



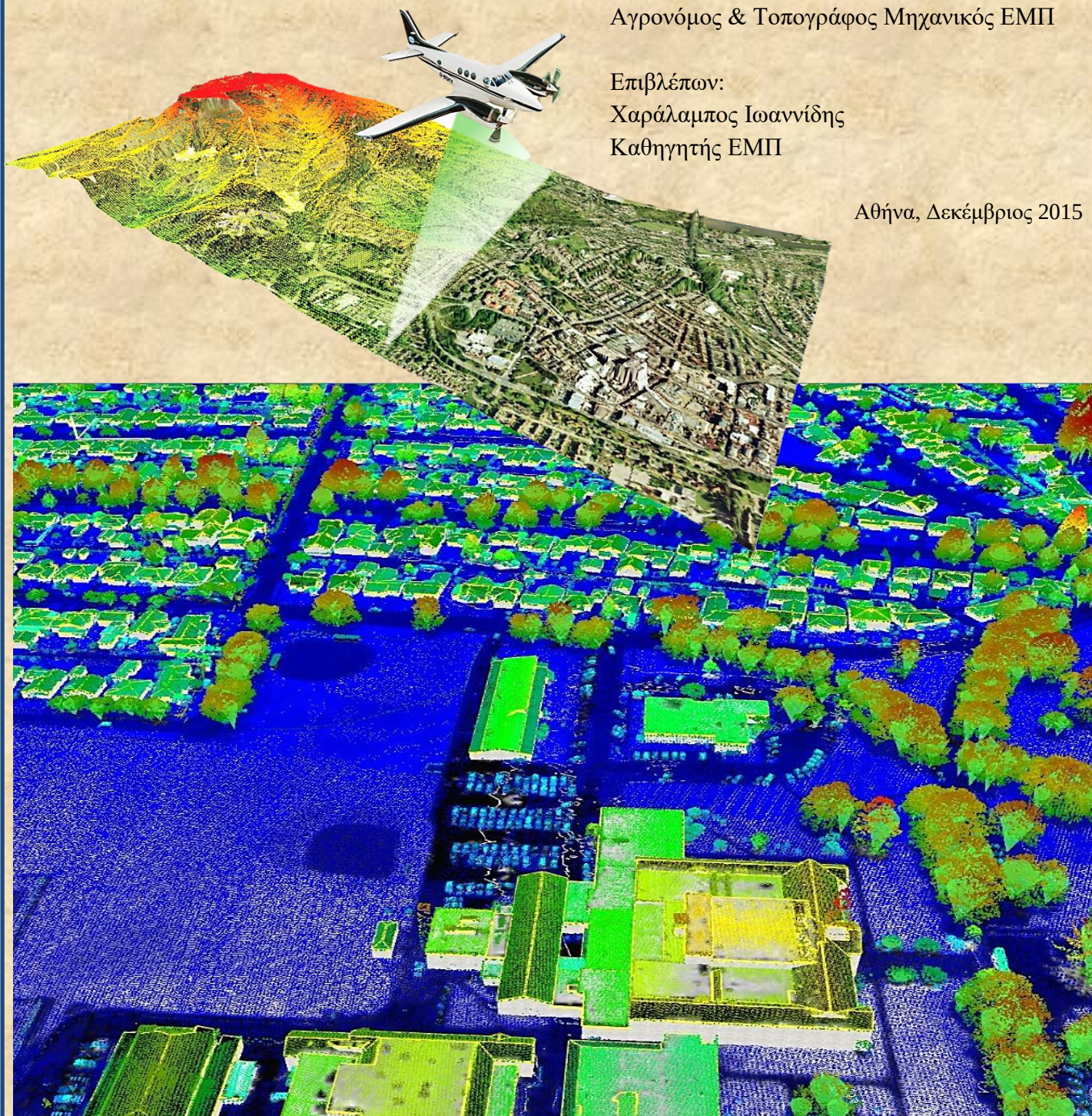
**ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ LiDAR ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ
LiDARGRAMMETRY ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ
ΕΙΚΟΝΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Φράγκος
Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων:
Χαράλαμπος Ιωαννίδης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών

ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



NATIONAL TECHNICAL

UNIVERSITY OF ATHENS

School of Rural & Surveying Engineering

GEOINFORMATICS

POST-GRADUATE PROGRAMME

**ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ LiDAR
ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ LiDARGRAMMETRY ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ
ΦΙΛΤΡΩΝ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΦΡΑΓΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χαράλαμπος Ιωαννίδης
Καθηγητής ΕΜΠ

Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Γεώργιος Καρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2015

Ημερομηνία εξέτασης

Παναγιώτης Λ. Φράγκος

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.
MSc Geoinformatics

Copyright © Παναγιώτης Λ. Φράγκος, 2015

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 : Exelis Visual Information Solutions

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα μιας πορείας στον ακαδημαϊκό χώρο, μέσα από την οποία μου δόθηκε μια σημαντική ευκαιρία τόσο για προσωπική όσο και για επιστημονική ολοκλήρωση στην ενασχόληση με το αντικείμενο του Τοπογράφου Μηχανικού. Αισθάνομαι την υποχρέωση να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα μου, Καθηγητή κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη, τόσο για την ευκαιρία που μου παρείχε για την ενασχόληση με αντικείμενα του άμεσου ενδιαφέροντός μου, όσο και για την πολύτιμη καθοδήγησή και υποστήριξή του καθόλη την απαιτητική πορεία εκπόνησης της παρούσης.

Ευχαριστίες οφείλω και στα λοιπά μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή κ. Γεωργόπουλο Ανδρέα και Καθηγητή κ. Καρρά Γεώργιο τόσο για τις δικές τους συμβουλές όσο και για την αξιολόγηση της εργασίας. Τέλος ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Δουλάμη Νικόλαο, για τον χρόνο που μου αφιέρωσε και για την πολύτιμη κριτική του σε θέματα αλγορίθμων και υπολογιστικών τεχνικών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο ενασχόλησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορά την εξαγωγή ιχνών κτιρίων από δεδομένα LiDAR, τόσο μέσω της τεχνικής Lidargrammetry, όσο και με την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων μεθόδων με τεχνικές όρασης υπολογιστών.

Η τεχνική Lidargrammetry αφορά στην παραγωγή στερεομοντέλων από εικόνες έντασης, οι οποίες εξάγονται απευθείας από το νέφος σημείων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό για την 3d στερεοαπόδοση γεωχωρικών δεδομένων. Η παραγωγή στερεομοντέλων έντασης βασίζεται στις αρχές των stereo-orthomates και αφορά την κατασκευή μιας παράγωγης εικόνας επί της οποίας εισάγεται κατάλληλη ποσότητα παράλλαξης με τεχνητό τρόπο. Η παράγωγή αυτή εικόνα (mate) σε συνδυασμό με την αρχική, παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού στερεοζεύγους ικανού για την επίτευξη στερεοπαρατήρησης και από το οποίο δύνανται να αποδίδονται 3d δεδομένα. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση ενός πυκνού νέφους (55 σημείων/m^2), το οποίο αραιώνεται διαδοχικά σε πυκνότητες 20 σημείων/m^2 και 5 σημείων/m^2 . Τα στερεομοντέλα έντασης παράγονται από το κάθε νέφος και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού 3d ψηφιοποίησης, εξάγονται τα ίχνη των κτιρίων στην περιοχή εργασίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση των ιχνών αυτών με αντίστοιχα δεδομένα ελέγχου, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα τόσο για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όσο και το βαθμό στον οποίο η μειούμενη ευκρίνεια των εικόνων έντασης από αραιότερα νέφη, επηρεάζει την φωτοερμηνευτική ικανότητα του χειριστή. Τα παραγόμενα ίχνη, παρουσιάζουν υψηλή χωρική ακρίβεια, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0,5 m και 1,5 m για ποσοστό πάνω από το 90%, καθιστώντας την μέθοδο ικανή για εξαγωγή δεδομένων ακόμα και για μεγάλες κλίμακες διαγραμμάτων.

Η αυτοματοποιημένη προσέγγιση στην εξαγωγή ιχνών κτιρίων, αφορά την ανάπτυξη και πειραματική εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων, οι οποίοι αποδίδουν τα ίχνη με την ελάχιστη παρέμβαση του χειριστή. Η ανάπτυξη των αλγορίθμων γίνεται με την χρήση τεχνικών όρασης υπολογιστών και μαθηματικής μορφολογίας, ενώ ως υπόβαθρα ανίχνευσης χρησιμοποιούνται κατάλληλα προεπεξεργασμένες επιφάνειες DSM από τους παλμούς μονών επιστροφών που παράγονται από το νέφος σημείων. Αναπτύσσονται δύο προσεγγίσεις, οι οποίες βασίζονται στην ανίχνευση ακμών (edge based) και στην ανίχνευση ομοιογενών περιοχών (area-based) αντίστοιχα. Στην πρώτη προσέγγιση πραγματοποιείται απευθείας ανίχνευση των ακμών που συνθέτουν το ίχνος έκαστου κτιρίου, ενώ στην δεύτερη προσέγγιση προηγείται κατάτμηση του υποβάθρου ανίχνευσης με τη μέθοδο του υδροκρίτη. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διαλογή των ανιχνευόμενων αντικειμένων μέσω μιας σειράς φίλτρων, τα οποία επιβάλλουν δεσμεύσεις σχήματος και μεγέθους, ώστε να επιτευχθεί η αφαίρεση των αντικειμένων εκείνων που δεν αντιστοιχούν σε κτίρια. Η εφαρμογή των μεθόδων πραγματοποιείται με τη χρήση ενός απλού DSM, αλλά και με την χρήση ενός

υπομετρικά επαναταξινομημένου αντίστοιχου, ενώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων με κατάλληλα δεδομένα ελέγχου δείχνει ότι ο συνολικός βαθμός απόδοσης των αλγορίθμων κυμαίνεται κοντά στο 80%. Η χρήση του απλού DSM παρουσιάζει μεγαλύτερη ορθότητα, με μικρό αριθμό εσφαλμένων ανιχνεύσεων και μικρότερη πληρότητα ιχνών, ενώ η χρήση του υπομετρικά επαναταξινομημένου DSM παρουσιάζει μικρότερη ορθότητα και μεγαλύτερη πληρότητα. Οι αντίστοιχες χωρικές ακρίβειες, αν και δεν αποτελούν το κύριο ζητούμενο παρουσιάζονται ικανοποιητικές, με την χρήση του απλού DSM να αποδίδει ίχνη ακρίβειας 0-7 m σε ποσοστό 90%, ενώ η αντίστοιχη χρήση του επαναταξινομημένου DSM αποδίδει ακρίβειες 0-3m για ποσοστό μεγαλύτερο του 90%.

Παναγιώτης Φράγκος
Δεκεμβριος 2015

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Εξεταστική Επιτροπή:
Καθηγητής Χαράλαμπος Ιωαννίδης (επιβλέπων)
Καθηγητής Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Γεώργιος Καρράς

Υπεβλήθη για την μερική ολοκλήρωση των προαπαιτούμενων
του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Εξειδίκευσης στην Γεωπληροφορική.

ABSTRACT

“Building extraction from LiDAR data with Lidargrammetric technique and automated image segmentation filters”

The present Thesis deals with procedures on building footprint extraction from LiDAR data, using the technique of Lidargrammetry, as well as with the development of automated processes with the utilization of computer vision methods.

Lidargrammetric technique concerns the production of stereomodels from LiDAR intensity images, which are suitable for use in a digital photogrammetric station and for the 3d stereo-digitization of spatial data. The production of intensity stereomodels is based on the principle of stereo-orthomates, with respect to the extraction of a derivative intensity image, in which a suitable amount of parallax is introduced artificially. This derivative image (mate) combined with the original intensity image, deliver the characteristics of a typical photogrammetric stereomodel, capable for 3d observation and from which 3d data can be extracted. In the present thesis, we use a dense point cloud of 55 points/m², which is being thinned out to 20 points/m² and 5 points/m². Inferred stereo pairs are being produced from each point clouds' intensity images and with the use of appropriate 3d digitization software, building footprints are being extracted over the study area. These footprints are being compared with control data by a high resolution standard photogrammetric model, in order to investigate the effectiveness of the technique and the degree on which the decreasing resolution of the stereomodels (due to less point cloud density) affects the photointerpretative capabilities of the human handler. The produced lidargrammetric footprints present high spatial accuracy, which ranges between 0.5 m και 1.5 m for an estimated percentage of more than 90%, and thus making the method capable for extracting spatial data suitable even for large scale topographic maps.

The automated approach for the extraction of building footprints, concerns the development and experimental application of appropriate algorithms which are capable of detecting buildings, with minimal human intervention. The development of the algorithms is done using computer vision techniques and mathematical morphology, while the used backgrounds for detection are suitably preprocessed DSM surfaces of the single return pulses, generated by the point cloud. Two approaches are being developed, based on the detection of edges and the detection of homogeneous areas respectively. In the first approach a direct detection of the edges constituting the footprint of each building is performed, whereas in the second approach a watershed segmentation of the background is first conducted. Subsequently, a sorting of the detected objects is being performed, through a series of filters which impose shape and size restrictions, in order to remove the detected objects that do not correspond to buildings. The application of the methods is being performed using both a plain DSM and an equivalent elevation reclassified one, and

the comparison of the results with appropriate control data, indicates that the overall efficiency of the algorithms ranges around 80%. The use of the plain DSM derives better accuracy (with a small number of false detections) and less footprint completeness, while the use of the elevation reclassified DSM derives less accuracy and better completeness. The corresponding spatial accuracies, although not the main issue are found to be satisfactory, with the usage of the plain DSM to result in footprints of 0-7 m accuracy for a level of 90%, while the corresponding use of the reclassified DSM delivers accuracies of 0-3m for a level more than 90%.

Panagiotis Fragkos

December 2015

School of Rural and Surveying Engineering

National Technical University of Athens

Thesis Committee:

Professor Charalampos Ioannidis (supervisor)

Professor Andreas Georgopoulos

Professor Georgios Karras

*In partial fulfillment for the requirements
of the Master in Science in Geoinformatics.*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	xi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xiii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xvii
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	xix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Το σύστημα LiDAR και το νέφος σημείων.....	5
1.1 Αρχές λειτουργίας και εξέλιξη των συστημάτων LiDAR	5
1.2 Δυνατότητες και εφαρμογές	8
1.3 Το νέφος σημείων.....	13
1.4 Φιλτράρισμα και ταξινόμηση νέφους σημείων	15
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Η τεχνική Lidargrammetry	23
2.1 Ένταση επιστρεφόμενου παλμού και εικόνες έντασης	23
2.2 Επισκόπηση της τεχνικής Lidargrammetry	28
2.3 Δημιουργία στερεομοντέλου (ISP) από τιμές έντασης.....	31
2.4 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές τεχνικής Lidargrammetry	35
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Προσεγγίσεις στην αυτοματοποιημένη ανίχνευση κτιρίων με δεδομένα LiDAR	40
3.1 Γενικό πλαίσιο	40
3.2 Ανίχνευση και εξαγωγή κτιρίων	43
3.3 Ανακατασκευή κτιρίων.....	45
3.4 Αλγόριθμοι κατάτμησης για την ανίχνευση κτιρίων	49
3.5 Μαθηματική μορφολογία	53
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Πειραματική εφαρμογή εξαγωγής ιχνών κτιρίων με την τεχνική Lidargrammetry.....	60
4.1 Εισαγωγή	60
4.2 Δεδομένα και λογισμικά εργασίας.....	62
4.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας.....	64
4.4 Αραίωση νέφους σημείων.....	65
4.5 Παραγωγή εικόνων έντασης και DSM	67
4.6 Παραγωγή στερεομοντέλων έντασης (ISP).....	71
4.7 Εξαγωγή ιχνών κτιρίων.....	76
4.8 Ακρίβεια ιχνών από Lidargrammetry – Συμπεράσματα.....	79
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Πειραματική εφαρμογή αυτοματοποιημένης ανίχνευσης και εξαγωγής ιχνών κτιρίων.....	85
5.1 Εισαγωγή	85
5.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο	87
5.3 Εξωτερική προεπεξεργασία υποβάθρων ανίχνευσης	90
5.4 Εσωτερική προεπεξεργασία υποβάθρων ανίχνευσης	95
5.5 Ανάπτυξη φίλτρου κατάτμησης με ανίχνευση ακμών (edge based)	99
5.6 Ανάπτυξη φίλτρου κατάτμησης με ανίχνευση ομοιογενών περιοχών (area based).....	106
5.7 Έλεγχος απόδοσης φίλτρων ανίχνευσης κτιρίων	114
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	120

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ	124
--	------------

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Η διαχρονική εξέλιξη του ρυθμού επανάληψης των παλμών στα συστήματα LiDAR (αριστερά) και η διαχρονική εξέλιξη της επιτυγχανόμενης ακρίβειας (δεξιά).....	6
Εικόνα 1- 2: Διαδικασία άμεσης γεωκωδικοποίησης για την παραγωγή νέφους σημείων LiDAR.....	7
Εικόνα 1- 3: Σχηματική αναπαράσταση σάρωσης LiDAR	8
Εικόνα 1-4: Σχηματική απεικόνιση πολλαπλών επιστροφών και ψηφιοποίησης επιστρεφόμενου σήματος (ASPRS).....	10
Εικόνα 1- 5: Δημιουργία προφίλ από ανάλυση πλήρους σήματος (NASA)	11
Εικόνα 1- 6: Εφαρμογές με δεδομένα LiDAR (ERDAS).....	13
Εικόνα 1- 7: Νέφη σημείων σε 3d απεικόνιση, με βάση την ένταση (αριστερά) και τις τιμές υψομέτρου (δεξιά)	14
Εικόνα 2-1: Εικόνα έντασης από σάρωση με σύστημα LiDAR (ASPRS).....	25
Εικόνα 2-2: Υβριδικές εικόνες έντασης (FIU)	27
Εικόνα 2-3: Υβριδική εικόνα με fusion ταξινόμησης νέφους και τιμών έντασης (GeoCUE)	28
Εικόνα 2-4: Εικόνες έντασης για τα διαφορετικά μήκη κύματος laser του συστήματος Titan	28
Εικόνα 2-5: Pseudocolor εικόνα έντασης από συνδυασμό των τριών τιμών στα διαφορετικά μήκη κύματος laser του συστήματος Titan (Laserdata GmbH).....	28
Εικόνα 2-6: Ροή εργασιών Lidargrammetry (GeoCUE).....	30
Εικόνα 2-7: Ο αλγόριθμος παραγωγής ISP από νέφος σημείων της GeoCUE	33
Εικόνα 2-8: Γεωμετρία παραγωγής ISP απευθείας από δεδομένα LiDAR (Teo, T. A., et al., 2010)	35
Εικόνα 2-9: Στερεομοντέλο (ISP) έντασης (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση).....	35
Εικόνα 3-1: Ιεραρχική ροή διαδικασίας ανακατασκευής κτιρίων (Sohn, G., et al. 2007)	41
Εικόνα 3-2: Αρχικώς ανιχνευμένα και τελικώς απλοποιημένα ίχνη κτιρίων με τη χρήση του αλγόριθμου Douglas-Peucker (Vögtle, T., 2000)	45
Εικόνα 3-3: Τύποι μοντέλων κτιρίων (Sohn, G., et al. 2007).....	46
Εικόνα 3-4: Μοντέλα κτιρίων (Sohn, G., et al. 2007)	47
Εικόνα 3-5: Κατασκευή απλού 3d μοντέλου κτιρίου από το ίχνο και το μέσο ύψος του με συνδυασμό αρχέτυπων μοντέλων (αριστερά)	49
Εικόνα 3-6: Κατάτμηση και ανίχνευση επίπεδων τμημάτων κτιρίου (Awrangjeb, M., & Fraser, C. S. , 2014).....	53
Εικόνα 3-7: Σχηματική απεικόνιση της τέλεσης μορφολογικής διαστολής (Cui, Z., 2013)	55

Εικόνα 3-8: Σχηματική απεικόνιση της τέλεσης μορφολογικής συστολής (Cui, Z., 2013)	56
Εικόνα 3-9: Δομικό στοιχείο 3x3 μορφολογικών πράξεων	56
Εικόνα 3-10: Αποτελέσματα μορφολογικών πράξεων (Li, Y., et al., 2014)	59
Εικόνα 4-1: Η περιοχή εργασίας επί υποβάθρου Google Earth	63
Εικόνα 4-2: Σχηματική απεικόνιση μεθοδολογικού πλαισίου διερεύνησης τεχνικής Lidargrammetry	65
Εικόνα 4-3: Εξαγωγή εικόνας έντασης από αραιωμένα (για σκοπούς απεικόνισης και οικονομίας υπολογιστικών πόρων) δεδομένα LiDAR, με εμφανή κενά στις περιοχές επικάλυψης λωρίδων σάρωσης	68
Εικόνα 4-4: Τελική εικόνα έντασης από νέφος 55 σημ/m ² και λεπτομέρεια	69
Εικόνα 4-5: Τελική εικόνα έντασης από νέφος 20 σημ/m ² και λεπτομέρεια	70
Εικόνα 4-6: Τελική εικόνα έντασης από νέφος 5 σημ/m ² και λεπτομέρεια	70
Εικόνα 4-7: Το DSM χωρικής ανάλυσης d=0,15m	71
Εικόνα 4-8: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας πλάγιας παράλληλης προβολής με εισαγωγή τεχνητής παράλλαξης εξ ολοκλήρου στην stereomate εικόνα	72
Εικόνα 4-9: Στερεομοντέλο νέφους πυκνότητας 55 σημ/m ²	73
Εικόνα 4-10: Λεπτομέρεια στερεομοντέλου νέφους πυκνότητας 55 σημ/m ²	74
Εικόνα 4-11: Στερεομοντέλο νέφους πυκνότητας 20 σημ/m ² (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)	74
Εικόνα 4-12: Λεπτομέρεια στερεομοντέλου νέφους πυκνότητας 20 σημ/m ²	75
Εικόνα 4-13: Στερεομοντέλο νέφους πυκνότητας 5 σημ/m ² (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)	75
Εικόνα 4-14: Λεπτομέρεια στερεομοντέλου νέφους πυκνότητας 5 σημ/m ²	76
Εικόνα 4-15: Απόδοση ιχνών κτιρίων από το στερεομοντέλο έντασης νέφους 55σημ/m ²	77
Εικόνα 4-16: Απόκρυψη τοιχίου από παρακείμενη πλευρά του κτιρίου στο φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)	78
Εικόνα 4-17: Απόκρυψη τμήματος κτιρίου ευρισκόμενο σε χαμηλότερο επίπεδο από την οροφή.....	78
Εικόνα 4-18: Τα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων και οι οπτικά αναγνωρίσιμες διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών	79
Εικόνα 4-19: Μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ ιχνών στερεομοντέλου 55σημ/m ² (κόκκινο) και φωτογραμμετρικών ιχνών (μαύρο).	82
Εικόνα 5-1: Αραίωση βλάστησης στο DSM μονών επιστροφών (αριστερά) σε σύγκριση με το DSM πρώτων επιστροφών (δεξιά)	92
Εικόνα 5-2: Το DSM των μονών (single) επιστροφών.....	94
Εικόνα 5-3: Το επαναταξινομημένο DSM των μονών (single) επιστροφών.....	95
Εικόνα 5-4: Τα δυαδικά υπόβαθρα ανίχνευσης. DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά).....	98

Εικόνα 5-5: Τα δυαδικά ανοιγμένα υπόβαθρα ανίχνευσης. Ανοιγμένο DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και ανοιγμένο επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)	99
Εικόνα 5-6: Αρχικές ανιχνευόμενες contours επί του ανοιγμένου DSM μονών επιστροφών.	101
Εικόνα 5-7: Αρχικές ανιχνευόμενες contours επί του ανοιγμένου επαναταξινομημένου DSM μονών επιστροφών.	102
Εικόνα 5-8: Διαδοχή φίλτρων για την διαλογή των ανιχνευόμενων contours	103
Εικόνα 5-9: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας αλγορίθμου Douglas Peucker και αποτέλεσμα στην απλοποίηση των ιχνών κτιρίων της εφαρμογής.....	104
Εικόνα 5- 10: Τα τελικά φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων [ανοιγμένου DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και ανοιγμένου επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)]	105
Εικόνα 5-11: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του DSM μονών επιστροφών.	106
Εικόνα 5-12: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του επαναταξινομημένου DSM μονών επιστροφών.	106
Εικόνα 5-13: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του αλγόριθμου watershed....	107
Εικόνα 5-14: Η εικόνα μετασχηματισμού αποστάσεων (αριστερά) και η εικόνα προσκηνίου (δεξιά) από το DSM μονών επιστροφών	109
Εικόνα 5-15: Η εικόνα μετασχηματισμού αποστάσεων (αριστερά) και η εικόνα προσκηνίου (δεξιά) από το επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	109
Εικόνα 5-16: Η εικόνα παρασκηνίου (αριστερά) και η εικόνα άγνωστων περιοχών (δεξιά) από το DSM μονών επιστροφών	110
Εικόνα 5-17: Η εικόνα παρασκηνίου (αριστερά) και η εικόνα άγνωστων περιοχών (δεξιά) από το επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	110
Εικόνα 5-18: Οι εικόνες των markers για την εφαρμογή με το DSM πρώτων επιστροφών (αριστερά) και το επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)	111
Εικόνα 5-19: Δημιουργία υπερκατάτμησης από την εφαρμογή του αλγόριθμου watershed (αριστερά) και εφαρμογή συγχώνευσης αντικειμένων (δεξιά).	112
Εικόνα 5-20: Τα τελικά φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων [ανοιγμένου DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και ανοιγμένου επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)]	113
Εικόνα 5-21: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του DSM μονών επιστροφών.	113
Εικόνα 5-22: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του επαναταξινομημένου DSM μονών επιστροφών.	114
Εικόνα 5-23: : Οπτική σύγκριση αυτόματα εξαγόμενων ιχνών μεμονωμένου κτιρίου (μαύρο) και αληθούς ιχνους (κόκκινο)	119
Εικόνα 5-24: Οπτική σύγκριση λεπτομέρειας αυτόματα εξαγόμενων ιχνών (μπλε) και αντίστοιχων φωτογραμμετρικών (κόκκινα).....	120

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Φωτογραμμετρικές αδυναμίες σε σύγκριση με πλεονεκτήματα των LiDAR (Habib 2009).....	9
Πίνακας 1-2: Φωτογραμμετρικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με αδυναμίες των LiDAR (Habib 2009).....	9
Πίνακας 1 - 3: Προϊόντα LiDAR	12
Πίνακας 1 - 4: Ενδεικτικές εφαρμογές δεδομένων LiDAR.....	12
 Πίνακας 2-1: Παραδείγματα ανακλαστικότητας αντικειμένων κατά την σάρωση με σύστημα LiDAR	24
 Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά του νέφους σημείων	63
Πίνακας 4-2: Θεωρητικές πυκνότητες νεφών σημείων και επιλογή εδαφοψηφίδας για τη δημιουργία DSM και εικόνας έντασης.....	65
Πίνακας 4-3: Στοιχεία αραιωμένων νεφών σημείων	67
Πίνακας 4-4: Συγκριτική θεώρηση μεταξύ ιχνών κτιρίων εξαγόμενα από στερεομοντέλα έντασης από νέφη σημείων διαφορετικής πυκνότητας	80
Πίνακας 4-5: Συγκριτική θεώρηση μεταξύ ιχνών κτιρίων από στερεομοντέλα έντασης για νέφη σημείων διαφορετικής πυκνότητας και αντίστοιχων φωτογραμμετρικών ιχνών.	81
Πίνακας 4-6: Αθροιστικές κατανομές ποσοστιαίων αποκλίσεων μεταξύ φωτογραμμετρικών και Lidargrammetry ιχνών	83
 Πίνακας 5-1: Πίνακας ποιοτικού ελέγχου φίλτρων αυτόματης ανίχνευσης κτιρίων	116
Πίνακας 5-2: Συγκριτική θεώρηση μεταξύ ιχνών κτιρίων από τους αλγόριθμους αυτόματης ανίχνευσης και αντίστοιχων φωτογραμμετρικών ιχνών.....	117
Πίνακας 5-3: Οριζοντιογραφικές αποκλίσεις αυτόματα εξαγόμενου ίχνους μεμονωμένου κτιρίου και αντίστοιχου αληθούς.....	119

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4-1: Ποσοστιαία κατανομή αποκλίσεων των κόμβων ιχνών κτιρίων μεταξύ των στερεομοντέλων έντασης	80
Διάγραμμα 4-2: Ποσοστιαία κατανομή αποκλίσεων των κόμβων ιχνών κτιρίων μεταξύ των στερεομοντέλων έντασης και του φωτογραμμετρικού στερεομοντέλου	82

Διάγραμμα 5-1: Το μεθοδολογικό πλαίσιο ανάπτυξης αλγορίθμων αυτόματης εξαγωγής ιχνών κτιρίων.....	Error! Bookmark not defined.
Διάγραμμα 5-2: Ιστόγραμμα κατανομής ποσοσטיαίων αποκλίσεων των αυτόματα εντοπισμένων ιχνών από τα αντίστοιχα αληθή.....	117
Διάγραμμα 5-3: Ιστόγραμμα αθροιστικής κατανομής ποσοσטיαίων αποκλίσεων των αυτόματα εντοπισμένων ιχνών από τα αντίστοιχα αληθή	118

AKPΩNYMIA

VGI	Volunteer Geographic Information
SAR	Synthetic Aperture Radar
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LOLA	Lunar Observer Laser Altimeter
AOL	Airborne Oceanographic LiDAR
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ALS	Airborne Laser Scanner
LiDAR	Light Detection And Ranging
TOF	Time Of Flight
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
ΜΣΘ	Μέση Στάθμη Θάλασσας
ISP	Inferred Stereo Pair
TOTIN	Tiled Overlapping Triangulated Irregular Network
UTM	Universal Transverse Mercator
QA/QC	Quality Assurance/Quality Control
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
PSP	Pseudo Stereo Pairs
RMSE	Root Mean Square Error
EGM	Earth Gravitational Model
IFSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
PRF	Pulse Repetition Frequency

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χαρτογράφηση κτιρίων, ιδιαίτερα για μεγάλες περιοχές, πραγματοποιείται παραδοσιακά με φωτογραμμετρικές μεθόδους, προς χάριν της ταχύτητας παραγωγής και της οικονομικότητας. Κλασικές μέθοδοι φωτοερμηνείας, καθώς και χειροκίνητες μέθοδοι καταγραφής του σχήματος, του μεγέθους και της θέσης των κτιρίων αναπτύχθηκαν προς το σκοπό αυτό, οι οποίες αποδίδουν παράγωγα πολύ υψηλής ποιότητας και ακρίβειας. Η εν λόγω φωτογραμμετρικές διαδικασίες βρίσκονται ακόμα και σήμερα σε πλήρες παραγωγικό επίπεδο, ιδιαίτερα όταν η ζητούμενη χωρική ακρίβεια είναι υψηλή, αλλά το κόστος τους παραμένει ιδιαίτερα υψηλό, καθώς απαιτεί την απασχόληση πολύ εξειδικευμένου προσωπικού, το οποίο πρέπει να επωμιστεί ένα σημαντικό μεγάλο φόρτο εργασίας. Τα παραδοσιακά πρωταρχικά δεδομένα (οπτικές εικόνες, και βοηθητικά υψομετρικά μοντέλα), παρουσίασαν σημαντική αύξηση σε διαθεσιμότητα και ποιότητα τα τελευταία χρόνια, γεγονός που εν πολλοίς οφείλεται στην αντίστοιχη ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και της ψηφιακής τεχνολογίας. Με τον τρόπο αυτό, ψηφιακές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης, από εναέριες και διαστημικές πλατφόρμες, εισήλθαν γρήγορα στην παραγωγική διαδικασία ενώ το συνεχώς μειούμενο κόστος απόκτησης τους, αύξησε την παραγωγικότητα.

Η ανάπτυξη των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), καθώς και η ευρεία υιοθέτησή τους από ένα μεγάλο σύνολο επιστημονικών κλάδων, έθεσε την ανάγκη για πιο εξευγενισμένα και σύνθετα δεδομένα, προς υποστήριξη των ποικίλων σύνθετων αναλύσεων που έχουν την δυνατότητα να επιτελούν. Τα 2d ίχνη κτιρίων, τα οποία ήταν επαρκή για την σύνταξη χαρτών και διαγραμμάτων μεγάλης κλίμακας για χαρτογραφικές και πολεοδομικές εφαρμογές, δεν ικανοποιούν τις ανάγκες των σύγχρονων εφαρμογών ανάλυσης, οι οποίες πραγματοποιούνται στον 3d χώρο, όπως η εκπόνηση σχεδίων αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών (πλημμύρες, σεισμοί κ.α.), οι μελέτες αστικού σχεδιασμού, οι τηλεπικοινωνιακές μελέτες κ.α. Για το λόγο αυτό, συνθετότερα μοντέλα κτιρίων έπρεπε να κατασκευαστούν, από τα ίδια παραδοσιακά φωτογραμμετρικά δεδομένα, ενώ η ενσωμάτωση μεγαλύτερου βαθμού αυτοματοποίησης, έως και η ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένων μεθόδων είναι μια διαρκής απαίτηση. Η έρευνα και οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την αυτοματοποίηση της ανίχνευσης, εξαγωγής και μοντελοποίησης των κτιρίων με βάση τα οπτικά δεδομένα είναι πολύ εκτενής και μια συγκριτική θεώρησή τους παρουσιάζεται από τον Mayer (1999), ο οποίος μετά από ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού προσεγγίσεων, προσδιορίζει τις αδυναμίες και τους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Σύμφωνα με τους Hermosilla et al. (2011), μπορούν να διακριθούν δύο κύριες προσεγγίσεις στην ανίχνευση κτιρίων με βάση οπτικά δεδομένα. Η πρώτη προσέγγιση (χαμηλού επιπέδου) αφορά την ανάπτυξη μεθοδολογιών με βάση την ανίχνευση και εξαγωγή ακμών, ενώ στη συνέχεια η

εξαγωγή κτιρίων στηρίζεται στην ανάπτυξη κανόνων και υποθέσεων. Η δεύτερη προσέγγιση (υψηλού επιπέδου) σχετίζεται με την ανάπτυξη μεθοδολογιών οι οποίες προσομοιάζουν την γνωσιακή (cognitive) μεθοδολογία του ανθρώπινου εγκεφάλου και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων από αυτόν, η οποία στηρίζεται σε ανάλυση των δεδομένων. Είναι κατανοητό, πως με τη χαμηλού επιπέδου προσέγγιση, τα αντικείμενα ανιχνεύονται χωρίς να συνοδεύονται από οποιαδήποτε σημασιολογική πληροφορία, ενώ οι υψηλού επιπέδου τεχνικές, ενσωματώνουν σημασιολογικές πληροφορίες όπως την σύγκριση των αντικειμένων σε μια εικόνα με πρότυπα (primitives) και την δημιουργία τοπολογικών σχέσεων. Η αναγνώριση προτύπων και οι μέθοδοι ταξινόμησης είναι παραδείγματα τέτοιων υψηλού επιπέδου τεχνικών, η ανάπτυξη των οποίων ενισχύεται από την εκτενή έρευνα και από την ευρεία ανάπτυξη μεθοδολογιών που έχει πραγματοποιηθεί στα πεδία της όρασης υπολογιστών (computer vision) και της αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition). Οι τηλεπισκοπικές διαδικασίες στατιστικής ταξινόμησης των εικονοστοιχείων δορυφορικών ηλεκτροπτικών δεδομένων, αντιμετωπίζει ιδιαίτερες δυσκολίες στην ανίχνευση των μεμονωμένων κτιρίων, λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας που παρουσιάζουν οι υψηλής ανάλυσης εικόνες και συνήθως περιορίζονται στην χαρτογράφηση των γενικών ορίων των αστικών περιοχών από χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης δεδομένα. Στις διαδικασίες ανίχνευσης κτιρίων, τα τελευταία συνήθως αντιμετωπίζονται ως αντικείμενα, γεγονός που απαιτεί την ανάπτυξη αντικειμενοστραφών διαδικασιών.

Η έλευση των συστημάτων LiDAR και η ραγδαία εξέλιξη των ψηφιακών και οπτικών υποστηρικτικών τους συστημάτων την τελευταία 15ετία, οδήγησε στη δυνατότητα συλλογής νεφών σημείων πολύ υψηλής πυκνότητας και ακρίβειας, τα οποία συντελούν μια ιδιαίτερα πλήρη δειγματοληψία του φυσικού χώρου. Τα δεδομένα αυτά γρήγορα αποτέλεσαν μια σημαντική προσθήκη στο ευρύτερο σύνολο των χρησιμοποιούμενων φωτογραμμετρικών δεδομένων, ενώ μεγάλο μέρος της υφιστάμενης έρευνας σταδιακά στράφηκε στην διερεύνηση νέων μεθόδων εκμετάλλευσής τους, καθώς και ενσωμάτωσής αυτών στις ήδη υφιστάμενες φωτογραμμετρικές διαδικασίες. Καθώς νέες εφαρμογές αναπτύσσονται συνεχώς, γίνεται σαφής ο υψηλός βαθμός ευελιξίας των δεδομένων LiDAR τα οποία παρέχουν πλεονέκτημα για την ανάπτυξη διαδικασιών εξαγωγής 3d αντικειμένων, καθώς από την φύση τους ενσωματώνουν υψηλής ποιότητας πληροφορία και για τις τρεις διαστάσεις του φυσικού χώρου, ανάγοντας τα σε πολύτιμη προσθήκη για εφαρμογή παράλληλα με τις ήδη καθιερωμένες φωτογραμμετρικές πρακτικές.

Παράλληλα, η συνεχώς αυξανόμενη ψηφιακή ολοκλήρωση της σύγχρονης εποχής παρουσιάζει μια σαφή τάση μεταστροφής προς τις πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες, επιτελούμενες εξ ολοκλήρου από ένα σύστημα, με λίγη ή καθόλου ανθρώπινη επίβλεψη. Παραδοσιακά, η ανάπτυξη αυτόματων διαδικασιών αφορούσε τον χώρο της επιστήμης υπολογιστών, όπου η φιλοσοφία προσέγγισης και το κύριο ζητούμενο είναι οι μικροί χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών από τους αναπτυσσόμενους αλγορίθμους, η οικονομία υπολογιστικών πόρων, η διαλειτουργικότητα και η πληρότητα των αποτελεσμάτων. Από την άλλη, η

παραδοσιακή φωτογραμμετρία, ως επιστήμη και τέχνη εξαγωγής υψηλής ποιότητας γεωχωρικών δεδομένων, παραδοσιακά δίνει κύρια έμφαση στην ακρίβεια των εφαρμοζόμενων διαδικασιών επιζητώντας πιστή, μετρική αναπαράσταση του φυσικού κόσμου. Οι κλασικές φωτογραμμετρικές τεχνικές εξακολουθούν να παρουσιάζουν υψηλές απαιτήσεις σε ανθρώπινη παρέμβαση προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλή ποιότητα των δεδομένων, γεγονός που καθιστά το συνεπαγόμενο κόστος τους ακόμα και απαγορευτικό για ορισμένο εύρος εφαρμογών. Βήματα προς την μερική αυτοματοποίηση των διαδικασιών έχουν ήδη πραγματοποιηθεί (π.χ. αυτόματη συλλογή σημείων σύνδεσης σε διαδικασίες αεροτριγωνισμού, αυτόματες ρουτίνες συλλογής ΨΜΕ κ.α.), αλλά η επίτευξη υψηλής χωρικής ακρίβειας εξακολουθεί να απαιτεί σημαντικό βαθμό ανθρώπινου χειρισμού (διόρθωση σφαλμάτων, συμπλήρωση κ.α.). Οι δύο αυτές αντίθετες προσεγγίσεις (πλήρης αυτοματοποίηση και υψηλή ακρίβεια) συγκλίνουν με ταχύ ρυθμό, καθώς οι δύο αυτοί διακριτοί κλάδοι (επιστήμη υπολογιστών και φωτογραμμετρία) αλληλεπιδρούν και αναπτύσσουν μια σύγχρονη διεπιστημονική φιλοσοφία, που προσανατολίζει την υφιστάμενη έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο να επιζητά την ισορροπία μεταξύ των δύο χώρων. Είναι βέβαιο ότι στο μέλλον η πλήρης σύγκλιση των δύο αυτών προσεγγίσεων, θα αποδώσει αυτόματες διαδικασίες υψηλής ακρίβειας, οι οποίες θα διευρύνουν το πεδίο εφαρμογών της φωτογραμμετρίας και θα μειώσουν σημαντικά το κόστος παραγωγής γεωχωρικών δεδομένων υψηλής ποιότητας, τόσο μέσω της μείωσης ανάγκης για χρήση εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού όσο και με την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής. Σύγχρονες τάσεις όπως η εθελούσια συλλογή γεωχωρικής πληροφορίας (volunteer geographic information –VGI) μέσω τεχνικών crowdsourcing, αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πεδίου εφαρμογής των μελλοντικών, πλήρως αυτοματοποιημένων και υψηλής ακρίβειας φωτογραμμετρικών τεχνικών, ακόμα και με την χρήση μικρών και φθηνών φορητών συσκευών (π. χ. smartphones).

