένων των GCP's, αναμένεται να είναι αρκετά υποδεέστερες από τις αντίστοιχες των επίγειων μετρήσεων, ενώ παράλληλα το χρησιμοποιούμενο DSM κατά τη διαδικασία ορθοαναγωγής δεν αναμένεται να αποδίδει τα ίδια ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με την αντίστοιχη επιφάνεια η οποία δημιουργείται ύστερα από χρονοβόρες, επίπονες και ιδιαίτερα ακριβείς φωτογραμμετρικές διαδικασίες στερεοαπόδοσης.

Η δυνατότητα της προτεινόμενης διαδικασίας παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας, με χρήση δεδομένων LiDAR και εικόνων ανάλογων προδιαγραφών με αυτά της παρούσης μελέτης, διερευνάται στη συνέχεια και καθορίζονται οι κλίμακες εκείνες για τις οποίες το παραγόμενο αποτέλεσμα κρίνεται αποδεκτό.

6.2 Σχεδιασμός κατασκευής της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας

Η ψηφιακή ορθοεικόνα που παράχθηκε για τους πειραματικούς σκοπούς της εργασίας, καλύπτει ένα μικρό τμήμα της περιοχής, επί του οποίου παρατηρούνται εναλλαγές κάλυψης γης (αστικός ιστός, βλάστηση, αγροτικές εκτάσεις κ.α.) καθώς και τμήματα με μεταβαλλόμενη τοπογραφία. Στο σύνολό της, η περιοχή που επιλέχθηκε καλύπτεται από τέσσερις ψηφιακές αεροφωτογραφίες, από τα επικαλυπτόμενα τμήματα των οποίων δύναται να κατασκευαστεί μωσαϊκό συνολικής έκτασης 1.526 στρεμμάτων περίπου και οριοθετείται από το πολύγωνο χρώματος μωβ στην εικόνα 6-1.



Εικόνα 6-1: Εντοπισμός περιοχής κατασκευής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας επί υποβάθρου Google Earth

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα παραγωγής ορθοεικόνων από τα αεροφωτογραφικά δεδομένα της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση των προδιαγραφών που παρουσιάζουν. Η ανάλυση έγινε στη βάση της προσπάθειας κατασκευής μιας ορθοεικόνας με όσο τη βέλτιστη χωρική διακριτική ικανότητα, ενώ εκτιμήθηκαν και υπολογίστηκαν τα μεγέθη που περιγράφονται στη συνέχεια.

Η ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format Leica RCD105, με την οποία ελήφθησαν οι αεροφωτογραφίες παράλληλα με την σάρωση LiDAR, παρουσιάζει μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel) $d_{\alpha/\varphi}=6,8 \mu\text{m}$, σύμφωνα με τα στοιχεία βαθμονόμησης τα οποία παρέχει η NERC. Οι πτήση εκτελέστηκε από ύψος $H=2.500 \text{ m}$ και η βαθμονομημένη σταθερά του φακού είναι $c=59,799 \text{ mm}$. Ως εκ τούτου, η μέση κλίμακα των αεροφωτογραφιών, καθώς και η διάσταση της εδαφοψηφίδας τους υπολογίζονται από τους τύπους 6.1 και 6.2.

$$\frac{1}{k} = \frac{c}{H} \Rightarrow k \approx 42.000 \quad (6.1)$$

$$D_{\alpha/\varphi} = d_{\alpha/\varphi} * k \Rightarrow D_{\alpha/\varphi} = 0,29 \text{ m} \quad (6.2)$$

Η επιλογή του μεγέθους της εδαφοψηφίδας της ορθοφωτογραφίας ($D_{\alpha/\varphi}$), πραγματοποιείται με βάση τον εμπειρικό τύπο 6.3, από τον οποίο φαίνεται ότι η χρήση αεροφωτογραφιών εδαφοψηφίδας $D_{\alpha/\varphi}=29 \text{ cm}$ ως πρωτογενή δεδομένα, υποστηρίζει με ασφάλεια την επιλογή κατασκευής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας με μέγεθος εδαφοψηφίδας (ή εναλλακτικά διακριτικής ικανότητας) $D_{\alpha/\varphi}=50 \text{ cm}$.

$$D_{o/\varphi} = 1,5 \cdot D_{a/\varphi} \Rightarrow D_{o/\varphi} \approx 0,45 \text{ m} \quad (6.3)$$

Με βάση το μέγεθος της εδαφοψηφίδας $D_{o/\varphi}$ της τελικής ορθοεικόνας, καθορίζεται και η μέγιστη δυνατή κλίμακα εκτύπωσής αυτής. Το εικονοστοιχείο $d_{o/\varphi}$ της ορθοεικόνας πρέπει να έχει διάσταση ίση με το μισό της διακριτικής ικανότητας του ανθρώπινου ματιού, προκειμένου στο τελικό εκτυπωμένο προϊόν να είναι εφικτή η αντίληψη της κανονικής ραδιομετρικής διάταξης των χρωμάτων και όχι μεμονωμένων pixels, για παρατήρηση από απόσταση 60 cm. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου οφθαλμού είναι 0,20-0,25 mm, γίνεται αποδεκτό ότι η διάσταση του εικονοστοιχείου $d_{o/\varphi}$ του τελικού προϊόντος πρέπει να είναι 0,10 mm (ή ισοδύναμα 100 μm), σύμφωνα και με τις προδιαγραφές του Ο.Κ.Χ.Ε. Επομένως, με δεδομένη τη διάσταση της εδαφοψηφίδας $D_{o/\varphi}$, υπολογίζεται η μέγιστη επιτρεπτή κλίμακα εκτύπωσης από τον τύπο 6.4.

$$D_{o/\varphi} = 100 \mu\text{m} \cdot k_{\text{εκτύπωσης}} \Rightarrow k_{\text{εκτύπωσης}} = 5.000 \quad (6.4)$$

Σύμφωνα λοιπόν με την ανάλυση που προηγήθηκε, τα δεδομένα που διατίθενται για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας είναι κατάλληλα για την δημιουργία ψηφιακής ορθοεικόνας χωρικής διακριτικής ικανότητας 50 cm και κλίμακας εκτύπωσης 1:5.000, η αβεβαιότητα της μέτρησης επί της οποίας είναι 1,25 m (0,25 mm στην κλίμακα).

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM) το οποίο απαιτείται για την παραγωγή της εν λόγω ψηφιακής ορθοεικόνας μέσω της διαδικασίας της ορθοαναγωγής, πρέπει να παρουσιάζει βήμα συλλογής (D_{DTM}) 0,5 - 2 mm στην κλίμακα της ορθοφωτογραφίας. Βάσει του εμπειρικού αυτού κανόνα και με επιλογή της μέσης τιμής του 1,5 mm, το βήμα του DTM υπολογίζεται από τη σχέση 6.5.