Τα θέματα τα οποία πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσονται σε πέντε κύρια κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται με συνοπτικό τρόπο η γενική αρχή που διέπει τη λειτουργία των συστημάτων LiDAR, οι δυνατότητες τους, αλλά και κάποιες από τις πλέον συχνά συναντώμενες εφαρμογές τους. Παράλληλα, αναπτύσσονται τα χαρακτηριστικά του παράγωγου, από τα συστήματα LiDAR, νέφους σημείων, ακολουθούμενα από την γενική μεθοδολογία επεξεργασίας του και παρατίθεται κατάλληλη βιβλιογραφία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η θεωρητική τεκμηρίωση της τεχνικής Lidargrammetry και εξετάζονται λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά εκείνα του συστήματος LiDAR στα οποία βασίζεται. Παράλληλα παρατίθενται οι γενικές θεωρητικές προσεγγίσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία, εντοπίζονται οι μελλοντικές τάσεις, ενώ διατυπώνονται τα πλεονεκτήματα και οι δυνατές εφαρμογές τις οποίες η υπόψη μεθοδολογία μπορεί να εξυπηρετήσει.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι προσεγγίσεις στην ανάπτυξη αυτόματων μεθόδων για την ανίχνευση κτιρίων από δεδομένα LiDAR. Αναλύονται οι διεθνείς

πρακτικές και μεθοδολογίες ανάπτυξης αυτοματοποιημένων τεχνικών, παράλληλα με τις αντίστοιχες εφαρμογές που εξυπηρετούν και γίνεται αναφορά στους ευρέως χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους για την ανίχνευση ακμών και την κατάτμηση δεδομένων LiDAR.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσης, πραγματοποιείται πειραματική εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry, με την κατασκευή στερεοζευγών (ISP) έντασης από δεδομένα LiDAR διαφορετικών πυκνοτήτων και την στέρεο ψηφιοποίηση ιχνών κτιρίων. Τα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων συγκρίνονται με αντίστοιχα εξαγόμενα από ένα τυπικό φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο υψηλής ακρίβειας, με σκοπό την ποσοτικοποίηση των υπεισερχόμενων σφαλμάτων ψηφιοποίησης λόγω της σταδιακά μειούμενης ευκρίνειας των στερεομοντέλων έντασης, αλλά και λόγω δυνατότητας της ίδιας της μεθόδου γενικά. Τελικώς εξάγονται συμπεράσματα για την υπόψη μέθοδο και διατυπώνονται τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί καθώς και η πιθανός βαθμός καταλληλότητάς της για την εξαγωγή διανυσματικών χαρτογραφικών δεδομένων εξ ολοκλήρου από δεδομένα LiDAR.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η πειραματική κατασκευή και εφαρμογή δύο αυτοματοποιημένων τεχνικών εξαγωγής ιχνών κτιρίων από δεδομένα LiDAR. Αναπτύσσεται το μεθοδολογικό πλαίσιο της προτεινόμενης προσέγγισης, στην βάση ορισμένων αρχικών υποθέσεων εργασίας και με έμφαση στον αυξημένο βαθμό αυτοματοποίησης της διαδικασίας, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα των προτεινόμενων αλγορίθμων αξιολογούνται με βάση την πληρότητα και την ορθότητα των παραγόμενων ιχνών. Τελικώς διατυπώνονται τα συμπεράσματα από το σύνολο της παρούσης διπλωματικής εργασίας και υποβάλλονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Το σύστημα LiDAR και το νέφος σημείων

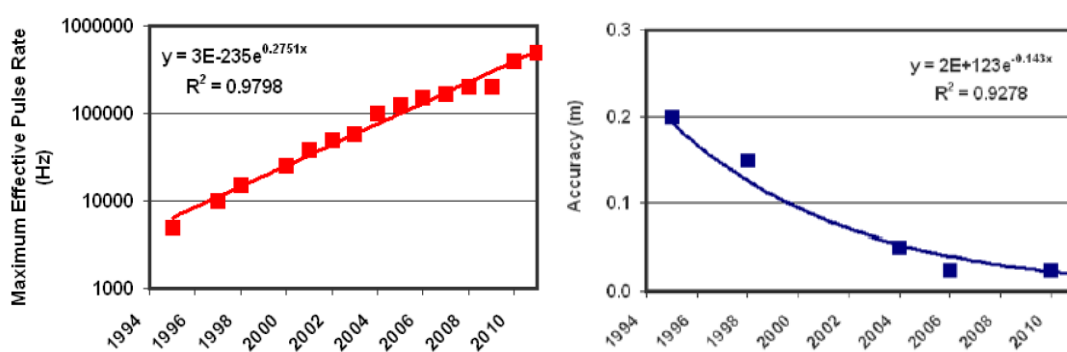
1.1 Αρχές λειτουργίας και εξέλιξη των συστημάτων LiDAR

Η τεχνολογία laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1960 και βασίζεται στην χρήση ενεργών μέσων για την παραγωγή φωτός με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως υψηλή συνοχή, μονοχρωματικότητα και ευθύγραμμη διάδοση στο χώρο. Τα συστήματα laser γρήγορα βρήκαν πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία και στον επιστημονικό κόσμο, μια από τις οποίες ήταν η χρήση τους στην μέτρηση αποστάσεων. Η βασική ιδέα ήταν ότι μια εκπεμπόμενη δέσμη laser που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός, μπορεί να οπισθοσκεδαστεί από ένα στόχο και να επιστρέψει στην πηγή εκπομπής της. Λαμβάνοντας την ακτίνα αυτή με κατάλληλες ηλεκτρονικές και οπτικές διατάξεις και μετρώντας τον συνολικό χρόνο πτήσης (time of flight – TOF), είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης του στόχου από τον παρατηρητή. Η τεχνική αυτή, η οποία εφαρμοζόταν ήδη στα συστήματα RADAR, αποτέλεσε την βασική ιδιότητα γύρω από την οποία αναπτύχθηκαν τα συστήματα LiDAR, ενώ οι πρώτες εφαρμογές τους αφορούσαν την μέτρηση νεφώσεων και σωματιδίων της ατμόσφαιρας. Κύριο πλεονέκτημα της χρήσης laser έναντι ραδιοκυμάτων, ήταν το γεγονός ότι το πολύ μικρότερο μήκος κύματος των ακτίνων laser, έδινε την δυνατότητα της οπισθοσκέδασης από πολύ μικρά αντικείμενα και συνεπώς της μέτρησης ατμοσφαιρικών αεροζόλ και σωματιδίων των νεφών. Η πρώτη χρήση για γεωχωρικού περιεχομένου εφαρμογές (με την έννοια που εξετάζονται εδώ) ήταν το 1971, όταν η διαστημική αποστολή Apollo 15 χρησιμοποίησε το σύστημα LOLA (Lunar Observer Laser Altimeter) για να χαρτογραφήσει την επιφάνεια της σελήνης (Garvin and Bufton, 1992) , καθώς και το 1977 με την ανάπτυξη του συστήματος AOL (Airborne Oceanographic LiDAR) που χρησιμοποιήθηκε από τη NASA για να χαρτογραφήσει τον ωκεάνιο πυθμένα (Hoge et al., 1980). Έκτοτε, η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς, με τα πρώτα εμπορικά συστήματα να αναπτύσσονται στις αρχές της δεκαετίας του 90. Η τεχνολογία LiDAR μετρά ήδη πάνω από 30 χρόνια εξέλιξης, με αυξανόμενο ρυθμό και με το μεγαλύτερο μέρος της προόδου να συμβαίνει την τελευταία δεκαετία, λόγω της παράλληλης, ραγδαίας εξέλιξης στην τεχνολογία των οπτικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καθώς και στην τεχνολογία laser (Pack et al., 2012).

Η βασική κατηγοριοποίηση των χαρτογραφικών συστημάτων LiDAR σήμερα αφορά την διάκρισή τους σε τοπογραφικά (εναέρια και επίγεια συστήματα) και βαθυμετρικά. Τα πρώτα είναι κατάλληλα παραμετροποιημένα για την αποτύπωση αντικειμένων

στην ξηρά, ενώ τα δεύτερα για υποβρύχιες αποτυπώσεις. Κύρια διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών, ιδιαίτερα όσον αφορά στα εναέρια συστήματα, είναι η χρήση δεσμών laser με διαφορετικό μήκος κύματος και ίχνος. Τα τοπογραφικά LiDAR λειτουργούν με μήκος κύματος περί τα 1064 nm (υπέρυθρο) και με μικρότερο ίχνος (0,10 – 2 m), ενώ τα βαθυμετρικά LiDAR χρησιμοποιούν μικρότερα μήκη περί τα 532 nm (ορατό φάσμα - πράσινο) και μεγαλύτερο ίχνος (2m), για λόγους μεγαλύτερης διαπεραστικότητας στο νερό. Παράλληλα, τα εναέρια τοπογραφικά LiDAR, δύναται να λειτουργούν τόσο με την εκπομπή διακριτών παλμών (pulse LiDAR) που συντελεί στη δημιουργία του νέφους σημείων με βάση την καταγραφή των τοπικών μεγίστων στο επιστρεφόμενο σήμα, όσο και με την δυνατότητα ανάλυσης πλήρους κυματομορφής (full waveform analysis) δημιουργώντας το νέφος από ψηφιοποίηση υψηλής ανάλυσης του συνόλου του επιστρεφόμενου σήματος. Πυκνότερη δειγματοληψία πάνω από την περιοχή μελέτης συνιστά πιστότερη και λεπτομερέστερη αναπαράσταση αυτής, σε βάρος όμως του υπολογιστικού φόρτου και αποθηκευτικού χώρου που απαιτείται για τέτοια δεδομένα. Προτάσεις για επεξεργασία τέτοιων δεδομένων μπορούν να διερευνηθούν στις εργασίες των (Reitberger et al., 2008; Hofton et al., 2000; Jutzi and Stilla, 2005).

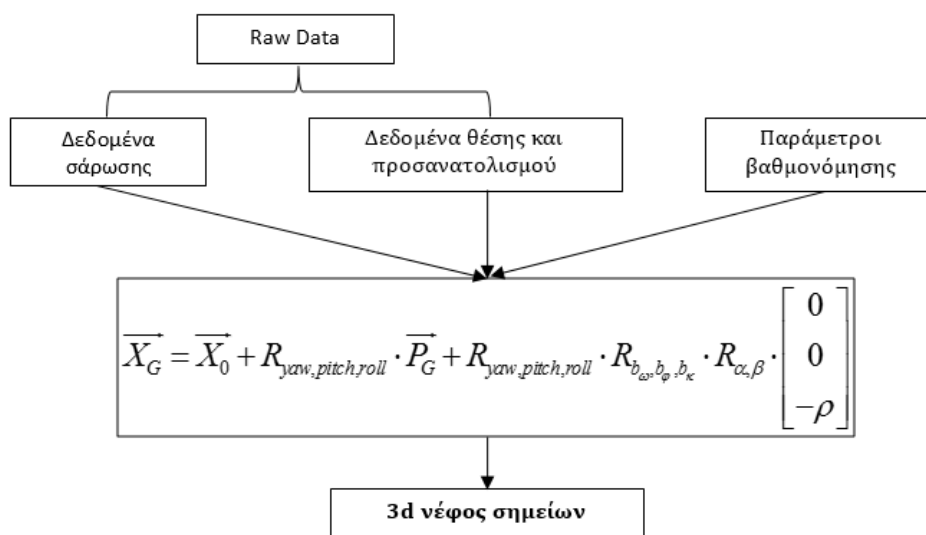
Ένα σύστημα LiDAR, εκπέμπει παλμούς laser με ρυθμό (PRF) που στα σύγχρονα συστήματα αγγίζουν τους 600.000/sec (600 KHz), από τους 5.000/sec των πρώτων συστημάτων, γεγονός που συνιστά μια αύξηση της τάξεως περίπου του 12.000% μέσα σε 20 περίπου έτη. Η δυνατότητα αυτή συντέλεσε στην παραγωγή πολύ πυκνότερων νεφών σημείων, που αποτυπώνουν την περιοχή σάρωσης με ιδιαίτερη λεπτομέρεια, ακόμα και από μεγάλα ύψη πτήσεων, ανοίγοντας τον δρόμο σε νέες απαιτητικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.



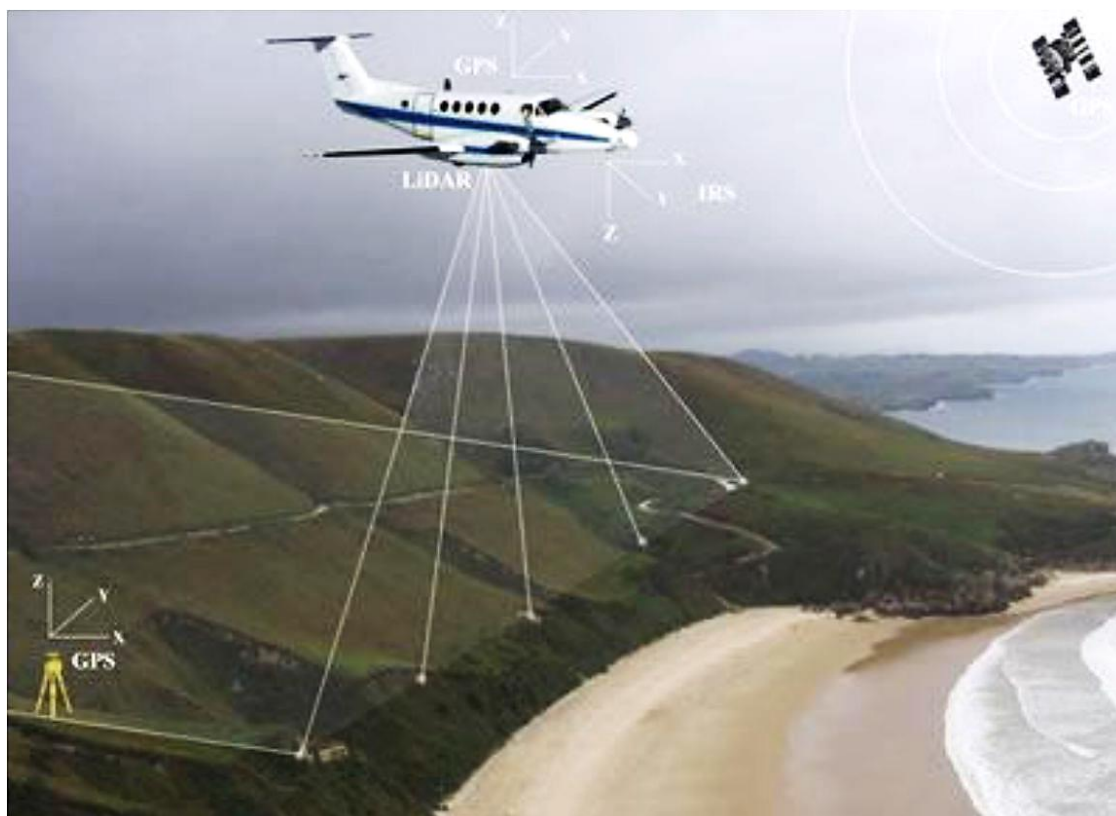
Εικόνα 1-1: Η διαχρονική εξέλιξη του ρυθμού επανάληψης των παλμών στα συστήματα LiDAR (αριστερά) και η διαχρονική εξέλιξη της επιτυγχανόμενης ακρίβειας (δεξιά) (HEXAGON GEOSPATIAL)

Η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων LiDAR είναι η εκπομπή δεσμών laser υπό κάποια γωνία προς το έδαφος και η καταγραφή του χρόνου μεταξύ εκπομπής και επιστροφής. Από τα δεδομένα χρόνου υπολογίζεται η απόσταση από τον στόχο οπισθοσκέδασης, που μαζί με την γωνία αποστολής της δέσμης σχηματίζουν ένα σετ πολικών συντεταγμένων (ρ, θ) για τον κάθε στόχο ως προς το σύστημα αναφοράς του κατόπτρου του σαρωτή. Το σύνολο των συντεταγμένων αυτών συνδυάζονται (άμεση

γεωκωδικοποίηση) με βάση τον χρόνο δημιουργίας τους, με δεδομένα από το σύστημα θέσης και προσανατολισμού (POS) το οποίο περιλαμβάνει μονάδα GNSS και μονάδα INS, καθώς και με δεδομένα βαθμονόμησης μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του συστήματος, για την δημιουργία ενός αρχείου 3D συντεταγμένων, για όλα τα μετρημένα σημεία, ως προς το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό ή χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 1- 2: Διαδικασία άμεσης γεωκωδικοποίησης για την παραγωγή νέφους σημείων LiDAR (Φράγκος 2013)



Εικόνα 1- 3: Σχηματική αναπαράσταση σάρωσης LiDAR
(www.windfarmobop.com)

1.2 Δυνατότητες και εφαρμογές

Βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων LiDAR, είναι η παραγωγή άμεσα γεωκωδικοποιημένων δεδομένων, γεγονός που συντέλεσε στη γρήγορη δημοτικότητα τους μεταξύ των χρηστών GIS. Σήμερα η εν λόγω τεχνολογία βρίσκεται εδραιωμένη στο χώρο ως η αποδοτικότερη για συλλογή 3d δεδομένων, ενώ νέα πεδία εφαρμογών αναπτύσσονται συνεχώς, κυρίως λόγω της μεγάλης ευελιξίας και της πλούσιας πληροφορίας που μπορεί να εξαχθεί από τα δεδομένα σάρωσης, καθώς και της καλής σχέσης κόστους - απόδοσης, με την οποία είναι συνυφασμένη η χρήση τέτοιων συστημάτων. Καθοριστικός παράγοντας της ευρείας υιοθέτησης του συστήματος από διάφορες χαρτογραφικές κοινότητες και φορείς, είναι η δυνατότητα συνδυασμού διασυνδεδεμένων εναέριων φωτομηχανών μεσαίου format, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα με το σαρωτή, παρέχοντας ψηφιακές αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης (έως και 80 Mpixel στα σύγχρονα συστήματα), καθώς και η αυξημένη ακρίβεια και η φθίνουσα τιμή των συστημάτων GNSS/INS. Η τεχνολογία LiDAR δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι μπορεί να αντικαταστήσει της υφιστάμενες, εδραιωμένες φωτογραμμετρικές διαδικασίες, αλλά περισσότερο ότι παρέχει εναλλακτικές, οικονομικότερες προτάσεις για παραγωγή ορισμένων προϊόντων. Η συνδυαστική εφαρμογή τους με ηλεκτροπτικά δεδομένα (αεροφωτογραφίες και δορυφορικές απεικονίσεις) μπορεί να δώσει το μέγιστο και από τα δύο περιβάλλοντα, με γνώμονα πάντα την κάλυψη των τεχνικών αναγκών με όσο το δυνατόν μικρότερο οικονομικό

και υλικοτεχνικό κόστος (Habib, 2009). Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους, μπορεί πάντα να κατασκευαστεί με τις κλασικές φωτογραμμετρικές μεθόδους, αλλά η εξαγωγή του από δεδομένα LiDAR αποδίδει, σε πολύ μικρότερο χρόνο, αποτέλεσμα ίδιας (ή και καλύτερης) ποιότητας παράλληλα με μια ευρεία γκάμα προϊόντων για άλλες χρήσεις.

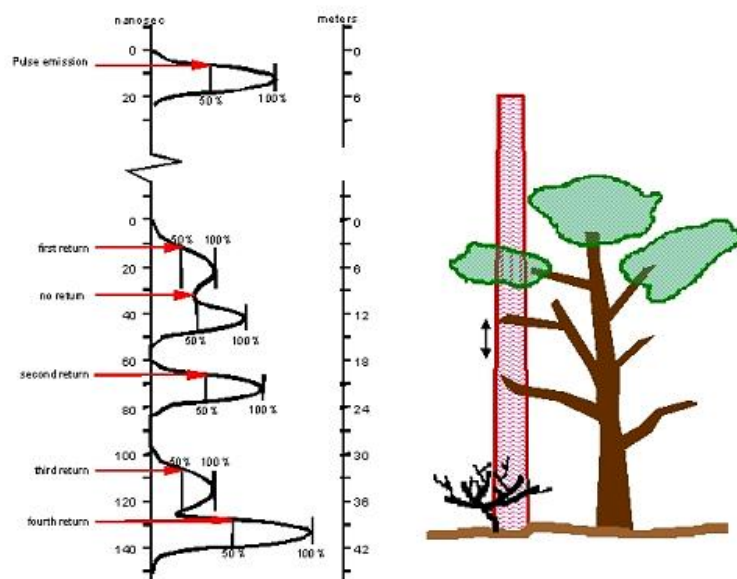
Πλεονεκτήματα LiDAR	Φωτογραμμετρικές αδυναμίες
Πυκνή πληροφορία σε ομογενείς επιφάνειες	Σχεδόν καθόλου πληροφορία θέσης σε ομογενείς επιφάνειες
Συλλογή πληροφορίας ημέρα και νύχτα	Συλλογή δεδομένων μόνο την ημέρα και με καλές συνθήκες ορατότητας
Άμεση γεωκωδικοποίηση 3d πληροφορίας	Περίπλοκες και μερικές φορές αναξιόπιστες διαδικασίες συνταύτισης
Υψομετρική ορθότητα καλύτερη της οριζοντιογραφικής	Υψομετρική ορθότητα χειρότερη της οριζοντιογραφικής

Πίνακας 1-1: Φωτογραμμετρικές αδυναμίες σε σύγκριση με πλεονεκτήματα των LiDAR (Habib 2009)

Αδυναμίες LiDAR	Φωτογραμμετρικά πλεονεκτήματα
Μικρή ποικιλία πληροφοριών	Μεγάλη ποικιλία πληροφορίας
Δύσκολη εξαγωγή σημασιολογικής πληροφορίας	Πλήθος σημασιολογικής πληροφορίας
Σχεδόν καθόλου πληροφορία γύρω από γραμμές αλλαγής κλίσης (breaklines)	Πυκνή πληροφορία γύρω από γραμμές αλλαγής κλίσης (breaklines)
Οριζοντιογραφική ορθότητα χειρότερη της υψομετρικής	Οριζοντιογραφική ορθότητα καλύτερη της υψομετρικής

Πίνακας 1-2: Φωτογραμμετρικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με αδυναμίες των LiDAR (Habib 2009)

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 (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 (εικ.1-4).



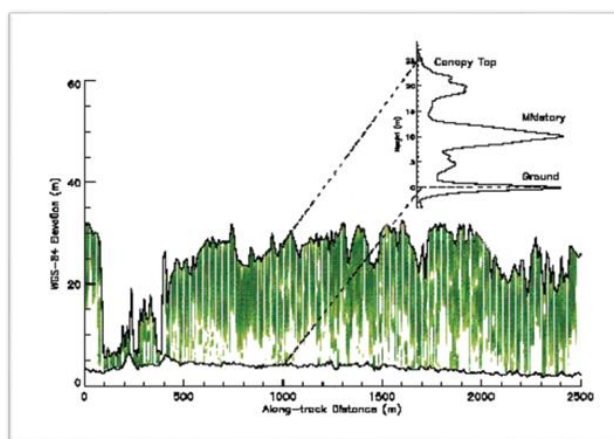
Εικόνα 1-4: Σχηματική απεικόνιση πολλαπλών επιστροφών και ψηφιοποίησης επιστρεφόμενου σήματος (ASPRS)

Η φυσική σημασία των πολλαπλών επιστροφών είναι ότι οι πρώτες αντιπροσωπεύουν σημεία στις υψηλότερες επιφάνειες της περιοχής σάρωσης, όπως κορυφές δέντρων και σκεπές κτιρίων, 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 οπισθοσκεδάσεις από το έδαφος, αφού κάποιο υπέργειο αντικείμενο (κλαδί δέντρου, τμήμα κατασκευής κ.α.) μπορεί να τις προκαλέσει. Για παλμούς οι οποίοι οπισθοσκεδάζονται εξ ολοκλήρου μια φορά, η πρώτη επιστροφή είναι και η τελευταία. Με την καταγραφή πολλαπλών επιστροφών, προσδιορίζονται διαφορετικές επιφάνειες από το νέφος σημείων, όπως το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DSM) της περιοχής σάρωσης και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM) αυτής και χαρτογραφούνται τμήματα βλάστησης μεταξύ των κορυφών των δέντρων και του εδάφους.

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. Με βάση την τεχνική αυτή, το νέφος σημείων δεν δημιουργείται από την καταγραφή των τοπικών μεγίστων στο επιστρεφόμενο σήμα όπως τα συστήματα διακριτών επιστροφών, αλλά από ψηφιοποίηση ολόκληρου του επιστρεφόμενου σήματος ως συνάρτηση του χρόνου (Reitberge et al., 2008), 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. 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.



Εικόνα 1- 5: Δημιουργία προφίλ από ανάλυση πλήρους σήματος (NASA)

Πλέον της λεπτομερέστερης απεικόνισης της περιοχής σάρωσης από τις πολλαπλές καταγραφές, τα σύγχρονα συστήματα συγκεντρώνουν και μια σειρά από άλλα δεδομένα για κάθε μετρούμενο σημείο, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως ιδιότητες αυτών (attributes) και τα οποία αυξάνουν τις δυνατότητες ανάλυσης στο παραγόμενο νέφος. Τέτοιες ιδιότητες είναι η ένταση (intensity) του οπισθοσκεδαζόμενου παλμού (θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο), ο χρόνος (GPS) καταγραφής του, η γωνία υπό την οποία κατεγράφη κ.α. Είναι κατανοητό, ότι η καταγραφή τέτοιας ποικιλίας χαρακτηριστικών δημιουργεί τις προϋποθέσεις για ανάπτυξη ενός αντίστοιχου εύρους εφαρμογών, για κάθε σκοπό, προσδίδοντας στην τεχνολογία LiDAR έναν ευέλικτο χαρακτήρα, στην κατεύθυνση της οικονομικότητας, αφού από τα δεδομένα μιας μόνο αποστολής είναι δυνατόν να υποστηριχθούν περισσότερες από μιας τεχνικές εργασίες, διαφορετικών απαιτήσεων.

Οι πλέον διαδεδομένες εφαρμογές ευρέως σκοπού, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την τεχνολογία LiDAR, αφορούν στην εκμετάλλευση των προϊόντων που μπορούν να

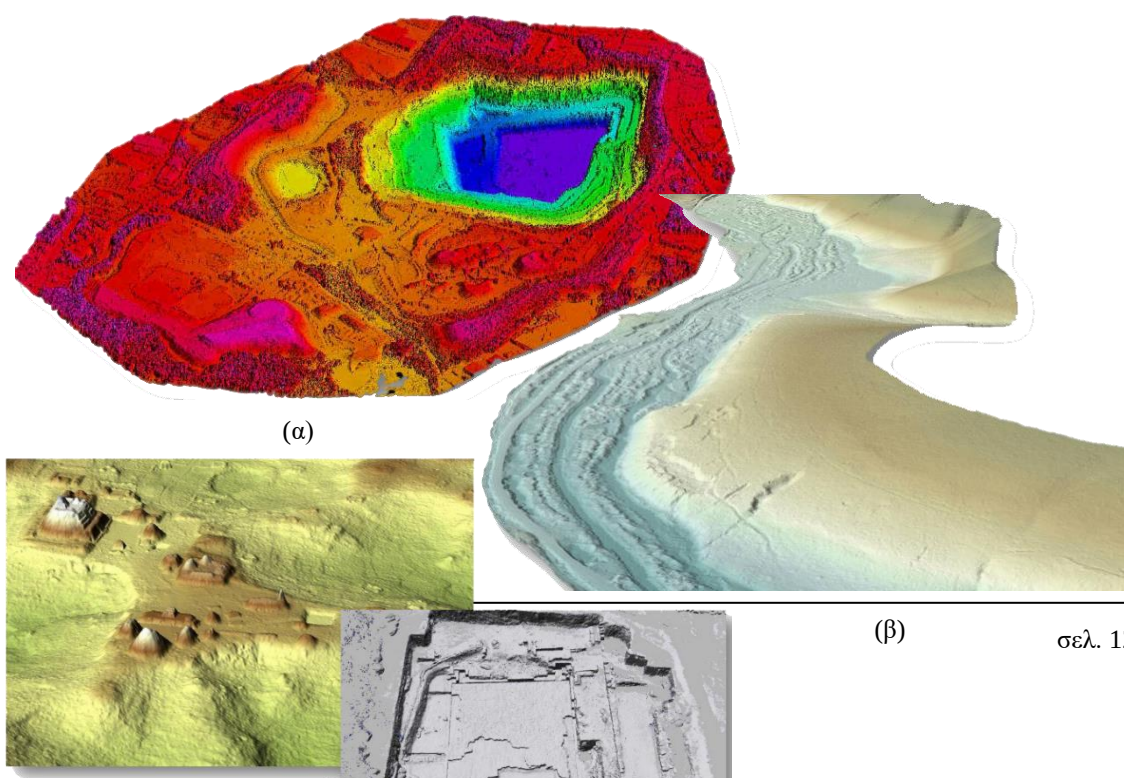
εξαχθούν από αυτή (πίνακας 1-3) και ως επί το πλείστο αφορούν GIS εφαρμογές για υποστήριξη λήψεων αποφάσεων, διαμόρφωσης πολιτικών και παρακολούθησης φαινομένων (πίνακας 1-4).

Raster	Vector
Εικόνες έντασης	Νέφη σημείων (με ή χωρίς χρωματική κωδικοποίηση)
DTMs και DSMs	Breaklines
Raster απεικονίσεις ταξινομήσεων νεφών σημείων	Ίχνη κτιρίων
Raster απεικονίσεις ειδών κάλυψης και χρήσης γης	Ισοϋψείς καμπύλες
	Υδρολογικό δίκτυο

Πίνακας 1 - 3: Προϊόντα LiDAR

Εφαρμογές δεδομένων LiDAR	
Δημιουργία χαρτογραφικών υποβάθρων	Ογκομετρική παρακολούθηση ορυχείων, ΧΥΤΑ κ.α.
Δημιουργία 3d μοντέλων	Σχεδιασμός, παρακολούθηση και διαχείριση δικτύων (συγκοινωνιακά, ηλεκτρικά, αγωγοί καυσίμων κ.α.)
Διαχείριση φυσικών πόρων	Χαρτογράφηση και παρακολούθηση μη προσβάσιμων ή επικίνδυνων περιοχών
Αστικός σχεδιασμός	Διαφύλαξη πολιτιστικής κληρονομιάς, τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων
Κτηματολογικές εφαρμογές, παρακολούθηση αυθαίρετης δόμησης	Διαχείριση κρίσεων
Παρακολούθηση υδατικών πόρων, υδραυλική μοντελοποίηση, αντιπλημμυρικός σχεδιασμός	Εθνική ασφάλεια, υποστήριξη σχεδίων

Πίνακας 1 - 4: Ενδεικτικές εφαρμογές δεδομένων LiDAR



(δ)

Εικόνα 1- 6: Εφαρμογές με δεδομένα LiDAR (HEXAGON)

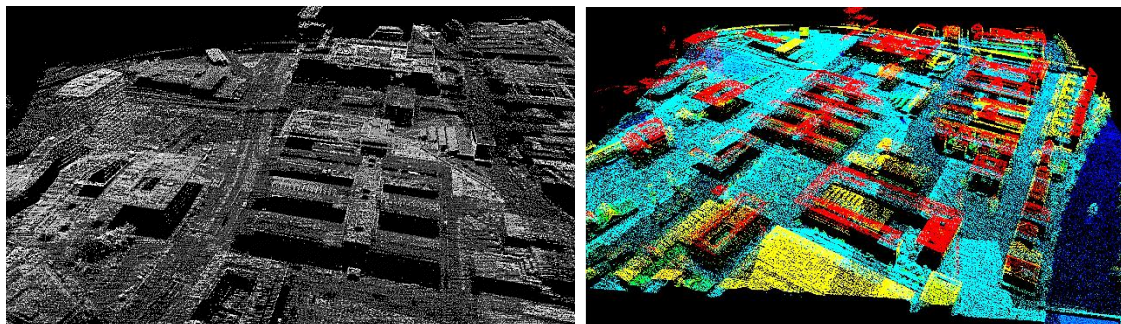
- (α) Ογκομετρική παρακολούθηση ορυχείων
- (β) Χαρτογράφηση διαβρώσεων ακτών
- (γ) Τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων
- (δ) Ανίχνευση κτιρίων
- (ε) Φωτορεαλιστικά αστικά μοντέλα
- (στ) Χαρτογράφηση – παρακολούθηση ηλεκτρικών δικτύων

1.3 Το νέφος σημείων

Το σύστημα LiDAR, 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 ικανοποιητική 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 ανθρωποποιητού), 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 1-7: Νέφη σημείων σε 3d απεικόνιση, με βάση την ένταση (αριστερά) και τις τιμές υψομέτρου (δεξιά) (HEXAGON GEOSPATIAL DEMO DATA)

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 Baltsavias (1999); Wehr and Lohr (1999) είναι οι ακόλουθες:

$$d_{Xalong} = \frac{u}{f_{sc}} \quad (1.1)$$

$$d_{Xacross} = \frac{SW}{N} \quad (1.2)$$

$$d_{min} = \frac{1}{d_{Xalong} \cdot d_{Xacross}} \quad (1.3)$$

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 $N = \frac{PRF}{f_{sc}}$

1.4 Φιλτράρισμα και ταξινόμηση νέφους σημείων

Η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ενός νέφους σημείων, επέρχεται με την ταξινόμηση αυτού στις διάφορες κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν όλα τα αντικείμενα του φυσικού και ανθρωποποιητού περιβάλλοντος στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Τέτοιες κατηγορίες, όπως έδαφος, βλάστηση, υδάτινες επιφάνειες, κτίρια κ.α. έχουν προκαθοριστεί σε μεγάλο βαθμό από την Αμερικανική Ένωση Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης (ASPRS), η οποία τις έχει ενσωματώσει στο πρότυπο “.las”, ανταλλαγής δεδομένων LiDAR. Το δυαδικό αυτό μορφότυπο των δεδομένων LiDAR, είναι ειδικά διαμορφωμένο και κατάλληλα δομημένο, ώστε να δύναται να φιλοξενεί τα δισεκατομμύρια σημεία που ένα νέφος μπορεί να περιλαμβάνει, μαζί με τις ιδιότητες τους, ενώ ταυτόχρονα παραμένει επεξεργάσιμο από άποψης υπολογιστικού φόρτου προσπέλασης (Young and Graham, 2012). Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα για τη δημιουργία νέων τάξεων από το χειριστή, προκειμένου να είναι εφικτή η εξειδικευμένη κατηγοριοποίηση των σημείων, για εφαρμογές ειδικού σκοπού. Σύμφωνα με τη θεώρηση των (Meng et al., 2010), οι μετρήσεις σημείων από το σύστημα LiDAR επηρεάζονται από τρεις παράγοντες, οι οποίοι είναι:

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

Ο θόρυβος αφορά σημεία τα οποία παρουσιάζουν τιμές υψομέτρου πολύ μεγαλύτερες ή πολύ μικρότερες από τις αναμενόμενες εντός συγκεκριμένης περιοχής μελέτης. Η ύπαρξή ασυνήθιστα υψηλών σημείων οφείλεται στην οπισθοσκέδαση της ακτινοβολίας laser από ατμοσφαιρικά αεροζόλ, νέφη, διερχόμενα πτηνά κ.α., ενώ τα ασυνήθιστα χαμηλά σημεία μπορούν να δημιουργηθούν από πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις (multipath) του ίδιου τμήματος του παλμού, προ της επιστροφής του στο σύστημα, γεγονός που οδηγεί σε εσφαλμένη μέτρηση απόστασης από το σαρωτή. Ο θόρυβος γενικά αφαιρείται από το νέφος σημείων κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας αυτού, με την θέσπιση ανώτατου και κατώτατου επιτρεπτού ορίου υψομέτρου, το οποίο προέρχεται από άλλη πηγή (χάρτη, τοπογραφικές μετρήσεις κ.α.). Προσοχή πρέπει να δίνεται στην εκάστοτε υψομετρική επιφάνεια αναφοράς, δεδομένου ότι οι χάρτες χρησιμοποιούν ορθομετρικά υψόμετρα (ΜΣΘ), ενώ το σύστημα LiDAR αποδίδει γεωμετρικά υψόμετρα (ελλειψοειδές αναφοράς) λόγω της γεωκωδικοποίησης μέσω GNSS, εκτός αν πραγματοποιηθεί κατάλληλη αναγωγή με τη χρήση μοντέλου γεωειδούς. Τα σημεία εκτός του ανώτατου και κατώτατου υψομετρικού κατωφλίου μπορούν είτε να απαλειφθούν από το νέφος, είτε να ταξινομηθούν στις αντίστοιχες κλάσεις του προτύπου las (class 7: Low Noise και class

18: High Noise), προκειμένου να εξαιρούνται από τα περαιτέρω στάδια επεξεργασίας, ενώ το νέφος διατηρείται εξ ολοκλήρου.

Ο διαχωρισμός των σημείων ενός νέφους στις διάφορες τάξεις του προτύπου .las, πραγματοποιείται σε δύο βασικά και κύρια στάδια:

- ✓ Το φιλτράρισμα, όπου γίνεται αρχικός διαχωρισμός των επίγειων (ground) από τα σημεία που δεν ανήκουν στο έδαφος σημεία (non-ground).
- ✓ Την ταξινόμηση, όπου τα σημεία που δεν ανήκουν στο έδαφος διαχωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση του αντικειμένου που αντιπροσωπεύουν (κτίρια, υδάτινες επιφάνειες, βλάστηση κ.α.).

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. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τα ελάχιστα υψόμετρα, την κλίση της επιφάνειας που ορίζεται από διαδοχικά σημεία του εδάφους, οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ σημείων του εδάφους, καθώς και η μορφολογία αυτών, όπως αυτά αναλύονται από τους Meng et al. (2010). Για τον διαχωρισμό των σημείων ενός νέφους σε επίγεια και υπέργεια, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς κατάλληλα φίλτρα, τα οποία συνιστούν διαφορετικές προσεγγίσεις, με βάση τα εκμεταλλευόμενα κάθε φορά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά και τον τρόπο εφαρμογής τους (απευθείας στο νέφος ή σε raster παράγωγα αυτού). Σύμφωνα με τους Pfeifer and Mandlburger (2009), οι κυριότερες προσεγγίσεις μπορούν να συνοψισθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

✓ **Απλά φίλτρα:** Αποτελούν την πλέον απλή προσέγγιση, καθώς βασίζονται στην θεώρηση ότι τα σημεία με τα χαμηλότερα υψόμετρα, σε μια μικρή γειτονιά, αποτελούν τα σημεία του εδάφους. Εξετάζοντας τα σημεία ενός νέφους, με ένα μικρό φίλτρο (δομικό στοιχείο) ανάλογο της επιθυμητής διάστασης εικονοψηφίδας και αποδίδοντας σε αυτή την τιμή του χαμηλότερου υψομέτρου, παράγεται το DTM της περιοχής. Η ολιστική αυτή προσέγγιση παράγει πληθώρα συστηματικών σφαλμάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές με αστική κάλυψη, έντονη τοπογραφία και υψηλή βλάστηση και γενικά δεν θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

✓ **Μορφολογικά φίλτρα:** Η αρχική τους πρόταση έγινε από τον Vosselman (2000), με την ανάπτυξη ενός φίλτρου κλίσεων, το οποίο διαχωρίζει τα επίγεια σημεία με βάση την κλίση και την υψομετρική διαφορά μεταξύ των υπο εξέταση σημείων και της μορφολογικής συστολής (erosion) του συνόλου των δεδομένων, εντός μιας μικρής περιοχής. Η μορφολογική συστολή επιτελείται με κατάλληλο δομικό στοιχείο, το οποίο προσδιορίζεται με βάση την μέγιστη επιτρεπόμενη υψομετρική διαφορά, σε σχέση με την οριζοντιογραφική υπολογιζόμενη απόσταση μεταξύ σημείων. Ένα σημείο ταξινομείται ως επίγειο εάν το υψόμετρό του δεν υπερβαίνει αυτό της επιφάνειας που δημιουργείται από τη μορφολογική συστολή. Το κατώφλι της μέγιστης επιτρεπόμενης υψομετρικής διαφοράς, με βάση το οποίο μορφώνεται το

δομικό στοιχείο για τον υπολογισμό της μορφολογικής συστολής, μπορεί να υπολογιστεί με αρχικές παραδοχές για την περιοχή μελέτης, με ενσωμάτωση της αναμενόμενης ακρίβειας των μετρήσεων του συστήματος (για δεδομένα με θόρυβο), καθώς και με τη χρήση υψομετρικών δεδομένων εκπαίδευσης. Κύριος περιορισμός της εν λόγω προσέγγισης στο φιλτράρισμα νεφών σημείων, είναι ο καθορισμός του κατάλληλου κατωφλίου υψομετρικής διαφοράς, γεγονός που δεν είναι πάντα εφικτό, λόγω μεταβαλλόμενης τοπογραφίας και καλύψεων γης πάνω από την ίδια περιοχή μελέτης. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί μέσα από διάφορες επιστημονικές εργασίες, αρκετοί μορφολογικοί αλγόριθμοι, που αποτελούν βελτιώσεις και επεκτάσεις στην υπόψη κατηγορία φίλτρων. Περισσότερα μπορούν να διερευνηθούν στις δημοσιεύσεις των Sithole (2001); Zhang et al. (2003); Kobler et al. (2007).

✓ **Φίλτρα Προοδευτικής Πύκνωσης TIN:** Η πρώτη ολοκληρωμένη προσέγγιση αυτού του είδους, αποδίδεται στον Axelsson (2000). Τα φίλτρα της συγκεκριμένης κατηγορίας επιτελούν μια προοδευτική δημιουργία μιας επιφάνειας, σε μορφή TIN, από τα σημεία ενός νέφους τα οποία κατατάσσονται ως επίγεια. Η διαδικασία εκκινεί από ένα μικρό αριθμό σημείων με τα χαμηλότερα υψόμετρα σε μια μικρή γειτονιά του νέφους και τα οποία ορίζουν μια αρχική προσέγγιση της επιφάνειας του εδάφους. Ένα δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN) δημιουργείται με βάση τα σημεία αυτά, το οποίο και 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. 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. Βελτιώσεις και διαφορετικές προσεγγίσεις στην διαδικασία προοδευτικής πύκνωσης TIN, προτάθηκαν από τους Sohn and Dowman (2002). Τα εν λόγω φίλτρα κρίνονται ιδιαίτερα αποτελεσματικά, καθώς ενσωματώνουν την έννοια της επιφάνειας κατά την ανάλυση και εκτός από αυστηρά γεωμετρικά κριτήρια (υψομετρικές διαφορές), συνυπολογίζουν τις τάσεις για επιφανειακές μεταβολές (Pfeifer and Mandlbauer, 2009).

✓ **Φίλτρα επιφανείας:** Τα φίλτρα αυτής της κατηγορίας, διαφοροποιούνται από τα αντίστοιχα της προοδευτικής πύκνωσης TIN, κυρίως για το λόγο ότι δεν προσθέτουν σημεία, με προοδευτικό τρόπο, για τη δημιουργία μιας επιφάνειας, αλλά μορφώνουν αυτή υπό την αρχική θεώρηση ότι συμπεριλαμβάνει όλα τα σημεία. Μια αρχική επιφάνεια παρεμβάλλεται μεταξύ όλων των σημείων και εν συνεχεία, μέσω επαναληπτικών διαδικασιών, πραγματοποιείται απόρριψη των σημείων που δεν προσαρμόζονται καλά, μεταβάλλοντας σταδιακά σε κάθε επανάληψη τα βάρη υπό τα οποία εκφράζεται η επιρροή του κάθε σημείου στην επιφάνεια. Η διαδικασία στηρίζεται στις κλασικές προσεγγίσεις δημιουργίας επιφανειών από δείγματα μετρήσεων (Interpolation, LSM, Kriging κ.α.), ενώ η πρώτη εφαρμογή για

φιλτράρισμα νέφους σημείων από σύστημα LiDAR, πραγματοποιήθηκε από τους Kraus and Pfeifer (1998), οι οποίοι δημιούργησαν την μέθοδο «εύρωστης παρεμβολής» (robust interpolation). Διαφορετικές προσεγγίσεις, στην ίδια φιλοσοφία αντιμετώπισης του προβλήματος διαχωρισμού των επίγειων από τα υπέργεια σημεία, μπορούν να διερευνηθούν στις εργασίες των Pfeifer et al. (2001);Elmqvist (2001);Krzystek (2003);Brovelli et al. (2003).

✓ **Φίλτρα κατάτμησης:** Τα φίλτρα της κατηγορίας αυτής στηρίζονται στην δημιουργία ομογενών περιοχών (αντικείμενα), και στη συνέχεια την συγχώνευση αυτών στην βάση κατάλληλου κριτηρίου ομοιογένειας (συνήθως φασματικού περιεχομένου) για τον διαχωρισμό των αντικειμένων του εικονιστικού χώρου (image space) στις διάφορες τάξεις που αντιπροσωπεύουν τα αντικείμενα του πραγματικού χώρου (object space). Ως εκ τούτου, εφαρμόζονται κυρίως υπόβαθρα τύπου raster ή TIN (2,5d), τα οποία προέρχονται από το νέφος σημείων. Η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων εκτείνεται πέρα από το αρχικό φιλτράρισμα του νέφους, για το διαχωρισμό των επίγειων από τα υπέργεια σημεία, στην πλήρη ταξινόμηση αυτού μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών αντικειμένων. Στην πιο γενικευμένη και απλούστερη τους μορφή όμως, διαχωρίζουν αποτελεσματικά την επιφάνεια του εδάφους, από τα υπέργεια αντικείμενα (δύο βασικές τάξεις). Η αντικειμενοστραφής αυτή προσέγγιση της ταξινόμησης, μπορεί να εφαρμοστεί με την χρήση διάφορων μεθόδων κατάτμησης εικόνας (image segmentation) για την δημιουργία των ομογενών περιοχών (αντικείμενα), όπως οι μέθοδοι region growing, cluster analysis κ.α. Στη συνέχεια, ένα κατάλληλο σετ κριτηρίων (ομοιογένειας, συμπαγότητας, γεωμετρικά κ.α.) εφαρμόζεται μεταξύ αυτών των αντικειμένων και τα αντικείμενα συγχωνεύονται με τρόπο ώστε να δημιουργούν μεγαλύτερα αντικείμενα στην εικόνα, που ανταποκρίνονται σε αντικείμενα του πραγματικού χώρου. Μια επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να προσεγγιστεί από την συγχώνευση αντικειμένων που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και σε χαμηλότερο υψόμετρο από όλα τα άλλα αντικείμενα στον χώρο της εικόνας. Η αντικειμενοστραφής προσέγγιση της ταξινόμησης έγινε ιδιαίτερα προσφιλής με την έλευση του λογισμικού eCognition της Trimble, καθώς οι ιδιαίτερα δύσκολες προγραμματιστικές διαδικασίες που απαιτούνται, αντιμετωπίστηκαν με αυτοματοποιημένο τρόπο, προσβάσιμο στο ευρύ κοινό. Αλγόριθμοι με διαφορετικές προσεγγίσεις στην κατάτμηση των 2,5d υποβάθρων, και στην χρήση κριτηρίων για την δημιουργία επιφανειών από ομοειδή αντικείμενα, μπορούν να διερευνηθούν στις εργασίες των Nardinocchi et al. (2003); Jacobsen and Lohmann (2003);Tovari and Pfeifer (2005);Bartels et al. (2006).

Οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για το φιλτράρισμα του νέφους σημείων, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε μία συγκριτική θεώρησή τους, οι Sithole and Vosselman (2004) διαπίστωσαν πως οι αλγόριθμοι οι οποίοι ενσωματώνουν κάποιας μορφής επιφάνεια προκειμένου να επιτελέσουν το φιλτράρισμα, παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση, αλλά η αντικειμενοστραφής κατάτμηση και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι, δεν ήταν τόσο ανεπτυγμένοι κατά την χρονολογία της υπόψη μελέτης. Γενικά, το πρόβλημα χαμηλής επίδοσης των

αλγορίθμων εστιάζεται κυρίως στις ακμές περιοχών με απότομες κλίσεις και στις γραμμές αλλαγής κλίσης (breaklines), όπως δημιουργούνται μεταξύ υπερκείμενων και υποκείμενων αντικειμένων (π.χ. γέφυρες). Οι Pfeifer and Mandlbürger (2009), αναφέρουν ότι τα μορφολογικά φίλτρα υστερούν στο γεγονός ότι εξετάζουν μόνο τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ γειτονικών σημείων, ενώ οι αλγόριθμοι επιφανείας και προοδευτικής πύκνωσης TIN, λαμβάνουν υπόψη και τις τάσεις της επιφάνειας για μεταβολή και συνεπώς παρέχουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Παράλληλα, η νεότερη προσέγγιση των φίλτρων κατάτμησης, φαίνεται να υπερτερεί σε περιοχές με έντονη ύπαρξη ανθρωποποίητων κατασκευών, καθώς σε τέτοια τεχνητά αντικείμενα (όπως κτίρια) υπάρχει πληθώρα ομοειδών επιφανειών, με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η ποιοτικότερη κατάτμηση. Στον «κανονικοποιημένο» αστικό χώρο, τα επίπεδα (planar surfaces), που ανιχνεύονται με σχετική ευκολία, ανήκουν εξ ολοκλήρου στο έδαφος ή σε υπέργεια αντικείμενα (π.χ. οροφές κτιρίων) και με τον τρόπο αυτό ο διαχωρισμός δεν υφίσταται τα προβλήματα από τις γραμμές αλλαγών κλίσεων, που διαπιστώνονται στους αλγόριθμους επιφανείας. Το πλεονέκτημα αυτό των φίλτρων κατάτμησης, χάνεται σε δασικές περιοχές, καθώς η ακανόνιστη φύση της βλάστησης, δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ομοιογενή αντικείμενα. Χαλαρές τιμές του κριτηρίου ομοιογένειας οδηγούν στην συμπερίληψη πολλών μη επίγειων αντικειμένων, ενώ αυστηρότερες τιμές έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών αντικειμένων (υπερκατάτμηση).

Η πλήρης ταξινόμηση του νέφους σημείων, μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά το αρχικό φιλτράρισμα και το διαχωρισμό των επίγειων από τα υπέργεια σημεία. Έχοντας αποκαταστήσει την βασική επιφάνεια του εδάφους, και αφαιρώντας από την ανάλυση τα σημεία που ανήκουν σε αυτή, απομένει το σύνολο των σημείων εκείνων που περιγράφουν τα υπέργεια αντικείμενα στην περιοχή σάρωσης. Οι δύο κυριότερες κατηγορίες τέτοιων αντικειμένων στον χώρο, είναι η κάθε μορφής βλάστηση και οι τεχνικές κατασκευές, ο προσδιορισμός των οποίων συγκεντρώνει και τον κύριο ερευνητικό όγκο στα θέματα ταξινόμησης. Πρέπει να αναφερθεί, ότι η πλήρης και ορθή ταξινόμηση ενός νέφους σημείων, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, επί του παρόντος, με τη χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων, καθώς κανένας αλγόριθμος δεν παρουσιάζει 100% επιτυχία σε κάθε τύπο περιοχής, κυρίως λόγω της συνθετότητας του φυσικού και τεχνητού περιβάλλοντος, η οποία επιβάλλει τη μεταβολή των παραμέτρων κάθε αλγορίθμου. Συνεπώς, διαφορετικοί αλγόριθμοι κρίνονται βέλτιστοι για διαφορετικού τύπου περιοχές (αστική, δασώδης κ.α.), ενώ το τελικό αποτέλεσμα απαιτεί, σχεδόν πάντα, την ανθρώπινη επέμβαση του χειριστή, προκειμένου να πληροί τις ποιοτικές προδιαγραφές του. Συνήθως, η χειροκίνητη επεξεργασία καταναλώνει και το μεγαλύτερο μέρος (περίπου 40% - 60%) του συνολικού χρόνου παραγωγής (Young and Abdullah, 2012).

Ενώ το φιλτράρισμα ενός νέφους σημείων πραγματοποιείται κυρίως με αυτοματοποιημένες μεθόδους, η πλήρης ταξινόμηση μπορεί να περιλαμβάνει τόσο αυτοματοποιημένες, όσο και ημιαυτόματες μεθόδους. Στην διαδικασία είναι δυνατόν να ενσωματώνονται δεδομένα από άλλες πηγές, όπως ίχνη κτηρίων από τοπογραφικά

διαγράμματα και κτηματολογικούς χάρτες, πολύγωνα βλάστησης από δασικούς χάρτες ή από ταξινόμηση πολυφασματικών εικόνων, vectors οδικού δικτύου, πολύγωνα υδάτινων επιφανειών κ.α. Η ύπαρξη τέτοιων βοηθητικών δεδομένων, επιταχύνει κατά πολύ την διαδικασία ταξινόμησης, αφού απαλείφει την ανάγκη για πρωτογενή ανίχνευση και τη μετέπειτα χειροκίνητη διόρθωση της. Εντούτοις, πολλές φορές η διαθεσιμότητα τέτοιων δεδομένων, περιορίζεται από το γεγονός της μη πληρότητας και της χαμηλότερης ακρίβειας, δεδομένης της υψηλής “ανάλυσης” των δεδομένων LiDAR.

Παράλληλα, η εξαγωγή τέτοιων γεωχωρικών πληροφοριών είναι πολλές φορές το ζητούμενο από μια αποστολή σάρωσης, γεγονός που καθιστά την εκτέλεση πρωτογενούς εργασίας ταξινόμησης αναπόφευκτη. Σε κάθε περίπτωση, οι ακριβείς απαιτήσεις και η φύση του έργου είναι οι καθοριστικοί παράγοντες για την επιλογή των μεθόδων και του βαθμού των βοηθητικών δεδομένων, που θα χρησιμοποιηθούν στην παραγωγική διαδικασία.

Αρκετή έρευνα και πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για την αυτοματοποίηση της ανίχνευσης των κατηγοριών της βλάστησης και των κτιρίων, καθώς αυτές αποτελούν τις βασικότερες από τις κατηγορίες των αντικειμένων του υπέργειου χώρου. Οι αλγόριθμοι που έχουν προταθεί βασίζονται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν με τους παλμούς laser του συστήματος. Γενικώς, η ανίχνευση των κτιρίων αποτελεί μια σχετικά ευθεία προσέγγιση, καθώς οι κτιριακοί όγκοι παρουσιάζουν χαρακτηριστικά όπως συμμετρία, επιπεδότητα και σταθερό (κατά βάσιν) ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Η ανίχνευση κτιρίων με αυτοματοποιημένες μεθόδους, θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

Η αυτοματοποιημένη χαρτογράφηση της βλάστησης, έχει αποτελέσει μια από τις πρώτες εφαρμογές που διερευνήθηκαν με την έλευση των εμπορικών συστημάτων εναέριων LiDAR. Ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί σε δασικές εφαρμογές όπως εκτίμηση του μέσου βλαστικού όγκου και ύψους (Næsset, 1997), εκτίμηση του βλαστικού όγκου και ύψους μεμονωμένων δέντρων (Hyypä and Inkinen, 1999; Brandtberg, 1999; Ziegler et al., 2000; Hyypä et al., 2001), ταξινόμηση ειδών δέντρων (Brandtberg et al., 2003; Holmgren and Persson, 2004; Liang et al., 2007), μέτρηση δασικής ανάπτυξης και ανίχνευση υλοτομίας (Hyypä et al., 2003b; Yu et al., 2004). Οι δύο κύριες προσεγγίσεις για την αξιοποίηση των δεδομένων LiDAR για χαρτογράφηση της βλάστησης, αφορούν αφενός την μελέτη μεμονωμένων δέντρων (με ή χωρίς τεχνικές κατάτμησης) και αφετέρου της επιφάνειας του θόλου που σχηματίζεται από μεγάλες δασωμένες περιοχές. Οι προσεγγίσεις αυτές εξαρτώνται από την κλίμακα χαρτογράφησης, την πυκνότητα του διαθέσιμου νέφους σημείων, καθώς και από τις απαιτήσεις ακρίβειας του έργου. Μια συγκριτική θεώρηση των χρησιμοποιούμενων τεχνικών παρουσιάζεται από τους Hyypä et al. (2004), όπου η επιφάνεια που σχηματίζεται από τις κορυφές των δέντρων (DSM) παράγεται από τις πρώτες επιστροφές των παλμών, ενώ η επιφάνεια που αποτελεί την προσέγγιση του εδάφους (DTM) εξάγεται από τις τελευταίες επιστροφές. Τα κενά που δημιουργούνται λόγω μη πλήρους διεξόδου των παλμών διαμέσου των φυλλωμάτων, πληρούνται με

τεχνικές παρεμβολής και τελικώς ο βλαστικός όγκος προκύπτει από την αφαίρεση του DTM από το DSM. Τεχνικές Image processing μπορούν να εφαρμοστούν για την ανίχνευση, μέτρηση και ταξινόμηση μεμονωμένων δέντρων, τα οποία παρουσιάζονται ως τοπικά μέγιστα στην επιφάνεια θόλου, που εξάγεται από τα δεδομένα.

Οι αμιγείς δασικές εφαρμογές με δεδομένα LiDAR είναι ανεπτυγμένες σε μεγάλο βαθμό, γεγονός που ευνοείται από την απουσία λοιπών αντικειμένων στο δασικό χώρο. Στην περίπτωση μίξης καλύψεων γης (βλάστηση με αστικό ιστό), όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα περίχωρα πόλεων και σε ημιαστικές περιοχές, δυσχεραίνεται η ανίχνευση και διαχωρισμός των κατηγοριών αυτών. Το αστικό πράσινο, συνήθως δημιουργεί σφάλματα στις αυτόματες ταξινομήσεις, καθώς υψηλά δέντρα που υφίστανται σε μεγάλη εγγύτητα με κτίρια, δημιουργούν σύγχυση ως προς την ακριβή ανίχνευση των ορίων των δύο κατηγοριών. Κατά τον τρόπο αυτό, είναι σύνηθες να παρατηρείται συμπερίληψη τμημάτων βλάστησης στα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων και αντίστροφα. Πολλές προσεγγίσεις αφορούν την ανίχνευση της αστικής βλάστησης με την βοήθεια γεωαναφερμένων υπερφασματικών ηλεκτροπτικών εικόνων, από τις οποίες εξάγονται μάσκες βλάστησης μέσω υπολογισμού του δείκτη NDVI (Straub, 2004; Demir and Baltsavias, 2010; Bandyopadhyay et al., 2013). Η προσέγγιση αυτή είναι και η συνηθέστερη, όταν υπάρχει διαθεσιμότητα κατάλληλων δεδομένων, καθώς η χαρακτηριστική, μέγιστη φασματική υπογραφή της βλάστησης στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να αποδώσει ιδιαίτερα ακριβή αποτελέσματα ταξινόμησης, τόσο στην φασματική (στατιστική) προσέγγισή της, όσο και στην αντικειμενοστραφή. Επιπλέον, η χρήση τέτοιας πρακτικής για την ταξινόμηση της βλάστησης σε περιοχές μικτού χαρακτήρα, ενισχύεται καθώς τα σύγχρονα συστήματα LiDAR ενσωματώνουν υπερφασματικές μεσαίου format οπτικές κάμερες, με πολύ υψηλή χωρική ανάλυση. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η αύξηση της διαθεσιμότητας οπτικών δεδομένων, άμεσα γεωαναφερμένων και ίδιας έκτασης με το νέφος σημείων, που λαμβάνονται ταυτόχρονα, από την ίδια αποστολή συλλογής.

Άλλη προσέγγιση στην ανίχνευση και ταξινόμηση της βλάστησης, είναι η χρησιμοποίηση του αριθμού των καταγραφόμενων οπισθοσκεδάσεων έκαστου παλμού. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, είναι η διαπερατικότητα των παλμών laser διαμέσου της βλάστησης. Γενικά, το έδαφος και τα κτίρια δεν δημιουργούν πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις ανά παλμό, καθώς οι επιφάνειές τους είναι συνήθως συνεχείς και αδιαπέρατες. Τα δέντρα και οι θάμνοι, από την άλλη, επιτρέπουν λόγω μη συνεχούς επιφάνειας, την μερική διαπερατικότητα των παλμών, με αποτέλεσμα τμήματα επαρκούς ενέργειας αυτού να οπισθοσκεδάζονται από χαμηλότερα τμήματα τους και από το έδαφος. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η καταγραφή περισσότερων από ενός υψομέτρων, για τον ίδιο παλμό, τα οποία αντιστοιχούν σε σημεία ίδιας προβολής, αλλά διαφορετικού ύψους από το έδαφος. Η διαφορά των σημείων πρώτων επιστροφών (first returns) από των τελευταίων επιστροφών (last returns), είναι ένδειξη οπισθοσκεδάσεων από διαπερατά αντικείμενα (π.χ. δέντρα) και με τον τρόπο αυτό κάθε σημείο για το οποίο το

υψόμετρο πρώτης επιστροφής είναι διαφορετικό από το αντίστοιχο της τελευταίας, μπορεί να ταξινομηθεί ως βλάστηση (Alharthy and Bethel, 2002). Τελικώς, προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για την ταξινόμηση βλάστησης, οι οποίες βασίζονται σε τεχνικές παρόμοιες με τις πρωθύστερα ανεπτυγμένες για το φιλτράρισμα των νεφών σημείων (ground-non ground). Κυρίως ακολουθούνται τεχνικές κατάτμησης επιφανειών (region growing, clustering κ.α.), στατιστικά μεγέθη ροπών εικόνων (skewness και kurtosis) (Crosilla et al., 2005) κ.α.

Η ακολουθούμενη, κάθε φορά προσέγγιση εξαρτάται, όπως προαναφέρθηκε, από τις απαιτήσεις κάθε έργου και τη διαθεσιμότητα βοηθητικών δεδομένων. Προοδευτική ταξινόμηση ενός νέφους μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση των βέλτιστων αλγορίθμων, σε σχέση με την εκάστοτε φύση της περιοχής μελέτης, ενώ οι πλέον εύκολα αναγνωρίσιμες κατηγορίες (έδαφος και κτίρια) αντιμετωπίζονται με προτεραιότητα. Σταδιακή αφαίρεση των σημείων του νέφους (που εμπίπτουν στις κατηγορίες αυτές) από τα επόμενα στάδια ανάλυσης, δύναται να οδηγήσει σε βελτιωμένα αποτελέσματα ανίχνευσης άλλων κατηγοριών (π.χ. βλάστηση), λόγω της σταδιακής μείωσης της πολυμορφίας της περιοχής.

Δυστυχώς, μια ολιστική αντιμετώπιση της διαδικασίας ταξινόμησης ενός νέφους σημείων δεν είναι εφικτή, καθώς οι δυνατότητες των υπολογιστικών συστημάτων για αναγνώριση προτύπων, υπολείπονται ακόμα σε πολύ μεγάλο βαθμό, από τις αντίστοιχες των ανθρώπινων χειριστών. Με την συνεχή έρευνα στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης, οι αυτόματες, ακριβείς, ταξινομήσεις θα είναι μια πραγματικότητα στο μέλλον, ενώ μάλιστα θα μπορούν να αποδίδουν και σημασιολογικό περιεχόμενο των αναγνωριζόμενων οντοτήτων. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι ταχέως εξελισσόμενες και πολλές στον αριθμό αυτοματοποιημένες διαδικασίες για ταξινόμηση νεφών σημείων, αποτελούν μια επίσπευση στον χρόνο μεταξύ λήψης δεδομένων και της παραγωγής τελικών προϊόντων, μειώνοντας όλο και περισσότερο την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Η τεχνική Lidargrammetry

2.1 Ένταση επιστρεφόμενου παλμού και εικόνες έντασης

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 στο προηγούμενο κεφάλαιο. 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 2-1 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. 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.

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

Πίνακας 2-1: Παραδείγματα ανακλαστικότητας αντικειμένων κατά την σάρωση με σύστημα LiDAR

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. 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 μια τιμή για το κάθε εικονοστοιχείο, από τις τιμές των εντάσεων των σημείων που εμπίπτουν σε αυτό. Μπορεί με τον τρόπο αυτό να υπολογιστεί, για κάθε εικονοστοιχείο, η μέση τιμή των εντάσεων των σημείων 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) τα αντικείμενα στην περιοχή

σάρωσης χρωματίζονται στις διάφορες αποχρώσεις του γκρι, ανάλογα με την ενέργεια του παλμού laser την οποία οπισθοσκεδάζουν. Συνεπώς, με λευκούς τόνους θα 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), έχοντας υπόψη ότι το μήκος κύματος για το laser των εναέριων τοπογραφικών LiDAR κείται στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (συνήθως 1064 nm).



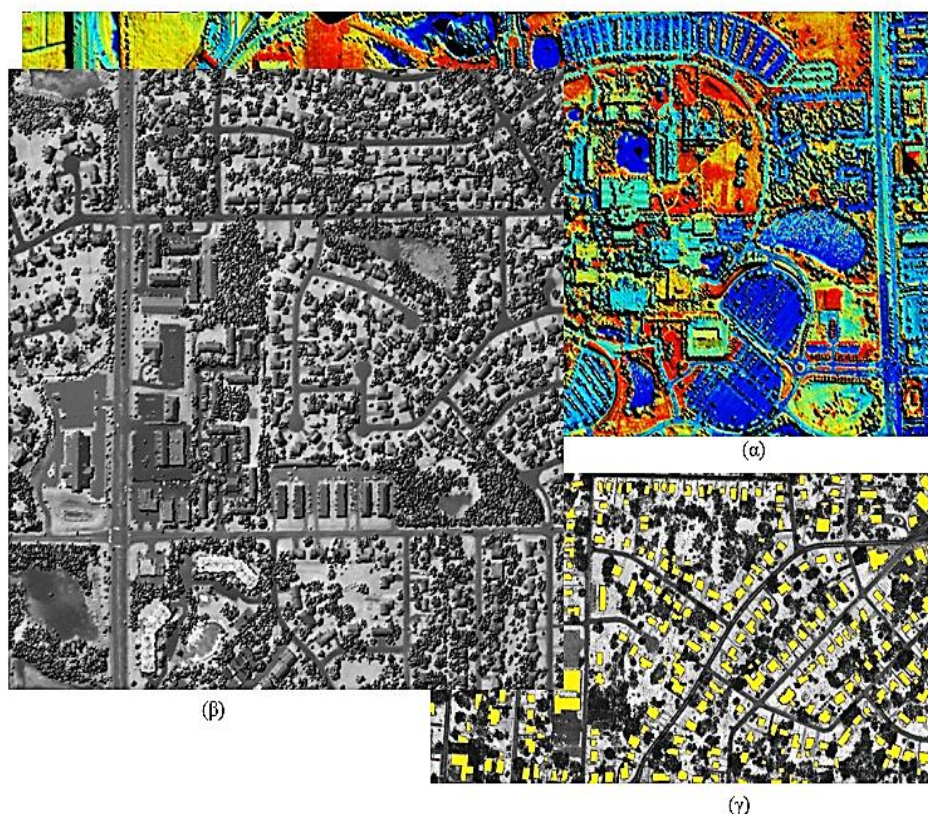
Εικόνα 2-1: Εικόνα έντασης από σάρωση με σύστημα LiDAR (ASPRS)

Το παραγόμενο αυτό raster τόνων του γκρι, ονομάζεται εικόνα έντασης και παρουσιάζει ομοιότητα με μια παγχρωματική ορθοφωτογραφία, χωρίς ωστόσο να έχει την ίδια ευκρίνεια με αυτή, αλλά ούτε και τα ίδια χαρακτηριστικά (εικ. 2-1). 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, με αποτέλεσμα να είναι απευθείας γεωαναφερμένες, με την ίδια, πολύ υψηλή, οριζοντιογραφική ακρίβεια του νέφους (τάξεως μερικών cm). Παράλληλα, αποτελούν ορθές προβολές του πραγματικού κόσμου, σε αντίθεση με τις ηλεκτροπτικές φωτογραφίες (κεντρικές προβολές), αφού εξ ορισμού δημιουργούνται με τεχνικές παρεμβολής στο νέφος σημείων και όχι μέσω φακών. Οι διαστάσεις τους αντιστοιχούν στις πραγματικές διαστάσεις της απεικονιζόμενης περιοχής, σε αντίθεση με τις υπό κλίμακα εικόνες κεντρικής προβολής, γεγονός που τις καθιστά άμεσα μετρητικό προϊόν. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των εικόνων έντασης είναι η απουσία των οριζοντιογραφικών μεταθέσεων που οφείλονται στις υψομετρικές διαφορές των αντικειμένων στην περιοχή μελέτης (εκτροπές αναγλύφου). Αυτό οφείλεται στο ακολουθούμενο γεωμετρικό μοντέλο, αφού κατά τη σάρωση laser, ακόμα και αν ο πλάγια εκπεμπόμενος παλμός χαρτογραφήσει σημείο επί προσόψεως κτιρίου, αυτό στο τελικό νέφος σημείων θα απεικονίζεται στην ορθή οριζοντιογραφική

του θέσης, ανεξάρτητα από την γωνία υπό την οποία λήφθηκε η μέτρηση. Κατά την λήψη αεροφωτογραφιών με οπτικές κάμερες, όσο περισσότερο απέχει από το ναδίρ ένα αντικείμενο με σημαντική υψομετρική διαφορά από το χαμηλότερο υψομετρικό επίπεδο στην εικόνα, τόσο περισσότερο η απεικόνισή του επ' αυτής θα είναι οριζοντιογραφικά μετατοπισμένη. Το πλεονέκτημα της απουσίας των εκτροπών αναγλύφου είναι ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι τα οριζοντιογραφικά δεδομένα, που μπορούν να εξαχθούν από τις εικόνες έντασης είναι συγκρίσιμα σε ορθότητα θέσης, με εκείνα των αληθών ορθοφωτογραφιών (true ortho), πάντα για λήψεις από ένα καλά βαθμονομημένο σύστημα, με κανονικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος θέσης και προσανατολισμού και με προσεκτικές διαδικασίες παραγωγής του νέφους.

Η κύρια χρήση των εικόνων έντασης, αρχικά, δεν αφορούσε την παραγωγή εμπορικά εκμεταλλεύσιμων χαρτογραφικών προϊόντων προερχόμενων απευθείας από το νέφος σημείων, αλλά κυρίως την χρήση τους 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 οι χαμηλοί ρυθμοί επανάληψης των παλμών (PRF) των πρώιμων συστημάτων LiDAR, τα οποία πραγματοποιούσαν σχετικά 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. Το υπόβαθρο, που δημιουργείται με την παραγωγή της εικόνας έντασης, δύναται να χρησιμοποιηθεί για την οπτική αναγνώριση αντικειμένων, διαδικασία όμως που είναι ανάλογη της πυκνότητας των σημείων του νέφους. Εικόνες έντασης από νέφη μέσης και υψηλής πυκνότητας (>10 σημείων/ m^2) εμφανίζουν ικανοποιητική ευκρίνεια, σαφώς μεγαλύτερη από τις αντίστοιχα προερχόμενες από χαμηλότερης πυκνότητας νέφη. Πλέον, ο ρόλος των εικόνων έντασης εμφανίζεται ιδιαίτερα ευρύς και ως εκ τούτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόβαθρα για την εκάστοτε εργασία, από τα οποία είναι δυνατή η διενέργεια ποιοτικών ελέγχων QC του νέφους, 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. Η χρήση της πληροφορίας έντασης γίνεται ακόμα περισσότερο ευέλικτη, όταν συνδυάζεται με άλλα δεδομένα, όπως οπτικές εικόνες, DSMs, τελικές ταξινομήσεις νεφών κ.α. Τα υβριδικά αυτά τελικά παράγωγα (εικ. 2-2), δύναται να αυξάνουν τις φωτοερμηνευτικές δυνατότητες του χρήστη, με την απόδοση επιπλέον σημασιολογικής πληροφορίας και πληροφορίας υφής από ότι οι αρχικές εικόνες έντασης ή από ότι τα λοιπά raster παράγωγα από ένα νέφος σημείων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η δημιουργία υβριδικής απεικόνισης, με την συγχώνευση πληροφορίας από την ταξινόμηση ενός νέφους και

την καταγεγραμμένη ένταση οπισθοσκέδασης των παλμών. Ο επίπεδος (απεικονιστικά) τρόπος απόδοσης μιας εικόνας ταξινόμησης (εικ. 2-3), ενισχύεται με χρωματική διακύμανση βάσει των τιμών έντασης δημιουργώντας ένα αποτέλεσμα που αυξάνει αισθητά την φωτοερμηνευτική δυνατότητα. Σε άλλο παράδειγμα, η υπέρθεση εικόνων έντασης επί κάποιας επιφάνειας DSM, προσδίδει την απαραίτητη αίσθηση αναγλύφου, προκειμένου για ρεαλιστικότερες, συνθετικές απεικονίσεις της τοπογραφίας μιας περιοχής (εικ. 2-2β).



Εικόνα 2-2: Υβριδικές εικόνες έντασης (FIU)

(α) Pseudocolor εικόνα έντασης

(β) Fusion εικόνας έντασης και DSM

(γ) Υπέρθεση ταξινόμησης κτιρίων σε εικόνα έντασης



Εικόνα 2-3: Υβριδική εικόνα με fusion ταξινόμησης νέφους και τιμών έντασης (GeoCUE)

Νέες προοπτικές και δυνατότητες χρήσης των εικόνων έντασης δημιουργούνται από τις τελευταίες εξελίξεις στον χώρο των εναέριων LiDAR. Τα πρώτα πολυφασματικά συστήματα έχουν κάνει την εμφάνισή τους, με το Titan της αμερικανικής Teledyne Optech να σηματοδοτεί τις νέες εξελίξεις. Το σύστημα χρησιμοποιεί τρεις ακτίνες laser, διαφορετικού μήκος κύματος η κάθε μια, με αποτέλεσμα την τριπλή σάρωση της ίδιας περιοχής. Όσον αφορά την ένταση των οπισθοσκεδάζομενων παλμών, καταγράφονται τρεις εντάσεις για κάθε σημείο, οι οποίες αντιστοιχούν στο διαφορετικό βαθμό ανακλαστικότητας, σε κάθε χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος. Οι τρεις αντίστοιχες παραγόμενες εικόνες έντασης, απεικονίζουν τα ίδια αντικείμενα να επιδεικνύουν διαφορετική φασματική συμπεριφορά στην οπισθοσκέδαση των laser (εικ. 2-4), γεγονός το οποίο μπορεί να αποτελέσει δεδομένο ανάλυσης για εξαγωγή πληροφοριών περί της φυσικής και χημικής σύνθεσης αυτών. Οι μεθοδολογίες είναι ακόμα προς ανάπτυξη και έρευνα, αλλά αναμένεται να ακολουθήσουν τις τηλεπισκοπικές τεχνικές εκμετάλλευσης των πολυφασματικών ηλεκτροπτικών απεικονίσεων (ανάλυση κύριων συνιστωσών, απλοί και σύνθετοι λόγοι εικόνων κ.α.)



Εικόνα 2-4: Εικόνες έντασης για τα διαφορετικά μήκη κύματος laser του συστήματος Titan (Teledyne Optech)



Εικόνα 2-5: Pseudocolor εικόνα έντασης από συνδυασμό των τριών τιμών στα διαφορετικά μήκη κύματος laser του συστήματος Titan (Laserdata GmbH)

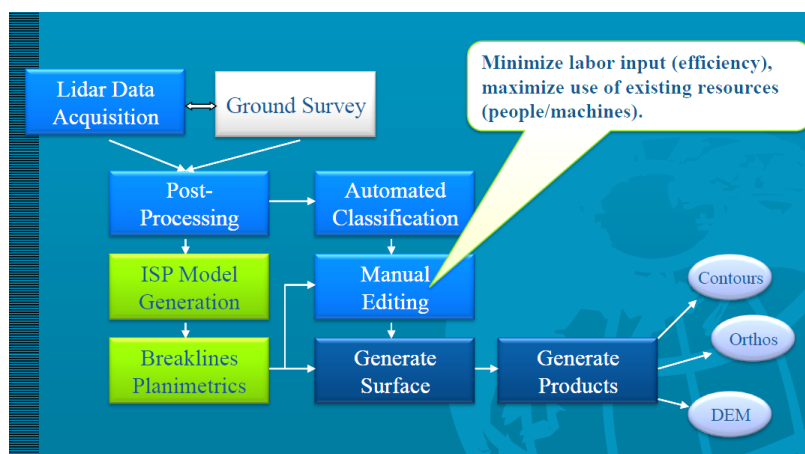
2.2 Επισκόπηση της τεχνικής Lidargrammetry

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 διαδικασία εκμετάλλευσης αεροφωτογραφιών. Τα στερεομοντέλα αυτά μπορούν στη συνέχεια να

χρησιμοποιηθούν σε ένα τυπικό ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό για την πραγματοποίηση 3d απόδοσης 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 ή και την χρήση διαφορετικών ιδιοτήτων, όπως το υψόμετρο. 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 3d διανυσματικής γεωχωρικής πληροφορίας από αυτό, χωρίς να απαιτείται η μεσολάβηση δημιουργίας εικόνων. Η τεχνική αυτή αναμένεται να αποτελέσει και την διεύρυνση του όρου Lidargrammetry στο μέλλον. Επί του παρόντος, η τεχνική βασίζεται στην δημιουργία raster στερεοζευγών με βάση τις υπάρχουσες, καθιερωμένες φωτογραμμετρικές τεχνικές, μέσω κατάλληλων προσαρμογών. Τα στερεοζεύγη αυτά 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. Η απαιτούμενη υψομετρική πληροφορία υπάρχει πρωτογενώς υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια στα νέφη σημείων και η εκμετάλλευσή της για τον σκοπό της Lidargrammetry μπορεί να προέλθει από διάφορες τεχνικές (raster DEM, TIN κ.α.). Ουσιαστικά η τεχνική αποτελεί μια «αντίστροφη» πρακτική, με βάση την οποία παράγονται 2d δεδομένα από ένα αρχικό 3d σετ, ενώ στην συνέχεια από τα 2d αυτά δεδομένα εξάγονται νέα 3d γεωχωρικά δεδομένα μέσω καθιερωμένων φωτογραμμετρικών τεχνικών. Αν και τα οφέλη από την τεχνική αυτή είναι αποδεδειγμένα, έχει διατυπωθεί σκεπτικισμός ως προς το «ανορθόδοξο» της διαδικασίας, αλλά και όσον αφορά την χρησιμότητα. Κατά γενική ομολογία, δεν υφίσταται θέμα ορθής ή λανθασμένης πρακτικής, απλώς θέμα μιας διαφορετικής προσέγγισης, η οποία καλείται να προστεθεί στις ήδη υπάρχουσες πρακτικές συλλογής γεωχωρικών δεδομένων, καθώς και να αυξήσει το βαθμό εκμετάλλευσης ενός σετ δεδομένων από ένα σύστημα LiDAR.

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 3d 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. Γενικά, η επιτυχία της τεχνικής εξαρτάται από την ποιότητα των εικόνων έντασης. Τα σύγχρονα συστήματα LiDAR, δύναται να συλλέγουν πολύ πυκνά νέφη σημείων, με μικρές αποστάσεις μεταξύ αυτών (post spacing), γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία εικόνων έντασης με μεγάλη χωρική ανάλυση. Για την 3d εκμετάλλευση των εικόνων αυτών, είναι επιθυμητό τα αντίστοιχα νέφη να παρουσιάζουν πυκνότητες μεγαλύτερες των 10 σημείων/m². Η σχέση της πυκνότητας συλλογής και των παραμέτρων του ύψους πτήσης, εύρους κάλυψης και αντίστοιχου κόστους της αποστολής, πρέπει να

καθορίζονται πάντα με βάση τις προδιαγραφές ακριβείας του έργου. Υψηλές πτήσεις, με μεγάλο εύρος κάλυψης, αποτελούν οικονομικότερες προσεγγίσεις στην συλλογή δεδομένων σάρωσης, αλλά δημιουργούν περιορισμούς όσον αφορά την επιτυγχάνομενη πυκνότητα, αλλά και την οριζοντιογραφική και υψομετρική ορθότητα του νέφους. Σταδιακά, νέα συστήματα στην αγορά δημιουργούν μεγαλύτερη ευελιξία στην παραπάνω σχέση, καθώς νέες εφαρμόζόμενες τεχνικές (πολλαπλοί ταυτόχρονοι παλμοί, χρήση διπλών ακτίνων σάρωσης κ.α.) επιτρέπουν την πυκνή συλλογή νεφών ακόμα και από μεγάλα ύψη.



Εικόνα 2-6: Ροή εργασιών Lidargrammetry (GeoCUE)

Μια τυπική ροή εργασιών (εικ. 2-6) περιλαμβάνει στάδια δημιουργίας και προεπεξεργασίας του νέφους σημείων, σύμφωνα με την καθιερωμένη πρακτική της εκμετάλλευσης δεδομένων εναέριων τοπογραφικών LiDAR. Πραγματοποιείται η γεωκωδικοποίηση του νέφους από τα δεδομένα σάρωσης, τα δεδομένα θέσης και προσανατολισμού, καθώς και τα δεδομένα βαθμονόμησης του συστήματος. Το τελικώς παραγόμενο νέφος, ελέγχεται με διαδικασίες QC (quality control), προκειμένου να διαπιστωθεί η επίτευξη των προδιαγραφών ακριβείας του, από άποψης πληρότητας, κάλυψης, οριζοντιογραφικής και υψομετρικής ακρίβειας. Στη συνέχεια το νέφος μπορεί να υποστεί διαδικασίες αυτόματης ταξινόμησης, ενώ ταυτόχρονα παράγονται και τα στερεοζεύγη έντασης (Inferred Stereo Pairs - ISPs). Από το κάθε στερεοζεύγος και με τη χρήση παραδοσιακών φωτογραμμετρικών λογισμικών και διαδικασιών, ψηφιοποιούνται 3d δεδομένα όπως γραμμές αλλαγής κλίσεων, ίχνη κτιρίων κ.α. Τα παραγόμενα αυτά γεωχωρικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την παραγωγή επιφανειών και λοιπών προϊόντων, αλλά και να ενσωματωθούν στο στάδιο διόρθωσης της αυτόματης ταξινόμησης του νέφους που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενο στάδιο. Η δυνατότητα αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο πλεονέκτημα, καθώς δίνει λύση στο πρόβλημα της διαθεσιμότητας κατάλληλων βοηθητικών δεδομένων, για την υποβοήθηση ή την διόρθωση της αυτόματης ταξινόμησης, κατά τα όσα αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 1 (§1.4). Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται μείωση του απαιτούμενου χρόνου για χειροκίνητη διόρθωση και μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα στην παραγωγή, μέσω της βέλτιστης συνέργειας

τόσο των αυτοματοποιημένων μεθόδων, όσο και του ανθρώπινου παράγοντα. Η διαδικασία αυτή συντελεί στην οικονομικότητα της παραγωγής, καθώς το στάδιο της ανθρώπινης επέμβασης για διόρθωση των σφαλμάτων των αλγορίθμων της ταξινόμησης είναι και το πιο κοστοβόρο, από άποψη χρόνου και απασχόλησης εξειδικευμένου προσωπικού.

2.3 Δημιουργία στερεομοντέλου (ISP) από τιμές έντασης

Οι εικόνες έντασης που εξάγονται από το νέφος σημείων, παρουσιάζουν γεωμετρικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές των αληθών ορθοφωτογραφιών (true orthos). Τέτοιες ιδιότητες είναι η απουσία οριζοντιογραφικών μετατοπίσεων λόγω εκτροπών αναγλύφου, η σταθερή κλίμακα σε όλο το εύρος της εικόνας και η αναπαράσταση της απεικονιζόμενης περιοχής μέσω ορθής προβολής. Ως αποτέλεσμα, καθίστανται κατάλληλες για την εξαγωγή μετρητικών πληροφοριών, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλή οριζοντιογραφική ορθότητα λόγω της αντίστοιχης ορθότητας του νέφους σημείων. Η γεωμετρική αυτή ομοιότητα μεταξύ εικόνων έντασης και αληθών ορθοφωτογραφιών, καθιστά εφικτή, με τις κατάλληλες προσαρμογές, την εφαρμογή της τεχνικής παραγωγής των στέρεο-ορθοφωτογραφιών (stereo orthophoto), όπως αυτή διατυπώθηκε αρχικά την δεκαετία του 1960 από τον Collins (1968), επεκτάθηκε και μελετήθηκε εκτεταμένα από τους Blachut (1968); Blachut and Wijk (1970); Blachut (1976.); Collins (1970); Kraus et al., (1979). Η βασική ιδέα στη δημιουργία των στέρεο-ορθοφωτογραφιών, έγκειται στην παραγωγή μιας ορθοφωτογραφίας από μια εικόνα και στον συνδυασμό της με μια δεύτερη ορθοφωτογραφία (stereomate) για τη δημιουργία στερεοσκοπικού ζεύγους. Η stereomate ορθοφωτογραφία μπορεί να παραχθεί από τις γειτονικές αρχικές φωτογραφίες, με την ταυτόχρονη εισαγωγή τεχνητής x-παράλλαξης ή ακόμα και από την ίδια φωτογραφία. Η παραγωγή της από την ίδια φωτογραφία που χρησιμοποιείται και για την δημιουργία της βασικής ορθοφωτογραφίας, έχει σαν αποτέλεσμα την αδυναμία στερεοσκοπικής παρατήρησης για όσα αντικείμενα δεν περιλαμβάνονται στο χρησιμοποιούμενο, για την ορθοαναγωγή, DEM, τα οποία θα εμφανίζονται να κείνται επί του εδάφους (Baltsavias, 1996; Wang, 2004).

Για την εισαγωγή της τεχνητής x-παράλλαξης, έχουν διατυπωθεί διαφορετικές προσεγγίσεις, ενώ μια ανάλυση και συγκριτική θεώρησή τους μπορεί να διερευνηθεί στην εργασία των Li et al. (2002). Συνοπτικά, αναφέρονται τρεις κύριες μέθοδοι εισαγωγής x-παράλλαξης για την δημιουργία ζεύγους στέρεο-ορθοφωτογραφιών:

✓ **Μοντέλο της πλάγιας παράλληλης προβολής:** Όπου η παράλλαξη για κάθε σημείο της stereomate εικόνας υπολογίζεται από μια απλή γραμμική σχέση (2.1) ως συνάρτηση του υψομέτρου.

$$P = \tan(a) \cdot Z \quad (2.1)$$

Όπου $\tan(\alpha) = B/H$

B: Η βάση του στερεοζεύγους

H: Το ύψος πτήσης

Z: Το υψόμετρο του εδάφους (ή του υπέργειου σημείου)

P: Η υπολογιζόμενη τεχνητή παράλλαξη x

✓ **Μοντέλο της λογαριθμικής προβολής:** Όπου η παράλλαξη για κάθε σημείο της stereomate εικόνας υπολογίζεται από μια λογαριθμική σχέση (2.2).

$$P = B \cdot \ln \left(\frac{H}{H - Z} \right) \quad (2.2)$$

✓ **Μοντέλο της μη παράλληλης προβολής:** Όπου η παράλλαξη για κάθε σημείο της stereomate εικόνας υπολογίζεται από την μη γραμμική σχέση (2.3) και αποτελεί το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο.

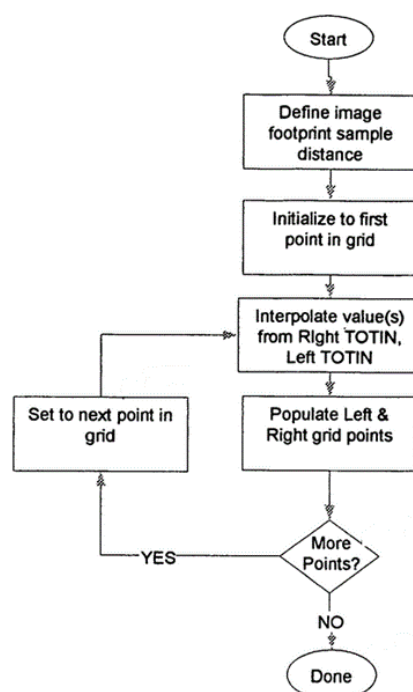
$$P = \frac{B \cdot Z}{H - Z} \quad (2.3)$$

Σε όλες τις παραπάνω προσεγγίσεις, τα μαθηματικά μοντέλα αναπτύχθηκαν βάσει της γεωμετρίας της λήψης αεροφωτογραφιών. Για το λόγο αυτό, εστιάζονται κυρίως στην δημιουργία της stereomate ορθοφωτογραφίας από την αρχική δευτερεύουσα εικόνα ενός τυπικού φωτογραμμετρικού στερεοζεύγους, μέσω κατάλληλου μοντέλου προβολής. Σε μια διαφορετική προσέγγιση, ένα στερεοζεύγος από οπτικές ορθοεικόνες θα μπορούσε επίσης να κατασκευαστεί με την χρήση μιας αρχικής ορθοφωτογραφίας και ενός βοηθητικού DEM. Για την περίπτωση αυτή, η ορθοφωτογραφία είναι επιθυμητό να είναι αληθής (true ortho), προς περιορισμό σφαλμάτων στο υπό δημιουργία στερεομοντέλο. Η stereomate ορθοεικόνα κατασκευάζεται από την αρχική ως προϊόν επανασύστασης (resampling) αυτής, με εισαγωγή τεχνητής x-παράλλαξης μέσω του τύπου 2.3. Η υπολογιζόμενη παράλλαξη εισάγεται εξ ολοκλήρου στη νέα εικόνα (stereomate), η οποία συνδυαζόμενη με την αρχική ορθοεικόνα δημιουργεί το ψηφιακό στερεοζεύγος. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν η αρχική ορθοεικόνα είναι οπτική, αλλά και όταν είναι άλλης φύσεως (π.χ. LiDAR). Απαραίτητο αρχικό στοιχείο πέρα από την εικόνα και το DEM, είναι μια παραδοχή για την τιμή του λόγου B/H, καθώς δεν υφίσταται πραγματικό μήκος βάσης λήψης. Ο λόγος αυτός καθορίζεται από το χειριστή, συνήθως με δοκιμές, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική στερεοπαρατήρηση. Η τιμή του παρουσιάζει σχέση αναλογίας με το βαθμό της τρισδιάστατης αντίληψης (stereo exaggeration) του χειριστή, καθώς υψηλότερες τιμές δημιουργούν εντονότερο στέρεο φαινόμενο στο ζεύγος. Το παραγόμενο ψευδοστερεοζεύγος, με βάση την τεχνική αυτή, χαρακτηρίζεται και ως Pseudo Stereo Pair (PSP) ή Inferred Stereo Pair (ISP) (εδώ θα

χρησιμοποιείται ο όρος ISP), καθώς δημιουργείται από μαθηματικές τεχνικές και όχι από αρχικό στερεοζεύγος.

Για την εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry, απαιτείται η κατασκευή ISP, καθώς τα αρχικά σετ δεδομένων δεν περιλαμβάνουν εικόνες κεντρικής προβολής, αλλά ένα νέφος σημείων από το οποίο μπορούν να κατασκευαστούν ψηφιακές απεικονίσεις διαφόρων μορφών. Η πλέον απλή προσέγγιση, είναι η κατασκευή του ISP (ή των ISPs αν το νέφος είναι κατατμημένο για λόγους ευκολίας επεξεργασίας), με βάση μια αρχική εικόνα έντασης (ή και άλλης ιδιότητας), ένα DEM και την αρχική παραδοχή του λόγου B/H, σύμφωνα με όσα περιγράψαν νωρίτερα. Σε γενικές γραμμές, ο λόγος B/H υπολογίζεται σε σχέση με την τοπογραφία της απεικονιζόμενης περιοχής και τιμές $B/H=0,3$ κρίνονται ικανοποιητικές για μέσου και έντονου αναγλύφου περιοχές, ενώ τιμές $B/H=0,6$ είναι πιο κατάλληλες για περιοχές χωρίς ιδιαίτερο ανάγλυφο, προκειμένου να ενισχυθεί η τρισδιάστατη παρατήρηση (Flood, 2007). Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η αύξηση της τιμής του λόγου B/H οδηγεί σε μείωση της ευκρίνειας του μοντέλου, κυρίως γύρω από τις γραμμές αλλαγής κλίσης (όρια κτιρίων, γέφυρες κ.α.).