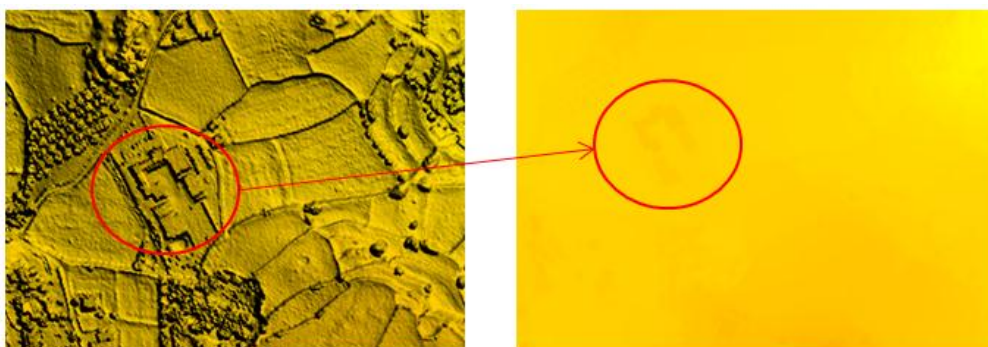
$$D_{DTM} = 1,5 \text{ mm} \cdot k_{\text{εκτύπωσης}} \Rightarrow D_{DTM} = 7,5 \text{ m} \quad (6.5)$$

Παράλληλα, το εν λόγω DTM απαιτείται να εμπλουτιστεί με όσες γραμμές αλλαγής κλίσης (breaklines) απαιτούνται, προκειμένου να περιγραφεί όσο το δυνατόν λεπτομερέστερα η επιφάνεια που ορίζει το έδαφος μαζί με τα υπερκείμενα αυτού αντικείμενα, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα DSM. Η χρήση του DSM το οποίο παράχθηκε απευθείας από το νέφος σημείων, καλύπτει τις ανωτέρω απαιτήσεις, δεδομένου ότι παρουσιάζει βήμα κανάβου 1 m και ενσωματώνει από τη φύση του την απαιτούμενη ορθή υψομετρική πληροφορία για τη διαδικασία της ορθοαναγωγής, η οποία έχει συλλεχθεί από το σύστημα LiDAR για όλες τις υπέργειες επιφάνειες (στεγές κτηρίων, τοιχία κ.α.) που υφίστανται στην περιοχή.

6.3 Μέτρηση φωτοσταθερών επί του DSM

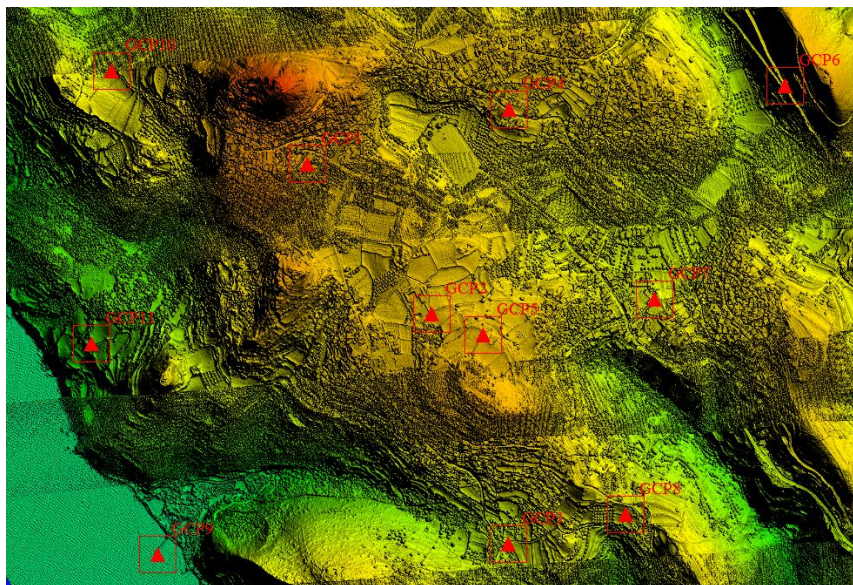
Για την επιλογή και μέτρηση των απαραίτητων φωτοσταθερών σημείων, δημιουργήθηκε μια σκιασμένη (hillshade) απεικόνιση του DSM το οποίο εξήχθη από τα δεδομένα της σάρωσης LiDAR. Η απεικόνιση μιας τοπογραφικής επιφάνειας με την τεχνική της σκίασης, βασίζεται γενικά στην προσομοίωση της επίδρασης του φυσικού φωτισμού. Η μέθοδος αυτή υιοθετεί μια υποθετική φωτεινή πηγή, η οποία τοποθετείται υπό κάποια ανύψωση, σε σχέση με την φωτιζόμενη επιφάνεια, δημιουργώντας ένα οπτικό αποτέλεσμα το οποίο αν και δύο διαστάσεων (2-d), δίνει στον παρατηρητή την αίσθηση του ανάγλυφου. Το οπτικό αυτό αποτέλεσμα διαμορφώνεται ουσιαστικά μέσω της διαφοροποίησης του τόνου του γκρι της απεικονιζόμενης επιφάνειας, που οφείλεται στην επίδραση του φωτισμού και στην διαφοροποίηση του προσανατολισμού σε κάθε σημείο της (Τζελέπης κ.α. 2008).

Κύριο πλεονέκτημα της απεικόνισης μιας επιφάνειας με τη μέθοδο της σκίασης, είναι η δυνατότητα άμεσης αντίληψης και οπτικής φωτοερμηνείας των χαρακτηριστικών οντοτήτων που την συνθέτουν, αλλά και των μεταβολών στην κλίση και τον προσανατολισμό αυτής από τον ανθρώπινο χειριστή. Ως εκ τούτου, όσο πιο λεπτομερής είναι η σκιαζόμενη επιφάνεια, τόσο πιο ακριβής μπορεί να γίνει και η εκτίμηση μεμονωμένων χαρακτηριστικών σημείων επ' αυτής, γεγονός το οποίο αντιμετωπίζει, ως ένα βαθμό, τον υφιστάμενο αυτό περιορισμό σε παράγωγα του νέφους σημείων. Το DSM το οποίο εξάγεται από την πολύ πυκνή δειγματοληψία της περιοχής που σαρώνεται από το σύστημα LiDAR, παρουσιάζει ικανοποιητική λεπτομέρεια στην απεικόνιση των υπέργειων αντικειμένων, ενώ φαίνεται να προσδίδει έμφαση σε σημεία όπως συμβολές ξερολιθιών και τοιχίων, γωνίες κτηρίων, απολήξεις εδάφους μεταξύ διακλαδώσεων δρόμων κ.α. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι η ευκρίνεια απεικόνισης τέτοιων χαρακτηριστικών δεν είναι ίδια για όλα τα αντικείμενα της ίδιας κατηγορίας (π.χ. δεν απεικονίζονται με την ίδια ευκρίνεια όλες οι γωνίες κτηρίων), γεγονός που συνδέεται με την κατανομή των σημείων στο νέφος. Εν τούτοις όμως, το γεγονός ότι το ανθρωποποίητο περιβάλλον παρουσιάζει πολύ μεγάλη συγκέντρωση τέτοιων χαρακτηριστικών κατασκευών, καθιστά το παραγόμενο από τη σάρωση LiDAR DSM μια πολύ πλούσια πηγή μέτρησης μεμονωμένων και αναγνωρίσιμων χαρακτηριστικών σημείων.