Ιδιαίτερα για την εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry, είναι δυνατόν να ακολουθηθεί μια διαφορετική προσέγγιση, για την δημιουργία ISP, η οποία στηρίζεται στο γεγονός ότι το αρχικό νέφος σημείων περιλαμβάνει όλη την απαραίτητη υψομετρικά πληροφορία. Η προσέγγιση αυτή, αφορά την δημιουργία δύο εικόνων απευθείας από το νέφος σημείων, επί των οποίων η απαραίτητη για τη στερεοπαρατήρηση x-παράλλαξη, μοιράζεται εξίσου. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν απαιτεί την ύπαρξη βοηθητικού υψομετρικού μοντέλου, αλλά μόνο τον καθορισμό του επιθυμητής τιμής του λόγου B/H. Μια εφαρμογή της, ενσωματώνεται στο λογισμικό Terrasolid της GeoCUE, που επί της παρούσης,



Εικόνα 2-7: Ο αλγόριθμος παραγωγής ISP από νέφος σημείων της GeoCUE

είναι και το μόνο διαθέσιμο εμπορικά, το οποίο παρέχει ολοκληρωμένη ροή εργασιών Lidargrammetry. Η κατοχυρωμένη (patent US 7804498 B1/2010) μεθοδολογία για την δημιουργία των εικόνων ενός ISP, περιλαμβάνει την δημιουργία δύο κατατμημένων επικαλυπτόμενων δικτύων ακανόνιστων τριγώνων (Tiled Overlapping Triangulated Irregular Networks – TOTIN), ένα για κάθε μια από τις δύο εικόνες του στερεοζεύγους. Οι κορυφές των TOTIN αποτελούν σημεία του αρχικού νέφους, για τα οποία υπάρχει καταγεγραμμένο ένα σύνολο ιδιοτήτων όπως θέση, τιμή έντασης, τάξη που ανήκουν, χρόνος καταγραφής κ.α. Η x- συντεταγμένη κάθε κορυφής σε κάθε

παραγόμενο TOTIN, υφίσταται μεταβολή με βάση την σχέση 2.4, ώστε να εισαχθεί η επιθυμητή ποσότητα τεχνητής x-παράλλαξης, για την επίτευξη του στέρεο-φαινομένου.

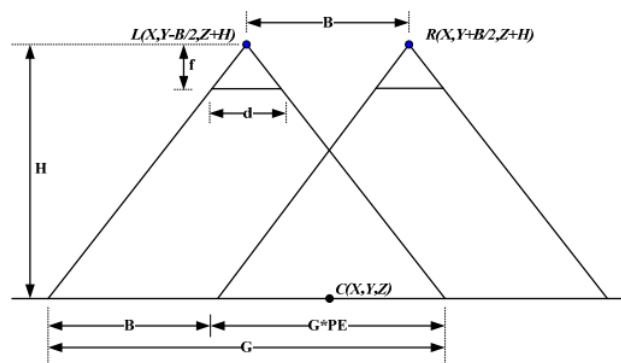
$$\text{ShiftedX} = X \pm dZ \cdot (Z - Z_0) \quad (2.4)$$

Όπου:

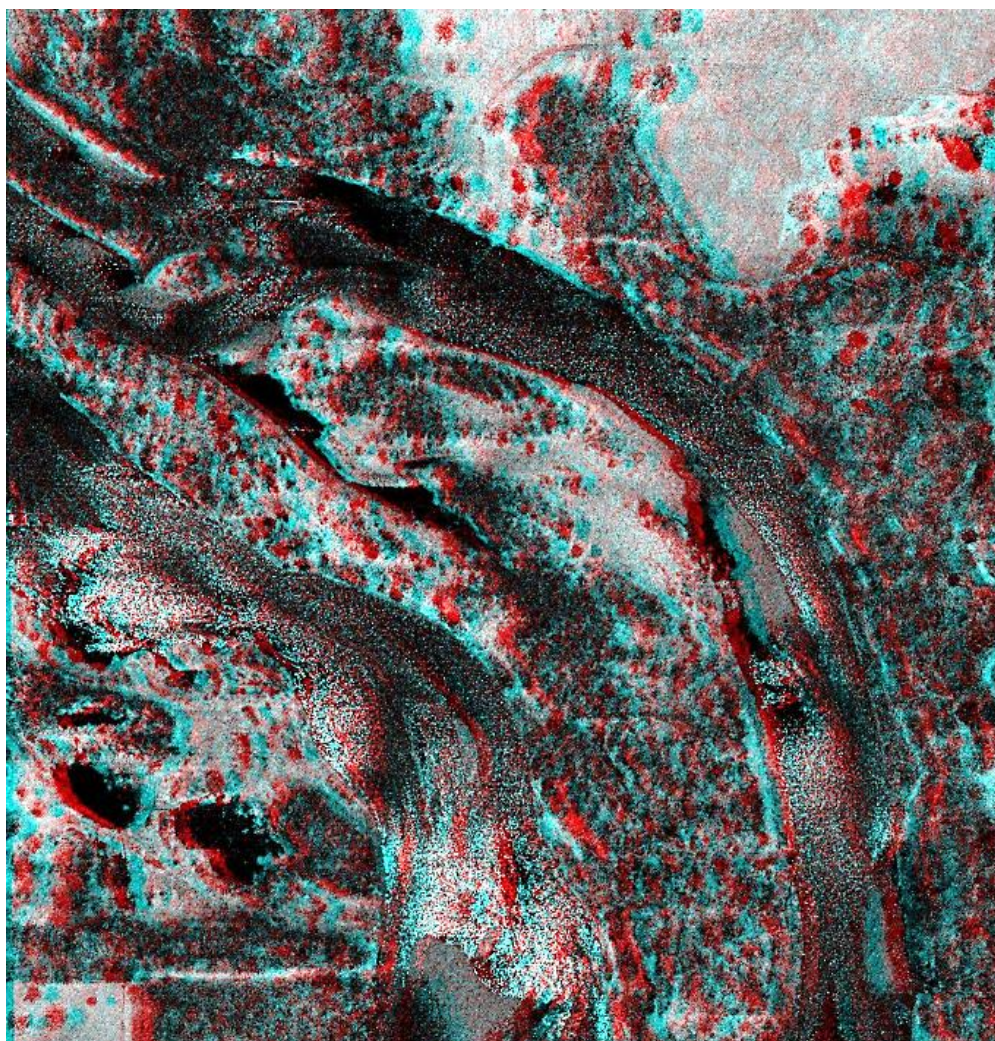
- ✓ ShiftedX: Η μετατοπισμένη τετμημένη κάθε σημείου του νέφους, σε κάθε TOTIN (+ ή - για δημιουργία αριστερού και δεξιού TOTIN)
- ✓ Z: Το υψόμετρο κάθε σημείου του νέφους (αμετάβλητο και στα δύο TOTIN)
- ✓ Z0: Μια βασική υψομετρική τιμή αναφοράς, στην οποία δεν υπάρχει x-παράλλαξη στο παραγόμενο ISP (συνήθως μέση τιμή υψομέτρου).
- ✓ dZ: Παράγοντας που εκφράζει την εισαγόμενη τεχνητή x-παράλλαξη, ως αποτέλεσμα του δοσμένου λόγου B/H

Η ποσότητα παράλλαξης, είναι ανάλογη της διαφοράς της τιμής υψομέτρου κάθε σημείου του αρχικού νέφους, από μια σταθερή τιμή υψομέτρου (μέση τιμή) για όλη την περιοχή. Τελικώς, δημιουργείται ο κάρναβος για την κάθε μια εικόνα του ISP (η τιμή της εδαφοψηφίδας καθορίζεται από το χρήστη) και με παρεμβολή στο αντίστοιχο TOTIN λαμβάνεται η επιθυμητή τιμή ιδιότητας (ένταση, υψόμετρο, κλάση...), η οποία και εκχωρείται ως τιμή για το κάθε εικονοστοιχείο. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να δημιουργηθούν στερεομοντέλα έντασης, υψομέτρου, ταξινόμησης κ.α. ή να συνδυαστούν τιμές ιδιοτήτων για την παραγωγή υβριδικών εικόνων (π.χ. ένταση και ταξινόμηση).

Σε μία διαφορετική προσέγγιση (Teo et al., 2010) της δημιουργίας των εικόνων ενός ISP απευθείας από το νέφος σημείων, οι δύο στέρεο εικόνες παράγονται σε ένα στάδιο, με προσομοίωση της γεωμετρίας λήψης μιας κλασικής αεροφωτογράφισης (εικ. 2-8). Για την προσομοίωση, το μοντέλο χρησιμοποιεί εικονικά στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού (τιμή εστιακής απόστασης f και διάστασης εικόνας d), καθώς και κατάλληλα υπολογιζόμενα στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού, τα οποία μειώνονται από 6 σε 3, αφού οι στροφές θεωρούνται μηδενικές. Οι παραγόμενες εικόνες, δημιουργούνται, σε ένα στάδιο, μέσω μιας διαδικασίας αντίστροφης προβολής του νέφους, με χρήση της συνθήκης συγγραμμικότητας και αποτελούν το ισοδύναμο μιας λήψης φωτογραφιών από γειτονικές θέσεις με συντεταγμένες $(X, Y - B/2, Z + H)$ για την αριστερή λήψη και $(X, Y + B/2, Z + H)$ για τη δεξιά, ενώ υπολογισμός γίνεται με βάση τη θέση (X, Y, Z) του μέσου σημείου του νέφους. Η συνολική x-παράλλαξη, εισάγεται επιμεριζόμενη και στις δύο εικόνες χωρίς να απαιτείται άμεσος προϋπολογισμός της. Τελικώς, οι τιμές των εικονοστοιχείων για την κάθε εικόνα του στερεοζεύγους, προκύπτουν από την επιθυμητή τιμή ιδιότητας (ένταση, υψόμετρο, κλάση) από το αντίστοιχο σημείο του νέφους, ενώ για τα εικονοστοιχεία για τα οποία δεν υπάρχει αντιστοίχιση, ακολουθείται διαδικασία παρεμβολής. Τα αρχικά δεδομένα που απαιτούνται είναι ένα νέφος σημείων και μια αρχική υπόθεση για την τιμή του λόγου B/H.



Εικόνα 2-8: Γεωμετρία παραγωγής ISP απευθείας από δεδομένα LiDAR
(Teo et al., 2010)



Εικόνα 2-9: Στερεομοντέλο (ISP) έντασης (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)
(Smith & Associates Inc.)

2.4 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές τεχνικής Lidargrammetry

Ο πρωταρχικός λόγος για το πρόσφατο ενδιαφέρον γύρω από την ανάπτυξη της τεχνικής Lidargrammetry, είναι η προσπάθεια για βελτίωση της συνολικής

παραγωγικότητας από τη χρήση δεδομένων LiDAR (Fowler et al., 2007). Η νέα τεχνική λειτουργεί ως μια επιπλέον μεθοδολογία για την υποβοήθηση και συντόμευση της διαδικασίας παραγωγής τελικών προϊόντων, αλλά διερευνάται και πρακτικότητα της υιοθέτησης μιας ροής εργασιών αποκλειστικά με βάση δεδομένα LiDAR, για συγκεκριμένου σκοπού εργασίες. Καθώς μελετώνται οι διάφορες πτυχές της εν λόγω τεχνικής, αποκαλύπτονται νέες δυνατότητες και εν δυνάμει πεδία εφαρμογών αυτής, ενώ επί της παρούσης η γενική χρησιμότητά της στοιχειοθετείται σε μεγάλο βαθμό στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Δεν υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες μελέτες, με πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα καθώς το μεγαλύτερο μέρος αυτών έχει πραγματοποιηθεί ιδιωτικά, προκειμένου να αναπτυχθούν εμπορικά λογισμικά και παραγωγικές ροές εργασιών. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι γενικές κατευθύνσεις και οι γενικές εντυπώσεις των κατασκευαστών είναι διαθέσιμες στο ευρύ κοινό.

Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής, είναι η δυνατότητα αναθεώρησης, επεξεργασίας και εκμετάλλευσης των δεδομένων LiDAR, σε μια μορφή που δεν απαιτεί ενσωμάτωση νέων λογισμικών και πρακτικών. Η διαφορά της φύσης των δεδομένων αυτών, από τα παραδοσιακά φωτογραφικά δεδομένα της φωτογραμμετρίας, επιφέρει νέες απαιτήσεις σε τεχνικές ικανότητες και υποδομή, καθώς η πρωταρχική επεξεργασία και εκμετάλλευση τους πραγματοποιείται στον 3d χώρο. Αυτό επιφέρει δυσκολία στην γρήγορη ενσωμάτωση των δεδομένων LiDAR στις υπάρχουσες ροές εργασιών, για την παραγωγή γεωχωρικών δεδομένων και μπορεί να αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα, λόγω της πιθανής καθυστέρησης μιας γραμμής παραγωγής, προκειμένου να ενσωματωθούν πλήρως σε αυτήν. Η τεχνική Lidargrammetry προσφέρει μια διέξοδο στο πρόβλημα αυτό, καθώς με τη δημιουργία raster προϊόντων και την χρήση τους για στερεοπαρατήρηση και συλλογή γεωχωρικών δεδομένων στους ήδη πλήρως παραγωγικούς ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς, το φαινόμενο της πιθανής διαταραχής της γραμμής παραγωγής ελαχιστοποιείται, καθώς δεν απαιτείται νέα υλικοτεχνική υποδομή, αλλά ούτε και επανεκπαίδευση του υφιστάμενου τεχνικού προσωπικού. Συνεπώς, ένα βασικό χαρακτηριστικό της τεχνικής Lidargrammetry, είναι η υποβοήθηση της γρήγορης ενσωμάτωσης των LiDAR δεδομένων στην παραγωγή και η συνεπακόλουθη ευρύτερη διάδοσή τους.

Σε ήδη οργανωμένες διαδικασίες εκμετάλλευσης δεδομένων LiDAR, η ενσωμάτωση της τεχνικής Lidargrammetry προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα αναφορικά με το χρόνο εξαγωγής δεδομένων. Αφού έχουν ολοκληρωθεί οι διαδικασίες παραγωγής του νέφους, η εκμετάλλευσή του απαιτεί την πλήρη ταξινόμηση και φιλτράρισμα αυτού. Οι διαδικασίες αυτές, παρουσιάζουν πολύ υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης, αλλά ακόμα και με χρήση των βέλτιστων μεθοδολογιών και αλγοριθμικών διαδικασιών, απαιτείται σημαντικός βαθμός χειροκίνητης επέμβασης για την διόρθωση των σφαλμάτων. Η παραγωγή των ISP είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία, που με την κατάλληλη οργάνωση μπορεί να προηγείται σημαντικά της ολοκλήρωσης της ταξινόμησης. Συνεπώς, με την χρήση των ISP σε παραδοσιακά περιβάλλοντα στερεοαπόδοσης, πραγματοποιείται πολύ γρήγορη συλλογή διανυσματικών δεδομένων όπως γραμμές αλλαγής κλίσεων και περιγράμματα κατασκευών, τα οποία είναι

υψηλής ακρίβειας και μπορούν να ανατροφοδοτηθούν στην διαδικασία διόρθωσης της ταξινόμησης του νέφους, συμβάλλοντας στην μείωση της απαιτούμενης ανθρώπινης παρέμβασης και στην οικονομικότητα της παραγωγής. Παράλληλα, το στέρεο-περιβάλλον της τεχνικής Lidargrammetry, είναι πολύ φιλικότερο στον ήδη εξοικειωμένο φωτογραμμέτη, από ότι τα 3d ψηφιακά περιβάλλοντα απεικόνισης των νεφών σημείων. Ως αποτέλεσμα, οι διαδικασίες ψηφιοποίησης και η χειροκίνητη διόρθωση της ταξινόμησης μπορεί να γίνει με ιδιαίτερα πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων LiDAR είναι η δυνατότητα συλλογής δεδομένων ανεξάρτητα από τις επικρατούσες συνθήκες φωτισμού, δεδομένου ότι πρόκειται για ενεργητικά συστήματα, τα οποία παράγουν μόνο τους την απαιτούμενη ακτινοβολία για τον «φωτισμό» της χαρτογραφούμενης περιοχής. Αποστολές σαρώσεων μπορούν να πραγματοποιούνται τόσο κατά τη νύχτα, όσο και με πτήσεις κάτω από τις νεφώσεις, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των συλλεγόμενων δεδομένων. Εξάιρεση αποτελεί η ύπαρξη ισχυρών ανέμων, καθώς οι έντονες αναταράξεις μπορούν να αποφέρουν μη αποδεκτά σφάλματα στην διαδικασία γεωκωδικοποίησης του νέφους με βάση τις μετρήσεις του συστήματος θέσης και προσανατολισμού (POS). Η μεγάλη αυτή ευελιξία που παρέχουν τα συστήματα LiDAR, κρίνεται σημαντική για περιοχές με μικρή περίοδο κατάλληλη για αεροφωτογραφίες, και η υιοθέτηση της τεχνικής Lidargrammetry παρέχει μια ικανοποιητική εναλλακτική μεθοδολογία για συλλογή ποιοτικών γεωχωρικών δεδομένων και παρακολούθηση περιοχών ενδιαφέροντος.

Σε άμεση σύνδεση με τις τεχνικές δυνατότητες του συστήματος LiDAR, είναι και η πολυεπίπεδη χαρτογράφηση, λόγω της δυνατότητας των παλμών laser να διαπερνούν τις βλαστικές μάζες. Οι αποκρυπτόμενες λόγω της βλάστησης λεπτομέρειες, αποτελούν τυπικό πρόβλημα μιας φωτογραμμετρικής απόδοσης με οπτικά δεδομένα, για το οποίο δεν υφίσταται λύση. Σε αντίθεση, η δειγματοληψία της μορφολογίας του εδάφους κάτω από τη βλάστηση εξασφαλίζεται, με κατάλληλο προγραμματισμό πτήσης, από τις τελευταίες επιστροφές των παλμών και οι αποκρυπτόμενες πτυχώσεις μπορούν να αποδοθούν μέσω της τεχνικής Lidargrammetry με την κατασκευή ISP μετά το φιλτράρισμα και αφαίρεση της βλάστησης από τα σημεία του νέφους. Το ίδιο ισχύει και για την χαρτογράφηση άλλων αποκρυπτόμενων πληροφοριών σε περιβάλλοντα με έντονη βλάστηση, όπως κατασκευές, οχήματα, ακτογραμμές κ.α.

Πρόσθετα πλεονέκτημα της τεχνικής Lidargrammetry, προκύπτουν από την φύση των χρησιμοποιούμενων ISPs. Η καθαρά υπολογιστική διαδικασία παραγωγής τους, τα καθιστά πιο ευέλικτα από τα παραδοσιακά φωτογραφικά στερεομοντέλα. Η ελεύθερη επιλογή του επιθυμητού λόγου B/H, δίνει τη δυνατότητα της πολύ γρήγορης δημιουργίας συμπληρωματικών, τοπικών μοντέλων για προβληματικές περιοχές, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη 3d αντίληψη (stereo exaggeration), λόγω μεγαλύτερης τιμής λόγου B/H, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη φωτοερμηνεία και χαρτογράφηση μικρών εδαφικών λεπτομερειών. Παράλληλα η έκταση που καλύπτεται από το κάθε στερεομοντέλο μπορεί να είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη

των οπτικών δεδομένων, καθώς αυτή καθορίζεται από τις απαιτήσεις της εργασίας και όχι από τη γεωμετρία της λήψης. Το νέφος σημείων μπορεί να καταταμηθεί με κάθε επιθυμητό τρόπο (tiling) ή και να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο εφόσον οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι το επιτρέπουν. Συνεπώς το παραγόμενο ISP μπορεί να προέρχεται από το κάθε tile ή και από ολόκληρο το νέφος, καλύπτοντας όλη την περιοχή μελέτης σε μια μόνο στέρεο συνεδρία. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ένα ISP που παράγεται από ένα νέφος σημείων 200+ εκατομμυρίων σημείων αντιστοιχεί σε μια οπτική εικόνα διαστάσεων 15.000x15.000 pixels ή 225 Mpixels. Ως αποτέλεσμα, έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικά προγράμματα, όπου μια περιοχή περίπου 1500Km², με ένα νέφος περίπου ενός δισεκατομμυρίου σημείων, καλύφθηκε στερεοσκοπικά με την παραγωγή μόλις 6 ISPs (Flood et al., 2012).

Σε γενικές γραμμές, η στέρεο εκμετάλλευση των LiDAR δεδομένων θεωρείται σχετικά καθιερωμένη στις ΗΠΑ (που αποτελούν και πρωτοπόρα χώρα στην εν λόγω τεχνολογία) και ήδη από το 2007 επίσημοι φορείς όπως το Εθνικό Συμβούλιο Ερευνών (National Research Council – NRC), εξετάζουν την πρόταση να υιοθετηθεί η τεχνική Lidargrammetry ως βασική πρακτική για την διαδικασία χαρτογράφησης πλημμυρών, αντικαθιστώντας την ανάγκη για οπτικές εικόνες και συμβάλλοντας καθοριστικά στην οικονομικότητα του προγράμματος (Committee on Floodplain Mapping Technologies, 2007). Σε κάθε περίπτωση, η τεχνική της Lidargrammetry βρίσκεται σε στάδιο όπου πραγματοποιείται έρευνα για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας των χαρτογραφούμενων οντοτήτων, ενώ αναλυτικά αποτελέσματα και τυποποιημένες ροές εργασιών, ανάλογα με το σκοπό και την επιθυμητή ακρίβεια, αναμένονται να διαμορφωθούν στο άμεσο μέλλον. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται επίσης και στην ανάπτυξη νέων δυνατοτήτων της τεχνικής, ιδιαίτερα με την δημιουργία ISP όχι μόνο από την ένταση των παλμών, αλλά και από υβριδικές εικόνες (§2.1) με τη συγχώνευση άλλων πληροφοριών όπως η ταξινόμηση του νέφους, το υψόμετρο κ.α. Αρκετή διερεύνηση αναμένεται να πραγματοποιηθεί και γύρω από τις δυνατότητες της τεχνικής, σε συνδυασμό με πολυφασματικά δεδομένα, λόγω της σύγχρονης δυνατότητας των συστημάτων LiDAR να προσθέτουν και συντεταγμένες χρώματος (RGB) ως επιπλέον ιδιότητα σε κάθε σημείο, αλλά και λόγω της ανάπτυξης πολυφασματικών σαρωτών.

Επί της παρούσης, η βέλτιστη απόδοση, αναφορικά με την ποιότητα και την ποικιλία των παραγόμενων γεωχωρικών δεδομένων, μπορεί να επιτευχθεί με τον συνδυασμό παραδοσιακών φωτογραμμετρικών τεχνικών και δεδομένων με τα αντίστοιχα των συστημάτων LiDAR. Ιδιαίτερα με την προοδευτικά μεγαλύτερη διαθεσιμότητα δεδομένων LiDAR, την μείωση του κόστους απόκτησης των συστημάτων, καθώς και με την αύξηση των δυνατοτήτων τους, ο παραπάνω συνδυασμός αποτελεί την οικονομικότερη προσέγγιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Προσεγγίσεις στην αυτοματοποιημένη ανίχνευση κτιρίων με δεδομένα LiDAR

3.1 Γενικό πλαίσιο

Η υιοθέτηση μιας μεθοδολογίας για την αυτοματοποιημένη ανίχνευση κτιρίων, εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων, που περιλαμβάνουν τα διαθέσιμα αρχικά δεδομένα, τη φύση της εργασίας την οποία καλείται να εξυπηρετήσει, την επιθυμητή χωρική ακρίβεια και συνθετότητα των προϊόντων κ.α. Ο ταυτόχρονος συνδυασμός του μεγαλύτερου δυνατού βαθμού αυτοματοποίησης, με τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε ακρίβεια είναι μια διαρκής απαίτηση και τις περισσότερες φορές ο συνδυασμός διαφορετικών αρχικών δεδομένων καθώς και μεθοδολογιών αποτελούν την πλέον πρόσφορη λύση. Οι προσεγγίσεις ανίχνευσης σε δεδομένα LiDAR έχουν αναπτυχθεί αρκετά, στηριζόμενες στην ήδη υπάρχουσα και εκτενή έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί για την αντίστοιχη εκμετάλλευση των οπτικών εικόνων. Πολλές τεχνικές και αλγόριθμοι βρίσκουν άμεση εφαρμογή, αφού προηγηθεί η ενσωμάτωση κατάλληλων τροποποιήσεων λόγω της διαφορετικής φύσης των δεδομένων LiDAR. Παράλληλα, νέες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τα δεδομένα αυτά, οι οποίες εκμεταλλεύονται τις ιδιαίτερες δυνατότητες και χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η απευθείας δημιουργία τρισδιάστατων παραγώγων, οι πολλαπλές επιστροφές των παλμών κ.α.

Κατά την εκμετάλλευση δεδομένων LiDAR για την ανίχνευση και ανακατασκευή κτιρίων, το βασικό ζητούμενο είναι να διαχωριστούν τα σημεία εκείνα του νέφους, τα οποία αντιπροσωπεύουν μετρήσεις σε κτίρια. Σε μια αποστολή σάρωσης, καταγράφεται, χωρίς διάκριση, το σύνολο των οντοτήτων στην περιοχή, με αποτέλεσμα το νέφος σημείων να περιέχει σημεία σε κτίρια, στο έδαφος, σε δέντρα, σε υδάτινες επιφάνειες, άλλες κατασκευές, εναέρια καλώδια, οχήματα κ.α. Ο διαχωρισμός των σημείων των κτιρίων αποτελεί πρόβλημα ταξινόμησης του νέφους και μπορεί να πραγματοποιηθεί ευκολότερα με σταδιακή αφαίρεση πληροφορίας. Έτσι, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική, περιλαμβάνει τον εντοπισμό και αφαίρεση των επίγειων σημείων πρωτίστως. Από τα εναπομείναντα σημεία, ταξινομείται πρώτα η βλάστηση ή τα κτίρια, αναλόγως της ακολουθούμενης προσέγγισης και των διαθέσιμων δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, η τελικώς ταξινομούμενες οντότητες είναι πιο εύκολο να εντοπιστούν, καθώς το νέφος έχει αραιώσει σημαντικά με τη σταδιακή αφαίρεση των άλλων κατηγοριών. Ο διαχωρισμός και αφαίρεση των επίγειων σημείων μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλές μεθόδους (§1.4), οι οποίες είναι καλά τεκμηριωμένες και αποτελεσματικές.

Η ταξινόμηση του νέφους μπορεί να εκτελεστεί και σε ένα μόνο στάδιο, όπου ο διαχωρισμός των οντοτήτων γίνεται ταυτόχρονα, ενώ οι διαφορετικές τεχνικές για τον

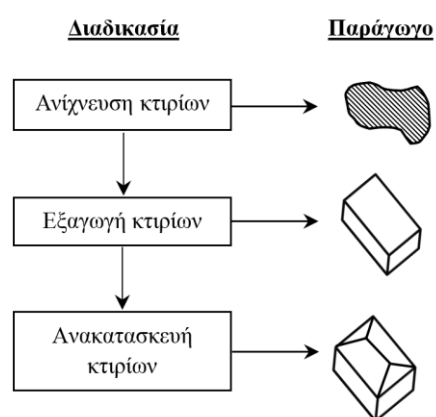
εντοπισμό του εδάφους, κτιρίων, βλάστησης κτλ. αποτελούν υπορουτίνες του ίδιου αλγορίθμου. Γενικά χρησιμοποιούνται τεχνικές κατάτμησης τόσο σε 2d κανονικοποιημένες (raster) αναπαραστάσεις του νέφους (Maas, 1999), όσο και σε n-d μορφές στον διανυσματικό χώρο (Filin and Pfeifer, 2006).

Ο επιθυμητός τύπος ψηφιακής αναπαράστασης των κτιρίων, καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την συνθετότητα των διαδικασιών που πρέπει να ακολουθηθούν, οι οποίες σε γενικές γραμμές μπορούν να διαχωριστούν σε τρία βασικά διαδοχικά επίπεδα επεξεργασίας (Sohn et al., 2007) :

✓ **Ανίχνευση των κτιρίων:** προσδιορίζεται η ύπαρξη κτιρίων και προσδιορίζονται χονδρικά οι περιοχές στις οποίες υφίστανται εντός της εικόνας.

✓ **Εξαγωγή των κτιρίων:** προσδιορίζονται τα όρια των κτιρίων, είτε στον 2d, είτε στον 3d χώρο.

✓ **Ανακατασκευή των κτιρίων:** αναγνωρίζονται και ανακατασκευάζονται οι πολύπλοκες επιφάνειες των στεγών των κτιρίων και δημιουργείται ένα πλήρες 3d μοντέλο.



Εικόνα 3-1: Ιεραρχική ροή διαδικασίας ανακατασκευής κτιρίων (Sohn et al., 2007)

Καθένα από τα παραπάνω στάδια δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται με διακριτά αντίστοιχα αλγοριθμικά βήματα, καθώς πολλοί αλγόριθμοι επιτελούν περισσότερα από ένα από αυτά σε ένα επεξεργαστικό βήμα. Έτσι, το στάδιο της εξαγωγής των κτιρίων μπορεί να ενσωματώνει και διαδικασίες ανίχνευσης αυτών, όπως επίσης και το στάδιο της ανακατασκευής μπορεί να περιλαμβάνει και διαδικασίες εξαγωγής ορίων. Γενικά, η χρήση της παραπάνω ιεραρχίας, εξασφαλίζει μια προσέγγιση από το γενικό προς το ειδικό, καθώς το πλέον απαιτητικό και δύσκολα υπολογιστικό στάδιο είναι αυτό της ανακατασκευής. Έχοντας ολοκληρωθεί η ανίχνευση και η εξαγωγή, εξασφαλίζεται ότι υπάρχει κατάλληλη αρχική πληροφορία

για το στάδιο της ανακατασκευής, ενώ η περιττή πληροφορία εξαιρείται από τους υπολογισμούς, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων.

Η μορφή των δεδομένων LiDAR, όπως αυτή παρέχεται μέσα από τα μορφότυπα μεταφοράς (.las, .XYZ, κ.α.), αφορά μια ακανόνιστη κατανομή σημείων στο χώρο. Μεγάλο μέρος των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση του νέφους, προϋποθέτουν την οργάνωση αυτού σε κάποια αξιοποιήσιμη δομή. Συνήθως χρησιμοποιούνται 2d raster παράγωγα, όπως εικόνες έντασης και εικόνες αποστάσεων, οι οποίες προκύπτουν με διαδικασίες παρεμβολής. Οι εικόνες έντασης συνήθως περιέχουν αρκετό θόρυβο, γεγονός που δυσχεραίνει σημαντικά την ανίχνευση ορίων και την εκτέλεση τεχνικών κατάτμησης. Η πληροφορία έντασης, από την άλλη, προσδίδει υφή στις απεικονιζόμενες οντότητες και μπορεί να αποτελέσει μια χρήσιμη επιπλέον πληροφορία για την ανάπτυξη κανόνων ταξινόμησης. Η χρήση 2,5-d αναπαραστάσεων της περιοχής, με την δημιουργία raster DSM, DTM και nDSM είναι συνήθως η πιο διαδεδομένη πρακτική, καθώς από αυτά μπορεί να γίνει άμεσα αξιοποιήσιμη η υψομετρική πληροφορία που περιέχεται στο νέφος σημείων. Οι υψομετρικές τιμές, ως τιμές των εικονοστοιχείων μιας εικόνας, δίνουν την δυνατότητα υπολογισμού μιας σειράς παραμέτρων, όπως η κλίση και η επιπεδότητα, από τις τιμές των οποίων μορφώνονται πολύ χρήσιμοι κανόνες για την εκτέλεση κατατμήσεων. Η χρήση raster παραγώγων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, που αφορούν στην άμεση και ευκολότερη εφαρμογή των ήδη καθιερωμένων αλγορίθμων ανάλυσης εικόνας, αλλά δημιουργούν αναπόφευκτη απώλεια πληροφορίας λόγω των διαδικασιών παρεμβολής από τις οποίες δημιουργούνται. Σε μια διαφορετική προσέγγιση, πιο εξεζητημένες τεχνικές κατάτμησης μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στον 3d χώρο, όπου το νέφος σημείων, καθώς και οι σχέσεις μεταξύ των σημείων, αναπαρίστανται με πολυπλοκότερες μορφές, όπως γράφοι, πλέγματα (meshes) και 3d κανονικοί κানাβοι.

Ως προς τις ακολουθούμενες τεχνικές ταξινόμησης οντοτήτων, υφίσταται η θεμελιώδης διαφορά (προερχόμενη από το πεδίο των computer graphics) μεταξύ αυτών που εξετάζουν το χώρο της εικόνας (image-space) και αυτών που εξετάζουν τον χώρο των αντικειμένων (object-space). Οι πρώτες, κατανέμουν τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας στις διάφορες κατηγορίες και οι προς ανίχνευση οντότητες προκύπτουν από τις συναθροίσεις των εικονοστοιχείων στην αντίστοιχη κατηγορία. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι η επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση και η σημαντική αδυναμία τους στην εφαρμογή για ανίχνευση κτιρίων προέρχεται από τη συνθετότητα του αστικού περιβάλλοντος, ιδιαίτερα σε εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης, καθώς και στα σημαντικά σφάλματα της ταξινόμησης (παράλειψη, συμπερίληψη). Οι δεύτερες χαρακτηρίζόμενες και ως αντικειμενοστραφείς, ομαδοποιούν τα εικονοστοιχεία σε μικρά ομοειδή αντικείμενα με ακανόνιστο σχήμα και συνήθως χωρίς φυσική έννοια, τα οποία όμως αποτελούν τις δομικές μονάδες που συναθροίζόμενες, προσεγγίζουν τις φυσικές οντότητες όπως τα κτίρια. Τέτοιες

τεχνικές, είναι οι τεχνικές κατάτμησης, οι οποίες εφαρμόζονται ευρέως όταν τα πρωτογενή δεδομένα είναι δεδομένα LiDAR.

3.2 Ανίχνευση και εξαγωγή κτιρίων

Το στάδιο της ανίχνευσης και της εξαγωγής των κτιρίων από δεδομένα LiDAR, τυπικά αφορά στον προσδιορισμό εκείνων των υποτμημάτων του νέφους, τα οποία περιλαμβάνουν αποκλειστικά και μόνο τα σημεία που ανήκουν στα κτίρια. Αν η ανάλυση πραγματοποιείται σε raster αναπαραστάσεις του νέφους, τότε δεν προσδιορίζονται σημεία, αλλά τα εικονοστοιχεία εκείνα που ανήκουν στα κτίρια. Από τα υποτμήματα αυτά, μπορούν να δημιουργηθούν τα ίχνη των κτιρίων και οι βασικές δομικές τους επιφάνειες, καθώς και να υπολογιστούν χρήσιμα μεγέθη για την μετέπειτα ανακατασκευή τους. Οι συνήθεις αλγόριθμοι κατάτμησης που χρησιμοποιούνται θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο, ενώ η παρούσα εστιάζει κυρίως στις μεθοδολογίες και στις χρησιμοποιούμενες ιδιότητες, στην βάση των οποίων μια κατάτμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Οι περισσότερες μεθοδολογίες πραγματοποιούνται μετά τον διαχωρισμό των επίγειων σημείων από τα υπέργεια και συνεπώς η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν είναι ο διαχωρισμός της βλάστησης από τα κτίρια, καθώς αυτές οι δύο αποτελούν τις κύριες εναπομείνουσες κατηγορίες σε ένα αστικό ή ημιαστικό περιβάλλον. Σημαντικό πλεονέκτημα των δεδομένων LiDAR είναι η αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου, μέσω μιας πυκνής δειγματοληψίας σημείων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύνολο ιδιοτήτων. Έτσι, για κάθε σημείο, καταγράφεται η οριζοντιογραφική και υψομετρική του θέση, η ένταση του επιστρεφόμενου παλμού, που έχει άμεση σχέση με την ανακλαστικότητα του αντικειμένου που την προκαλεί, ο χρόνος καταγραφής, η γωνία εκτροπής του παλμού, ο αριθμός επιστροφής κ.α. Κάθε μια από τις ιδιότητες αυτές, μπορεί εν δυνάμει να αποτελέσει βάση για την δημιουργία κριτηρίων, από τα οποία μπορεί να επιτευχθεί ο διαχωρισμός των κτιρίων από τη βλάστηση και τις λοιπές κατηγορίες. Πιο συχνά, γίνεται η εκμετάλλευση της υψομετρικής πληροφορίας, καθώς και των παράγωγων μεγεθών από αυτή, όπως η κλίση.

Μια βασική διαφορά μεταξύ των κτιρίων και της βλάστησης, είναι ότι τα πρώτα δημιουργούν επίπεδες επιφάνειες με μεγάλο βαθμό κανονικότητας, ενώ η δεύτερη δημιουργεί πιο ακανόνιστες επιφάνειες με μεγαλύτερη διακύμανση μεταβολών. Ως αποτέλεσμα ο διαχωρισμός των κτιρίων μπορεί να πραγματοποιηθεί στην βάση της ανάλυσης της πρώτης παραγώγου των υψομετρικών διαφορών μεταξύ γειτονικών σημείων (ή εικονοστοιχείων), η οποία εκφράζει την κλίση (Morgan and Tempfli, 2000). Γειτονικά σημεία με μηδενική τιμή κλίσης ανήκουν στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, ενώ γειτονικά σημεία με σταθερή τιμή κλίσης στο ίδιο κεκλιμένο επίπεδο. Παράλληλα, η δεύτερη παράγωγος των υψομετρικών διαφορών, η οποία εκφράζει την καμπυλότητα, διασφαλίζει την επιπεδότητα των κεκλιμένων επιφανειών όταν διατηρεί

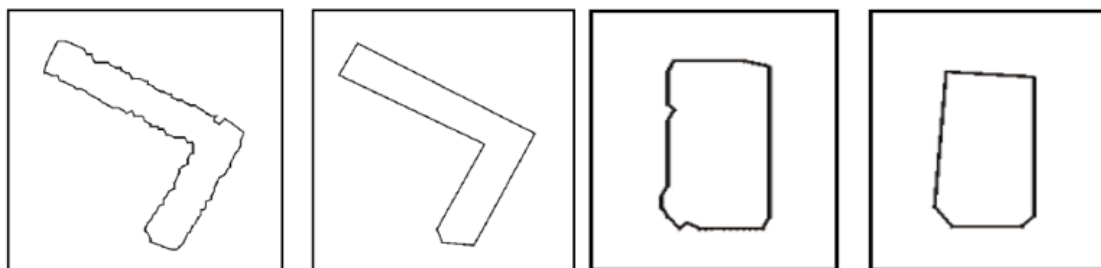
μηδενική τιμή. Τα οριζόντια και κεκλιμένα αυτά επίπεδα πιθανότατα αποτελούν, τμήματα των οροφών και σκεπών κτιρίων σε αντίθεση με τις αντίστοιχες επιφάνειες της βλάστησης, οι οποίες δεν πληρούν τέτοια κριτήρια, καθώς παρουσιάζουν ακανόνιστες μεταβολές κλίσης και καμπυλότητας. Προβλήματα στην εν λόγω μεθοδολογία παρουσιάζονται λόγω των υφιστάμενων, επί των στεγών των κτιρίων, αντικειμένων (καμινάδες, κεραίες κ.α.), στα όρια των κτιρίων λόγω των μη κανονικών υψομετρικών μεταβολών που παρουσιάζονται, καθώς και λόγω των εσφαλμένων μετρήσεων του συστήματος.

Σε μια διαφορετική προσέγγιση, διάφορα επίπεδα στο χώρο μπορούν να προσδιοριστούν με βάση κάποιο σημείο, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ελαχιστοτετραγωνικές μέθοδοι, προκειμένου να εξεταστεί ποια από τα γειτονικά υφιστάμενα σημεία ανήκουν στο επίπεδο αυτό, εντός μιας μικρής γειτονιάς (Filin, 2002; Zhang et al., 2006; Michel and Habib, 2002). Αν το επίπεδο προσδιορίζει μια οροφή, τότε τα γειτονικά σημεία πρέπει να ανήκουν σε αυτό (να επαληθεύουν την εξίσωσή του) ή να παρουσιάζουν πολύ μικρές υψομετρικές αποκλίσεις από αυτό. Συνεπώς, με τη χρήση κατάλληλου κατωφλίου επιτρεπτής υψομετρικής διαφοράς, μπορούν να ομαδοποιηθούν τα σημεία που ανήκουν σε κάθε επίπεδο στην εικόνα, με αποτέλεσμα να προσδιορίζονται τα επίπεδα εκείνα που αποτελούν τα δομικά στοιχεία των κτιρίων. Στα αντίστοιχα επίπεδα που προσδιορίζονται από τη βλάστηση, οι αποκλίσεις των σημείων είναι μεγαλύτερες και συνεπώς τα επίπεδα θα είναι πολύ μικρά (μόνο λίγα σημεία σε τοπικό επίπεδο). Τα μικρά αυτά αντικείμενα μπορούν εύκολα να αποκλειστούν στη συνέχεια. Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις των υψομέτρων των σημείων από αντικείμενα που βρίσκονται πάνω στις οροφές (κεραίες, καμινάδες κ.α.), αλλά παρουσιάζει αδυναμία στον προσδιορισμό των ορίων των κτιρίων.

Οι πολλαπλές επιστροφές των παλμών, παρέχουν ένα άλλο χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση κτιρίων (Alharthy and Bethel, 2002; Meng et al., 2009). Οι παλμοί laser διαπερνούν τα φυλλώματα και τμήματα τους (επαρκούς ενέργειας) οπισθοσκεδάζονται από χαμηλότερα των δέντρων και από το έδαφος. Με τον τρόπο αυτό, ένας παλμός που προσπίπτει σε τέτοια διαπερατή επιφάνεια όπως αυτή της βλάστησης, δημιουργεί περισσότερα από ένα σημεία στο νέφος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικά υψόμετρα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για το διαχωρισμό της βλάστησης και την ανίχνευση των κτιρίων, αφού τα σημεία που αποτελούν πολλαπλές επιστροφές, κατά κύριο λόγο προέρχονται από τμήματα βλάστησης. Εξετάζοντας την υψομετρική διαφορά μεταξύ πρώτων και τελευταίων επιστροφών, αναμένονται μεγάλες τιμές όταν τα σημεία αφορούν βλάστηση και πολύ μικρές έως μηδενικές τιμές όταν τα σημεία αφορούν κτίρια και άλλες αδιαπέρατες επίπεδες επιφάνειες. Η μέθοδος αυτή είναι συνήθως επαρκής για τον αραιό τύπο της αστικής βλάστησης, αλλά δεν αποδίδει σε περιοχές με πολύ πυκνή και αδιαπέρατη βλάστηση. Παράλληλα, σε πολύ πυκνά νέφη σημείων, η μέθοδος αυτή αφαιρεί και σημεία τα οποία είναι στα όρια των κτιρίων, δεδομένου ότι και εκεί παρατηρείται αντίστοιχο φαινόμενο πολλαπλών επιστροφών, με τμήματα του παλμού να οπισθοσκεδάζονται τόσο από το όριο του κτιρίου, όσο και

από το έδαφος ή χαμηλότερα αντικείμενα, εφαπτόμενα κατά την έννοια της κάτοψης, σε αυτό. Επιπλέον, ένα άλλο σημείο αδυναμίας είναι ότι οι μικρές υψομετρικές διαφορές ($< 3\text{m}$) μεταξύ πρώτων και τελευταίων επιστροφών (συνέπεια της πολύ χαμηλής βλάστησης) δεν είναι πολύ αξιόπιστες, γεγονός που σχετίζεται με την κατακόρυφη διαχωριστικότητα των παλμών laser, λόγω του μήκους κύματός τους (τυπικά 10nsec).

Σε κάθε περίπτωση, οι παραπάνω πρακτικές μπορούν να συνδυαστούν και να τροποποιηθούν κατάλληλα βάσει άλλων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το νέφος σημείων, προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Τα εξαγόμενα ίχνη των κτιρίων, συχνά αποτελούνται από θορυβώδεις, μη κανονικές γραμμές, γεγονός που σχετίζεται με τη μη κανονική κατανομή των σημείων στο νέφος, την πυκνότητα αυτών, τις διαδικασίες παρεμβολής και την απώλεια πληροφορίας για τη δημιουργία raster υποβάθρων ανίχνευσης κ.α. Η μη κανονικότητα αυτή των ιχνών διορθώνεται με την χρήση τεχνικών απλοποίησης γραμμών, που εφαρμόζονται ταυτόχρονα με την ψηφιοποίηση τους από τα raster υπόβαθρα ή απευθείας στην περίπτωση που τα εξαγόμενα ίχνη έχουν προσδιοριστεί σε διανυσματική μορφή. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών αποτελούν ο αλγόριθμος Douglas - Peucker, ο επαναληπτικός αλγόριθμος προσαρμογής τελικού σημείου, η μέθοδος minmax κ.α. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην διατήρηση των βασικών χαρακτηριστικών ενός ίχνους, όπως η ορθογωνικότητα και η παραλληλία των γραμμών, ώστε να αποφεύγεται η απώλεια σημαντικής πληροφορίας ως προς το χαρακτηριστικό σχήμα του κτιρίου. Μια εκτενής αναφορά στις υπάρχουσες προσεγγίσεις, καθώς και εκτιμήσεις των σφαλμάτων περιέχεται στην εργασία των (Chen et al., 2004).



Εικόνα 3-2: Αρχικός ανιχνευμένος και τελικός απλοποιημένος ίχνη κτιρίων με τη χρήση του αλγόριθμου Douglas-Peucker (Vögtle, 2000)

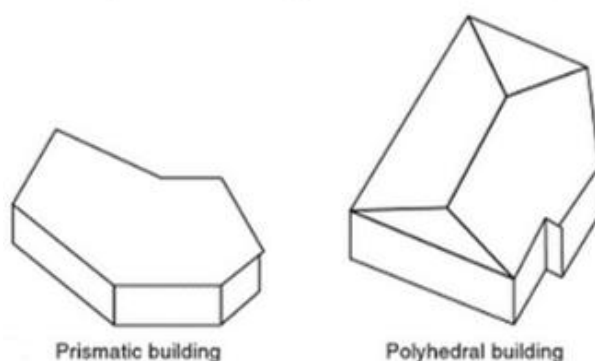
3.3 Ανακατασκευή κτιρίων

Η εξαγωγή των ιχνών των κτιρίων, αλλά και των ορίων των επιμέρους δομικών τους στοιχείων, είναι η βασική προϋπόθεση για την επιτυχή ανακατασκευή αυτών. Στοιχεία όπως η κανονικότητα των γραμμών και η ομοιομορφία των εξαγόμενων τμημάτων, έχουν άμεση σχέση με τη δυνατότητα της αποκατάστασης των σχέσεων μεταξύ τους, γεγονός που επηρεάζει την ακρίβεια με την οποία μπορεί να αναπαρασταθεί ένα κτίριο. Η διαδικασία και οι μέθοδοι για την μοντελοποίηση των κτιρίων απασχολούν

ένα άλλο μεγάλο τμήμα της έρευνας γύρω από τα συστήματα GIS, καθώς παρουσιάζουν άμεση σύνδεση με τις απεικονιστικές και αναλυτικές δυνατότητες των υπολογιστικών συστημάτων αυτών. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην διαδικασία εξαγωγής

2d οριζοντιογραφικών ιχνών κτιρίων και συνεπώς η αναφορά στις μεθοδολογίες και τις προσεγγίσεις γύρω από το αντικείμενο της ανακατασκευής αυτών, γίνεται καθαρά για λόγους πληρότητας.

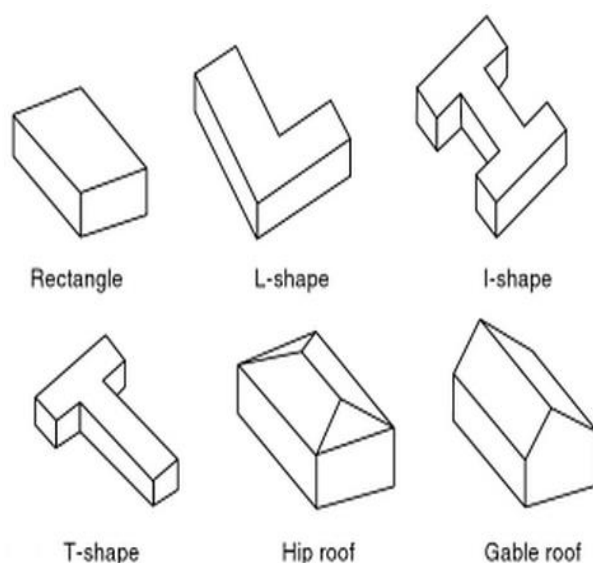
Τα μοντελοποιούμενα κτίρια, μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό συνθετότητας, ανάλογα με την ακολουθούμενη προσέγγιση, το σκοπό της εργασίας, τα διαθέσιμα δεδομένα και τους υφιστάμενους υπολογιστικούς πόρους. Η πλέον γρήγορη και απλούστερη προσέγγιση στην ανακατασκευή κτιρίων, είναι η χρήση του 2d ίχνους αυτών, σε συνδυασμό με μια μέση τιμή υψομέτρου (πρισματικά μοντέλα). Η απαραίτητη υψομετρική τιμή μπορεί να προκύψει με απλή διαδικασία, ως ο μέσος όρος των υψομετρικών τιμών όλων των σημείων του νέφους τα οποία εμπίπτουν εντός του ορίου του ίχνους. Τα απλά αυτά μοντέλα είναι γρήγορα στην κατασκευή, εύκολα στην απεικόνιση (rendering) από τα υπολογιστικά συστήματα και γενικώς αποδίδουν μια απλοποιημένη, αλλά ιδιαίτερα ευέλικτη και χρήσιμη προσέγγιση της περιοχής μελέτης. Βασική αδυναμία των απλών μοντέλων είναι το γεγονός ότι παρουσιάζουν μια πολύ γενική προσέγγιση των κτιρίων, χωρίς να περιλαμβάνουν την στέγη, γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για κάποιες εφαρμογές όπου η λεπτομερής απεικόνιση είναι ουσιώδης. Πληρέστερα μοντέλα (πολυεδρικά μοντέλα), μπορούν να προκύψουν αν ακολουθηθεί μια ξεχωριστή προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της στέγης, γεγονός που αποτελεί μια αρκετά σύνθετη διεργασία. Σε γενικές γραμμές, οι στέγες των κτιρίων μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούνται από τη σύνθεση απλών αρχέτυπων, όπως οριζόντια και κεκλιμένα επίπεδα. Για την προσαρμογή αυτών των αρχέτυπων, πρέπει να έχει προηγηθεί ανίχνευση των ορίων μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων που αποτελούν ένα σύνθετο κτίριο, σε αντίθεση με τα απλά μοντέλα που αρκούνται μόνο στο γενικό, περιμετρικό 2d ίχνος. Τα σύνθετα μοντέλα κτιρίων είναι πληρέστερα ως προς την αναπαράσταση των πραγματικών κτιρίων, αλλά επιφέρουν μεγάλο υπολογιστικό κόστος για τη δημιουργία τους, ενώ η απεικόνισή τους από πολλά συστήματα GIS είναι δυσκολότερη.



Εικόνα 3-3: Τύποι μοντέλων κτιρίων
(Sohn et al., 2007)

Σύμφωνα με τους (Schwalbe et al., 2005), οι προσεγγίσεις για την μοντελοποίηση των κτιρίων, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε κατάλληλα συστήματα CAD και GIS για οπτικοποίηση και ανάλυση, μπορούν χονδρικά να κατηγοριοποιηθούν στις βασιζόμενες σε μοντέλα (model-based ή model-driven) και στις βασιζόμενες στα δεδομένα (data-based ή data-driven) και μια συγκριτική θεώρησή τους παρουσιάστηκε από τους (Tarsha-Kurdi et al., 2007).

Οι model-based προσεγγίσεις, αφορούν την υπόθεση ότι τα κτίρια μπορούν να αναπαρασταθούν από παραμετρικά, αρχέτυπα μοντέλα, τα οποία βρίσκονται προαποθηκευμένα σε κάποια βάση δεδομένων. Αποτελεί μια top-down προσέγγιση, αφού το μοντέλο που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα, αρχικώς επιλέγεται και στη συνέχεια εφαρμόζεται, στην βάση μιας σειράς παραμέτρων μεταβολής αυτού, οι οποίες υπολογίζονται από την ανίχνευση των κτιρίων στο νέφος. Τέτοιες παράμετροι είναι το ίχνος του κτιρίου, το εμβαδό, το μήκος της περιμέτρου του, ο προσανατολισμός των ορίων του κ.α. Μπορούν να κατασκευαστούν απλά μοντέλα κτιρίων, αλλά και πιο σύνθετα, τα οποία προέρχονται από σύνθεση διαφορετικών αρχετύπων, προκειμένου να προκύψει το τελικό σχήμα του κτιρίου.

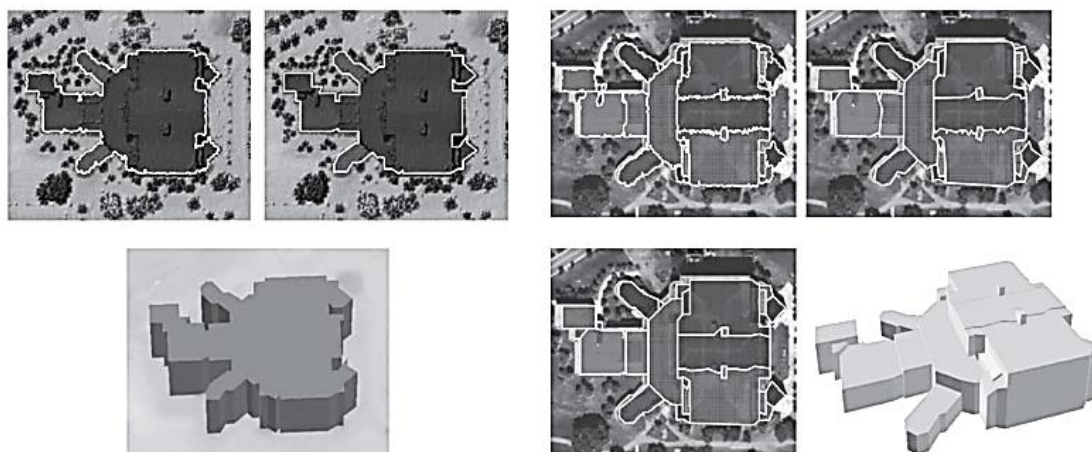


Εικόνα 3-4: Μοντέλα κτιρίων
(Sohn et al., 2007)

Βασικό μειονέκτημα των model-based μεθόδων, είναι η μεγάλου βαθμού εξάρτησή τους από το βαθμό ανάπτυξης των διαθέσιμων βιβλιοθηκών και βάσεων δεδομένων αρχετύπων μοντέλων. Τα σχήματα των πραγματικών κτιρίων είναι συνήθως αρκετά σύνθετα, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα εφικτή η πλήρης εφαρμογή των προκαθορισμένων μοντέλων. Παράλληλα, η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου με βάση τις υπολογισμένες παραμέτρους δεν είναι πάντα μονοσήμαντη, καθώς περισσότεροι από ένας συνδυασμοί μοντέλων μπορούν να πληρούν τις προϋποθέσεις, καθιστώντας συνθετότερη την διαδικασία επιλογής. Τα μοντελοποιημένα κτίρια με βάση τις model-based μεθόδους, παρουσιάζουν ποιο συμπαγή μορφή και στερούνται

παραμορφώσεων, αφού ανεξάρτητα της ποιότητας των ανιχνευμένων ιχνών, τα προκαθορισμένα μοντέλα, αποτελούν συμπαγή δομικά μπλόκ που αποδίδουν συγκεκριμένο, ομογενές σχήμα.

Σε αντίθεση με τις model-based μεθόδους, οι data-based προσεγγίσεις αφορούν την ανίχνευση ομογενών υποαντικειμένων απευθείας από τα δεδομένα LiDAR, με την εφαρμογή διάφορων τεχνικών κατάτμησης. Αποτελούν μια bottom-up προσέγγιση, καθώς η ανακατασκευή των κτιρίων πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου χωρίς προηγούμενη γνώση ή υπόθεση (όπως στην περίπτωση των μοντέλων) για αυτά. Όλα τα δομικά στοιχεία για την δημιουργία ενός κτιρίου, όπως επίπεδα και ακμές, αρχικώς ανιχνεύονται και στη συνέχεια συνδέονται με την δόμηση τοπολογίας, που περιγράφει τον τρόπο επαφής τους. Τα παραγόμενα απλά ή σύνθετα μοντέλα, δεν ανήκουν σε καμία προκαθορισμένη βιβλιοθήκη και αποτελούν εξειδικευμένες προσεγγίσεις των συγκεκριμένων κτιρίων που αντιπροσωπεύουν. Η επιτυχημένη μοντελοποίηση εξαρτάται στο μεγαλύτερο βαθμό από την επιτυχία των αλγορίθμων ανίχνευσης, που ενσωματώνονται σε κάθε τεχνική. Η πληρότητα της ανίχνευσης δεν είναι πάντα απλή υπόθεση, δεδομένου ότι το αστικό περιβάλλον παρουσιάζει μεγάλο βαθμό ποικιλομορφίας, καθώς και μεγάλο όγκο πληροφορίας, που δυσχεραίνει την ορθή προσέγγιση των ορίων. Παράλληλα, τα δεδομένα LiDAR είναι ένα σύνολο ακανόνιστων σημείων από τα οποία είναι δύσκολο να προσεγγιστούν ακμές, ενώ η μετάπτωσή τους σε raster μορφή για εφαρμογή τεχνικών κατάτμησης εικόνας, οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό, οι data-based μέθοδοι μειονεκτούν στο γεγονός ότι δημιουργούν μοντέλα με γεωμετρικές παραμορφώσεις, λόγω των αδυναμιών των ανιχνευμένων ορίων, ενώ απαιτούν πολύ υψηλότερο υπολογιστικό κόστος από τις model-based προσεγγίσεις. Σε κάθε περίπτωση, αν το νέφος σημείων είναι υψηλής πυκνότητας και ομοιογενούς κατανομής και αν ακολουθηθούν τεχνικές διόρθωσης των ανιχνευόμενων ιχνών, τότε οι παραμορφώσεις είναι αμελητέες και τα παραγόμενα μοντέλα υψηλής πιστότητας. Οι data-based προσεγγίσεις, άλλωστε, αποτελούν την μόνη λύση για την ψηφιακή ανακατασκευή εξεζητημένων κτιρίων, τα οποία δεν ανταποκρίνονται σε προκαθορισμένες μορφές.



Εικόνα 3-5: Κατασκευή απλού 3d μοντέλου κτιρίου από το ίχνος και το μέσο ύψος του με συνδυασμό αρχέτυπων μοντέλων (αριστερά)
Κατασκευή σύνθετου 3d μοντέλου κτιρίου από τα ίχνη όλων των υποτημημάτων αυτού (δεξιά)
(Zhang et al., 2006)

3.4 Αλγόριθμοι κατάτμησης για την ανίχνευση κτιρίων

Η ανάπτυξη και αξιολόγηση τεχνικών κατάτμησης είναι, επί του παρόντος, ένας από τους σημαντικότερους τομείς ενδιαφέροντος σχετικά με την εκμετάλλευση δεδομένων LiDAR. Πολλές έρευνες, αλλά και πρακτικές εφαρμογές, παρουσιάζονται διαρκώς, με στόχο την βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των υπόψη τεχνικών. Η επιτυχία ενός αλγόριθμου κατάτμησης, σχετίζεται άμεσα με το βαθμό αυτοματοποίησης που μπορεί να ενσωματωθεί στην ανάπτυξη μεθόδων ταξινόμησης νεφών σημείων, αλλά και όσον αφορά το βαθμό ποιότητας των εξαγόμενων χωρικών δεδομένων. Κάποιοι αλγόριθμοι μπορούν να αποδίδουν πληρέστερα τα επίπεδα από τα οποία αποτελείται ένα κτίριο, αποδίδοντας πιο σύνθετα μοντέλα, ενώ κάποιοι άλλοι πλεονεκτούν όσον αφορά τον ακριβέστερο προσδιορισμό των ιχνών των επιπέδων αυτών και αποδίδουν καλύτερα τα γενικευμένα ίχνη των κτιρίων. Οι περισσότεροι από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους αλγορίθμους, βασίζονται στο πεδίο γνώσης της όρασης υπολογιστών (computer vision) και μπορούν να εφαρμόζονται εύκολα στα raster παράγωγα, που εξάγονται από το νέφος σημείων. Στην πιο διαδεδομένη περίπτωση της χρήσης raster DSM, το οποίο αποτελεί ένα 2,5d μοντέλο, είναι δυνατή η ταυτόχρονη ενσωμάτωση της υφιστάμενης υψομετρικής πληροφορίας προκειμένου να μορφωθούν τοπικά κριτήρια επιπεδότητας, επεκτείνοντας το εύρος των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων. Η επέκταση αυτών στην εφαρμογή επί ενός ακανόνιστου 3d νέφους σημείων δεν είναι πάντα εφικτή, πριν την οργάνωσή του σε κάποια μορφή (TIN ή 3d grid), ενώ κάποιοι αλγόριθμοι μπορούν να λειτουργούν απευθείας στο 3d dataset από το οποίο αποτελείται το νέφος. Σε κάθε περίπτωση, οι 3d αλγόριθμοι πλεονεκτούν στο γεγονός της αποφυγής της απώλειας πληροφορίας από την μετατροπή του νέφους σε

raster, αλλά παρουσιάζουν σύνθετες απαιτήσεις που τους καθιστούν δύσκολα εφαρμόσιμους, ιδιαίτερα σε μεγάλης έκτασης εργασίες. Γενικά η κατηγοριοποίηση των μεθόδων κατάτμησης δεν είναι απόλυτα ξεκάθαρη, καθώς διαφορετικές τεχνικές και μαθηματικοί αλγόριθμοι μπορούν να συνδυαστούν, παράγοντας κάθε φορά νέες σύνθετες προσεγγίσεις.

Οι Wang and Shan (2009) αναφέρουν ότι μια χονδρική κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων κατάτμησης μπορεί να πραγματοποιηθεί βάσει των χρησιμοποιούμενων μαθηματικών τεχνικών που ενσωματώνουν. Οι αλγόριθμοι κατάτμησης μπορούν να διακριθούν σε πέντε γενικές ενότητες:

✓ Μέθοδοι ανίχνευσης ορίων (Edge-detection methods): που πραγματοποιούν την κατάτμηση εξετάζοντας τοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ενώ εν συνεχεία ομαδοποιούν τα σημεία εντός των ιχνών για να αποδώσουν τα τελικά τμήματα. Μια μεγάλη ποικιλία τέτοιων αλγορίθμων έχουν αναπτυχθεί για την κατάτμηση οπτικών εικόνων στο πλαίσιο της όρασης υπολογιστών. Ενεργούν σε raster παράγωγα (DSM) του νέφους σημείων, καθώς ενσωματώνουν τεχνικές ανίχνευσης ακμών και η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την ποιότητα του υποβάθρου (ύπαρξη κενών περιοχών, ανάλυση, ραδιομετρία), όσο και από την ακολουθούμενη προσέγγιση ανίχνευσης. Οι ανιχνευτές ακμών (edge detectors) μπορούν να είναι μιας ή πολλαπλών διευθύνσεων 2d χωρικά φίλτρα (πυρήνες/kernels), με τα οποία πραγματοποιείται η πράξη της 2d συνέλιξης με την εικόνα ή και συνδυασμός φίλτρων με επιπρόσθετους υπολογισμούς. Τα φίλτρα είναι κατάλληλα διαμορφωμένα, ώστε να υπολογίζουν την πρώτη ή δεύτερη παράγωγο σε μια εικόνα, ανιχνεύοντας με τον τρόπο αυτό τις γραμμές αλλαγής κλίσεων (gradient), συνολικά ή κατά διευθύνσεις, που αντιστοιχούν στις ακμές. Γενικά η μέθοδος αυτή ανίχνευσης των ακμών είναι ευαίσθητη στον θόρυβο, καθώς η πράξη υπολογισμού της παραγώγου πραγματοποιεί ενίσχυση αυτού. Χαρακτηριστικοί ανιχνευτές ακμών είναι τα φίλτρα Prewitt, Sobel, Kirsch and Robinson, Nalwa and Binford, Canny κ.α. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η απώλεια πληροφορίας που οφείλεται στην μετατροπή του πρωτογενούς νέφους σε raster, λόγω των διαδικασιών παρεμβολής. Παράλληλα, σε περιοχές της εικόνας όπου εμφανίζονται διαφορετικά επίπεδα (βλάστηση που επικαλύπτει οροφές κτιρίων, πολυεπίπεδες οροφές σύνθετων κτιρίων, γέφυρες κ.α.) παρατηρείται υποκατάτμηση και τελικώς εσφαλμένη ταξινόμηση. Μια συγκριτική θεώρηση μεταξύ τεσσάρων κύριων μεθόδων ανίχνευσης ακμών παρουσιάζεται από τους (Heath et al., 1998), ενώ διάφορες εφαρμογές παρουσιάζονται από τους Jiang and Bunke (1999); Sappa and Devy (2001); Yong (2011).

✓ Μέθοδοι ανίχνευσης επιφανειών (Surface/Area-detection methods): που πραγματοποιούν την κατάτμηση βασίζόμενες σε τοπικά κριτήρια ομοιότητας και χωρικής εγγύτητας, στη βάση των οποίων πραγματοποιείται ομαδοποίηση των σημείων του νέφους. Η επιφάνεια που ανιχνεύεται προκύπτει από τη βέλτιστη εφαρμογή της στα ομαδοποιημένα σημεία, ενώ στη συνέχεια το όριο της (ίχνος) μπορεί να προσεγγιστεί σε δεύτερο χρόνο. Η τεχνική παρουσιάζει ομοιότητες με την

μέθοδο region growing που εφαρμόζεται στην ανάλυση εικόνων. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε 2,5d υπόβαθρα (DSM), όσο και τρισδιάστατα, απευθείας στο νέφος σημείων, αφού προηγηθεί η οργάνωσή του σε κάποια μορφή (TIN, GRID). Κατά γενική αρχή, ανιχνεύονται πρωτίστως επιφανειακά, επίπεδα (ή μη) τμήματα, τα οποία χρησιμεύουν ως αρχικοποίηση (seeds) της διαδικασίας ανίχνευσης. Για την ανίχνευση των αρχικών αυτών τμημάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι ευρέως δοκιμασμένοι και καλώς τεκμηριωμένοι, όπως η Ελαχιστοτετραγωνική προσαρμογή (Least Squares Adjustment), ο μετασχηματισμός Hough, ο αλγόριθμος RANSAC, ο αλγόριθμος Watershed κ.α. Οι αρχικές αυτές επιφάνειες επεκτείνονται και μεγεθύνονται σταδιακά, ομαδοποιώντας (ή απορρίπτοντας) σημεία στη βάση κριτηρίων ομοιότητας, όπως η χωρική εγγύτητα (π.χ. απόσταση από την επιφάνεια), η κλίση, η καμπυλότητα κ.α. Γενικά, οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας είναι και οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι για την κατάτμηση νεφών σημείων, δεδομένου ότι σε αυτά υπάρχει πληθώρα γεωμετρικών χαρακτηριστικών, που μπορεί να υπολογιστεί και να γίνει άμεσα εκμεταλλεύσιμη. Παράλληλα, η δυνατότητα υπολογισμού επιπέδων (ασχέτως κλίσεων και προσανατολισμού), είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την περίπτωση της ανίχνευσης κτιρίων και λοιπών τεχνικών κατασκευών, καθώς σε αυτά οι επίπεδες επιφάνειες είναι κυρίαρχο στοιχείο. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι γενικά εύκολο να ενσωματωθούν και παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις για την κατάτμηση νεφών σημείων μεγάλης έκτασης. Κύριο μειονέκτημα είναι η επιλογή των επιφανειών που θα χρησιμοποιηθούν για την αρχικοποίηση των αλγορίθμων, καθώς επιλογή διαφορετικών αρχικών επιφανειών οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα κατάτμησης. Με τον τρόπο αυτό, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί a priori το βέλτιστο σετ αρχικών επιφανειών και μια διαδικασία trial and error είναι συνήθως απαραίτητη για την εξαγωγή του κατάλληλου αποτελέσματος. Παραδείγματα τεχνικών κατάτμησης με ενσωμάτωση area based αλγορίθμων μπορούν να διερευνηθούν στις δημοσιεύσεις των Vosselman and Dijkman (2001);Gorte (2002);Lee and Schenk (2002);Rottensteiner (2003); Rabbani et al. (2006).

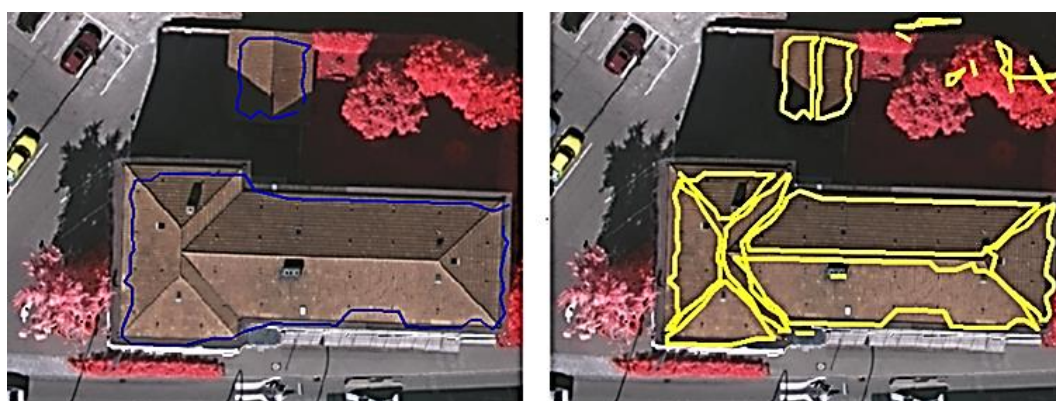
✓ Μέθοδοι γραμμών σάρωσης (Scan Line methods): οι οποίες αναλύουν το νέφος σημείων κατά την έννοια των γραμμών υπό τις οποίες σαρώνεται μια περιοχή από το σύστημα LiDAR. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ενώ οι γραμμές σάρωσης υπό τις οποίες συλλέγονται οι μετρήσεις από το σύστημα είναι συγκεκριμένες, ένας εκ των υστέρων διαχωρισμός του νέφους σε αυθαίρετες διευθυντικές γραμμές είναι δυνατός, χωρίς τον επηρεασμό της μεθόδου. Συνεπώς η χρήση των αυθεντικών γραμμών σάρωσης δεν είναι απαραίτητη και ως γραμμή σάρωσης μπορεί να θεωρηθεί ακόμη και κάθε γραμμή του raster DSM. Οι μέθοδοι αυτοί υιοθετούν την τεχνική διαχωρισμού και συνένωσης (split and merge) προερχόμενη από την ανάλυση εικόνων. Ως τέτοιας προέλευσης, εφαρμόζεται σε 2,5d παράγωγα του νέφους και αποσκοπεί στο διαχωρισμό της εικόνας σε ομοιόμορφες περιοχές, ξεκινώντας από την ανίχνευση γραμμών κατά μήκος της ορισμένης, κάθε φορά, γραμμής σάρωσης. Ο διαχωρισμός αφορά την κατάτμηση των γραμμών σάρωσης σε ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία θεωρούνται ότι πληρούν κάποιο κριτήριο ομοιογένειας (π.χ. τιμή υψομέτρου,

απόστασης από την ευθεία ή κλίσης), ενώ μεταξύ των ευθυγράμμων αυτών τμημάτων η τιμή του κριτηρίου μεταβάλλεται. Με άλλα λόγια, η κατάτμηση των ορισμένων γραμμών σάρωσης σε ευθύγραμμα τμήματα, ακολουθεί την φιλοσοφία των αλγορίθμων region growing, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως “line growing” (ένα παράδειγμα θα ήταν η χρήση του RANSAC για εξαγωγή ευθύγραμμων τμημάτων). Στη συνέχεια, επιτελείται η συνένωση αυτών των ευθύγραμμων τμημάτων, στη βάση κάποιου διαφορετικού κριτηρίου ομοιότητας (συγγραμμικότητα, παραλληλία, επικάλυψη κ.α.) με τρόπο αντίστοιχο του χρησιμοποιούμενου στις τεχνικές ανίχνευσης επιφανειών, ώστε να προκύψουν ομοιογενείς περιοχές. Γενικά γραμμές σάρωσης δεν υφίστανται στα νέφη σημείων (στην ακανόνιστη μορφή τους) και συνεπώς η απώλεια πληροφορίας από την παραγωγή raster μορφών είναι αναπόφευκτη για την χρήση της εν λόγω μεθόδου. Παράλληλα, τα αποτελέσματα της κατάτμησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις διευθύνσεις των γραμμών σάρωσης, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε δημιουργούνται συνήθως με τεμαχισμό του νέφους. Εφαρμογές με βάση την μέθοδο των γραμμών σάρωσης, μπορούν να διερευνηθούν στις εργασίες των Jiang and Bunke (1994); Sithole and Vosselman (2003); Khalifa et al. (2003); Hebel and Stilla (2008).

✓ Μέθοδοι ομαδοποίησης (Clustering methods): οι οποίες δημιουργούν ομοιογενείς ομάδες σημείων, με βάση τα χαρακτηριστικά (features) που συνδέονται με κάθε σημείο. Αποτέλεσμα είναι τα σημεία που ανήκουν σε μια ομάδα να είναι περισσότερο όμοια μεταξύ τους ως προς κάποιο κριτήριο, απ’ ότι με τα σημεία που ανήκουν σε άλλες ομάδες. Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούν παραμετρικά μοντέλα (π.χ. προκαθορισμένα επίπεδα που προσαρμόζονται στα δεδομένα), οι μέθοδοι clustering εφαρμόζονται σε ένα n-διάστατο χώρο, ο οποίος περιέχει τα διανύσματα που συσχετίζονται με κάθε σημείο και τα οποία δημιουργούνται από τα διάφορα γεωμετρικά και ραδιομετρικά χαρακτηριστικά, που υπάρχουν διαθέσιμα ή μπορούν να υπολογιστούν για αυτά. Ο χώρος αυτός καλείται feature space και παραδείγματά του θα μπορούσαν να είναι ο 4-d χώρος {X, Y, Z, Intensity} ή ο 3d χώρος των διευθυντικών συνημιτόνων των κανονικών διανυσμάτων {cos ω , cos ϕ , cos κ } ενός επιπέδου. Ο χώρος δημιουργείται από τα αντίστοιχα διανύσματα, που αφορούν το κάθε σημείο στο νέφος, δεδομένου ότι οι συντεταγμένες θέσης και η τιμή έντασης είναι ήδη καταγεγραμμένα από το σύστημα. Οι μέθοδοι ομαδοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε 3d Νέφη σημείων, όσο και σε οργανωμένες μορφές αυτών (grid και TIN). Χαρακτηριστικές τεχνικές clustering όπως οι K-Μέσων (K-means), ασαφούς ομαδοποίησης (fuzzy clustering), μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum - likelihood), χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ομάδων σημείων και την εκτέλεση της κατάτμησης του νέφους. Η χρήση των διανυσμάτων χαρακτηριστικών, ενισχύει τις ανομοιομορφίες μεταξύ των δημιουργούμενων ομάδων (Shan et al., 2012), αποδίδοντας βελτιωμένα αποτελέσματα κατάτμησης. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου, είναι η a priori υπόθεση που πρέπει να γίνει για τον αριθμό των ομοιογενών ομάδων. Αυτό θα σήμαινε ότι κανείς πρέπει να γνωρίζει ή να υποθέσει τον αριθμό των επιφανειών (π.χ. οροφών κτιρίων) που ζητείται από τον αλγόριθμο να εντοπίσει. Παράλληλα, η συνολική ποιότητα της κατάτμησης

εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των διανυσμάτων χαρακτηριστικών (και κατ' επέκταση του βαθμού διαφοροποίησης μεταξύ των ομάδων), αλλά και από την χρησιμοποιούμενη τεχνική κατάτμησης. Εφαρμογές με βάση τις τεχνικές ομαδοποίησης μπορούν να διερευνηθούν στις εργασίες των Roggero (2001);Filin (2002);Chehata et al. (2008).

✓ Μέθοδοι γράφων (ή γραφημάτων): που βασίζονται στην ομώνυμη θεωρία των γνωστικών μαθηματικών και αντιμετωπίζουν το νέφος σημείων ως ένα σύνολο κόμβων (V) μεταξύ των οποίων μπορούν να αποκατασταθούν σχέσεις (με βάση κάποιο χαρακτηριστικό) οι οποίες αποτελούν τις ακμές (E) του γράφου. Η απλούστερη ενσωμάτωση της γενικής ιδέας για την κατάτμηση νεφών σημείων, είναι η ανίχνευση ομοιογενών περιοχών που περιέχουν σημεία τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές χωρικής εγγύτητας μεταξύ τους, απ' ό,τι με σημεία άλλων περιοχών. Για την υλοποίηση της εν λόγω προσέγγισης, πρέπει να υπολογιστούν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων ή ομάδων σημείων σε μια μικρή περιοχή οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν και ως ακμές. Τα αντίστοιχα σημεία ή ομάδες σημείων αποτελούν τους κόμβους του γράφου. Το όριο μεταξύ διαφορετικών περιοχών αναμένεται να εντοπίζεται εκεί όπου υπάρχει η ασθενέστερη διασύνδεση, υπό την έννοια της απόστασης. Με βάση την υπολογισμένη απόσταση, αποδίδεται ένα βάρος σε κάθε ακμή του γράφου, το οποίο χρησιμεύει ως μέτρο ομοιότητας μεταξύ των διαφορετικών περιοχών. Η κατάτμηση του συνολικού γράφου (και συνεπώς του νέφους σημείων) πραγματοποιείται με τη χρήση διάφορων αλγόριθμων τμηματοποίησης, οι οποίοι αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της ομοιότητας μεταξύ διαφορετικών περιοχών και ταυτόχρονα στη μεγιστοποίηση της ομοιότητας στην ίδια περιοχή. Παραδείγματα καλά τεκμηριωμένων τέτοιων αλγορίθμων είναι οι normalized cut, minimum spanning tree (MST) και spectral graph partitioning. Παραδείγματα εφαρμογών στην ανίχνευση κτιρίων με χρήση μεθόδων γράφων, μπορούν να διερευνηθούν στις εργασίες των Kim and Muller (1999); Fuchs (2001);Wang and Chu (2008).



Εικόνα 3-6: Κατάτμηση με ανίχνευση ακμών (αριστερά) και ομοιογενών περιοχών (δεξιά)
(Awrangjeb and Fraser, 2014)

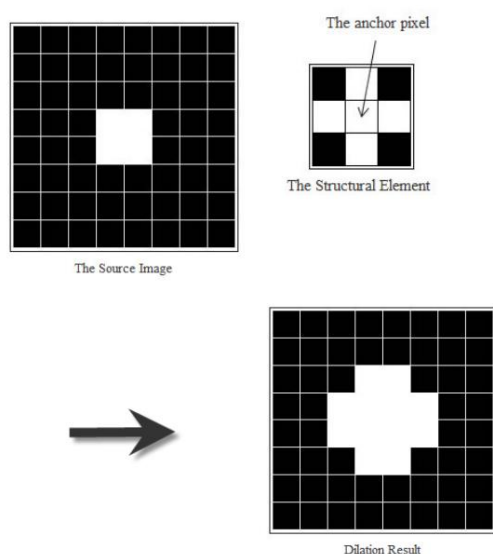
3.5 Μαθηματική μορφολογία

Η έννοια της μαθηματικής μορφολογίας αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1960 από τους Matheron και Serra και τις επόμενες δεκαετίες γνώρισε μεγάλη αποδοχή και επέκταση. Αφορά την ανάλυση και την επεξεργασία γεωμετρικών δομών όπως γράφοι, στερεά και meshes, αλλά βρίσκει τη συχνότερη εφαρμογή της στην επεξεργασία ψηφιακών εικόνων που οργανώνονται σε μια ψηφιδωτή δομή (grid). Συγκεκριμένα, η μορφολογική επεξεργασία εικόνας αφορά τον μετασχηματισμό μιας ψηφιακής απεικόνισης με τη χρήση ορισμένων τελεστών, που λειτουργούν με βάση διάφορες τοπολογικές και γεωμετρικές έννοιες, όπως το μέγεθος, το σχήμα, η συνδεσιμότητα κ.α. Αρχικώς χρησιμοποιήθηκε σε δυαδικού τύπου απεικονίσεις, αλλά η μεταγενέστερη επέκτασή της καλύπτει πλέον και τις απεικονίσεις τόνων του γκρι (greyscale). Αποτελεί ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο για την ψηφιακή επεξεργασία εικονιστικών υποβάθρων και την αναγνώριση προτύπων, ενώ όσον αφορά την εκμετάλλευση δεδομένων LiDAR εφαρμόστηκε, ήδη από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των συστημάτων σε εμπορικό επίπεδο, για την εκμετάλλευση των raster υποβάθρων τα οποία εξάγονται από το νέφος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη, από το 2000, των μορφολογικών φίλτρων για τον διαχωρισμό επίγειων και υπέργειων σημείων (§1.4), αλλά και οι ανάπτυξη τεχνικών με βάση τις μορφολογικές πράξεις για την εξαγωγή τεχνικών κατασκευών από 2,5d raster υποβάθρα.

Η μορφολογική επεξεργασία εικόνας πραγματοποιείται μέσω της πράξης της 2d συνέλιξης της εικόνας με ένα κατάλληλο μορφολογικό φίλτρο ή αλλιώς δομικό στοιχείο (structure element). Το δομικό στοιχείο έχει οπωσδήποτε μικρότερες διαστάσεις από αυτές τις εικόνες και αποτελείται από μηδενικά και μοναδιαία στοιχεία, διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν κάποιο γεωμετρικό σχήμα (σταυρός, έλλειψη κ.α.). Η κίνηση του δομικού στοιχείου μεταξύ όλων των εικονοστοιχείων μιας ψηφιακής εικόνας, καθώς και η εκτέλεση της πράξης της συνέλιξης, δημιουργεί μια νέα εικόνα, με βάση το μορφολογικό τελεστή που χρησιμοποιείται. Στην εικόνα εξόδου αυτή, η τιμή κάθε εικονοστοιχείου είναι αποτέλεσμα της σύγκρισης του αντίστοιχου εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας με τους γείτονές του, στο εύρος που ορίζουν οι διαστάσεις του δομικού στοιχείου. Σε δυαδικές εικόνες, η μορφολογική επεξεργασία χρησιμοποιείται για να διορθώσει ατέλειες που παρουσιάζονται μετά την χρήση τεχνικών όπως η κατωφλίωση, που δημιουργούν παραμορφώσεις λόγω ύπαρξης θορύβου και υφής. Οι βασικές μορφολογικές πράξεις επεξεργασίας μιας εικόνας είναι η συστολή (erosion) και η διαστολή (dilation). Με βάση τις πράξεις αυτές, ορίζονται οι σύνθετες μορφολογικές πράξεις του ανοίγματος (opening) και του κλεισίματος (closing) μιας εικόνας, ως μια διαδοχική επένεργεια συστολής -διαστολής και διαστολής - συστολής αντίστοιχα. Άλλες σύνθετες μορφολογικές πράξεις, όπως είναι οι μορφολογικοί μετασχηματισμοί White Top-Hatt και Black Top-Hatt, μπορούν να δημιουργηθούν με χρήση συνδυασμών πρόσθεσης και αφαίρεσης της αρχικής εικόνας με τα παράγωγα των πράξεων του ανοίγματος και κλεισίματος, ενώ υφίστανται και επιπλέον μετασχηματισμοί και εργαλεία, όπως ο μετασχηματισμός Hit-or-miss, η μορφολογική σκελετοποίηση κ.α.

3.5.1 Διαστολή (dilation) και συστολή (erosion)

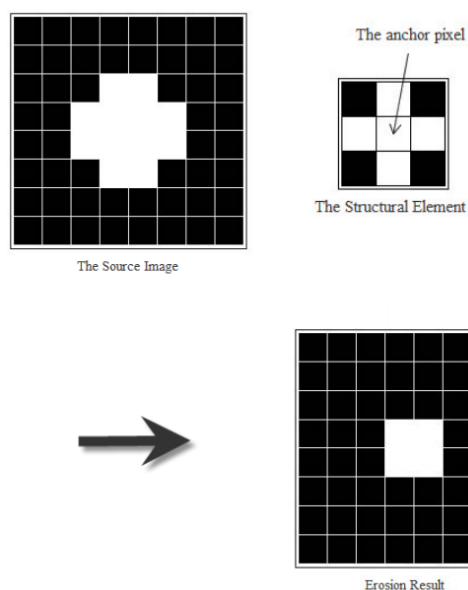
Η διαδικασία της μορφολογικής διαστολής, εξετάζει τις τιμές των εικονοστοιχείων στην γειτονιά που ορίζουν οι διαστάσεις του δομικού στοιχείου και εκχωρεί την μέγιστη τιμή από αυτές ως νέα τιμή για το κεντρικό εικονοστοιχείο. Συνεπώς, η νέα εικόνα που δημιουργείται, παρουσιάζει μια επέκταση των ορίων των αντικειμένων στην εικόνα. Αν πρόκειται για δυαδική εικόνα, τότε ποιο απλά, αν κάποιο εικονοστοιχείο στην γειτονιά του κεντρικού παρουσιάζει τιμή ίση με 1, τότε η νέα τιμή του κεντρικού εικονοστοιχείου γίνεται 1. Μαθηματικά, για μια εικόνα A και ένα δομικό στοιχείο B συμβολίζεται ως $A \oplus B$.



Εικόνα 3-7: Σχηματική απεικόνιση της τέλεσης μορφολογικής διαστολής (Cui, 2013)

Με χρήση της διαστολής πραγματοποιείται κλείσιμο σε οπές αντικειμένων λόγω φυσικού σχήματος των αντικειμένων, καθώς και γεφύρωμα μικρών κενών ανάμεσα σε εικονοστοιχεία που παρουσιάζονται στα raster υπόβαθρα λόγω ανεπάρκειας δεδομένων για την εκτέλεση παρεμβολής. Για τέτοιου είδους επεξεργασία, είναι γενικώς προτιμότερο να χρησιμοποιείται δομικό στοιχείο διαστάσεων 3x3 με τα μη μηδενικά στοιχεία να είναι μοναδιαία. Μεγαλύτερα δομικά στοιχεία οδηγούν σε εντονότερο φαινόμενο, γενικεύοντας τα σχήματα των αντικειμένων.

Η μορφολογική συστολή λειτουργεί με αντίστροφη διαδικασία, εκχωρώντας στο κεντρικό εικονοστοιχείο την ελάχιστη τιμή από αυτές στη γειτονιά που ορίζει το δομικό στοιχείο. Κατ' αντιστοιχία, για δυαδικές εικόνες εκχωρείται η τιμή μηδέν, αν έστω ένα γειτονικό στοιχείο έχει την τιμή αυτή. Τα σχήματα των αντικειμένων μετά την εφαρμογή της μορφολογικής συστολής παρουσιάζουν μια συρρίκνωση. Μαθηματικά, για μια εικόνα A και ένα δομικό στοιχείο B συμβολίζεται ως $A \ominus B$.



Εικόνα 3-8: Σχηματική απεικόνιση της τέλεσης μορφολογικής συστολής (Cui, 2013)

Με χρήση της συστολής εξαλείφονται απομονωμένα εικονοστοιχεία τα οποία, στις πλείστες των περιπτώσεων, αποτελούν στικτό θόρυβο στην εικόνα, απομακρύνεται περιττή (αλλά μερικές φορές και χρήσιμη λεπτομέρεια), απαλείφονται μικρές φωτεινές περιοχές, κλπ. Παράλληλα, τα περιγράμματα των υφιστάμενων αντικειμένων λεπταίνουν και μπορεί να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός αντικειμένων με εφαιπτόμενα όρια, προκειμένου να είναι εφικτή η περαιτέρω αυτόματη ανίχνευσή τους. Για τις διαδικασίες ανίχνευσης αντικειμένων με εκμετάλλευση δεδομένων LiDAR, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον διαχωρισμό τμημάτων βλάστησης που βρίσκονται κοντά στις πλευρές κτιρίων, όπως η αστική βλάστηση των πεζοδρομίων.

Το ποιο διαδεδομένο δομικό στοιχείο, για τις απλές μορφολογικές πράξεις της διαστολής και της συστολής, παρουσιάζεται στην εικόνα 3-9 και αποτελεί το πλησιέστερο σχήμα σε κύκλο για μια ψηφιακή εικόνα.