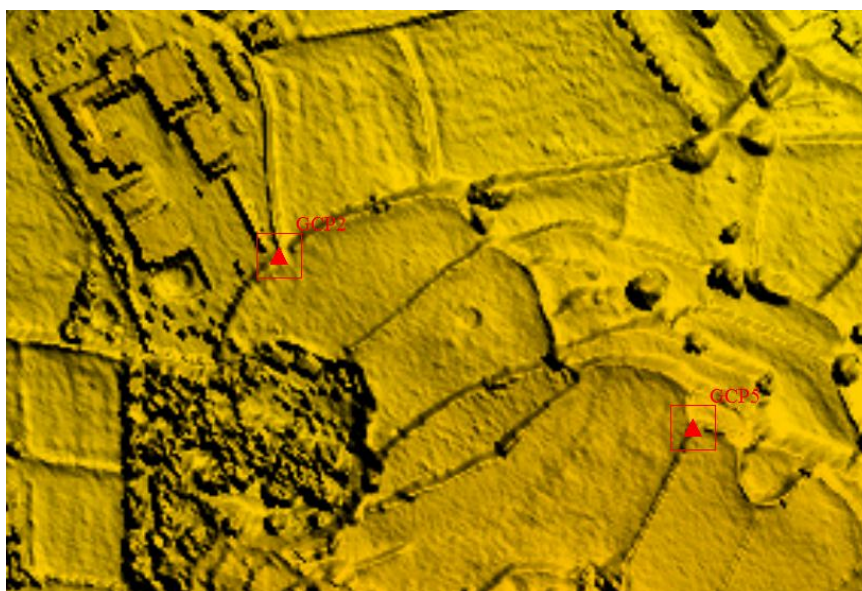


Εικόνα 6-2: Ανάδειξη υπέργειων αντικειμένων επί του DSM με τη χρήση της τεχνικής σκίασης (hilshading)

Για την κάλυψη του συνόλου της περιοχής, επιλέχθηκαν 11 GCP όσο το δυνατόν ισοκατανεμημένα σε αυτή, των οποίων οι τρισδιάστατες συντεταγμένες μετρήθηκαν χειροκίνητα. Η κατανομή των GCP καθώς και λεπτομέρεια του είδους των παρουσιάζεται στις εικόνες 6.3 και 6-4.



Εικόνα 6-3: Κατανομή μετρηθέντων GCP



Εικόνα 6-4: Λεπτομέρεια με τη θέση δύο GCPs

Η ακρίβεια μέτρησης των GCP, αναμένεται να είναι χειρότερη του 1 m, δεδομένης της αντίστοιχης χωρικής διάστασης της εδαφοψηφίδας του DSM. Στην αβεβαιότητα της μέτρησης, πρέπει να προστεθεί και το σφάλμα στον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του κάθε σημείου, λόγω της υποδεέστερης ευκρίνειας αναπαράστασης την οποία παρουσιάζει το DSM σε σχέση με τις αεροφωτογραφίες.

6.4 Επίλυση αεροτριγωνισμού

Η διαδικασία του αεροτριγωνισμού ορίζεται ως η πύκνωση του φωτογραμμετρικού δικτύου παρατηρήσεων (Ιωαννίδης 2010), το οποίο μορφώνεται από το σύνολο των φωτογραμμετρικών σημείων τα οποία μετρούνται επί των εικόνων (προβολικά κέντρα, σημεία σύνδεσης, φωτοσταθερά). Η επίλυση του αεροτριγωνισμού οδηγεί στον υπολογισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων σύνδεσης (των οποίων μετρώνται οι εικονοσυντεταγμένες), αλλά και στον υπολογισμό των στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε εικόνα (γεωδαιτικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου και γωνίες στροφής ως προς τον κάθε άξονα του τρισσορθογώνιου καρτεσιανού γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς). Ως απαραίτητες παρατηρήσεις για τη μόρφωση του φωτογραμμετρικού συστήματος εξισώσεων με βάση τη συνθήκη της συγγραμμικότητας, σκοπεύθηκε και μετρήθηκε ικανός αριθμός σημείων σύνδεσης (tie points) καθώς και των GCP των οποίων οι γεωδαιτικές συντεταγμένες μετρήθηκαν επί του DSM της περιοχής. Η φωτογραμμετρική διαδικασία της παραγωγής της ψηφιακής ορθοεικόνας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ERDAS/LPS και η εκτέλεση του αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο της συνόρθωσης κατά δέσμες (bundle adjustment), οδήγησε στον προσανατολισμό του μπλοκ των αεροφωτογραφιών με αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 6-1.

Αποτελέσματα αεροτριγωνισμού	
GCP RMSE X (m)	0,5307
GCP RMSE Y (m)	0,6460
GCP RMSE Z (m)	0,8152
Total GCP RMSE (m)	1,168
Total RMSE (pixel)	1,871

Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα επίλυσης αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο της κατά δέσμες συνόρθωσης

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE της θέσης των GCP, υπολογίζεται από τις διαφορές μεταξύ των μετρημένων συντεταγμένων για αυτά (τις οποίες εισάγει ο χρήστης) και ενός σετ βελτιωμένων συντεταγμένων οι οποίες προκύπτουν από τη συνόρθωση, βάσει της παραμετροποίησης της επίλυσης και των δεδομένων εισόδου.. Γενικά, η ποιότητα της επίλυσης του αεροτριγωνισμού εκφράζεται με το ολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE, το οποίο υπολογίζεται να είναι μικρότερο των 2 pixel. Με βάση την διάσταση της εδαφοψηφίδας των αρχικών αεροφωτογραφιών η οποία είναι $D_{a/\varphi} = 30$ cm, η επίλυση του αεροτριγωνισμού δείχνει μια μέση αβεβαιότητα περίπου 57 cm (1,9 pixel). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν να είναι πολύ ικανοποιητικά, και σε γενικές γραμμές εντός του ορίου των 1,25 m το οποίο απαιτεί η κλίμακα εκτύπωσης 1:5.000.

6.5 Ορθοαναγωγή

Το τελικό στάδιο για την παραγωγή της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας, είναι η διαδικασία της ορθοαναγωγής. Η διαδικασία αυτή αποβλέπει στον μετασχηματισμό των εικόνων από τη γεωμετρία της κεντρικής προβολής σε ορθή προβολή και στη δημιουργία μιας εικόνας με ενιαία κλίμακα. Οι οριζοντιογραφικές μετατοπίσεις των αντικειμένων οι οποίες παρουσιάζονται στις αεροφωτογραφίες λόγω των προοπτικών παραμορφώσεων που προκαλούνται από την ύπαρξη υψομετρικών διαφορών, αναιρούνται με την τεχνική της ορθοαναγωγής, καθιστώντας την τελική ορθοφωτογραφία μια μετρητική, ορθή αναπαράσταση της πραγματικότητας.

Η διαδικασία απαιτεί την χρήση ενός μοντέλου υψομέτρων, το οποίο πρέπει να περιγράφει τόσο το έδαφος, όσο και τα υπερκείμενα αυτού αντικείμενα. Η συνήθης φωτογραμμετρική πρακτική, αφορά την χειροκίνητη ή αυτόματη συλλογή ενός DTM με κατάλληλο βήμα κανάβου, καθώς και την ενίσχυση αυτού με όσες γραμμές αλλαγής κλίσης (breaklines) απαιτούνται. Η συλλογή τόσο του DTM, όσο και των breaklines, πραγματοποιείται επί των προσανατολισμένων στερεομοντέλων τα οποία έχουν δημιουργηθεί μετά την επίλυση του αεροτριγωνισμού και, στο σύνολό τους, τα δύο αυτά στοιχεία συνδυαζόμενα δημιουργούν μια υβριδική επιφάνεια, η οποία χαρακτηρίζεται ως DTM στο σύνολό της, αλλά ως DSM στις περιοχές όπου υφίστανται breaklines (π.χ. στέγες κτηρίων). Ως εναλλακτική, πολλές φορές χρησιμοποιείται ένα ήδη έτοιμο DTM, το οποίο ενισχύεται με τη συλλογή breaklines, διαδικασία όμως η οποία συναντά σοβαρούς περιορισμούς, κυρίως λόγω διαθεσιμότητας και καταλληλότητας των υπαρχόντων DTM.