0	1	0
1	1	1
0	1	0

Εικόνα 3-9: Δομικό στοιχείο 3x3 μορφολογικών πράξεων

Από την εφαρμογή των διαδικασιών της διαστολής και συστολής με διαφορετικά δομικά στοιχεία, προκύπτει ότι το μέγεθος και το σχήμα τους καθορίζουν το τελικό προκύπτον αποτέλεσμα. Το σχήμα επιλέγεται ώστε να δίνει έμφαση (ή να αγνοεί) αντικείμενα συγκεκριμένου προσανατολισμού στην εικόνα (πχ διαγώνια, κάθετα κλπ.) και το μέγεθος ανάλογα με την επιθυμητή ένταση του αποτελέσματος της μορφολογικής πράξης. Παράλληλα, η επαναληπτική εφαρμογή τόσο της συστολής όσο και της διαστολής με το ίδιο δομικό στοιχείο στο αποτέλεσμα που προκύπτει κάθε

φορά, είναι εφικτή και ως τεχνική εξυπηρετεί την απόδοση πιο εκλεπτυσμένου αποτελέσματος, χωρίς την εμφάνιση υπερβολών και την απώλεια σημαντικής πληροφορίας.

3.5.2 Άνοιγμα (opening) και κλείσιμο (closing)

Η πράξη του μορφολογικού ανοίγματος, ορίζεται ως μια συστολή της εικόνας με κάποιο δομικό στοιχείο, ακολουθούμενη από τη διαστολή του αποτελέσματος με βάση το ίδιο δομικό στοιχείο. Μαθηματικά, για μια εικόνα A και ένα δομικό στοιχείο B συμβολίζεται ως $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$. Το αποτέλεσμα που έχει η διαδικασία αυτή σε ένα αντικείμενο, είναι η εξομάλυνση του περιγράμματος του και η εξάλειψη μεμονωμένων σημείων, ενώ διατηρούνται τα σχήματα και τα μεγέθη των μεγαλύτερων αντικειμένων. Γενικά τα αντικείμενα παρουσιάζονται πιο συμπαγή, ενώ το βασικό μειονέκτημα είναι ότι επιδρά πάνω σε όλες τις περιοχές των εικονοστοιχείων χωρίς διάκριση. Όσο μεγαλύτερο είναι το δομικό στοιχείο με το οποίο πραγματοποιείται η πράξη του ανοίγματος, τόσο εντονότερο παρουσιάζεται το αποτέλεσμα και χρήση υπερβολικά μεγάλων διαστάσεων δομικού στοιχείου γενικεύουν πέραν αναγνώρισης τα αντικείμενα στην εικόνα. Χρήση της πράξης του ανοίγματος σε ένα DSM, με διάσταση δομικού στοιχείου μεγαλύτερη από το μεγαλύτερο κτίριο, οδηγεί στην αφαίρεση όλων των υπέργειων αντικειμένων, αποδίδοντας ένα μοντέλο της επιφάνειας του εδάφους (DTM), πρακτική η οποία είναι απλή στην εφαρμογή και παρέχει γρήγορο αποτέλεσμα, αλλά γενικά μειονεκτεί λόγω υπερεξομάλυνσης της επιφάνειας για περιπτώσεις χρήσης πολύ μεγάλων διαστάσεων δομικών στοιχείων (περίπτωση χαμηλών πτήσεων και υψηλής πυκνότητας δεδομένα LiDAR). Παράλληλα, η πράξη του ανοίγματος δύναται να διαχωρίζει την εφαιπόμενη σε πλευρές κτιρίων παρακείμενη αστική βλάστηση, γεγονός που αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας των raster υποβάθρων για την εκτέλεση αλγορίθμων αυτόματης ανίχνευσης.

Ο μετασχηματισμός του κλεισίματος ορίζεται ως μια διαστολή της εικόνας με κάποιο δομικό στοιχείο, ακολουθούμενη από τη συστολή του αποτελέσματος με βάση το ίδιο δομικό στοιχείο. Μαθηματικά, για μια εικόνα A και ένα δομικό στοιχείο B συμβολίζεται ως $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$. Όπως και κατά την εκτέλεση της πράξης του ανοίγματος, τα γραμμικά στοιχεία της εικόνας (πχ ακμές κτιρίων) εξομαλύνονται, ενώ είναι δυνατή η πλήρωση μικρών κενών στο υπόβαθρο (filling) που δημιουργούνται από απώλεια πληροφορίας κατά την παρεμβολή ή την απουσία δεδομένων. Μπορεί να εκτελεσθεί είτε ως προεπεξεργασία του υποβάθρου για την κάλυψη των εν λόγω ατελειών, είτε και μετά την εκτέλεση του μορφολογικού ανοίγματος, προκειμένου να διορθωθούν τυχόν κενά που δύναται να δημιουργηθούν. Κατάλληλη επιλογή δομικού στοιχείου είναι απαραίτητη και πρέπει να επιτελείται σε σχέση με το δομικό στοιχείο που επιλέχθηκε κατά το μορφολογικό άνοιγμα, προκειμένου να μην υπάρχει αντιστροφή του αποτελέσματος.

3.5.3 Εφαρμογή σύνθετων μορφολογικών πράξεων

Οι συμβατικοί μετασχηματισμοί του ανοίγματος και του κλεισίματος, είναι χρήσιμοι γενικά για την εξομάλυνση των εικόνων, αλλά περιορίζονται από την τάση τους να αφαιρούν σημαντικά λεπτά αντικείμενα από τις ψηφιακές εικόνες, στο πλαίσιο της αφαίρεσης θορύβου. Για την αντιμετώπιση της αδυναμίας αυτής, έχουν αναπτυχθεί σύνθετα μορφολογικά φίλτρα, με σκοπό την απαλοιφή του θορύβου ενώ διατηρείται η χρήσιμη πληροφορία, ως προστάδιο επεξεργασίας των εικόνων, προκειμένου εν συνεχεία να πραγματοποιηθεί ανίχνευση ακμών και αντικειμένων με αυτόματες μεθόδους. Παράλληλα, οι σύνθετοι μετασχηματισμοί μπορούν να αποδίδουν μόνο τα επιθυμητά αντικείμενα από μια εικόνα, σε ένα βήμα, συντομεύοντας αλγοριθμικές διαδικασίες, που σε άλλη περίπτωση θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν σε διακριτά στάδια από τον χρήστη.

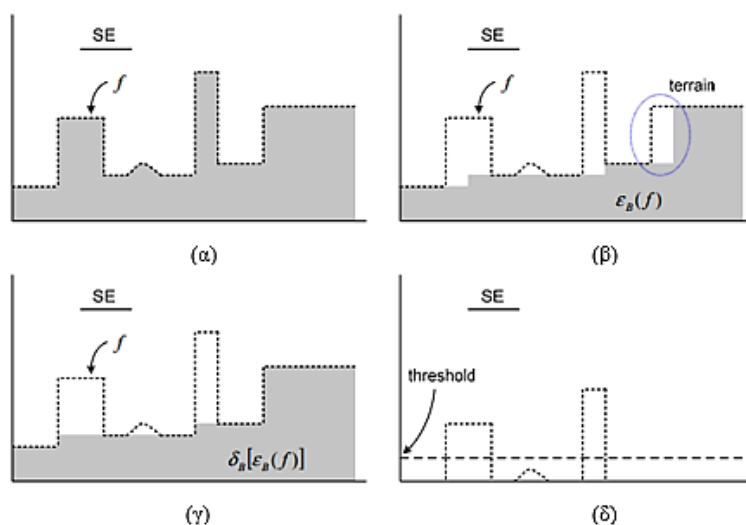
Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετου φίλτρου αποτελεί το μορφολογικό φίλτρο ASF (Alternating Sequential Filtering), το οποίο επενεργεί στην εικόνα μέσω μιας διαδοχής μετασχηματισμών ανοίγματος και κλεισίματος, σε η επαναλήψεις και με βάση το καθορισμένο δομικό στοιχείο. Η ακολουθία εφαρμογής ανοίγματος και κλεισίματος ελέγχεται από μια παράμετρο η οποία λαμβάνει τιμή OC όταν εκτελείται αρχικά άνοιγμα (Opening) και μετά κλείσιμο (Closing), τιμή CO όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τιμή OCO για άνοιγμα κλείσιμο και ξανά άνοιγμα και τιμή COC για κλείσιμο άνοιγμα και ξανά κλείσιμο. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή των κατάλληλων πράξεων, των επιθυμητών επαναλήψεων, καθώς και του βέλτιστου δομικού στοιχείου, εξαρτώνται από την φύση της περιοχής, την ποιότητα των αρχικών δεδομένων και το επιθυμητό αποτέλεσμα, ενώ ο καθορισμός σταθερών κανόνων εφαρμογής για όλες τις περιπτώσεις δεν είναι εφικτός.

Ο μετασχηματισμός Top-Hat αποτελεί έναν σύνθετο μετασχηματισμό του οποίου η εφαρμογή εξάγει μικρά στοιχεία και λεπτομέρειες από την αρχική εικόνα, ενώ εφαρμόζεται σε δύο παραλλαγές, που είναι ο μετασχηματισμός White Top - Hat (ή Top - Hat) και ο Black Top- Hat (ή Bot - Hat).

Ο White Top-Hat επιτυγχάνεται αν αφαιρεθεί μια εικόνα παράγωγο μορφολογικού ανοίγματος, από την αρχική της, ενώ ο Black Top- Hat επιτυγχάνεται με την αφαίρεση της αρχικής εικόνας, από την εικόνα παράγωγο ενός μορφολογικού κλεισίματος με κάποιο δομικό στοιχείο. Ο μετασχηματισμός White Top - Hat επιστρέφει ως αποτέλεσμα μια εικόνα που περιέχει όσα αντικείμενα είναι μικρότερα από την διάσταση του δομικού στοιχείου και ταυτόχρονα εμφανίζονται «φωτεινότερα» από το περιβάλλον τους (για ένα DSM σημαίνει υψηλότερα από το περιβάλλον τους αντικείμενα). Ο μετασχηματισμός Black Top- Hat, επιστρέφει ως αποτέλεσμα μια εικόνα που περιέχει όσα αντικείμενα είναι μικρότερα από την διάσταση του δομικού στοιχείου, και ταυτόχρονα εμφανίζονται «σκοτεινότερα» από το περιβάλλον τους.

Γενικά οι μετασχηματισμοί Top-Hat χρησιμοποιούνται για εξαγωγή αντικειμένων, την ισοδυναμοποίηση υποβάθρου, την ενίσχυση εικόνων κ.α. Κατά την εφαρμογή του μετασχηματισμού Top - Hat πραγματοποιείται εντοπισμός των ορίων των

περιγραμμάτων των αντικειμένων της εικόνας, ωστόσο κατά την διαδικασία του White Top - Hat τα όρια που εντοπίζονται είναι ελαφρώς μετακινημένα προς τα έξω σε σχέση με τα πραγματικά, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την εφαρμογή του Black Top - Hat. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του δομικού στοιχείου που χρησιμοποιείται τόσο πιο έντονο είναι το αποτέλεσμα του εντοπισμού περιγραμμάτων, ενώ παράλληλα προστίθεται θόρυβος στα περιγράμματα των αντικειμένων. Η χρήση τους στην ανίχνευση κτιρίων μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς σε αστικές περιοχές τα κτίρια τείνουν να περιβάλλονται από δρόμους, οι οποίοι παρουσιάζουν χαρακτηριστικά μικρότερο υψόμετρο και συνεπώς απεικονίζονται με σκοτεινότερους τόνους στο DSM.



Εικόνα 3-10: Αποτελέσματα μορφολογικών πράξεων (Li et al., 2014)

(α) Αρχική εικόνα και δομικό στοιχείο (SE)

(β) Αποτέλεσμα μορφολογικής συστολής

(γ) Αποτέλεσμα μορφολογικής διαστολής επί του αποτελέσματος της συστολής (Άνοιγμα)

(δ) Αποτέλεσμα μετασχηματισμού Top-Hatt

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Πειραματική εφαρμογή εξαγωγής ιχνών κτιρίων με την τεχνική Lidargrammetry

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια πειραματική εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry, για την εξαγωγή ιχνών κτιρίων. Χρησιμοποιούνται εικόνες έντασης από δεδομένα LiDAR, καθώς και κατάλληλο ψηφιακό μοντέλο επιφανείας προερχόμενο από τα ίδια δεδομένα, προκειμένου να παραχθούν στερεομοντέλα έντασης (ISP). Τα ίχνη των κτιρίων ψηφιοποιούνται σε περιβάλλον 3D παρατήρησης, προκειμένου να εξαντληθεί η δυνατότητα εκτίμησης της ακριβέστερης θέσης των ακμών, που σχηματίζουν το κάθε ίχνος ώστε να ελαχιστοποιηθεί το φωτοερμηνευτικό

σφάλμα κατά την εργασία. Η εξαγωγή των ιχνών των κτιρίων πραγματοποιείται σε δεδομένα από νέφη σημείων διαφορετικής πυκνότητας, τα οποία προέκυψαν από αραίωση του αρχικού νέφους και με σκοπό να εκτιμηθεί το σφάλμα στην ψηφιοποίηση από την μείωση της ευκρίνειας των εικόνων έντασης η οποία παρατηρείται σε νέφη χαμηλότερων πυκνοτήτων. Τελικώς πραγματοποιείται μια συγκριτική ανάλυση των εξαγόμενων ιχνών, τόσο ως προς την μεταξύ τους σχετική θέση, όσο και ως προς τη θέση αληθών ιχνών κτιρίων, προερχόμενα από ένα τυπικό φωτογραμμετρικό μοντέλο υψηλής ακρίβειας.

Οι αρχικές υποθέσεις εργασίας της παρούσης εφαρμογής, αφορούν περιορισμούς και παραδοχές με βάση τις οποίες καθορίστηκε το πλαίσιο εργασίας. Καθώς το αντικείμενο είναι ευρύ και οι πτυχές προς διερεύνηση ποικίλες, κρίθηκε σκόπιμο να τεθούν περιορισμοί, οι οποίοι να επιτρέψουν την ολοκλήρωση της εφαρμογής και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων με βάση το διατιθέμενο χρονικό διάστημα και το σκοπό της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Οι βασικότερες υποθέσεις εργασίας και παραδοχές είναι οι κάτωθι:

- ✓ Τα αρχικά δεδομένα LiDAR και ηλεκτροπτικά φωτογραμμετρικά δεδομένα, παραχωρήθηκαν ως δεδομένα επίδειξης, άρα θεωρούνται a priori ότι παρουσιάζουν υψηλή ποιότητα και ακρίβεια και ότι έχουν υποστεί όλους του απαραίτητους ελέγχους και επεξεργασία, προ και μετά την αποστολή συλλογής, προκειμένου να αναδείξουν ένα ποιοτικό αποτέλεσμα και τις δυνατότητες των συστημάτων της εκάστοτε κατασκευάστριας εταιρίας. Ως αποτέλεσμα δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστούν οι ενέργειες ποιοτικού ελέγχου (QC) οι οποίες σε κάθε περίπτωση αποτελούν το πρώτο στάδιο μιας ροής εργασιών εκμετάλλευσης δεδομένων τρίτων, τα οποία παραδίδονται άνευ πιστοποιητικών QC, αλλά ακόμη και για έλεγχο των παραδιδόμενων από τον τελικό αποδέκτη. Για δεδομένα LiDAR, τέτοιες ενέργειες ποιοτικού ελέγχου περιλαμβάνουν έλεγχο επικαλύψεων, έλεγχο εναπομεινάντων συστηματικών σφαλμάτων λόγω βαθμονόμησης συστήματος, έλεγχο ακρίβειας γεωκωδικοποίησης των δεδομένων κ.α. (Φράγκος, 2013).
- ✓ Τα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων θα εξεταστούν ως 2D σχήματα, λαμβάνοντας υπόψη το εξώτατο, προβαλλόμενο στο επίπεδο του εδάφους, περίγραμμα των κτιρίων. Λαμβάνονται υπόψη γείσα και εξοχές οροφών (εφόσον αναγνωρίζονται σαφώς), ενώ δεν λαμβάνονται υπόψη οι ακμές των διαφορετικών επιπέδων των οροφών, εφόσον αυτές προβάλλονται κατακόρυφα εντός του εξώτατου ίχνους του εκάστοτε κτιρίου. Ο σκοπός της παρούσης παραδοχής είναι η απλοποίηση της ανάλυσης μεταξύ των εξαγόμενων ιχνών, για την ποσοτικοποίηση των οριζοντιογραφικών μεταθέσεων οι οποίες οφείλονται σε φωτοερμηνευτικά σφάλματα, προερχόμενα από την φύση των στερεομοντέλων έντασης.
- ✓ Γίνεται αποδεκτό ότι η αραίωση (thinning) του αρχικού νέφους σημείων, παράγει παρόμοιο νέφος με αυτό που θα είχε συλλεχθεί απευθείας από την αντίστοιχη αποστολή σάρωσης, με την χρήση των ανάλογων παραμέτρων στο σύστημα LiDAR

για την επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας. Το γεγονός ότι οι αλγόριθμοι αραίωσης αφαιρούν σημεία με συστηματικό τρόπο από τα αρχικά δεδομένα, εκτιμάται ότι δεν επηρεάζει τη μη κανονικότητα του παράγωγου νέφους σημείων και ιδιαίτερα του αποτελέσματος της παραγωγής της εικόνας έντασης, η ευκρίνεια της οποίας κρίνεται ότι θα είναι η αναμενόμενη.

- ✓ Η παραγωγή των στερεομοντέλων έντασης θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση μιας αρχικής εικόνας έντασης και ενός παράγωγου (από τα ίδια δεδομένα) DSM, για τη δημιουργία stereomate εικόνας με τη χρήση μοντέλου της πλάγιας παράλληλης προβολής και την εκμετάλλευση ρουτίνας εμπορικού λογισμικού. Η ανάπτυξη αντίστοιχης εφαρμογής δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας και η δημιουργία στερεομοντέλων έντασης με την παρούσα μεθοδολογία κρίνεται ότι δεν θα επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα αυτών. Ιδανική πρακτική θεωρείται η εισαγωγή των απαραίτητων οριζοντιογραφικών μεταθέσεων απευθείας στο νέφος σημείων (μορφής TIN) και στη συνέχεια η απευθείας παραγωγή στερεοεικόνων έντασης από τα μετατεθειμένα TIN. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης πρακτικής πραγματοποιείται από συγκεκριμένο λογισμικό στο οποίο δεν υπήρξε πρόσβαση και ο διατιθέμενος χρόνος για την ανάπτυξή της σε κατάλληλη γλώσσα προγραμματισμού κρίθηκε ανεπαρκής.

4.2 Δεδομένα και λογισμικά εργασίας

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνουν πυκνό νέφος σημείων (55 σημ/m²), το οποίο συλλέχθηκε με το σύστημα LiDAR Leica ALS70, καθώς και φωτογραμμετρικό προσανατολισμένο μοντέλο χωρικής ανάλυσης 5cm από την ψηφιακή φωτομηχανή Leica ADS100 στην περιοχή της Ζυρίχης. Τα δεδομένα αποτελούν demo data της εταιρίας Hexagon Geospatial και χορηγήθηκαν για ακαδημαϊκή χρήση στο εργαστήριο Φωτογραμμετρίας από την εταιρεία Geosystems Hellas.

Τα δεδομένα καλύπτουν μια ιδιαίτερα ευρεία αστική περιοχή, στην περιφέρεια 5 και 6 της πόλης της Ζυρίχης με ήπια εναλλαγή τοπογραφίας βορείως και νοτίως του ποταμού Limmat. Για τις εφαρμογές της παρούσης εργασίας, επιλέχθηκε και κατατμήθηκε τμήμα των δεδομένων, νοτίως του ποταμού, στο οποίο επικρατούν μεγάλα βιομηχανικά κτίρια και εμπορικά κέντρα με αρκετά σύνθετο σχήμα και πολυεπίπεδες οροφές, με ή χωρίς κεκλιμένα τμήματα. Παράλληλα στην περιοχή υφίσταται αρκετή αστική βλάστηση καθώς και αυτοκινητόδρομοι με εναέριες γέφυρες. Η έκταση της επιλεγείσας περιοχής εργασίας εκτιμάται περίπου σε 0,5 Km². Κριτήρια επιλογής της περιοχής εργασίας, αποτέλεσαν ο περιορισμός του υπολογιστικού φόρτου διαχείρισης των δεδομένων και η ύπαρξη μεγάλων κτιρίων με σύνθετο περίγραμμα, προκειμένου να τονιστούν οι διαφοροποιήσεις στην χειροκίνητη ψηφιοποίηση λόγω της μεταβαλλόμενης φωτοερμηνευτικής δυνατότητας μεταξύ φωτογραμμετρικού ηλεκτροπτικού στερεομοντέλου και στερεομοντέλων έντασης.



Εικόνα 4-1: Η περιοχή εργασίας επί υποβάθρου Google Earth

Το νέφος σημείων που προέκυψε μετά την κατάτμηση βάσει των ορίων της περιοχής εργασίας, αποτελείται από 27.000.000 περίπου σημεία, που κατανέμονται σε πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις παλμών (1-5). Η πυκνότητα του νέφους είναι ιδιαίτερα υψηλή (55 σημεία/m²) και η μέση απόσταση (nominal post spacing) μεταξύ των σημείων είναι 0,13m. Η πτήση της αποστολής σάρωσης πραγματοποιήθηκε από χαμηλό ύψος (περίπου 540m AGL) και η γεωκωδικοποίησή του πραγματοποιήθηκε στην προβολή UTM Zone 32N του συστήματος αναφοράς WGS84, με υψομετρική αφετηρία το ελλειψοειδές WGS84.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αριθμός σημείων	27.199.499
Αριθμός σημείων που αποτελούν τελευταία επιστροφή	26.408.713
1 ^{ος} Επιστροφές	26.413.254
2 ^{ος} Επιστροφές	747.242
3 ^{ος} Επιστροφές	36.453
4 ^{ος} Επιστροφές	2.142
5 ^{ος} Επιστροφές	340
Μέση απόσταση μεταξύ σημείων	0,13 m
Μέση πυκνότητα σημείων	55 σημεία/m ²
Εμβαδό καλυπτόμενης περιοχής	0,49 Km ²
Μέγεθος	1,5 Gb

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά του νέφους σημείων

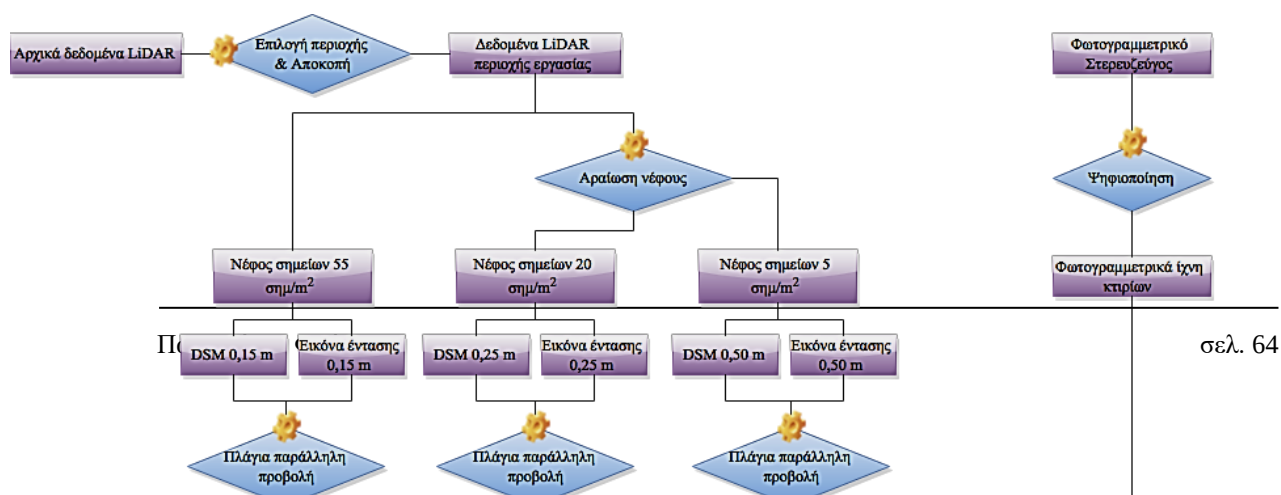
Για την επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός εμπορικών λογισμικών, αλλά και αντίστοιχων ανεπτυγμένα για ακαδημαϊκούς σκοπούς, με κάποια εξ αυτών να διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα το σύνολο των εργασιών πραγματοποιήθηκαν με χρήση των ακόλουθων λογισμικών:

- ✓ LasTools (ελεύθερη έκδοση) για την επεξεργασία του νέφους σημείων και την παραγωγή εικόνων έντασης.
- ✓ ILWIS Academic για την παραγωγή στερεομοντέλων έντασης και την ψηφιοποίηση των ιχνών κτιρίων.
- ✓ Imagine Photogrammetry για την ψηφιοποίηση των ιχνών κτιρίων από το φωτογραμμετρικό ηλεκτροπτικό στερεομοντέλο.
- ✓ ArcGIS για την εκτέλεση των υπολογισμών στατιστικής ανάλυσης και ανάλυσης εγγύτητας μεταξύ των εξαγόμενων ιχνών κτιρίων.

4.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας

Για την εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry προς εξαγωγή ιχνών κτιρίων από στερεοζεύγη έντασης, αναπτύχθηκε το μεθοδολογικό πλαίσιο της εικόνας 4-2. Η ανάπτυξη του εν λόγω πλαισίου προέκυψε κατόπιν δοκιμών και εναλλαγών, που σχετίζονταν τόσο με τα χρησιμοποιούμενα λογισμικά, όσο και με τα προστάδια επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR. Σε πρώτο στάδιο, γίνεται επιλογή της περιοχής εργασίας, βάσει κριτηρίων της §4.2 και αποκόπτεται κατάλληλο τμήμα των αρχικών δεδομένων LiDAR. Το παράγωγο αυτό υπομήμημα του νέφους σημείων, υφίσταται αραιώση προκειμένου να προκύψουν δύο νέα νέφη, με πυκνότητες 20 σημεία/m² και 5 σημεία/m² αντίστοιχα. Οι εν λόγω πυκνότητες νεφών αντιστοιχούν σε αποστάσεις σημείων 0,22m και 0,45m αντίστοιχα και επηρεάζουν την επιλογή εδαφοψηφίδας τόσο στο παραγόμενο, στο επόμενο στάδιο, DSM όσο και στην αντίστοιχη εικόνα έντασης (πίνακας 4-2).

Κάθε εικόνα έντασης, καθώς και το αντίστοιχο DSM, χρησιμοποιούνται ως αρχικά δεδομένα για την παραγωγή τριών διαφορετικών στερεοζευγών έντασης, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό ευκρίνειας λόγω της μείωσης της ανάλυσης του αρχικού νέφους σημείων. Τα ίχνη των ίδιων κτιρίων (στην κεντρική περιοχή του μοντέλου) ψηφιοποιούνται σε 3D περιβάλλον παρατήρησης, το οποίο ενισχύει τις φωτοερμηνευτικές δυνατότητες του χρήστη και τελικώς τα τρία διαφορετικά σετ συγκρίνονται μεταξύ τους προκειμένου να εκτιμηθούν οι οριζοντιογραφικές μεταθέσεις των ιχνών, οφειλόμενες στη σταδιακά μειούμενη ευκρίνεια του μοντέλου. Παράλληλα, τα υπόψη ίχνη συγκρίνονται με ένα τέταρτο σετ ιχνών, προερχόμενο από 3D ψηφιοποίηση επί ενός τυπικού φωτογραμμετρικού μοντέλου υψηλής χωρικής ανάλυσης, με σκοπό την ποσοτικοποίηση της οριζοντιογραφικής μεταβολής των ιχνών Lidargrammetry σε σχέση με την κλασική φωτογραμμετρική μεθοδολογία απόδοσης, ενώ καταγράφονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις.



Εικόνα 4-2: Σχηματική απεικόνιση μεθοδολογικού πλαισίου διερεύνησης τεχνικής Lidargrammetry

Νέφος σημείων	Πυκνότητα	Απόσταση σημείων	Επιλεχθείσα εδαφοψηφίδα
Ldr55	55 σημ/m ²	0,13 m	0,15 m
Ldr20	20 σημ/m ²	0,22 m	0,25 m
Ldr05	5 σημ/m ²	0,45 m	0,50 m

Πίνακας 4-2: Θεωρητικές πυκνότητες νεφών σημείων και επιλογή εδαφοψηφίδας για τη δημιουργία DSM και εικόνας έντασης

4.4 Αραίωση νέφους σημείων

Η διαδικασία της αραίωσης (thinning), παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης νεφών σημείων διαφορετικής πυκνότητας. Αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμη πρακτική για την διερεύνηση των επιπτώσεων της μείωσης της ανάλυσης των νεφών, ανάλογα της επιθυμητής εφαρμογής, κυρίως λόγω της ταυτόσημης οριζοντιογραφικής και υψομετρικής ακρίβειας των παράγωγων νεφών και την οικονομικότητα της εργασίας λόγω εξάλειψης της ανάγκης για εκτέλεση νέων αποστολών σαρώσεων. Από τις εν λόγω προσομοιώσεις, μπορούν να καθοριστούν οι απαιτήσεις για δεδομένη εφαρμογή σε μικρή κλίμακα, γεγονός που παίζει καθοριστικό ρόλο στον βέλτιστο προγραμματισμό αποστολών σαρώσεων και παραμετροποίησης του σαρωτή LiDAR

προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η πλέον ευθεία προσέγγιση για την αραίωση νεφών σημείων, είναι η δημιουργία ενός κανάβου διάστασης ψηφίδας ίσης με την επιθυμητή νέα απόσταση μεταξύ σημείων στο αραιωμένο νέφος και η αφαίρεση των πλεοναζόντων σημείων από αυτά που εμπίπτουν σε κάθε κελί. Η επιθυμητή θεωρητική απόσταση μεταξύ σημείων, μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο 1.3, υποθέτοντας ίσες αποστάσεις κατά την Χ και Υ διεύθυνση. Η παραδοχή αυτή δεν είναι απόλυτα ορθή, καθώς διαφορετικές τεχνολογίες κίνησης του κάτοπτρου του σαρωτή (περιστρεφόμενο πολυγωνικό κάτοπτρο, ταλαντευόμενο κάτοπτρο, κλονιζόμενο κάτοπτρο κ.α.) παράγουν διαφορετικά μοτίβα σάρωσης στο έδαφος, με αποτέλεσμα την μεταβλητή απόσταση μεταξύ των σημείων κατά την διεύθυνση πτήσης (Χ) και την κάθετη σε αυτή διεύθυνση σάρωσης (Υ). Εντούτοις, στα σύγχρονα συστήματα LiDAR πολύ υψηλού ρυθμού επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency - PRF) και ιδίως όσα ενσωματώνουν συστήματα διπλής εκπομπής ακτίνας, παράγουν ιδιαίτερα πυκνά μοτίβα σάρωσης στο έδαφος, με την απόσταση μεταξύ των σημείων ξεχωριστά κατά διευθύνσεις, να αποκτά δευτερεύοντα ρόλο. Η υπόθεση, συνεπώς, ίσων αποστάσεων κατά τις δύο διευθύνσεις, εκτιμάται ότι δεν επηρεάζει την ρεαλιστικότητα του παραγόμενου νέφους σημείων από την διαδικασία της αραίωσης.

Πρέπει να τονισθεί ότι η θεωρητική απόσταση μεταξύ των σημείων ενός νέφους δεν μπορεί να επιτευχθεί απόλυτα στην πράξη, καθώς το αρχικό νέφος σημείων παρουσιάζει ακανόνιστη κατανομή, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των σημείων πάνω από κάποια κελιά του κανάβου αραίωσης να διαφέρουν. Η επιλογή της παραμονής του κοντινότερου στο κέντρο του κελιού σημείου θα οδηγούσε σε μεγάλο βαθμό στην κανονικοποίηση του αραιωμένου νέφους, με μορφή παρόμοια με αυτή του κανάβου αραίωσης. Εντούτοις, αυτό δεν είναι επιθυμητό, καθώς από μια πραγματική αποστολή σάρωσης δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν τέτοιες κανονικές κατανομές των σημείων εντός του νέφους. Προς χάριν της ρεαλιστικότητας, επιλέγεται η τυχαία αφαίρεση σημείων εντός κάθε κελιού του κανάβου αραίωσης, γεγονός όμως που επηρεάζει την τελικώς υπολογιζόμενη μέση πυκνότητα του νέφους, λόγω των μεταβλητών αποστάσεων μεταξύ σημείων. Οι αποκλίσεις θεωρητικών και πρακτικά επιτευχθέντων αποτελεσμάτων για τα αραιωμένα νέφη σημείων, καθώς και λοιπά γενικά στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα 4-3.

Μέγεθος	Ldr20	Ldr05
Θεωρητική Πυκνότητα	20 σημ/m ²	5 σημ/m ²
Θεωρητική Απόσταση σημείων	0,22 m	0,45 m
Επιτευχθείσα Πυκνότητα	25,42 σημ/m ²	6,78 σημ/m ²
Επιτευχθείσα Απόσταση σημείων	0,20 m	0,38 m
Αριθμός σημείων	17.080.819	4.558.722
Αριθμός σημείων που αποτελούν τελευταία επιστροφή	16.936.418	4.458.790
1εξ Επιστροφές	16.412.743	4.441.711
2εξ Επιστροφές	625.084	111.310
3εξ Επιστροφές	40.858	5.373
4εξ Επιστροφές	1.859	286

Σες Επιστροφές	227	34
Μέγεθος	456 Mb	139 Mb

Πίνακας 4-3: Στοιχεία αραιωμένων νεφών σημείων

4.5 Παραγωγή εικόνων έντασης και DSM

Κύριο μέλημα της διαδικασίας είναι η παραγωγή ποιοτικών και ευκρινών εικόνων έντασης, καθώς η φωτοερμηνευτική δυνατότητα για την αναγνώριση των ακμών και των λεπτομερειών των κτιρίων έχει άμεση σχέση με αυτές. Η καταγεγραμμένη τιμή έντασης υφίσταται για κάθε σημείο στο νέφος, ανεξάρτητα αν αυτό αποτελεί παράγωγο μοναδικής ή κάποιας επακόλουθης οπισθοσκέδασης έκαστου παλμού. Οι τιμές έντασης που καταγράφονται από το σύστημα, σχετίζονται με την ενέργεια που φέρει η επιστρεφόμενη ανάκλαση, η οποία μειώνεται όταν το υλικό πρόσπτωσης παρουσιάζει μεγάλο βαθμό απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας (π.χ. υδάτινη επιφάνεια). Παράλληλα, χαμηλές τιμές έντασης παρατηρούνται και στις περιπτώσεις πολλαπλών οπισθοσκεδάσεων, καθώς η διαδοχική ανάκλαση τμημάτων του παλμού προκαλεί την επιστροφή στο σύστημα διαφορετικών τμημάτων αυτού, με σταδιακά μειούμενη ενέργεια.

Κατά την απεικόνιση δεδομένων LiDAR με βάση τις τιμές έντασης, πολλά λογισμικά επιτελούν μια επιλεκτική αραιώση των σημείων, προκειμένου να μειωθεί η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς και να είναι δυνατή η γρήγορη διαχείριση του νέφους. Η αραιώση αυτή, δημιουργεί κενά πληροφορίας σε όλο το εύρος των δεδομένων, ενώ το φαινόμενο επιδεινώνεται σημαντικά στις περιοχές επικάλυψης των λωρίδων σάρωσης, καθώς εκεί επιτελείται διπλή αφαίρεση σημείων (εικ.4-3). Η απευθείας εξαγωγή εικόνας έντασης από τα απεικονιζόμενα δεδομένα, που είναι και ο πλέον γρήγορος και ευθύς τρόπος, παρουσιάζει θορυβώδες και μη εκμεταλλεύσιμο αποτέλεσμα και δεν συνιστάται. Το ίδιο αποτέλεσμα (εμφάνιση κενών) παρουσιάζεται και στην περίπτωση εξαγωγής της εικόνας έντασης από συγκεκριμένες επιστροφές παλμών. Σε αντίθεση με την παραγωγή DSM, για το οποίο παραδοσιακά χρησιμοποιούνται μόνο οι πρώτες επιστροφές των παλμών, η εξαγωγή εικόνας έντασης παρουσιάζει βέλτιστο οπτικό αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιηθεί το σύνολο των σημείων του νέφους.

Η αυξημένη φωτοερμηνευτική δυνατότητα, μέσω της ευκρίνειας της εικόνας έντασης είναι, καθώς προαναφέρθηκε, το κύριο ζητούμενο και η ανάμειξη των αρχικών τιμών έντασης στο τελικό αποτέλεσμα (raster) δεν επηρεάζει το σκοπό της γεωμετρικής εξαγωγής ορίων, εφόσον συνιστά αύξηση της ενάργειας της εικόνας. Για το λόγο αυτό και κατά τη διαδικασία παραγωγής, ο υπολογισμός τιμής έντασης για κάθε εικονοστοιχείο από την μέση τιμή των σημείων που εμπίπτουν εντός των ορίων του, αποδίδει ένα ομαλότερο εικονιστικό αποτέλεσμα. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί, ότι διαφορετική επιλογή απόδοσης τιμής έντασης σε κάθε εικονοστοιχείο (από την χαμηλότερη ή υψηλότερη τιμή), μπορεί να εξυπηρετήσει διαφορετικού τύπου εφαρμογές, κυρίως στο πεδίο της τηλεπισκόπησης, όπου η μελέτη της έντασης

οπισθοσκέδασης δύναται να αποδώσει πληροφορία για τον τύπο του υλικού που την προκαλεί και να υποβοηθήσει τις τεχνικές αυτόματης ταξινόμησης.



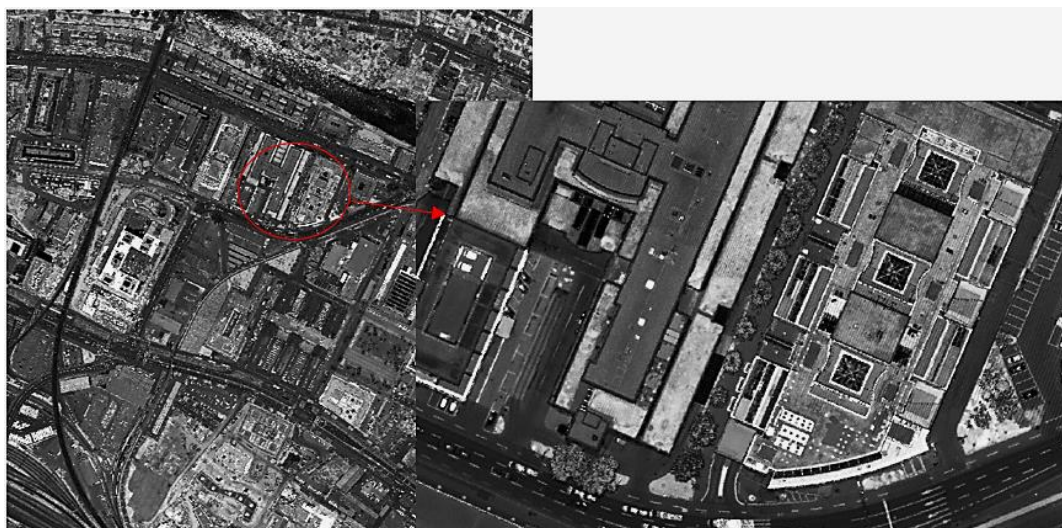
Εικόνα 4-3: Εξαγωγή εικόνας έντασης από αραιωμένα (για σκοπούς απεικόνισης και οικονομίας υπολογιστικών πόρων) δεδομένα LiDAR, με εμφανή κενά στις περιοχές επικάλυψης λωρίδων σάρωσης.

Ιδιαίτερα χρήσιμη παρουσιάζεται και η χρήση τεχνικών παρεμβολής (π.χ. διγραμμική ή κυβική) για την πλήρωση τυχόν μικρών κενών στην παραγόμενη εικόνα. Οι εν λόγω τεχνικές είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες και ενσωματώνονται στην πλειοψηφία των λογισμικών, τα οποία δύναται να παράγουν raster παράγωγα από οποιαδήποτε αρχικά δεδομένα. Τυχόν εικονοστοιχεία με κενό πληροφορίας, πληρώνονται με παρεμβολή στα γειτονικά εικονοστοιχεία, αποδίδοντας ένα πιο ομοιόμορφο οπτικό αποτέλεσμα. Τέτοια κενά πληροφορίας στα εικονοστοιχεία των εικόνων έντασης δύναται να προκύψουν λόγω της μη κανονικής κατανομής των σημείων του νέφους LiDAR, με αποτέλεσμα σε ορισμένα κελιά του υπερτιθέμενου κάναβου, βάσει του οποίου δημιουργείται ο πίνακας της εικόνας, να μην εμπίπτουν σημεία.

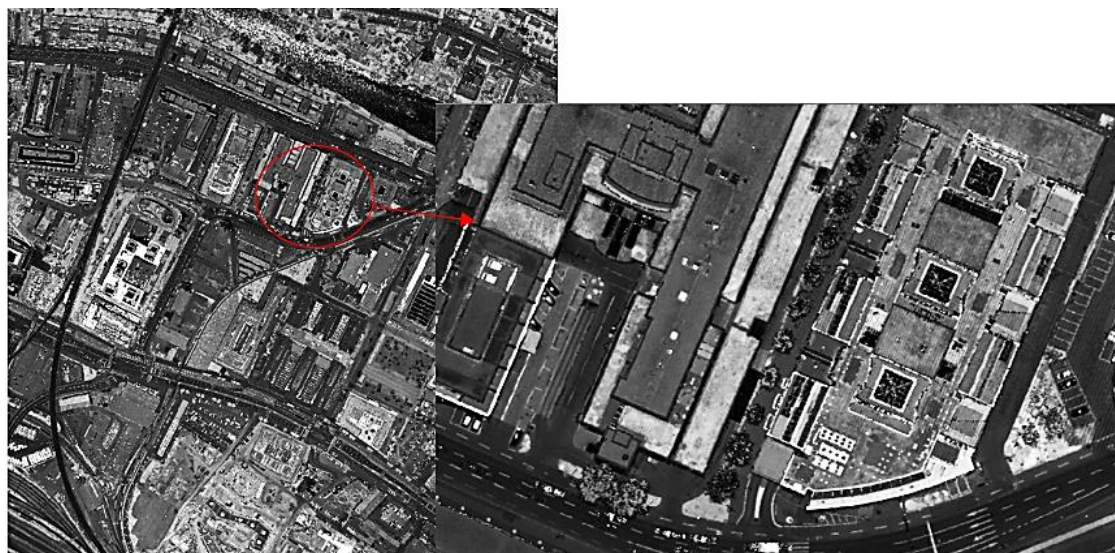
Η ραδιομετρία της παραγόμενης εικόνας έντασης μπορεί να παρουσιάζει μεταβλητό βάθος χρώματος (π.χ. 8bit, 16bit κ.α.), ανάλογα των επιλογών που διαθέτει η κάθε ρουτίνα παραγωγής. Τυπικά, η επιλογή βάθους 8 bit (256 τιμές) για την κανονικοποίηση των τιμών έντασης, σε συνδυασμό με τη δημιουργία απεικόνισης ενός καναλιού (single band), δεδομένης και της μονοδιάστατης φύσης του μεγέθους της έντασης, αποδίδει το πλέον απλό, εύκολα διαχειρίσιμο και ταυτόχρονα πλήρες αποτέλεσμα. Η τελική ραδιομετρία της εικόνας έντασης μπορεί να ενισχυθεί με τεχνικές μεταβολής του ιστογράμματός της, προκειμένου να βελτιωθεί το οπτικό αποτέλεσμα και να αυξηθεί η φωτοερμηνευτική δυνατότητα του χρήστη.