Το DSM που εξάγεται από τα δεδομένα της σάρωσης LiDAR, αποτελεί μια άριστη επιφάνεια για χρήση στη διαδικασία της ορθοαναγωγής, δεδομένου ότι εκτός της μεγάλης πυκνότητας των σημείων, περιέχει και όλα τα σημεία που απαρτίζουν τις γραμμές αλλαγής κλίσης μεταξύ των διαφόρων επιφανειών. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι παρόλο που δεν ενσωματώνεται κάποια πληροφορία ώστε τα εν λόγω σημεία να μορφώσουν μια γραμμή η οποία θα αντιμετωπισθεί ως γραμμή αλλαγής κλίσης από τον αλγόριθμο παραγωγής του DSM, αυτό δεν αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τη διαδικασία της ορθοαναγωγής, δεδομένης της πολύ πυκνής και ορθής υψομετρικής πληροφορίας την οποία ενσωματώνει η συγκεκριμένη επιφάνεια, λόγω της φύσης του νέφους σημείων. Ο αριθμός των γραμμών αυτών (στέγες κτηρίων, φρύδια και πόδια πρανών, πτυχώσεις του εδάφους, τοιχία, ξερολιθιές, γέφυρες κ.α.) είναι σημαντικά πολύ μεγαλύτερος, από τον αντίστοιχο ο οποίος δύναται να συλλεχθεί χειροκίνητα από το χρήστη, εντός πάντα των ορίων της οικονομικότητας των μέσων εργασίας. Παράλληλα, η χωρική ανάλυση του DSM που εξάγεται από τα δεδομένα LiDAR είναι σημαντικά υψηλή, γεγονός που το καθιστά ικανό για την εκτέλεση ορθοαναγωγής ακόμα και σε εργασίες πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (π.χ. παραγωγή αστικών ορθοεικόνων κλίμακας 1.1000).

Η ορθοαναγωγή του μπλοκ των αεροφωτογραφιών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του DSM βήματος 1 m που εξήχθη από το νέφος σημείων, το οποίο είναι σημαντικά πιο λεπτομερές από το θεωρητικώς απαιτούμενο DTM βήματος 7,5 m (§ 6.2).

Η παραγωγή του τελικού μωσαϊκού από τις ορθοεικόνες που δημιουργήθηκαν από τις αρχικές αεροφωτογραφίες, ολοκληρώθηκε με την εκτέλεση των απαραίτητων ραδιομετρικών ρυθμίσεων χρώματος και φωτισμού, προκειμένου να παραχθεί ένα οπτικά ομοιόμορφο αποτέλεσμα, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 6.5.



Εικόνα 6-5: Ψηφιακό ορθοφωτομωσαϊκό

6.6 Έλεγχος αποτελεσμάτων

Προκειμένου να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της διαδικασίας της παραγωγής ορθοφωτογραφίας με τη χρήση του LiDAR/DSM τόσο για τη συλλογή των GCP's, όσο και για τη διαδικασία της ορθοαναγωγής, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από ελέγχους. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν τόσο το παραγόμενο οπτικό αποτέλεσμα, όσο και την οριζοντιογραφική αξιοπιστία την οποία παρουσιάζει το τελικό ορθοφωτομωσαικό και περιγράφονται στη συνέχεια.

✓ Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε κυρίως με βάση την απαίτηση εξακρίβωσης του βαθμού καταλληλότητας του DSM, για την άρση των παραμορφώσεων που δημιουργούνται στις ορθοεικόνες, όταν δεν συλλέγονται γραμμές αλλαγής κλίσεων. Το φαινόμενο αυτό των παραμορφώσεων (εικ. 6-6), γίνεται περισσότερο έντονο σε περιβάλλοντα με απότομες υψομετρικές διακυμάνσεις, όπως εντός αστικού ιστού, σε απότομα πρανή, σε ορεινές περιοχές με μεγάλες κλίσεις εδάφους κ.α.

Όπως προαναφέρθηκε, η χειροκίνητη συλλογή των γραμμών αλλαγής κλίσεων είναι μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, η οποία στην παρούσα εργασία παρακάμφθηκε με τη χρήση του DSM από το νέφος σημείων του LiDAR, ως μοντέλου υψομέτρων για την εκτέλεση της διαδικασίας της ορθοαναγωγής. Σε μια επισκόπηση του ορθοφωτομωσαικού που παράχθηκε, διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζει ελάχιστες, έως καθόλου παραμορφώσεις ακόμα και στις περιοχές με έντονο αστικό ιστό (εικ. 6-7), ενώ οι μικρές τοπικές αδυναμίες μπορούν πολύ εύκολα να αρθούν με την συλλογή μικρού αριθμού γραμμών αλλαγής κλίσης, για βέλτιστο οπτικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 6-6: Παραμορφώσεις σε ορθοφωτογραφία, λόγω σφαλμάτων DTM (μη συλλογή γραμμών αλλαγών κλίσεων) στην περιοχή της Ν. Σαντορίνης



Εικόνα 6-7: Λεπτομέρεια του ψηφιακού ορθοφωτομωσαικού

✓ Οριζοντιογραφικός έλεγχος

Ο οριζοντιογραφικός έλεγχος μια παραγόμενης ορθοφωτογραφίας, γίνεται με την χρήση εξωγενώς μετρημένων σημείων ελέγχου, τα οποίων οι συντεταγμένες έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια, ώστε να θεωρούνται ορθές. Στην ιδανική περίπτωση, τα σημεία αυτά ελέγχου, πρέπει να έχουν μετρηθεί στο πεδίο (με επίγειες μεθόδους) και να μην συμμετέχουν στην επίλυση του αεροτριγωνισμού. Με τον τρόπο αυτό, το σύνολο των σημείων ελέγχου μορφώνει ένα δίκτυο παρατηρήσεων οι οποίες είναι πλήρως ανεξάρτητες από την φωτογραμμετρική διαδικασία που ακολουθήθηκε, με συνέπεια η υπέρθεσή τους στην ορθοεικόνα να φανερώνει τις τυχόν οριζοντιογραφικές αποκλίσεις αυτής. Ποσοτικοποιώντας τις αποκλίσεις αυτές με τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE, ο χρήστης δύναται να πραγματοποιήσει μια εκτίμηση της οριζοντιογραφικής ποιότητας της ψηφιακής ορθοεικόνας και κατά συνέπεια των διαδικασιών από τις οποίες παράχθηκε.

Για την περιοχή της Ν. Μήλου δεν υπήρξε διαθεσιμότητα επίγειων μετρήσεων, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ένας ιδανικός οριζοντιογραφικός έλεγχος και συνεπώς πραγματοποιήθηκε ένας χονδρικός έλεγχος της εσωτερικής αξιοπιστίας των διαδικασιών, με υπέρθεση του ορθοφωτομωσαικού επί της εικόνας έντασης, αλλά και μια σύγκριση με την αντίστοιχη ορθοφωτογραφία της Κτηματολόγιο Α.Ε, η οποία συνιστά έναν εξωγενή οριζοντιογραφικό έλεγχο.