Βάσει των παραπάνω στοιχείων βελτιστοποίησης των παραγόμενων εικόνων έντασης από δεδομένα LiDAR, δημιουργήθηκαν τρεις απεικονίσεις, από το αρχικό και τα δύο

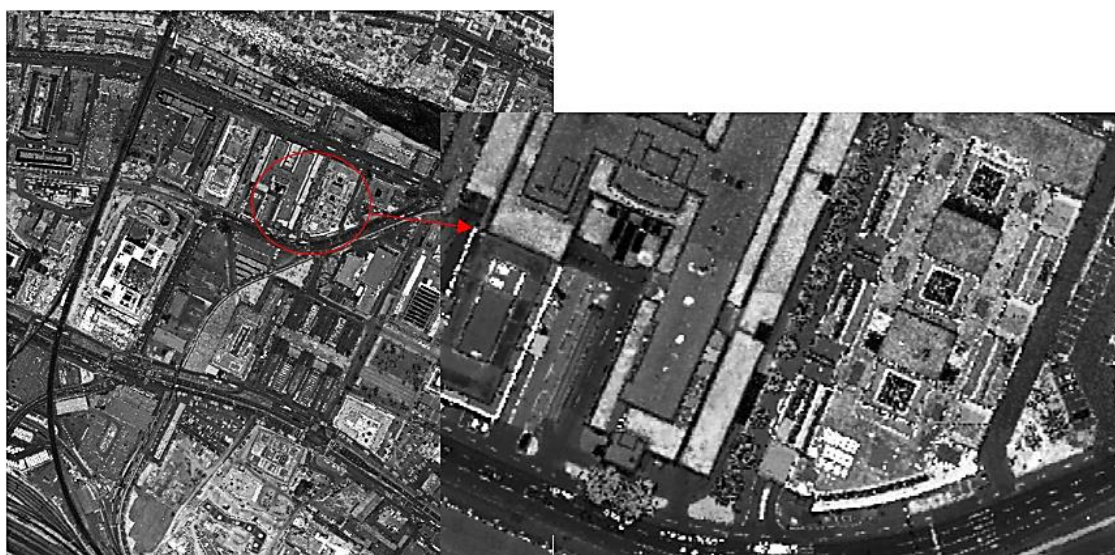
επακόλουθα αραιωμένα νέφη σημείων (εικ. 4-4, 4-5, 4-6), χωρικής ανάλυσης 0,15m, 0,25m και 0,5m αντίστοιχα. Η ραδιομετρία των τελικών απεικονίσεων ενισχύθηκε με την τεχνική LSD (Local Standard Deviations), η οποία αποδίδει νέες τιμές στα εικονοστοιχεία, βάση της αρχικής τιμής, της τιμής ενός τοπικού μέσου και της τυπικής απόκλισης των τιμών των εικονοστοιχείων σε μια μικρή γειτονιά του ιστογράμματος. Οι τελικές εικόνες έντασης είναι επαρκώς ευκρινείς και παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο απεικονιζόμενης πληροφορίας. Καθώς η πυκνότητα του νέφους σημείων μειώνεται, η αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει την αναμενόμενη μείωση της ευκρίνειας, ενώ η ακριβής θέση των ορίων των αντικειμένων γίνεται ιδιαίτερα δυσδιάκριτη, για μονοσκοπική παρατήρηση. Οι διαφορές ευκρίνειας στις εικόνες από τα νέφη πυκνότητας 55 και 25 σημ/m² είναι μικρές, λόγω της υψηλής ανάλυσης του νέφους και περιορίζονται στα όρια κάποιων ακμών των οποίων το σχήμα αλλοιώνεται μερικώς. Σε αντίθεση, η μείωση της μονοσκοπικής ευκρίνειας της εικόνας έντασης προερχόμενης από το νέφος πυκνότητας 7 σημ/m², είναι ιδιαίτερα αισθητή σε όλο το εύρος της.



Εικόνα 4-4: Τελική εικόνα έντασης από νέφος 55 σημ/m² και λεπτομέρεια



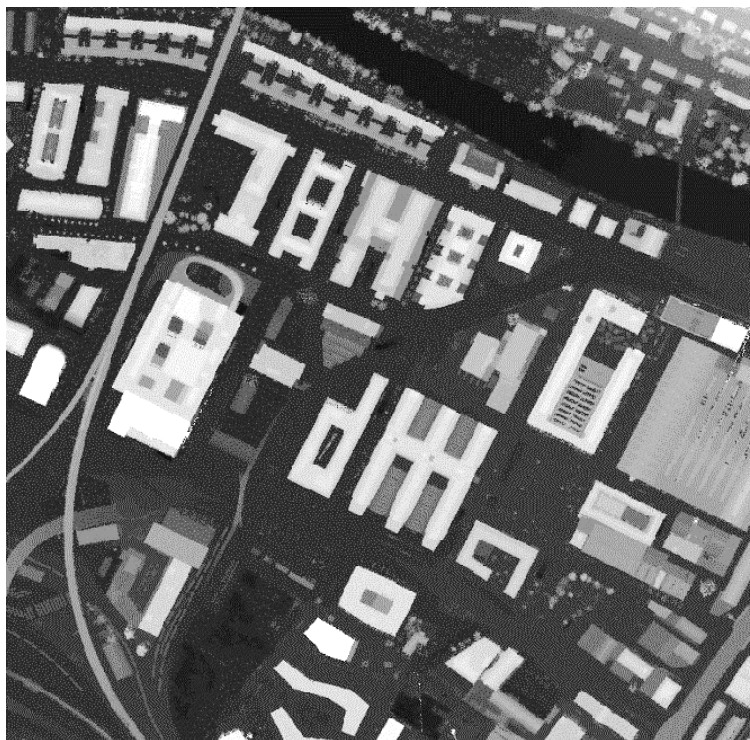
Εικόνα 4-5: Τελική εικόνα έντασης από νέφος 25 σημ/m² και λεπτομέρεια



Εικόνα 4-6: Τελική εικόνα έντασης από νέφος 7 σημ/m² και λεπτομέρεια

Τα απαιτούμενα υψομετρικά μοντέλα για την μετέπειτα δημιουργία των στερεοζευγών έντασης, δημιουργήθηκαν με την χρήση των σημείων εκείνων του νέφους τα οποία αποτελούν τις πρώτες οπισθοσκεδάσεις των παλμών. Σκοπός της επιλογής αυτής είναι η κατασκευή μιας επιφάνειας, η οποία να μοντελοποιεί τόσο το έδαφος, όσο και τα υπερκείμενα του εδάφους αντικείμενα της περιοχής μελέτης (DSM). Οι πρώτες επιστροφές των παλμών laser αντιπροσωπεύουν ακριβώς αυτή την επιφάνεια και η παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου σε κατάλληλη μορφή (raster) είναι παρόμοια διαδικασία με την παραγωγή εικόνων έντασης. Η κύρια διαφοροποίηση είναι η επιλογή της ιδιότητας του υψομέτρου των σημείων για την απόδοση τιμών στα εικονοστοιχεία του κανάβου της εικόνας. Με τη χρήση των τριών νεφών σημείων, δημιουργήθηκαν τρία DSM, με ίδια χωρική ανάλυση των αντίστοιχων εικόνων έντασης, κυρίως για λόγους πληρότητας, αφού η χρήση του υψηλότερης ανάλυσης DSM από το νέφος σημείων πυκνότητας 55σημ/m² θα μπορούσε να ικανοποιήσει

πλήρως την υψομετρική απαίτηση για την κατασκευή και των τριών στερεομοντέλων έντασης. Τα παραγόμενα DSM δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ τους.



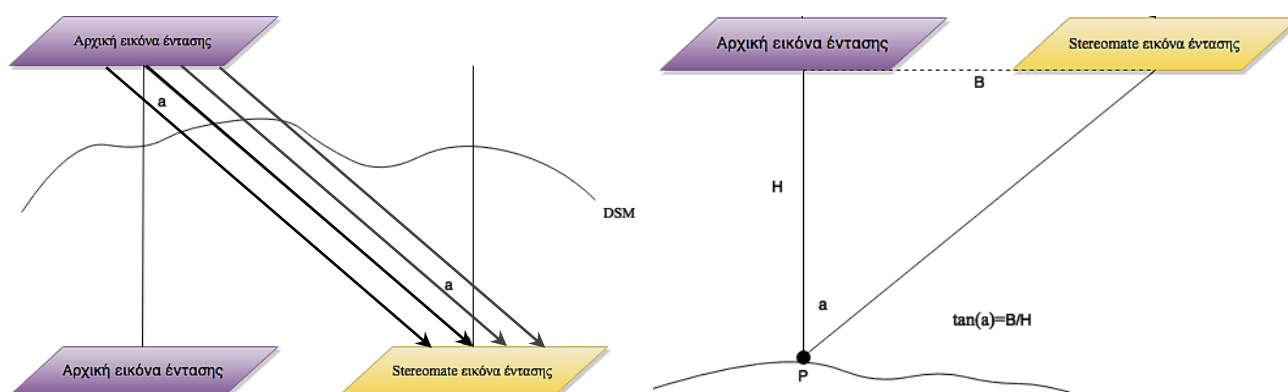
Εικόνα 4-7: Το DSM χωρικής ανάλυσης $d=0,15m$

4.6 Παραγωγή στερεομοντέλων έντασης (ISP)

Η δημιουργία των στερεοζευγών έντασης αποτελεί το τελικό στάδιο προπαρασκευής των δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η 3D απόδοση διανυσματικών δεδομένων με την εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry. Αν και η τεχνική είναι θεωρητικά καλά ανεπτυγμένη, σύμφωνα και με όσα προαναφέρθηκαν στις §2.2 και §2.3, εντούτοις εντοπίστηκαν αρκετές τεχνικές δυσκολίες για την εφαρμογή της με διάφορα φωτογραμμετρικά λογισμικά. Κύρια δυσκολία εντοπίστηκε στην εισαγωγή του παραγόμενου στερεομοντέλου, με κατάλληλο προσανατολισμό στο χώρο, ώστε να πραγματοποιηθεί η απαραίτητη φωτογραμμετρική απόδοση. Παράλληλα, κάθε εμπορικό λογισμικό απαιτεί την χρήση συγκεκριμένου μορφότυπου για το στερεομοντέλο, περιορίζοντας έτσι την διαλειτουργικότητα μεταξύ των διάφορων συστημάτων. Οι παράγοντες αυτοί, σε συνδυασμό με την έλλειψη αυτοματοποιημένων ρουτίνων παραγωγής στερεοζευγών έντασης απευθείας από το νέφος σημείων, καταδεικνύουν την, επί του παρόντος, έλλειψη ενσωμάτωσης της εν λόγω τεχνικής στα διάφορα εμπορικά φωτογραμμετρικά λογισμικά. Τα περισσότερα εξ αυτών, περιορίζονται σε απολύτως βασικές διαδικασίες και δυνατότητες διαχείρισης και εκμετάλλευσης δεδομένων LiDAR (οπτικοποίηση, κατάτμηση και συγχώνευση, βασικές ταξινομήσεις, εξαγωγή απεικονίσεων κ.α.). Στο μέλλον αναμένεται διεύρυνση των παρεχόμενων διαδικασιών εκμετάλλευσης των εν λόγω δεδομένων,

περιλαμβάνοντας και αυτοματοποιημένες διαδικασίες για την εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry.

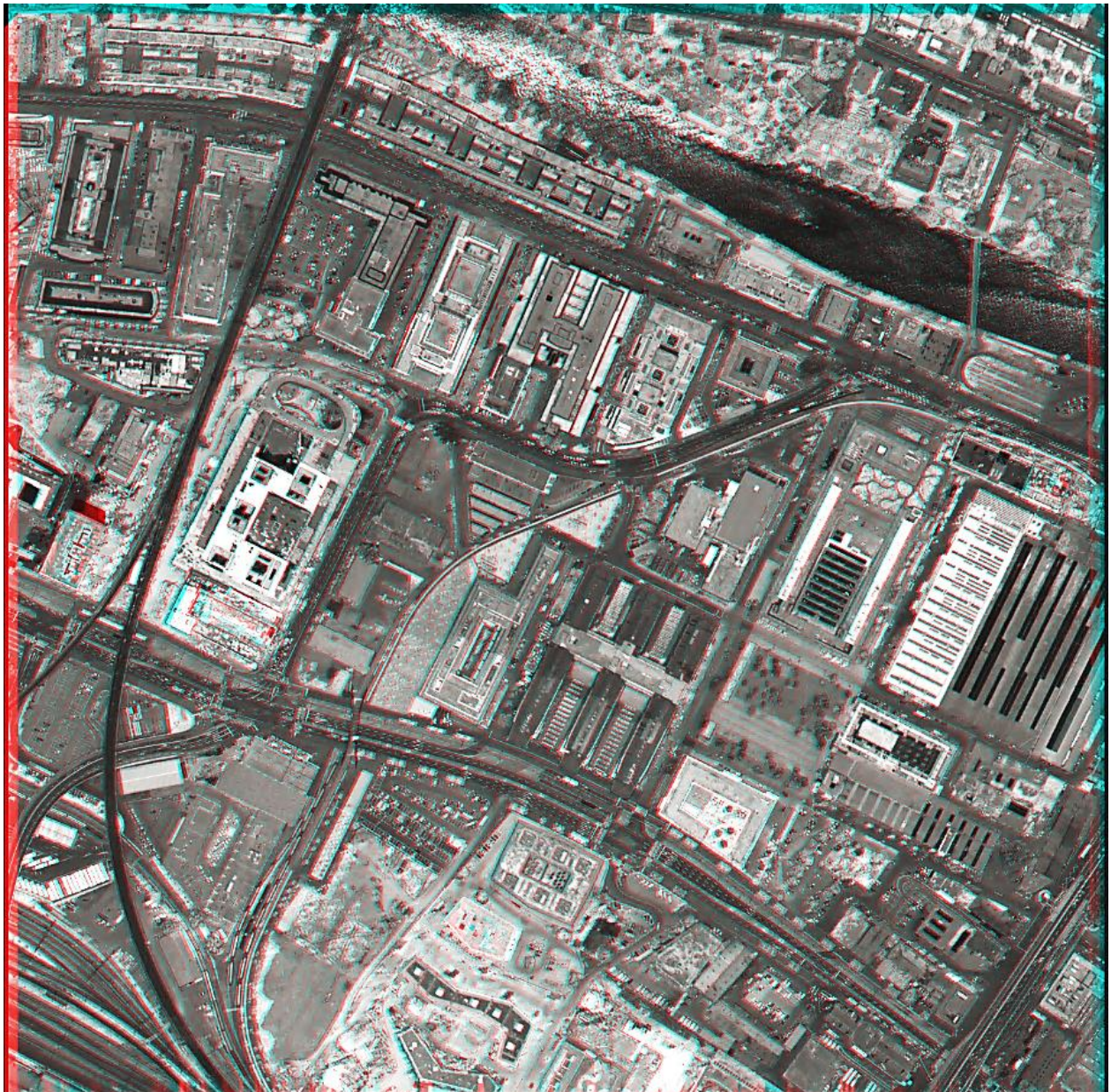
Η παραγωγή των στερεομοντέλων έντασης πραγματοποιήθηκε με βάση το μοντέλο της παράλληλης πλάγιας προβολής. Απαραίτητη αρχική υπόθεση πρέπει να πραγματοποιηθεί για τον λόγο B/H , ο οποίος ισούται με την εφαπτομένη της γωνίας υπό την οποία πραγματοποιείται η πλάγια παράλληλη προβολή, εισάγοντας την τεχνητή x -παράλλαξη στην stereomate εικόνα έντασης. Υποθέτοντας τιμή λόγου ίση με 0,3 (§2.3) υπολογίζεται τιμή γωνίας προβολής περίπου ίση με $18,5^\circ$. Η πλάγια προβολή μπορεί να εισαχθεί εξ ολοκλήρου στη νέα stereomate εικόνα έντασης, η οποία σε συνδυασμό με την αρχική να δημιουργήσει το επιθυμητό στερεομοντέλο. Για μείωση των παραμορφώσεων λόγω πλάγιας προβολής, καθώς το ανάγλυφο της περιοχής εργασίας είναι έντονο λόγω των υψηλών κτιρίων, επιλέγεται η εισαγωγή της παράλλαξης με επιμερισμό σε δύο νέες απεικονίσεις. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με δύο διαδοχικές πλάγιες παράλληλες προβολές της αρχικής εικόνας έντασης, υπό γωνία ίση με το ήμισυ ($9,25^\circ$) της αρχικά υπολογιζόμενης. Το αποτέλεσμα είναι δύο νέες εικόνες πλάγιας προβολής, με μικρότερες παραμορφώσεις, ο συνδυασμός των οποίων συνθέτει το επιθυμητό στερεομοντέλο έντασης.



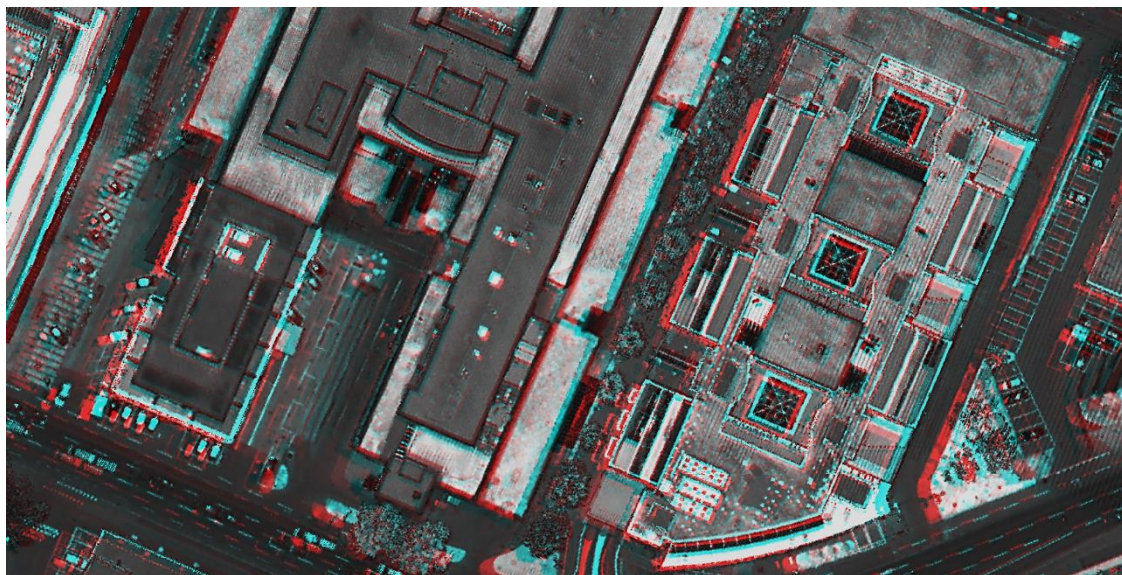
Εικόνα 4-8: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας πλάγιας παράλληλης προβολής με εισαγωγή τεχνητής παράλλαξης εξ ολοκλήρου στην stereomate εικόνα

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε παράγωγη εικόνα έντασης από τα διαδοχικά αραιότερα νέφη σημείων και τελικώς λαμβάνονται τρία στερεομοντέλα έντασης, με διαφορετικό βαθμό ευκρίνειας ως αναμενόμενο. Από την οπτική εποπτεία των στερεομοντέλων αυτών σε συνθήκες 3D παρατήρησης, παρατηρείται ότι στα προερχόμενα από τα νέφη σημείων πυκνότητας $55 \text{ σημ}/\text{m}^2$ και $25 \text{ σημ}/\text{m}^2$, είναι εφικτός ο λεπτομερής προσδιορισμός των ορίων των αντικειμένων, ενώ το επίπεδο αναγνωρίσιμης λεπτομέρειας είναι σαφώς υψηλότερο από το αντίστοιχο της μονοσκοπικής παρατήρησης των αντίστοιχων εικόνων έντασης. Η δυνατότητα φωτοερμηνείας είναι σαφώς μειωμένη στο στερεομοντέλο του νέφους σημείων πυκνότητας $7 \text{ σημ}/\text{m}^2$, επί του οποίου παρατηρείται «σκληρή υφή» στις απεικονιζόμενες επιφάνειες. Το μοντέλο φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερο θόρυβο στα μεγάλα επίπεδα μεγέθυνσης τα οποία απαιτούνται για την ψηφιοποίηση των ορίων

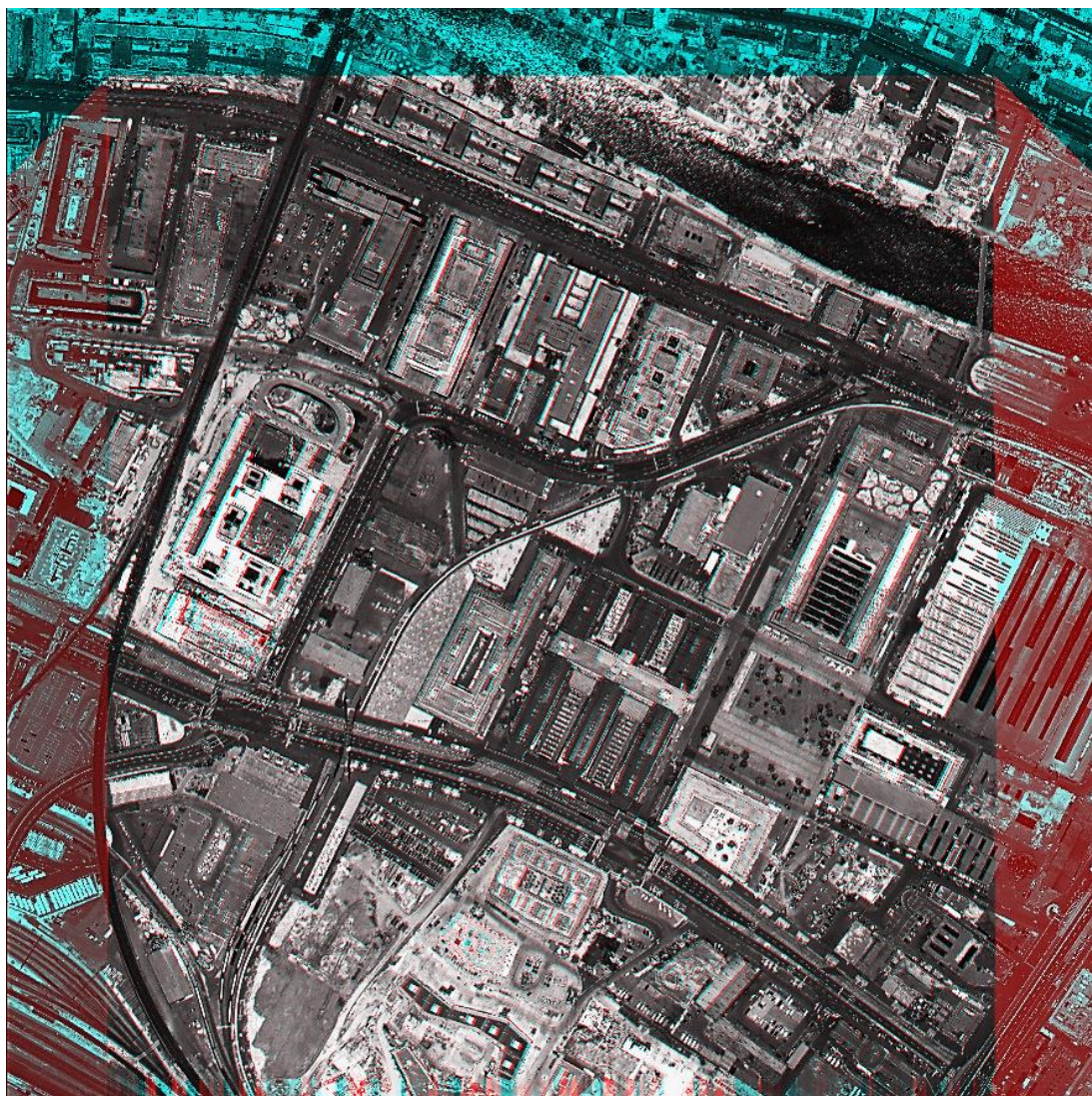
των κτιρίων και των λεπτομερειών αυτών. Εντούτοις, η δυνατότητα αναγνώρισης και εκτίμησης της θέσης των ακμών είναι σαφώς ανώτερη από την αντίστοιχη της μονοσκοπικής παρατήρησης και κρίνεται οριακά επαρκής για το σκοπό της παρούσης.



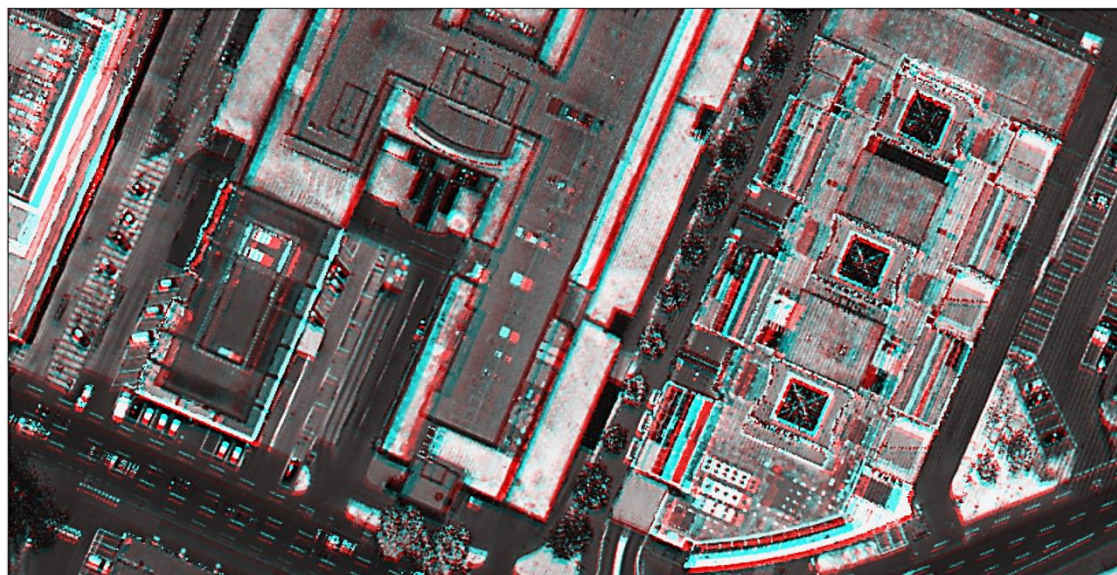
Εικόνα 4-9: Στερεομοντέλο νέφους πυκνότητας 55 σημ/m²
(χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)



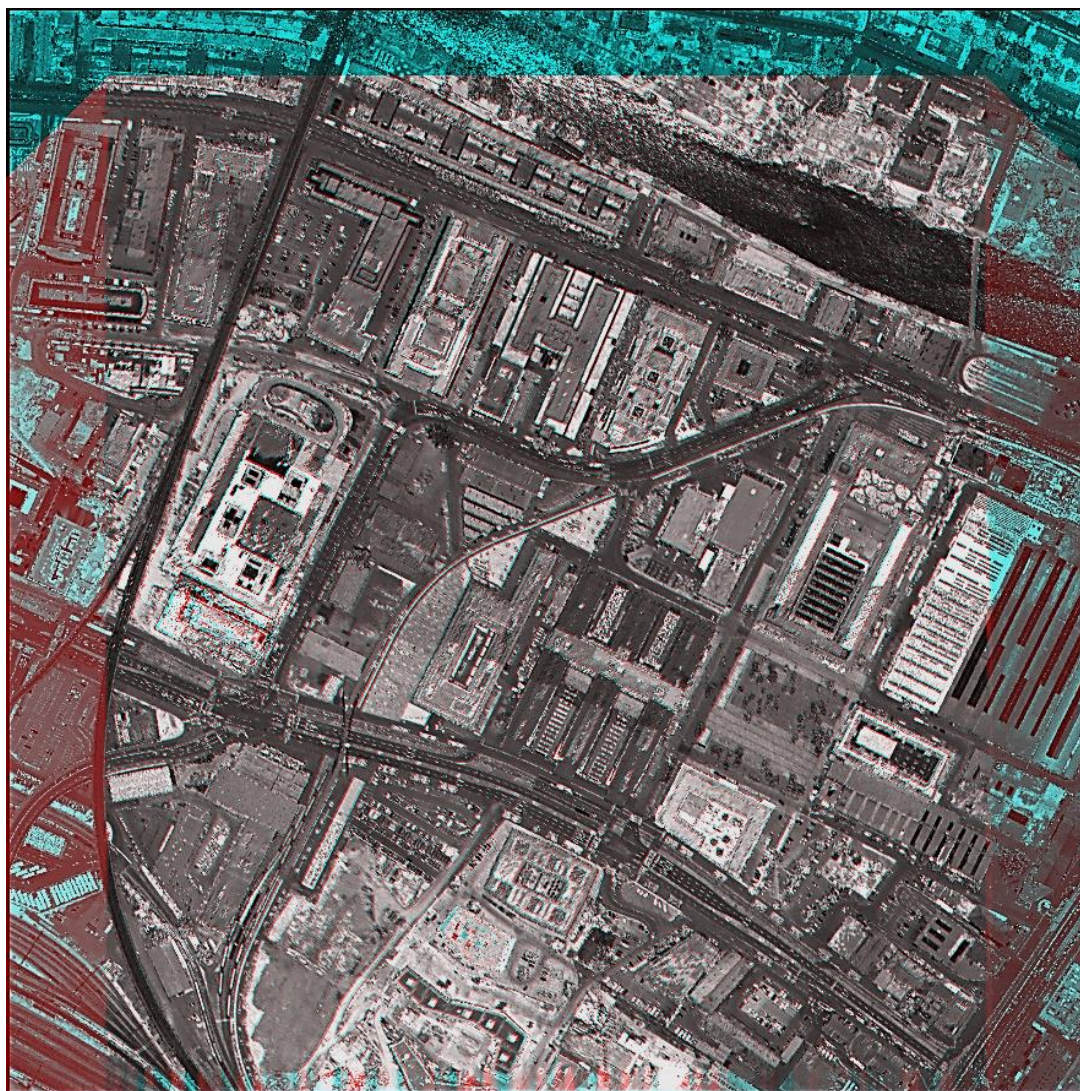
Εικόνα 4-10: Λεπτομέρεια στερεομοντέλου νέφους πυκνότητας 55 σημ/μ²
(χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)



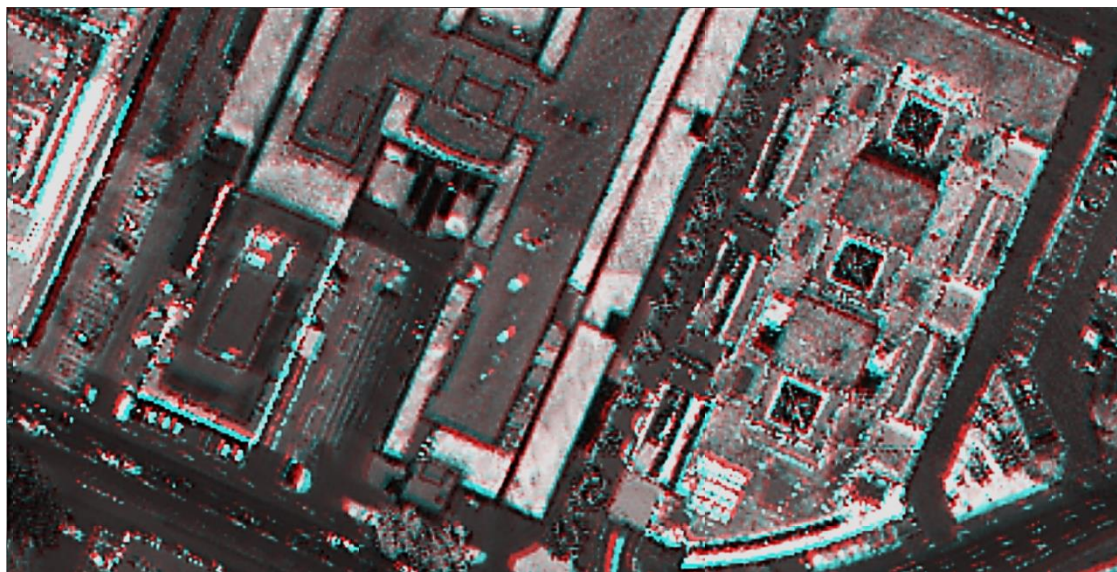
Εικόνα 4-11: Στερεομοντέλο νέφους πυκνότητας 25 σημ/μ² (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)



Εικόνα 4-12: Λεπτομέρεια στερεομοντέλου νέφους πυκνότητας 25 σημ/μ²
(χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)



Εικόνα 4-13: Στερεομοντέλο νέφους πυκνότητας 7 σημ/μ² (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)



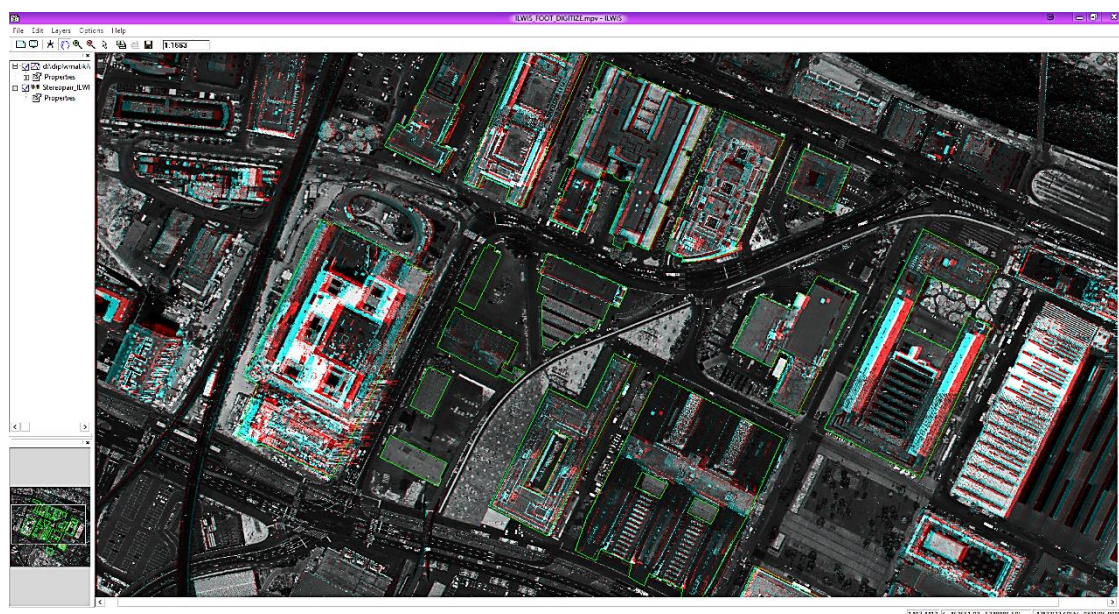
Εικόνα 4-14: Λεπτομέρεια στερεομοντέλου νέφους πυκνότητας 7 σημ/μ²
(χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)

4.7 Εξαγωγή ιχνών κτιρίων

Τα ίχνη 17 κτιρίων στο κεντρικό τμήμα της περιοχής εργασίας, ψηφιοποιήθηκαν σε 3D περιβάλλον, από καθένα από τα τρία στερεομοντέλα έντασης, καθώς και από το φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο. Κύριο μέλημα της διαδικασίας ήταν η ψηφιοποίηση, κατά το δυνατόν, των ίδιων λεπτομερειών των περιγραμμάτων προκειμένου οι οποίες εμφανιζόμενες οριζοντιογραφικές μεταθέσεις μεταξύ τους να οφείλονται μόνο σε σφάλματα ερμηνείας των ορίων, λόγω της φύσης των στερεομοντέλων έντασης και της μειούμενης ευκρίνειας των αντίστοιχων προερχόμενων από αραιότερα νέφη. Για αποφυγή επηρεασμού της διαδικασίας λόγω γνωσιακών τάσεων (cognitive biases), τα ίχνη από κάθε στερεομοντέλο ψηφιοποιήθηκαν από μηδενική βάση κάθε φορά, χωρίς την ταυτόχρονη απεικόνιση των ήδη υπαρχόντων ιχνών ή των αντίστοιχων από το φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει την αντικειμενικότητα της απόδοσης, και ταυτόχρονα καθιστά δυνατή την δημιουργία λαθών στην επιλογή αντικειμένων και ψηφιοποίηση των ορίων τους, λόγω ασαφούς βαθμού ενάργειας του στερεομοντέλου. Η δεκτικότητα σε λανθασμένη ψηφιοποίηση είναι επιθυμητή, καθώς οι τελικές διαφοροποιήσεις των ιχνών που αποδίδονται θα αναδείξουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας και θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

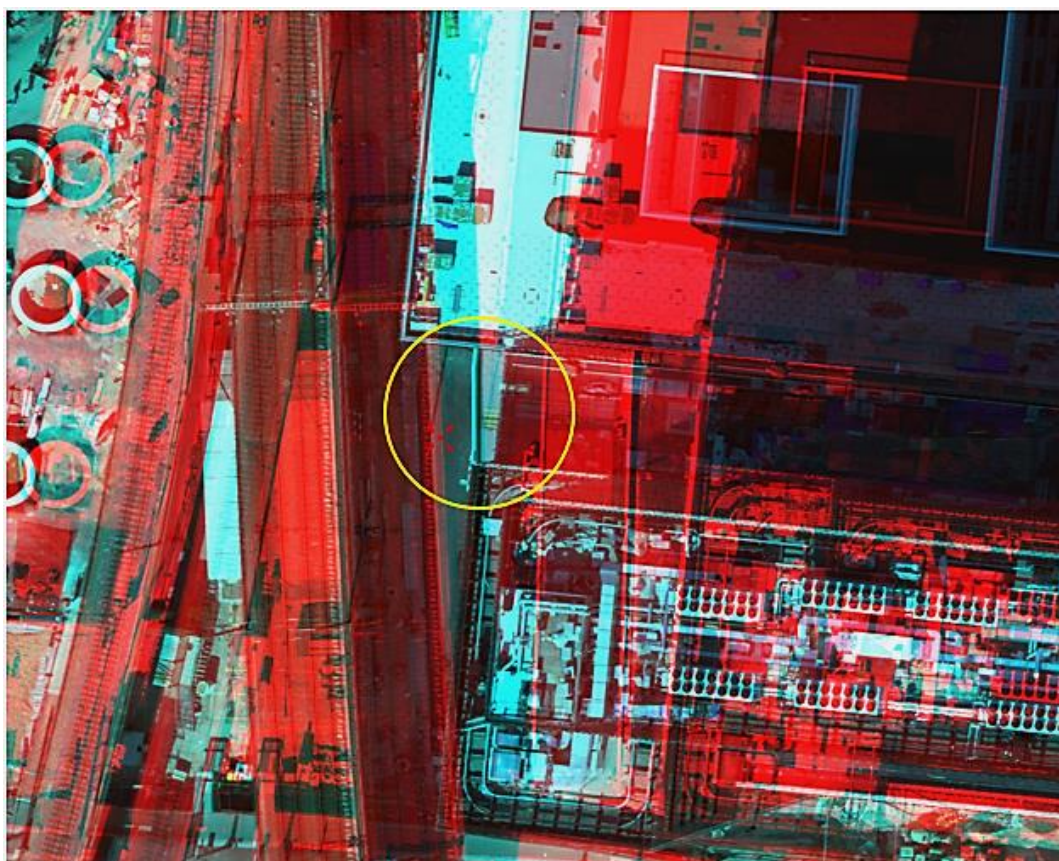
Το γενικό ίχνος του κάθε κτιρίου, σχηματίστηκε από την εξώτατη γραμμή η οποία προβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένων των εξοχών των οροφών, όπως μαρκίζες, γείσα κ.α. Ο βαθμός της αποδιδόμενης λεπτομέρειας καταβλήθηκε προσπάθεια να είναι ο μέγιστος δυνατός, ώστε να είναι εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την καταλληλότητα των δεδομένων σε σχέση με όλες τις πιθανές κλίμακες απόδοσης αντίστοιχων φωτογραμμετρικών διαγραμμάτων. Η αναγνώριση των ορίων των ακμών, καθώς και των λεπτομερειών θλάσης αυτών κατέστη σε γενικές γραμμές άνετη στα δύο υψηλότερης ευκρίνειας στερεομοντέλα, με ασήμαντες

διαφοροποιήσεις να εντοπίζονται μεταξύ τους. Σε αντίθεση, η εκτίμηση των ορίων ορισμένων ακμών κατέστη δυσκολότερη στο χαμηλότερης ανάλυσης στερομοντέλο, ιδιαίτερα κατά την απόδοση μικρών λεπτομερειών σε μεγάλη μεγέθυνση.

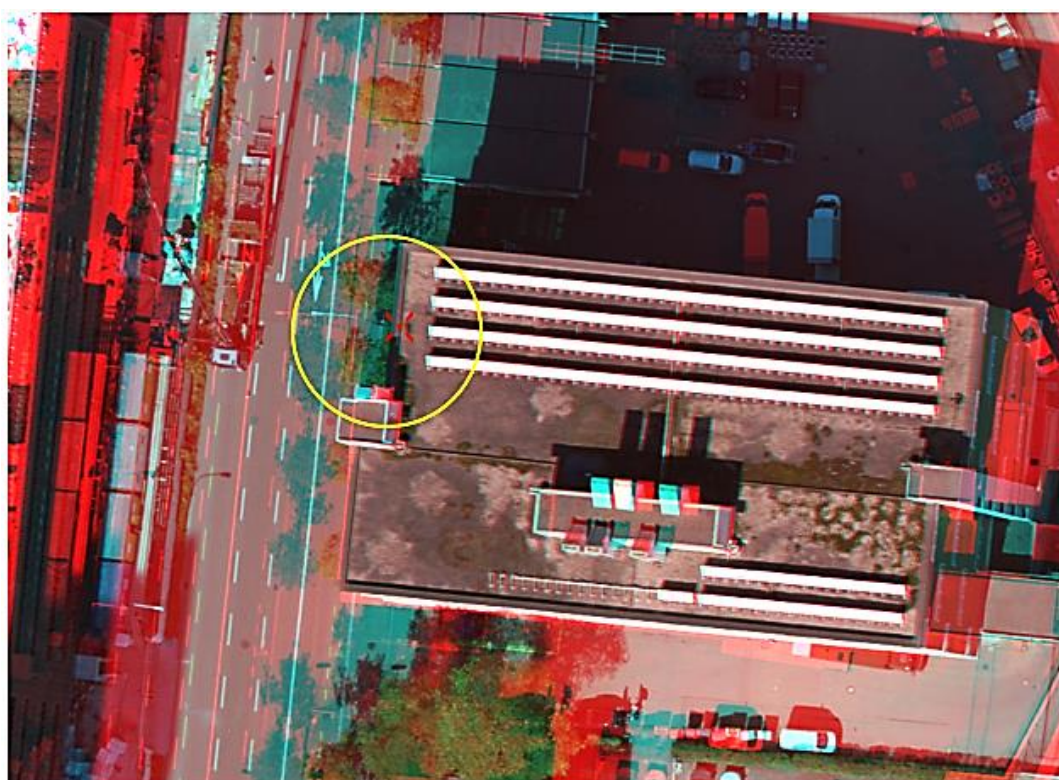


Εικόνα 4-15: Απόδοση ιχνών κτιρίων από το στερομοντέλο έντασης νέφους 55σημ/μ² (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)

Ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα της απόδοσης από δεδομένα έντασης, διαφάνηκε πως είναι το γεγονός της απουσίας αποκρύψεων αντικειμένων, λόγω των μηδενικών εκτροπών αναγλύφου, αλλά και λόγω της μη εμφάνισης σκιάσεων οφειλόμενων στην γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτισμού. Οι δύο αυτοί παράγοντες αποκρύψεων, συνιστούν τυπικά και πολύ συχνά προβλήματα κατά την απόδοση διανυσματικών δεδομένων από κλασικά οπτικά φωτογραμμετρικά μοντέλα, ιδιαίτερα όταν η περιοχή περιλαμβάνει έντονο αστικό ιστό και η κλίμακα απόδοσης είναι μεγάλη. Η χρήση ενός ενεργητικού δέκτη όπως ο σαρωτής LiDAR αλλά και η φύση των παραγόμενων εικόνων έντασης, που φέρουν τις γεωμετρικές ιδιότητες μιας αληθούς ορθοφωτογραφίας, αποτελούν μια διέξοδο στο εν λόγω πρόβλημα και κατατάσσονται στα τυπικά πλεονεκτήματα του συστήματος. Ενδεικτικά παρουσιάζονται δύο εκ των περιπτώσεων αποκρύψεων στο φωτογραμμετρικό μοντέλο, στις οποίες κατέστη αδύνατη η ψηφιοποίηση του ακριβούς ίχνους των κτιρίων. Η πρώτη περίπτωση αφορά παρακείμενο, σε υψηλή πλευρά κτιρίου, τοίχιο (εικ. 4-16), η απόδοση του οποίου ήταν απαραίτητη για την δημιουργία του εξώτατου ίχνους, αλλά το συγκριτικά με την παρακείμενη πλευρά του κτιρίου χαμηλότερο επίπεδο του, οδήγησε στην πλήρη σχεδόν απόκρυψή του. Κατά τον τρόπο αυτό, η ψηφιοποίησή του δεν ήταν δυνατή και πραγματοποιήθηκε σχηματισμός του ίχνους μόνο από το διαφαινόμενο τμήμα του, το οποίο και ήταν αναγνωρίσιμο από το χειριστή. Στη δεύτερη περίπτωση (εικ 4-17), η πλάγια όψη του φωτογραμμετρικού στερομοντέλου συντέλεσε στην εξ ολοκλήρου απόκρυψη τμήματος κτιρίου, το οποίο κείται σε χαμηλότερο επίπεδο από την οροφή.