Η υπέρθεση του ορθοφωτομωσαικού επί της εικόνας έντασης, έδειξε πολύ καλή ταύτιση μεταξύ των δύο υποβάθρων (εικ. 6-8) γεγονός που δείχνει ότι οι διαδικασίες παραγωγής της ορθοφωτογραφίας παρουσιάζει στο σύνολό της καλή εσωτερική αξιοπιστία.



Εικόνα 6-8: Οριζοντιογραφική ταύτιση μεταξύ εικόνας έντασης και ψηφιακού ορθοφωτομωσαϊκού

Για τη σύγκριση με την αντίστοιχη ορθοφωτογραφία της Κτηματολόγιο Α.Ε., πραγματοποιήθηκε η μέτρηση των συντεταγμένων 20 σημείων και στα δύο υπόβαθρα. Από τις διαφορές των συντεταγμένων αυτών, υπολογίστηκε το σφάλμα RMSE, η μέση οριζοντιογραφική μετάθεσή τους και η τυπική απόκλιση αυτής, κατά τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.4.1.

Από την σύγκριση αυτή, προκύπτει (πάλι) μια συστηματική μετάθεση μεταξύ της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε. και του παραχθέντος ψηφιακού ορθοφωτομωσαϊκού. Η ακρίβεια του υπολογισμού της μετάθεσης υπολογίζεται εντός των αναμενόμενων ορίων (περίπου της τάξεως του 1 m), ενώ στο σύνολό της η μετάθεση αυτή εμφανίζεται λίγο μεγαλύτερη από την προσδιορισθείσα κατά την οριζοντιογραφική σύγκριση του LiDAR/DSM και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε. (§5.4.1), όπως φαίνεται από τη σχέση 6.6. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, δεδομένης της συσσώρευσης σφαλμάτων από τις ενδιάμεσες φωτογραμμετρικές διαδικασίες, της επίλυσης του αεροτριγωνισμού και της παραγωγής του ορθοφωτομωσαϊκού.

$$RMSE_{ο/φ-κτηματολόγιο} - RMSE_{DSM-κτηματολόγιο} = 7,59 - 6,93 = 0,66 \text{ m} \quad (6.6)$$

Τα αίτια της μετάθεσης δεν μπορούν να αποσαφηνιστούν με βεβαιότητα, λόγω της απουσίας επίγειων μετρήσεων υψηλής ακρίβειας, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία ελέγχου, αλλά και λόγω μη πρόσβασης στα αρχικά δεδομένα LiDAR και στις διαδικασίες QA/QC που ακολουθήθηκαν (§ 5.4.1). Θεωρώντας ότι η συστηματική αυτή μετάθεση μπορεί εύκολα να απαλοιφεί με την χρήση ενός κοινού σημείου, αλλά και ότι οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες, εξάγεται

το ασφαλές συμπέρασμα ότι η ανωτέρω προτεινόμενη διαδικασία παραγωγής ορθοεικόνας (από τα διαθέσιμα δεδομένα), δύναται να καλύψει τις απαιτήσεις τις κλίμακας 1:5.000. Η κλίμακα αυτή αποτελεί βασικό υπόβαθρο για την χωρική ανάλυση που απαιτείται κατά τον σχεδιασμό αλλά και την κατασκευή της πλειοψηφίας των μεγάλων τεχνικών έργων (π.χ. οδοποιίας, χωροθέτησης και μελέτης φραγμάτων κ.α.), αλλά και για εργασίες που αφορούν σχεδιασμό του χώρου γενικότερα όπως πολεοδομικές παρεμβάσεις κ.α.. Προφανώς, η διαδικασία υπερπληροί τις προδιαγραφές ακριβείας μικρότερων κλιμάκων (1:10.000, 1:25.000, 1:50.000 κ.α.) οι οποίες χρησιμοποιούνται για χαρτογραφήσεις εθνικού επιπέδου και αποτυπώσεις μεγάλων εκτάσεων. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα παραγωγής τέτοιων υποβάθρων από δεδομένα LiDAR, πλεονεκτεί των συνήθων φωτογραμμετρικών διαδικασιών, τόσο από άποψη χρόνου παραγωγής, όσο και λόγω της γενικής οικονομικότητας του έργου, αφού τα ίδια δεδομένα LiDAR μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα και από άλλους χρήστες για διαφορετικής φύσεως εργασίες.

Α/Α	Ο/Φ με GCP από LiDAR		Ο/Φ Κτηματολόγιο Α.Ε.		Μέσες τιμές διαφορών		Τυπική απόκλιση		RMSE	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	$\overline{\Delta x}$	$\overline{\Delta y}$	$\sigma_{\overline{\Delta x}}$	$\sigma_{\overline{\Delta y}}$	x	y
1	271491,26	4069888,11	271496,97	4069883,76	-5,44 m	5,16 m	0,81 m	0,85 m	5,50 m	5,23 m
2	271510,55	4069122,40	271515,42	4069118,03						
3	271349,50	4068834,20	271356,31	4068829,14						
4	271420,42	4068400,22	271425,43	4068394,23						
5	270829,41	4069916,38	270834,07	4069912,04						
6	270404,79	4069861,66	270410,06	4069854,74						
7	269885,42	4069793,68	269890,70	4069787,19						
8	269348,65	4069799,02	269355,43	4069793,31						
9	270824,40	4069485,96	270829,25	4069481,16						
10	270849,67	4069108,86	270854,73	4069104,43						
11	270795,19	4068834,66	270800,95	4068829,64						
12	270839,08	4068582,20	270844,63	4068577,25						
13	270482,56	4069526,16	270487,14	4069520,62						
14	270441,36	4069123,28	270446,20	4069118,75						
15	270440,26	4068879,40	270445,78	4068875,08						
16	270455,59	4068502,96	270459,74	4068498,85						
17	269961,99	4069548,33	269969,36	4069542,32						
18	270010,12	4069146,24	270015,86	4069140,59						
19	269966,51	4068885,72	269972,51	4068881,37						
20	270074,08	4068493,13	270079,10	4068486,88						
Συνολικά					$\overline{\Delta s}$	$\sigma_{\overline{\Delta s}}$	RMSE			
					7,50 m	±0,83 m	7,59 m			

Πίνακας 6-2: Πίνακας εκτίμησης οριζοντιογραφικής μετάθεσης μεταξύ του ψηφιακού ορθοφωτομωσαϊκού και της ορθοφωτογραφίας της Κτηματολόγιο Α.Ε.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης της παρούσης διπλωματικής εργασίας, διατυπώνονται μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την ενασχόληση με το αντικείμενο των εναέριων σαρωτών LiDAR. Τα συμπεράσματα αυτά, μορφώθηκαν μέσα από την μελέτη της βιβλιογραφίας, την πρακτική τριβή με την επεξεργασία των δεδομένων LiDAR, αλλά και μέσα από τις δυσχέρειες και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την εκτέλεση των εφαρμογών. Αποτελούν συμπεράσματα τα οποία αφορούν κυρίως το αντικείμενο της παρούσης εργασίας και η γενίκευσή τους θα πρέπει να πραγματοποιείται έχοντας υπόψη τις διαφορετικές παραμέτρους της κάθε εργασίας.

Το πεδίο εφαρμογών με χρήση δεδομένων LiDAR διευρύνεται συνεχώς, καλύπτοντας πολλούς διαφορετικούς επιστημονικούς χώρους οι οποίοι όμως σχετίζονται με το κοινό χαρακτηριστικό της μελέτης και ανάλυσης του φυσικού χώρου. Στη βάση αυτή, διατυπώνονται μια σειρά από προτάσεις, οι οποίες αφορούν μελλοντικά ερευνητικά θέματα που μπορούν να διερευνηθούν επάνω στο αντικείμενο της αξιοποίησης των εναέριων δεδομένων σάρωσης και αφορούν το γνωστικό πεδίο του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού.

➤ Συμπεράσματα

✓ Η τεχνολογία των εναέριων σαρωτών LiDAR παρουσιάζει πολύ ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης, λόγω της ανάλογης προόδου στα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά μέσα τα οποία ενσωματώνει το σύστημα. Τα νέα συστήματα μπορούν να σαρώνουν με υψηλούς ρυθμούς και με τεχνικές όπως οι καταγραφή πολλαπλών επιστροφών, η ταυτόχρονη ύπαρξη πολλών παλμών laser στον αέρα (MPiA) και η ανάλυση πλήρους σήματος, οι οποίες έχουν ως συνέπεια την συλλογή ιδιαίτερα περιεκτικών σε πληροφορία και λεπτομερών νεφών σημείων, κατάλληλα για κάθε εφαρμογή.

✓ Τα διατιθέμενα συστήματα σαρωτών LiDAR στην αγορά την παρούσα χρονική στιγμή είναι αρκετά και οι κατασκευάστριες εταιρίες παρέχουν διαφορετικά μοντέλα τα οποία είναι βελτιστοποιημένα για γενική χρήση, για χρήσεις ειδικού σκοπού, για εργασίες εθνικού επιπέδου κ.α. Το δε κόστος τους μπορεί να ξεκινά από 600.000 - 700.000 € έως και να ξεπερνά το 1.000.000 €, ιδιαίτερα για σαρωτές ειδικών σκοπών. Η εξέλιξη όμως της τεχνολογίας, οδηγεί το κόστος των σαρωτών LiDAR να εμφανίζει πτωτική τάση, ενώ παράλληλα αυξάνεται το πεδίο εφαρμογής τους, γεγονός που σε βάθος χρόνου καθιστά την προμήθεια ενός τέτοιου συστήματος οικονομικά συμφέρουσα.

✓ Οι ακρίβειες που δύναται να επιτευχθούν από τις σαρώσεις με συστήματα LiDAR είναι ιδιαίτερα υψηλές και μπορούν να αγγίξουν τις λίγες δεκάδες εκατοστά οριζοντιογραφικά και σημαντικά μικρότερες υψομετρικά. Ωστόσο οι ακρίβειες αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν μόνο ως ονομαστικές, δεδομένου ότι προϋποθέτουν ιδανικές συνθήκες σάρωσης όπως επίπεδο έδαφος, άριστη γεωμετρία δορυφόρων του χρησιμοποιούμενου αστερισμού GNSS, τέλεια βαθμονόμηση του συστήματος, χαμηλό ύψος πτήσης, μικρό εύρος σάρωσης, απουσία έντονων κατασκευών επί του εδάφους, ομαλές συνθήκες πτήσης κ.α.

✓ Η διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος, αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την ακρίβεια του νέφους σημείων, μαζί με τον ακριβή προσδιορισμό των συντεταγμένων του σταθμού GNSS εδάφους, ως προς τις οποίες γεωκωδικοποιούνται τα σημεία. Η βαθμονόμηση πρέπει να πραγματοποιείται με λεπτομερείς διαδικασίες και τα αποτελέσματά της να ελέγχονται πριν την εκτέλεση της αποστολής σάρωσης. Γενικά, όλες οι διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας (QA) είναι απαραίτητο να εκτελούνται με ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια, προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

✓ Η πραγματική ακρίβεια του νέφους σημείων μπορεί να διαπιστωθεί και να ποσοτικοποιηθεί, μόνο με τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου, τα οποία συλλέγονται προ ή μετά της πτήσης. Τα σημεία αυτά πρέπει να παρουσιάζουν μια καλή κατανομή, σε όλο το εύρος της περιοχής σάρωσης, προκειμένου η διαδικασία ελέγχου να παρέχει όσο το δυνατόν ποιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Ο ποιοτικός αυτός έλεγχος (QC) πρέπει να πραγματοποιείται από τον παροχέα των δεδομένων και μια λεπτομερής έκθεση QA/QC πρέπει να παραδίδεται μαζί με τα δεδομένα στο χρήστη.

✓ Για την περίπτωση της απουσίας της έκθεσης QA/QC (π.χ. χρήση δεδομένων άγνωστης προέλευσης ή από τρίτους), καθώς και για λόγους επιπλέον ελέγχου από τους χρήστες των δεδομένων, ο πλέον ασφαλής τρόπος ποιοτικού ελέγχου (QC) συνίσταται στην παραγωγή raster προϊόντων και την εκτέλεση οριζοντιογραφικών και υψομετρικών συγκρίσεων με ακριβή δεδομένα πεδίου ή ακόμα και με άλλα raster δεδομένα τα οποία παρουσιάζουν ελεγμένα υψηλή ακρίβεια.

✓ Η διαχείριση των δεδομένων από εναέριους σαρωτές LiDAR απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, δεδομένου του μεγάλου όγκου των αρχείων. Η δημιουργία μεμονωμένων αρχείων με όγκο μεγαλύτερο των 2Gb πρέπει να αποφεύγεται (προδιαγραφές για δεδομένα LiDAR από την USGS) και ενιαίες λωρίδες σάρωσης που οδηγούν σε τέτοια αρχεία πρέπει να υφίστανται κατάτμηση κατά το σχεδιασμό της πτήσης.

✓ Τα διαθέσιμα αυτή τη στιγμή, εμπορικά πακέτα διαχείρισης δεδομένων LiDAR είναι επαρκή για την εκτέλεση ενός μεγάλου εύρους εργασιών, παρουσιάζουν όμως αρκετά υψηλό κόστος. Τα δωρεάν εργαλεία διαχείρισης τα οποία ελέγχθηκαν, είναι σε θέση να επιτελούν βασικές εργασίες επί των νεφών σημείων, υφίστανται όμως σοβαρούς περιορισμούς λόγω μεγέθους αρχείων και πληρότητας διεργασιών που ενσωματώνουν.

✓ Η ροή εργασιών που διατυπώθηκε στην παρούσα εργασία, μπορεί να καθοδηγήσει το χρήστη σε μια αποτελεσματική εκμετάλλευση των δεδομένων σάρωσης και στην γρήγορη εξαγωγή προϊόντων, δεδομένης της τυποποίησης της διαδικασίας παραγωγής αλλά και της ενσωμάτωσης πολλών αυτοματισμών.

✓ Η πρώτιστη και βασικότερη επεξεργασία που πρέπει να υποστεί ένα νέφος σημείων είναι η διαδικασία του φιλτραρίσματος, για τον διαχωρισμό των επίγειων (ground) από τα υπέργεια (non-ground) σημεία. Οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για την εκτέλεση του διαχωρισμού αυτού λειτουργούν βάση κριτηρίων όπως η κλίση, η διαφορά υψομέτρου, η μορφολογικές διαφορές κ.α. Αποτελούν αντικείμενο που συνεχώς εξελίσσεται και η εύρεση του κατάλληλου αλγόριθμου για την πραγματοποίηση του βέλτιστου φιλτραρίσματος εξαρτάται τόσο από τη μορφολογία του εδάφους όσο και τις υφιστάμενες καλύψεις γης. Σημαντικό ρόλο ενέχει και η εμπειρία του χρήστη, με βάση την οποία ρυθμίζονται οι διάφορες παράμετροι, βάσει των οποίων ο εκάστοτε χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος θα επιτελέσει το φιλτράρισμα.

✓ Τα σημεία τα οποία ανήκουν σε υπερκείμενα του εδάφους αντικείμενα, μπορούν να ταξινομηθούν (αρχικά αυτόματα) στις προκαθορισμένες από την ASPRS κλάσεις του προτύπου .las. Οι κλάσεις αυτές περιλαμβάνουν κατηγορίες όπως βλάστηση, υδάτινες επιφάνειες, γέφυρες, κτήρια, σύρματα μεταφοράς ενέργειας και πολλές άλλες, ενώ ένας αριθμός κλάσεων είναι διαθέσιμος για να οριστούν νέες κατηγορίες από τους χρήστες, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας. Η ολοκλήρωση της ταξινόμησης των υπέργειων σημείων στις διάφορες κλάσεις, απαιτεί αρκετή χειροκίνητη επεξεργασία και υπολογίζεται ότι καταλαμβάνει το 70% του συνολικού χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων. Αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία, δεδομένου ότι από ένα πλήρως ταξινομημένο νέφος σημείων, είναι δυνατή η εξαγωγή μεμονωμένων τάξεων αντικειμένων (π.χ. κτήρια) με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια.

✓ Η παραγωγή raster προϊόντων επιφανείας (DSM και DTM) δεν απαιτεί πλήρη ταξινόμηση του νέφους σημείων, παρά μόνο την ολοκλήρωση της διαδικασίας φιλτραρίσματος. Θα πρέπει να πραγματοποιείται με βήμα κανάβου τουλάχιστον ίσο με την μέση απόσταση μεταξύ σημείων στο νέφος, προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι εντός κάθε pixel της raster επιφανείας θα υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο του νέφους (οι προδιαγραφές της USGS ορίζουν ελάχιστο βήμα κανάβου το διπλάσιο της μέσης απόστασης μεταξύ σημείων). Η δημιουργία των προϊόντων αυτών, τα οποία εν δυνάμει παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια, είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα τόσο από οικονομικής άποψης, όσο και λόγω σημαντικά μικρότερου χρόνου επεξεργασίας σε σχέση με τις συμβατικές φωτογραμμετρικές και συμβολομετρικές διαδικασίες (Interferometric Synthetic Aperture Radar – IFSAR), εφόσον φυσικά υπάρχουν διαθέσιμα τα δεδομένα LiDAR.

✓ Είναι δυνατόν να μετρηθούν φωτοσταθερά σημεία επί του σκιασμένου LiDAR/DSM της περιοχής εργασίας, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ψηφιακής ορθοεικόνας. Με βάση τα δεδομένα της εργασίας, η ακρίβεια των φωτοσταθερών επαρκεί οριακά για χρήση σε κλίμακα 1:5.000, ενώ υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις για τις μικρότερες συνήθεις κλίμακες (1:10.000, 1:25.000, 1:50.000 κ.α.). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την παράλληλη λήψη αεροφωτογραφιών από την ενσωματωμένη στο σύστημα ψηφιακή φωτομηχανή μεσαίου format, καθιστά τις αποστολές συλλογής LiDAR πλήρεις πηγές δεδομένων. Από αυτές, μπορούν ταυτόχρονα με την σάρωση για εξαγωγή ακριβών υψομετρικών μοντέλων, να εξάγονται και εικονιστικά υπόβαθρα (ορθοφωτομωσαικά) ως παράλληλα προϊόντα και ουσιαστικά χωρίς επιπλέον κόστος, συμβάλλοντας έτσι ουσιαστικά στην σύγχρονη απαίτηση για οικονομία μέσων και πόρων.

✓ Η εκτέλεση της διαδικασίας της ορθοαναγωγής, υποβοηθείται σε σημαντικό βαθμό με την χρήση του LiDAR DSM, δεδομένης της μικρότερης απαίτησης για συλλογή γραμμών αλλαγής κλίσεων, γεγονός που συμβάλλει στην οικονομικότητα των παραγωγικών διαδικασιών.

➤ **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

✓ Σύγκριση διαθέσιμων αλγόριθμων φιλτραρίσματος νεφών σημείων και καταγραφή αποτελεσμάτων σε περιοχές με ποικιλόμορφη τοπογραφία και καλύψεις γης.

✓ Σύγκριση διαδικασιών παρεμβολής (IDW, Kriging, Spline κ.α.) για την δημιουργία raster προϊόντων από το νέφος σημείων και έλεγχος σφαλμάτων που εισάγουν.

✓ Ενασχόληση με τη διαδικασία της ταξινόμησης του νέφους σημείων και εκτίμηση του βαθμού απόδοσης των ήδη υπαρχόντων αυτοματισμών. Χειροκίνητη επεξεργασία του αρχικά αυτόματα ταξινομημένου νέφους και εκτίμηση του απαραίτητου χρόνου εργασίας για την επίτευξη κάθε επιπέδου λεπτομέρειας.

- ✓ Εξαγωγή περιγραμμάτων κτηρίων από το νέφος σημείων μέσω διαδικασίας ταξινόμησης και διερεύνηση της δυνατότητας υποβοήθησης της διαδικασίας μέσω τροφοδότησης με πολύγωνα από τοπογραφικά διαγράμματα.
- ✓ Έλεγχος υψομετρικών μεταβολών μεταξύ περιοδικών DSM για επισήμανση περιοχών αυθαίρετης δόμησης.
- ✓ Ανάπτυξη λογισμικού συνόρθωσης για την άμεση γεωαναφορά εικόνων με ταύτιση γραμμικών στοιχείων εισόδου που εξάγονται από το νέφος και τις εικόνες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Βραδής, Χ., (2000). Στοιχεία Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας (Μετάφραση). ISM Systemap Corporation, Καναδάς.
2. Ιωαννίδης, Χ., (2010). Σημειώσεις μαθήματος Φωτογραμμετρία II. ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα.
3. Καρράς, Γ., (2011). Σημειώσεις μαθήματος Φωτογραμμετρία III. ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα.
4. Πόθου, Α., (2012). Ανάπτυξη διαδικασίας βαθμονόμησης συστήματος LiDAR. Διδακτορική διατριβή. Αθήνα, ΕΜΠ.
5. Τζελέπης, Ν., κ.α. (2008). Μια μεθοδολογία αναλυτικής σκίασης του αναγλύφου με συνδυασμό διαφορετικών διευθύνσεων φωτισμού. Πρακτικά 10^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Χαρτογραφίας, Ιωάννινα.
6. Τσούλος, Λ., (2010). Σημειώσεις μαθήματος Ψηφιακή χαρτογραφία. ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα.

Διεθνής

1. Abdullah, Q., Heidmann H.K., (2012). Accuracy standards and guidelines. At Renslow M.S. (editor), Manual of airborne topographic LiDAR. Maryland , ASPRS.
2. Ackerman, F., (1999). Airborne laser scanning-present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 54.
3. Adams, J.C., Chandler, J.H., (2002). Evaluation of LiDAR and Medium Scale Photogrammetry for Detecting Soft-Cliff Coastal Change. Photogrammetric Record. Vol. 17, 405-418. Remote Sensing and Photogrammetric Society.

4. Axelsson, P., (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXIII, Part B4, 110-117. ISPRS.
5. Axelsson, P., Processing of laser scanner data-algorithms and applications ISPRS *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 138-147.
6. Baltsavias, E.P., (1999). Airborne Laser Scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, volume 54.
7. Bang, K. I., et.al., (2009). Lidar system calibration using overlapping strips. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Vol. 15, Special Issue on Mobile Mapping Technology, 725-742.
8. Bowen, Z.H., Waltermire, R.G., (2002). Evaluation of light detection and ranging (LiDAR) for measuring river corridor topography. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol 3, 33-41.
9. Deng, F., et.al. (2007). Construction 3D Urban Model from LiDAR and Image Sequense. *The International Archives of photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences*, Vol 34.
10. Fei, D., et.al., (2008). Automatic registration between LiDAR and digital images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part B1, 487-490. ISPRS.
11. Flood M., et. al., (2012). Lidar data and complimentary technologies. At Renslow M.S. (editor), *Manual of airborne topographic LiDAR*. Maryland , ASPRS.
12. Flood, M., (1999). *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXII, Part W14,13-20. ISPRS.
13. Habib, A. et.al., *Quality Assurance and Quality Control of LiDAR Systems and Derived Data*.
14. Habib, A., et.al., (2005). *LIDAR data for Photogrammetric Georeferncing*. FIG Working Week and GSDI-8. Cairo Egypt.
15. Heidmann, H.K., et.al. (2012). Applications of ALS systems. At Renslow M.S. (editor), *Manual of airborne topographic LiDAR*. Maryland , ASPRS.
16. Hodgson, M.E., Bresnahan, P., (2004). Accuracy of airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol 70, 331-339. ASPRS.
17. Hofton, M., et.al., (2000). Decomposition of Laser Altimeter Waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
18. J. Reitberger et.al., (2007). Analysis of full waveform LiDAR data for tree species classification, *Munich University of applied Sciences*.
19. Jutzi B., Stilla U. (2005). Waveform processing of laser pulses for reconstruction of surfaces in urban areas. In: Moeller M, Wentz E (eds) 3th International Symposium: Remote sensing and data fusion on urban areas, URBAN 2005. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*
20. Kager, H., (2004). Discrepancies Between Overlapping Laser Scanning Strips-Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips; *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress ,Istanbul*.
21. Kuwano, Y., (2008). *LiDAR System overview and instrument calibration*. Indian Institute of Technology Kanpur, India
22. Lee, J., et.al., (2010). Autoregistration of High Resolution Satellite Imagery Using LiDAR Intensity Data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol 15, 375-384.

23. Mastin, A., et.al., (2009). Automatic Registration of LIDAR and Optical Images of Urban Scenes. Computer Vision and Pattern Recognition IEEE Conference, 2639-2646. Miami.
24. Maune, D.F., (2001). Digital Elevation Model Technologies and applications: The DEM Users Manual. ASPRS, Bethesda, Maryland.
25. Meng, X., et.al. (2009). A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 64. 117-124.
26. Meng, X., et.al. (2010). Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. Remote Sensing, 2, 833-860.
27. Novak, K., 1993. Data collection for multi-media GIS using mobile mapping systems, *GIM*
28. Pack, R.T. et. al., (2012). An overview of ALS technology. At Renslow M.S. (editor), Manual of airborne topographic LiDAR. Maryland , ASPRS.
29. Perez-Garcia, J.L., et.al., (2012). International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIX, Part B3, 155-160. ISPRS.
30. Pfeifer, N., et.al., (2005). Automatic Tie Elements Detection for Laser Scanner Strip Adjustment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 36.
31. Qi Chen., (2007). Airborne Lidar Data Processing and Information Extraction. Center for the Assessment and Monitoring of Forest and Environmental Resources. UC Berkeley.
32. Scherzinger, B. et.al., (2012). An overview of ALS technology. At Renslow M.S. (editor), Manual of airborne topographic LiDAR. Maryland , ASPRS.
33. Schwarz, K.P. and N. El-Sheimy, (2007). Digital Mobile Mapping Systems – State-of-the-Art and Future Trends, Advances in Mobile Mapping Technology, Eds. Tao and Li, Taylor & Francis.
34. Toth, C.K., (2009). R&D of mobile LiDAR mapping and future trends. ASPRS annual conference, Baltimore.
35. Weber, M.J., (1999). Handbook of laser wavelengths. Washington, D.C., CRC Press.
36. Wechsler, S.P., (2011). Development of a LiDAR Derived Digital Elevation Model (DEM) as Input to a METRANS Geographic Information System (GIS). California State University, Long Beach.
37. Wehr, A. and Lohr, U., (1999). Airborne Laser Scanning: An introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, volume 54.
38. Wehr, A., (2009). LiDAR systems and calibration. At Shan, J., and Toth, C.K., (editors), Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. CRC Press.
39. Yuan F., et.al., (2009). DEM generation from airborne LiDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing.
40. Zhang, K., Whitman, D., (2005). Comparison of three algorithms for filtering airborne LiDAR data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal, Vol. 71, 313-324.

Διαδικτυακοί τόποι

1. www.paidio.blogspot.gr (προσπέλαση 3/4/13)
2. www.wikipedia.org
3. <http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/> (προσπέλαση 7/4/13)
4. www.accessscience.com (προσπέλαση 15/4/13)
5. www.e-education.psu.edu (προσπέλαση 5/5/13)
6. www.riegl.com (προσπέλαση 5/6/13)
7. <http://www.riegl.com/nc/products/principle-of-operation-detail/poo/airborne-laser-scanners/print.html> (προσπέλαση 5/6/13)
8. www.leica-geosystems.com (προσπέλαση 5/6/13)
9. www.gim-international.com (προσπέλαση 5/6/13)
10. http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v10.pdf
(προσπέλαση 6/6/13)
11. http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v11.pdf
(προσπέλαση 6/6/13)
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v12.pdf
(προσπέλαση 6/6/13)
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v13.pdf
(προσπέλαση 6/6/13)
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v14.pdf
(προσπέλαση 6/6/13)
12. <http://www.itc.nl/personal/vosselman/papers/vosselman2002.columbus.pdf>
(προσπέλαση 15/6/13)
13. http://eprints.usq.edu.au/3871/1/Liu_Progress_in_Phys_Geog_v32n1.pdf
(προσπέλαση 16/6/13)
14. www.fema.gov (προσπέλαση 9/7/13)
15. <http://arsf.nerc.ac.uk> (προσπέλαση 12/7/13)
16. http://www-scf.usc.edu/~luwang/pdf/lu_CVPR09.pdf (προσπέλαση 25/8/13)