Εικόνα 4-16: Απόκρυψη τοιχίου από παρακείμενη πλευρά του κτιρίου στο φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)

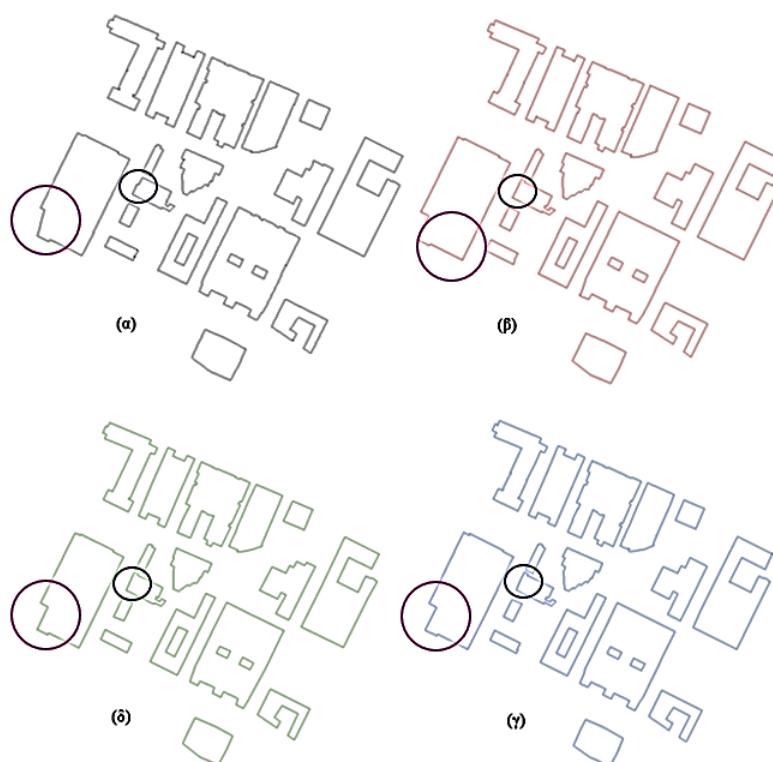


Εικόνα 4-17: Απόκρυψη τμήματος κτιρίου ευρισκόμενο σε χαμηλότερο επίπεδο από την οροφή (χρήση γυαλιών anaglyph για παρατήρηση)

4.8 Ακρίβεια ιχνών από Lidargrammetry – Συμπεράσματα

Τα τελικώς εξαγόμενα ίχνη των 17 επιλεγέντων κτιρίων, αποτελούν τη βάση της ανάλυσης για την εξαγωγή συμπερασμάτων περί της αποτελεσματικότητας της μεθόδου Lidargrammetry για τη συλλογή γεωχωρικής πληροφορίας μέσω 3d παρατήρησης δεδομένων έντασης από συστήματα LiDAR. Η ανάλυση αφορά, σε πρώτο στάδιο, την σύγκριση μεταξύ των ιχνών των υπόψη κτιρίων, εξαγόμενων από τα στερεομοντέλα διαφορετικής πυκνότητας, προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός καταλληλότητας αυτών για τις διάφορες κλίμακες απόδοσης. Οι αποκλίσεις μεταξύ των ιχνών από το κάθε στερεομοντέλο έντασης αναμένεται να ποσοτικοποιούν την μειούμενη δυνατότητα ακριβούς ερμηνείας των ακμών και λεπτομερειών των υπό εξέταση κτιρίων, λόγω της αντίστοιχα μειούμενης ενάργειας των μοντέλων από την μικρότερη κάθε φορά πυκνότητα του νέφους σημείων. Σε δεύτερο στάδιο, η σύγκριση των Lidargrammetry ιχνών με τα αντίστοιχα φωτογραμμετρικά, θεωρούμενα και ως αληθή, δύναται να προσδιορίσει την απόλυτη ακρίβεια αυτών καθώς και το βαθμό καταλληλότητας των για χρήση σε διαγράμματα ή χαρτογραφικά προϊόντα.

Τα τελικώς εξαγόμενα ίχνη κτιρίων, παρατίθενται για γενική οπτική σύγκριση (εικ. 4-18), με την γενική τους εικόνα να μην παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις, πλην των περιπτώσεων ύπαρξης αποκρύψεων στο φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο

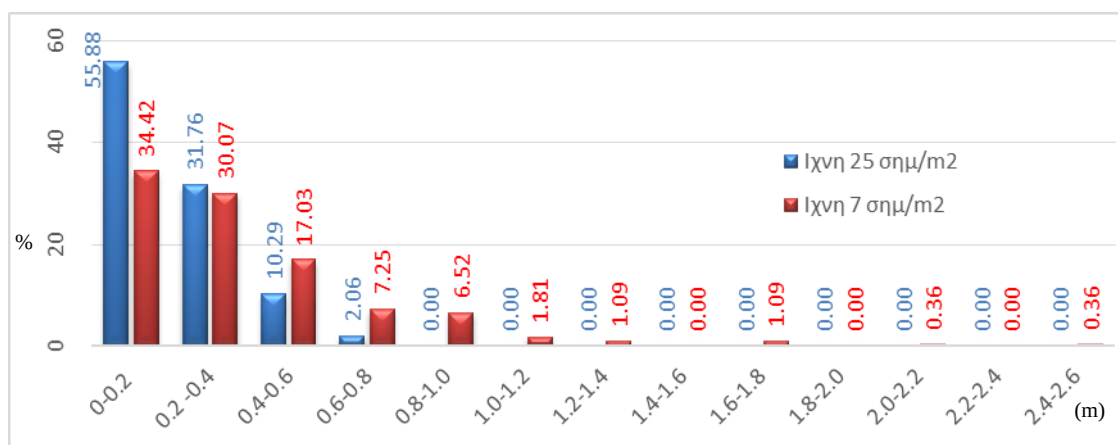


Εικόνα 4-18: Τα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων και οι οπτικά αναγνωρίσιμες διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών
 (α) φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο
 (β) στερεομοντέλο έντασης από νέφος 55 σημ/μ²
 (γ) στερεομοντέλο έντασης από νέφος 25 σημ/μ²
 (δ) στερεομοντέλο έντασης από νέφος 7 σημ/μ²

Για την εκτέλεση της ανάλυσης εγγύτητας μεταξύ των Lidargrammetry ίχνων κτιρίων, θεωρείται ως βασικό dataset τα ίχνη των στερεομοντέλων πυκνότητας 55 σημ/μ², καθώς αναμένεται να παρουσιάζει τον υψηλότερο βαθμό ευκρίνειας και συνεπώς την πιστότερη, εκ των τριών, αποτύπωση των κτιριακών ίχνων, πάντα υπό την παραδοχή της ανεξάρτητης ψηφιοποίησης από το χειριστή. Υπολογίστηκαν οι οριζοντιογραφικές μεταθέσεις μεταξύ των κόμβων των γραμμών, οι οποίες παρουσιάζονται (πίν. 4-4) μεταξύ του βασικού dataset και των λοιπών ίχνων (25 σημ/μ² και 7 σημ/μ²). Παράλληλα, για τη πληρέστερη εξαγωγή αντιπροσωπευτικότερων συμπερασμάτων, υπολογίστηκε η ποσοστιαία κατανομή των οριζοντιογραφικών μεταθέσεων οι οποίες συγκεντρώνονται στο διάγραμμα 4-1.

	Ελάχιστη μετάθεση (m)	Μέγιστη μετάθεση (m)	Μέση μετάθεση (m)
Ίχνη 55 σημ/μ ² - Ίχνη 25σημ/μ ²	0.00	0.69	0.20 ± 0.15
Ίχνη 55 σημ/μ ² - Ίχνη 7 σημ/μ ²	0.00	2,58	0.38 ± 0.35

Πίνακας 4-4: Συγκριτική θεώρηση μεταξύ ίχνων κτιρίων εξαγόμενα από στερεομοντέλα έντασης από νέφη σημείων διαφορετικής πυκνότητας



Διάγραμμα 4-1: Ποσοστιαία κατανομή αποκλίσεων των κόμβων ίχνων κτιρίων μεταξύ των στερεομοντέλων έντασης

Αποδελτιώνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης εγγύτητας, παρατηρείται ότι, κατά μέσο όρο, η μειούμενη ενάργεια των στερεομοντέλων δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στα παραγόμενα ίχνη κτιρίων. Οι μέσες σχετικές οριζοντιογραφικές μεταθέσεις μεταξύ αυτών, υπολογίζονται στην τάξη των λίγων δεκάδων εκατοστών, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, κατά γενική εκτίμηση, τα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων από αραιά νέφη μπορούν να παρουσιάζουν ικανό βαθμό αξιοπιστίας σε σχέση με τα αντίστοιχα πυκνότερων νεφών. Η μειούμενη φωτοερμηνευτική ικανότητα, παρόλο που εμφανίζεται αντιληπτή στο χαμηλότερης ευκρίνειας στερεομοντέλο, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερης κλίμακας μεταβολές στην οριζοντιογραφική ποιότητα των αποδιδόμενων δεδομένων. Το γεγονός αυτό, εκτιμάται ότι οφείλεται στην ικανή εναπομείνασα ενάργεια του μοντέλου, αλλά και στην ιδιαίτερα πλεονεκτική

στερεοπαρατήρηση την οποία οι σύγχρονοι ψηφιακοί φωτογραμμετρικοί σταθμοί προσφέρουν.

Εν τούτοις, οι υπολογιζόμενες μέγιστες μεταθέσεις δείχνουν να αυξάνονται σημαντικά με την μείωση της πυκνότητας του αρχικού νέφους σημείων προσεγγίζοντας τα 2,6 m περίπου, για το χαμηλότερης ευκρίνειας στερεομοντέλο. Από τη μελέτη της κατανομής των οριζοντιογραφικών μεταθέσεων (διάγραμμα 4-1) διαφαίνεται ότι οι μέγιστες μεταθέσεις (0,69 m) των ιχνών του στερεομοντέλου έντασης από νέφος 25 σημ/m², εμφανίζονται στο 2% περίπου των κόμβων των ιχνών, ενώ σε ποσοστό περίπου 98% περιορίζονται σε λιγότερο από 0,6 m. Κατά όμοιο τρόπο, οι μέγιστες μεταθέσεις (2,58 m) των ιχνών του στερεομοντέλου έντασης από νέφος 7 σημ/m², εμφανίζονται σε ποσοστό 0,36% του συνολικού αριθμού των κόμβων, ενώ σε ποσοστό περίπου 97% βρίσκονται να είναι μικρότερες των 1,2 m (διπλάσιο του στερεομοντέλου των 25 σημ/m²). Το ιδιαίτερα μικρό ποσοστό εμφάνισης των μέγιστων οριζοντιογραφικών μεταθέσεων για το χαμηλότερης ευκρίνειας στερεομοντέλο, δείχνει ότι αυτές παρουσιάζουν καθαρά τοπικό και τυχαίο χαρακτήρα, σε συγκλίσεις ακμών σύνθετων κτιρίων (γωνίες), οι οποίες εμφανίζονται ασαφείς όσον αφορά τον ακριβή προσδιορισμό τους. Αποτελεί μια εν δυνάμει αδυναμία των δεδομένων LiDAR χαμηλής πυκνότητας, η οποία όμως δεν παρουσιάζει γενικότητα, αλλά μάλλον μεμονωμένο χαρακτήρα.

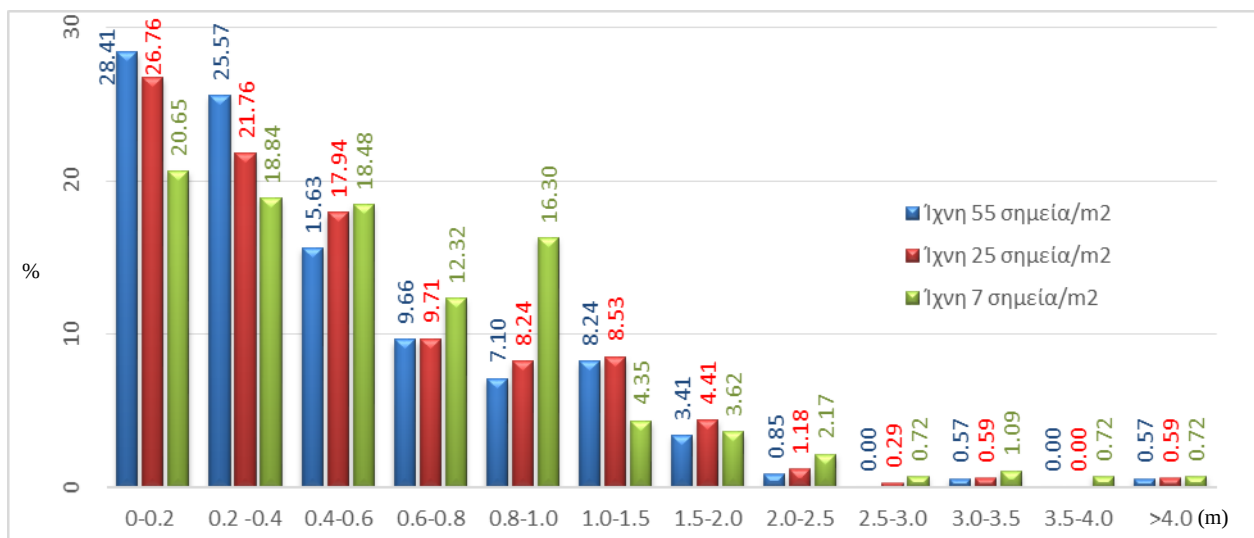
Σε δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση εγγύτητας μεταξύ των ιχνών κτιρίων από τα στερεομοντέλα έντασης και των αντίστοιχων φωτογραμμετρικών, τα οποία θεωρούνται και αληθή. Υπολογίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη των οριζοντιογραφικών μεταθέσεων των κόμβων των γραμμών των φωτογραμμετρικών ιχνών, από τις αντίστοιχες γραμμές των Lidargrammetry ιχνών (πιν. 4-5), καθώς και το ιστόγραμμα των ποσοστιαίων αποκλίσεων αυτών (διαγ. 4-2), για την πληρέστερη εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου.

	Ελάχιστη μετάθεση (m)	Μέγιστη μετάθεση (m)	Μέση μετάθεση (m)
Ίχνη 55 σημ/m ²	0.00	7.15	0.49 ± 0.54
Ίχνη 25 σημ/m ²	0.00	7.59	0.55 ± 0.65
Ίχνη 7 σημ/m ²	0.00	7.86	0.64 ± 0.72

Πίνακας 4-5: Συγκριτική θεώρηση μεταξύ ιχνών κτιρίων από στερεομοντέλα έντασης για νέφη σημείων διαφορετικής πυκνότητας και αντίστοιχων φωτογραμμετρικών ιχνών.

Οι μέσες μεταθέσεις των ιχνών Lidargrammetry κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα (μερικές δεκάδες εκατοστά) και αυξάνονται με την μείωση της ευκρίνειας του μοντέλου. Το γεγονός κρίνεται αναμενόμενο, ενώ οι τιμές των μέσων αποκλίσεων επιδεικνύουν υψηλό βαθμό αποτελεσματικότητας της μεθόδου εξαγωγής ιχνών κτιρίων μέσω 3d παρατήρησης στερεομοντέλων έντασης. Οι μέγιστες, παρόλα αυτά, μεταθέσεις, στην περίπτωση αυτή φαίνεται να παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές και με ανάλυση του ιστογράμματος κατανομής αυτών, προκύπτει ότι εμφανίζονται σε

πολύ μικρό ποσοστό του συνόλου των κόμβων των κτιριακών ιχνών (0,57%, 0,59% και 0,72%), γεγονός που δείχνει την ύπαρξη χονδροειδούς λάθους κατά την διαδικασία της ψηφιοποίησης.



Διάγραμμα 4-2: Ποσοστιαία κατανομή αποκλίσεων των κόμβων ιχνών κτιρίων μεταξύ των στερεομοντέλων έντασης και του φωτογραμμετρικού στερεομοντέλου

Ύστερα από ενδελεχή έλεγχο των δεδομένων, για τον εντοπισμό των σημείων μέγιστων μεταθέσεων, προέκυψαν οι περιπτώσεις της αδυναμίας ψηφιοποίησης ορισμένων ιχνών κτιρίων στο φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο λόγω αποκρύψεων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην §4.7. Το τελικό αποτέλεσμα των αποκρύψεων, καθώς και μια περίπτωση εσφαλμένης εκτίμησης του ίχνους στα στερεομοντέλα έντασης, επιδεικνύονται στην εικ. 4-19



Εικόνα 4-19: Μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ ιχνών στερεομοντέλου 55σημ/μ² (κόκκινο) και φωτογραμμετρικών ιχνών (μαύρο).

(α) Απόκρυψη τοιχίου στο φωτογραμμετρικό μοντέλο

(β) Απόκρυψη τμήματος του κτιρίου στο φωτογραμμετρικό μοντέλο

(γ) Εσφαλμένη εκτίμηση ορίου κτιρίου στο στερεομοντέλο έντασης

Προς χάριν εξαγωγής μιας λεπτομερέστερης εκτίμησης, υπολογίζονται από το διάγραμμα 4-2, οι αθροιστικές κατανομές των ποσοστιαίων αποκλίσεων μεταξύ των ιχνών. Τα ίχνη από το στερεομοντέλο νέφους 55σημ/m² παρουσιάζουν αθροιστική απόκλιση μικρότερη του 1,5 m σε ποσοστό 94,60% του συνολικού αριθμού των κόμβων των γραμμών, ενώ ο αντίστοιχος για τα ίχνη 25σημ/m² και 7σημ/m² είναι 92,94% και 90,94% (πιν. 4-6). Από την υπόψη αθροιστική κατανομή, κρίνεται ότι τα ίχνη κτιρίων, εξαγόμενα με την τεχνική Lidargrammetry, από ένα καλά βαθμονομημένο σύστημα και με προσεκτικές διαδικασίες QA/QC κατά τα στάδια συλλογής και επεξεργασίας, είναι κατάλληλα για χρήση σε τοπογραφικά διαγράμματα κλίμακας 1:5.000. Ο βαθμός αξιοπιστίας τους κρίνεται υψηλός, δεδομένου ότι σε ποσοστό πάνω από 90%, πληρούν την αντίστοιχη απαιτούμενη ακρίβεια (1,25m).

Απόκλιση (m)	Αθροιστική κατανομή ποσοστιαίων αποκλίσεων (%)		
	Ίχνη 55 σημ/m ²	Ίχνη 20 σημ/m ²	Ίχνη 5 σημ/m ²
0 – 0,2	28.41	26.76	20.65
0,2 – 0,4	53.98	48.53	39.49
0,4 – 0,6	69.60	66.47	57.97
0,6 – 0,8	79.26	76.18	70.29
0,8 – 1,0	86.36	84.41	86.59
1,0 – 1,5	94.60	92.94	90.94

Πίνακας 4-6: Αθροιστικές κατανομές ποσοστιαίων αποκλίσεων μεταξύ φωτογραμμετρικών και Lidargrammetry ιχνών

Πρέπει να αναφερθεί, ότι το σύνολο της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε στην βάση της παραδοχής ότι το διαθέσιμο φωτογραμμετρικό στερεομοντέλο αποδίδει τα ίχνη ακριβέστερα ως προς τη θέση, λόγω της καλύτερης ευκρίνειας που παρουσιάζει σε σχέση με τα στερεομοντέλα έντασης, αλλά και λόγω της ευκολότερα ελέγξιμης από πλευράς σφαλμάτων ποιότητάς του. Γενικά για ένα καλά βαθμονομημένο σύστημα (ψηφιακή κάμερα, σύστημα GNSS και σύστημα INS αν πρόκειται για pushbroom), τα αντίστοιχα σφάλματα εσωτερικού προσανατολισμού εμφανίζονται αμελητέα, ενώ τα τελικώς συσσωρευόμενα σφάλματα, που επηρεάζουν την ακρίβεια του στερεομοντέλου είναι η ακρίβεια σκόπευσης των σημείων σύνδεσης και των φωτοσταθερών, καθώς και η ακρίβεια μέτρησης των φωτοσταθερών. Οι πηγές αυτές σφαλμάτων είναι εύκολα ελέγξιμες και με προσεκτική εργασία το στερεομοντέλο μπορεί να παρουσιάζει δυνατότητα υποψηφιδικής ακρίβειας σκόπευσης, για έναν έμπειρο χειριστή.

Η οριζοντιογραφική ακρίβεια των δεδομένων LiDAR, μπορεί να διασφαλιστεί σε μεγάλο βαθμό με προσεκτικό σχεδιασμό της αποστολής σάρωσης και κατάλληλες διαδικασίες QA όπως βέλτιστες βάσεις επίλυσης για το σύστημα GNSS, πολύ καλή βαθμονόμηση του συστήματος LiDAR, ενδελεχή μελέτη των συνθηκών στην περιοχή σάρωσης κ.α. Παράλληλα, μετά την αποστολή σάρωσης, διαδικασίες QC είναι απαραίτητο να ακολουθηθούν προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός στον οποίο επετεύχθη η επιθυμητή ακρίβεια. Με δεδομένα LiDAR υψηλής ποιότητας,

διασφαλίζεται ότι τα παραγόμενα προϊόντα θα είναι επίσης αντίστοιχης ποιότητας, δεδομένου ότι οι διαδικασίες παραγωγής είναι κατά το μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποιημένες, εκμηδενίζοντας την εισαγωγή επιπλέον σφαλμάτων λόγω ανθρώπινου χειρισμού. Η όλη διαδικασία είναι αρκετά πιο σύνθετη από την αντίστοιχη μιας τυπικής φωτογραμμετρικής εργασίας όπου το μεγαλύτερο μέρος των σφαλμάτων στα τελικά παράγωγα υπεισέρχεται κατά τη διαδικασία παραγωγής αυτών στον φωτογραμμετρικό σταθμό εργασίας. Συνεπώς είναι κατανοητό, ότι μη δίνοντας έμφαση στις διαδικασίες παραγωγής υψηλής ποιότητας αρχικών δεδομένων LiDAR, τα μετέπειτα εξαγόμενα γεωχωρικά δεδομένα (raster παράγωγα, DSM, DTM, διανυσματικά δεδομένα από απόδοση Lidargrammetry κ.α.) θα παρουσιάζουν αντίστοιχα μειωμένη ποιότητα ως προς την απόλυτη θέση τους.

Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι η τεχνική Lidargrammetry, για την απόδοση γεωχωρικών δεδομένων μέσω περιβάλλοντος στερεοσκοπικής παρατήρησης, αποτελεί μια χρήσιμη πρόσθετη διαδικασία εκμετάλλευσης, η οποία αυξάνει την αξία των a priori ποιοτικών δεδομένων LiDAR. Κύριο πλεονέκτημά της είναι ο μικρός χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή δεδομένων, ο οποίος εμφανίζεται σημαντικά λιγότερος από τον αντίστοιχα απαιτούμενο για την πραγματοποίηση μιας τυπικής φωτογραμμετρικής απόδοσης. Παράλληλα, η δυνατότητα εξαγωγής διανυσματικών δεδομένων από LiDAR dataset, παρέχει μια ολοκληρωμένη πρόταση βελτιστοποίησης της αξίας του συστήματος, σε όρους κόστους-απόδοσης και οικονομικότητας, γεγονός που αποτελεί σημαντική παράμετρο των γεωχωρικών εφαρμογών του μηχανικού στην σύγχρονη εποχή των περιορισμένων οικονομικών πόρων. Σε κάθε περίπτωση, η μεθοδολογία Lidargrammetry δεν αντικαθιστά τις τυπικές φωτογραμμετρικές διαδικασίες, αλλά αποτελεί ένα πρόσθετο εργαλείο, στη βάση της συνέργειας LiDAR και φωτογραμμετρίας, για την βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών και την εκμετάλλευση των καλύτερων και αποδοτικότερων στοιχείων από τις δύο αυτές τεχνικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Πειραματική εφαρμογή αυτοματοποιημένης ανίχνευσης και εξαγωγής ιχνών κτιρίων

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η ανάπτυξη φίλτρων αυτόματης κατάτμησης δεδομένων LiDAR, για την ανίχνευση των ιχνών κτιρίων. Σύμφωνα και με τα όσα αναλύθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο της παρούσης, οι αυτοματοποιημένες μέθοδοι για την ανίχνευση κτιρίων μπορούν να παρουσιάζουν πολλές παραλλαγές, αλλά και να αφορούν διαφορετικές κάθε φορά προσεγγίσεις, αναλόγως του επιθυμητού αποτελέσματος και της φύσης των αρχικών δεδομένων LiDAR. Εκλεπτυσμένες προσεγγίσεις, που επιδιώκουν την ανεξάρτητη εξαγωγή των επιμέρους γεωμετρικών επιφανειών που συνθέτουν κάθε κτίριο, βασίζονται στην εκμετάλλευση των γεωμετρικών ιδιοτήτων αυτών (κλίση, προσανατολισμός κ.α.) προκειμένου εν συνεχεία να είναι εφικτή η πλήρης μοντελοποίηση των κτιρίων σε ψηφιακό περιβάλλον. Ολιστικότερες προσεγγίσεις, που εξετάζουν τα ίχνη των κτιρίων ως τα μοναδιαία αντικείμενα ενδιαφέροντος, επικεντρώνονται στον ορθότερο και πλήρη προσδιορισμό του γενικού περιγράμματος αυτών. Οι δύο αυτές γενικές κατηγορίες, όπως είναι εύκολα αντιληπτό, ικανοποιούν τις απαιτήσεις διαφορετικών εφαρμογών, όπως η κατασκευή λεπτομερών 3d μοντέλων πόλεων και η παρακολούθηση της δόμησης σε προστατευόμενες περιοχές αντίστοιχα.

Οι προσεγγίσεις που αναπτύσσονται στο κεφάλαιο αυτό, αφορούν γενικά τον προσδιορισμό του εξώτατου ίχνους κάθε κτιρίου στην περιοχή εργασίας, με σκοπό την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας τους τόσο ως προς την πληρότητα, όσο και ως προς την ακρίβεια της ανίχνευσης. Ως υπόβαθρο εργασίας χρησιμοποιούνται κατάλληλα διαμορφωμένα μοντέλα επιφανείας (DSM), τα οποία εξάγονται απευθείας από τα δεδομένα LiDAR και τα οποία εσωκλείουν την απαραίτητη υψομετρική πληροφορία για τον διαχωρισμό των οντοτήτων. Τα εν λόγω υπόβαθρα αποτελούν και τη βέλτιστη επιλογή, σύμφωνα και με το σκοπό της εργασίας, ο οποίος επικεντρώνεται στην οριζοντιογραφική προσέγγιση των εξώτατων ιχνών των κτιρίων. Η επιλογή των συγκεκριμένων υποβάθρων ως αρχικά δεδομένα εργασίας, ταξινομεί τους αλγόριθμους που αναπτύσσονται στην κατηγορία των αλγόριθμων που εφαρμόζονται σε raster υπόβαθρα και όχι απευθείας επί της 3d μορφής των δεδομένων LiDAR. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα της ενσωμάτωσης μιας ευρείας γκάμας τεχνικών, οι οποίες προέρχονται από το πεδίο της όρασης υπολογιστών (computer vision) και συγκεκριμένα της αναγνώρισης προτύπων, ενώ είναι καλά εδραιωμένες και

τεκμηριωμένες, από το πλήθος των εφαρμογών σε ηλεκτροπτικές εικόνες έως σήμερα. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν, συνδυάζουν και ενσωματώνουν διαφορετικές τεχνικές προεπεξεργασίας, ανίχνευσης και φιλτραρίσματος των οντοτήτων που εντοπίζονται, οι οποίες λειτουργούν γραμμικά, σε μια εκτέλεση, ενώ εστιάζουν στον διαχωρισμό των κτιρίων από την αστική βλάστηση, η οποία αποτελεί και την πλέον δύσκολη κατηγορία όσο αφορά την δακρυτοποίηση. Η ανίχνευση των ιχνών των κτιρίων πραγματοποιείται με δύο διαφορετικές μεθόδους, για σκοπούς πληρότητας και σύγκρισης αποτελεσμάτων. Η πρώτη προσέγγιση αφορά την απευθείας ανίχνευση των ακμών (edge based) που ορίζουν κάθε κτίριο, επί των προεπεξεργασμένων υποβάθρων, ενώ η δεύτερη προσέγγιση αποδίδει τα ίχνη των κτιρίων μέσω ανίχνευσης των ορίων ομοιογενών περιοχών (area based) που προέρχονται από κατάτμηση του υποβάθρου.

Πραγματοποιήθηκαν αρχικές υποθέσεις εργασίας, στη βάση των οποίων καθορίστηκε το πλαίσιο για την ανάπτυξη των φίλτρων ανίχνευσης. Σκοπός των υποθέσεων αυτών είναι η αποσαφήνιση του στόχου της ανίχνευσης των κτιριακών ιχνών, ο έλεγχος του εύρους ανάπτυξης (δεδομένου του ακαδημαϊκού χαρακτήρα της διπλωματικής εργασίας και των υφιστάμενων χρονικών περιορισμών), καθώς και η εναρμόνιση με τα διαθέσιμα προς εκμετάλλευση δεδομένα. Το βασικό πλαίσιο των υπόψη υποθέσεων εργασίας, είναι το ακόλουθο:

✓ Η λειτουργία των αλγορίθμων πρέπει να βασίζεται εξ ολοκλήρου σε δεδομένα LiDAR και ως αποτέλεσμα δεν ενσωματώνει την χρήση δεδομένων από εξωγενείς πηγές (οπτικές εικόνες, τοπογραφικά διαγράμματα κ.α.). Τα επιπλέον δεδομένα, κρίνεται ότι δεν είναι πάντα διαθέσιμα σε πραγματικές εφαρμογές και ως αποτέλεσμα η ανεξαρτησία λειτουργίας των αναπτυσσόμενων αλγορίθμων κρίνεται αναγκαία. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση τέτοιων εξωγενών δεδομένων δεν είναι απαγορευτική, καθώς με μικρής έκτασης τροποποιήσεις στην μεθοδολογία που αναπτύσσεται (και κυρίως στην προπαρασκευή των υποβάθρων) είναι δυνατή η ενσωμάτωσή τους.

✓ Οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται παρουσιάζουν 2d αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν τα εξώτατα ίχνη των κτιρίων που ανιχνεύονται. Ως αποτέλεσμα, η καταλληλότητά τους για την ανακατασκευή 3d μοντέλων κτιρίων σε δεύτερο στάδιο, αφορά μόνο τα απλά μοντέλα (LoD1), τα οποία προκύπτουν με την προσθήκη μιας συνεχούς τιμής υψομέτρου, εύκολα εξαγόμενης από το ήδη υφιστάμενο DSM. Παράλληλα, τα εξαγόμενα ίχνη είναι κατάλληλα για πολεοδομικές και τοπογραφικές εφαρμογές, όπως παρακολούθηση πυκνότητας αστικού χώρου και ευαίσθητων περιοχών, χαρτογραφικές αναθεωρήσεις, ταξινομήσεις χώρου κ.α.

✓ Ο προσανατολισμός των αλγορίθμων αφορά αστικές και περιαστικές περιοχές, όπου η τοπογραφία του εδάφους παρουσιάζεται μάλλον ήπια. Ως αποτέλεσμα, εφαρμογές σε περιοχές έντονης τοπογραφικής μορφολογίας προϋποθέτουν μικρής έκτασης μετατροπές, οι οποίες αφορούν κυρίως την προπαρασκευή των υποβάθρων από τα δεδομένα LiDAR.

Για την πειραματική εφαρμογή των μεθοδολογιών αυτόματης εξαγωγής κτιριακών ιχνών που αναπτύχθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα σάρωσης από το σύστημα ALS70 της παραγράφου 4.2, με πυκνότητα 55 σημ/μ². Η ανάπτυξη των αλγορίθμων πραγματοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python, με την χρήση (μεταξύ άλλων) και της εξειδικευμένης, για εφαρμογές computer vision, βιβλιοθήκης OpenCV. Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού Python οφείλεται στην μεγάλη ευελιξία που παρέχει σε επίπεδο χειριστή, στο ιδιαίτερο εύρος διαθέσιμων βιβλιοθηκών, αλλά και στο γεγονός ότι αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη scripting γλώσσα, η οποία υποστηρίζεται από πολλά GIS λογισμικά (ελεύθερα και εμπορικά) για την ανάπτυξη εξειδικευμένων ρουτινών, που βελτιστοποιούν τις διαδικασίες εκμετάλλευσης γεωχωρικών δεδομένων, αναλόγως του ιδιαίτερου χαρακτήρα κάθε εφαρμογής.

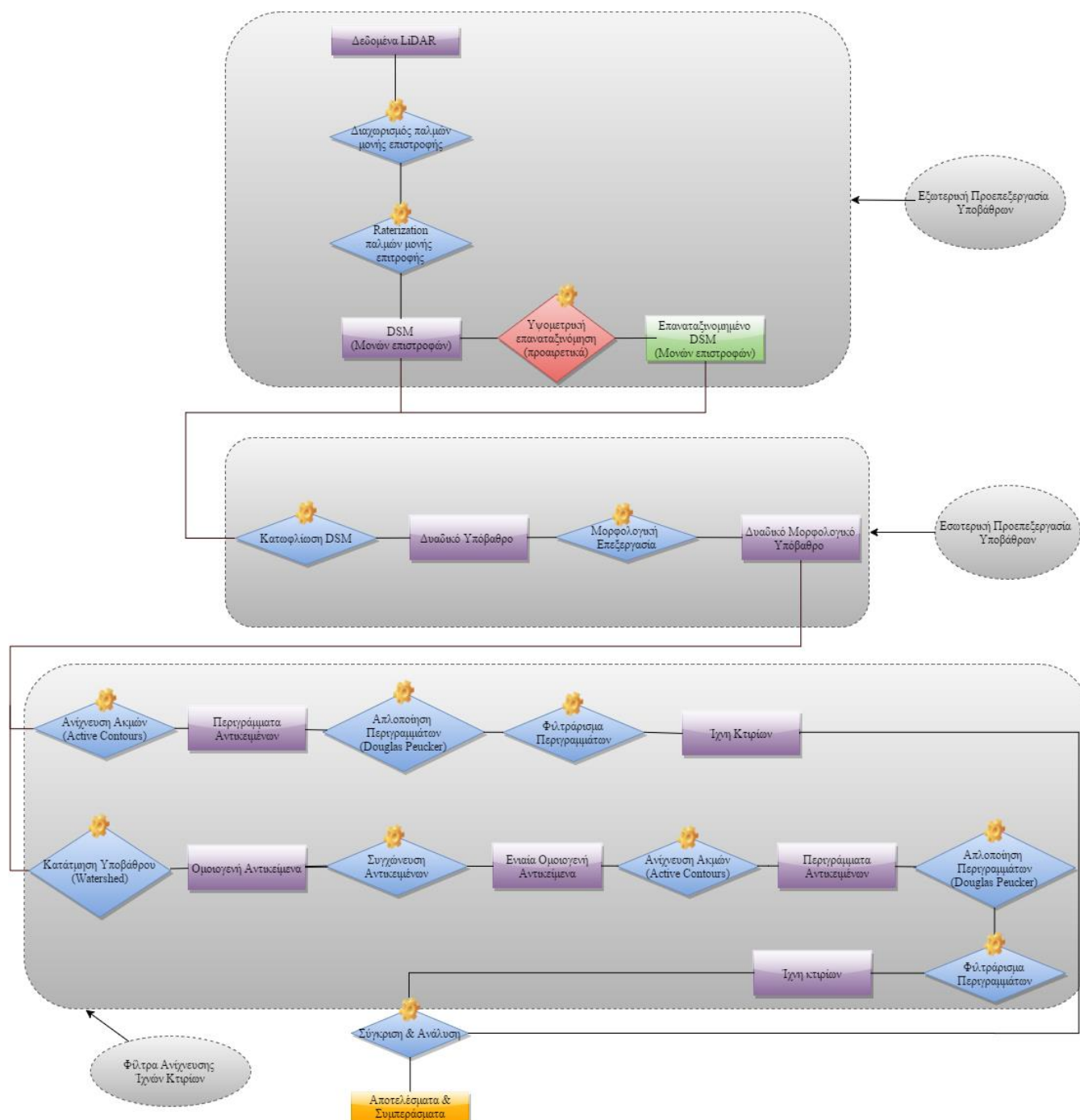
5.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Η ανίχνευση των ιχνών των κτιρίων, πραγματοποιήθηκε στην βάση μεθοδολογίας τριών σταδίων, που αναπτύχθηκε κατά την πειραματική εφαρμογή της παρούσης εργασίας και σχηματικά παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5-1. Το σύνολο της μεθοδολογίας περιλαμβάνει τόσο τις διεργασίες, που πραγματοποιούνται από το χειριστή και αφορούν την αρχική διαχείριση των δεδομένων LiDAR, όσο και τις αυτόματες διεργασίες που επιτελεί ο αλγόριθμος για την βελτιστοποίηση της αρχικής μορφής των δεδομένων εισαγωγής, την ανίχνευση των υποψήφιων ιχνών κτιρίων, καθώς και την μετεπεξεργασία αυτών για την απόδοση των τελικών ιχνών.

Το πρώτο και δεύτερο στάδιο περιλαμβάνουν την απαραίτητη προεπεξεργασία των υποβάθρων (LiDAR DSM), προκειμένου να είναι εφικτή η βέλτιστη απόδοση των φίλτρων ανίχνευσης κτιρίων τα οποία αναπτύσσονται στο τρίτο στάδιο. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται το εξωτερικό τμήμα της προεπεξεργασίας, το οποίο αφορά την μετάπτωση των διαθέσιμων δεδομένων LiDAR στην επιθυμητή μορφή του DSM, με την ταυτόχρονη απαλοιφή σημείων που αποτελούν πολλαπλές επιστροφές, δεδομένου ότι σε αστικό περιβάλλον οι πολλαπλές επιστροφές οφείλονται κατά κύριο λόγο σε τμήματα βλάστησης. Το τελικό DSM το οποίο θα τροφοδοτηθεί στον αλγόριθμο ως δεδομένο εισόδου, προκύπτει από την αφαίρεση διαδοχικά παραγόμενων επιφανειών, και περιλαμβάνει λιγότερα σημεία (εικονοστοιχεία), κατά κύριο λόγο στις περιοχές βλάστησης, με σκοπό να βελτιστοποιήσει την απόδοση των φίλτρων. Κατά το στάδιο αυτό, μπορεί να πραγματοποιηθεί προαιρετική υψομετρική αναταξινόμηση του τελικού DSM, προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν τα αντικείμενα της περιοχής ελέγχου σε συγκεκριμένες υψομετρικές τάξεις. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.

Στο δεύτερο στάδιο της προεπεξεργασίας των υποβάθρων (εσωτερική προεπεξεργασία), το εκάστοτε DSM εισόδου του πρώτου σταδίου υπόκειται σε διεργασίες επεξεργασίας εικόνας, με σκοπό την προετοιμασία του για το στάδιο της ανίχνευσης. Οι βασικές διεργασίες περιλαμβάνουν την κατωφλίωση του DSM και τη

δημιουργία ενός δυαδικού υποβάθρου, καθώς και την μορφολογική επεξεργασία αυτού με την χρήση πράξεων μαθηματικής μορφολογίας (§3.5). Το στάδιο αυτό επιτελείται εσωτερικά στον αλγόριθμο, χωρίς την επίβλεψη του χειριστή, αφού προηγηθεί κατάλληλη παραμετροποίηση αναλόγως των ιδιαιτεροτήτων της περιοχής εργασίας. Σκοπός του δεύτερου σταδίου είναι η τελική προετοιμασία του υποβάθρου για την βέλτιστη απόδοση των φίλτρων ανίχνευσης με την ταυτόχρονη εξάλειψη θορύβου, την πλήρωση μικρών κενών στα εικονοστοιχεία, αλλά και τον, κατά το δυνατό, διαχωρισμό των τμημάτων της αστικής βλάστησης που κείνται σε επαφή με πλευρές κτιρίων.



Διάγραμμα 5-1: Το μεθοδολογικό πλαίσιο ανάπτυξης αλγορίθμων αυτόματης εξαγωγής ιχνών κτιρίων

Στο τρίτο και τελικό στάδιο του υπόψη μεθοδολογικού πλαισίου, επιτελείται η λειτουργία της ανίχνευσης των ιχνών των κτιρίων, από τις δύο προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν. Το φίλτρο ανίχνευσης με βάση τις ακμές δρα απευθείας επί του τελικού προεπεξεργασμένου υποβάθρου, ενώ τα εντοπιζόμενα από αυτό περιγράμματα υφίστανται μια διαδοχή απλοποίησης και φιλτραρισμάτων, με σκοπό την απαλοιφή των αντικειμένων που δεν αποτελούν κτίρια και την απόδοση των τελικών ιχνών. Το φίλτρο ανίχνευσης με βάση ομοιογενείς περιοχές, προσθέτει ένα στάδιο κατάτμησης

του τελικώς προεπεξεργασμένου υποβάθρου, με την εφαρμογή του αλγόριθμου του υδροκρίτη (watershed). Σκοπός της κατάτμησης αυτής είναι η παραγωγή ομοιογενών τμημάτων, τα οποία στην περίπτωση των κτιρίων αναμένεται να είναι μεγάλα και συνεχή, λόγω ομοιομορφίας υψής, ενώ στα τμήματα αστικής βλάστησης αναμένεται να είναι μικρότερα και κατακερματισμένα. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται το μετέπειτα φιλτράρισμα των αντικειμένων που δεν αποτελούν κτίρια, το οποίο επιτελείται επαναλαμβάνοντας την διαδικασία του φίλτρου ανίχνευσης ακμών. Τα τελικώς εξαγόμενα συγκρίνονται και αναλύονται ως προς την πληρότητα και την ακρίβειά τους, για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της υπόψη μεθοδολογίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

5.3 Εξωτερική προεπεξεργασία υποβάθρων ανίχνευσης

Η αρχική μορφή των δεδομένων LiDAR αποτελείται (συνήθως) από ένα σετ δυαδικών αρχείων (.las), τα οποία περιέχουν τα καταγεγραμμένα σημεία και τις ιδιότητες αυτών ανά λωρίδα πτήσης ή με άλλη κατάτμηση εφόσον έχουν υποστεί ανάλογη επεξεργασία. Το στάδιο της εξωτερικής προεπεξεργασίας των υποβάθρων ανίχνευσης αφορά την κατάλληλη μετάπτωση των αρχικών αυτών δεδομένων LiDAR, προκειμένου να είναι εφικτή η εκμετάλλευσή τους από τους αλγόριθμους ανίχνευσης κτιρίων που αναπτύχθηκαν. Η κατάλληλη μετάπτωση πρωτίστως περιλαμβάνει την εξαγωγή raster παραγώγων, καθώς στη συνέχεια απαιτείται η εφαρμογή τεχνικών ανάλυσης εικόνας. Τα πιθανά και πλέον διαδεδομένα raster παράγωγα, είναι τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα αλλά και οι εικόνες έντασης που προκύπτουν μέσω διαδικασιών παρεμβολής και με εκχώρηση τιμών στα εικονοστοιχεία, τις τιμές υψομέτρου ή τις τιμές της καταγεγραμμένης έντασης επιστροφής των παλμών αντίστοιχα. Η χρήση των εικόνων έντασης για ανίχνευση αντικειμένων με διαδικασίες image processing, δυσχεραίνεται σημαντικά από την πολυπλοκότητα αυτών, καθώς η απεικονιζόμενη πληροφορία είναι κατά πολύ περισσότερη και η υφή της εικόνας σαφώς εντονότερη από το DSM. Η πολυπλοκότητα και η περίσσεια πληροφορία γενικά, είναι δύο από τους κύριους παράγοντες που οδηγούν τους αλγόριθμους ανίχνευσης σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, ένα DSM σε raster μορφή ενσωματώνει και πληροφορία για την τρίτη διάσταση (ως τιμή των εικονοστοιχείων), γεγονός που προσθέτει ένα, εν δυνάμει, επιπλέον εκμεταλλεύσιμο δεδομένο για τη δημιουργία μιας προσέγγισης στην ανίχνευση κτιρίων.

Ένα DSM από δεδομένα LiDAR μπορεί να κατασκευαστεί με πολλούς τρόπους, καθώς είναι δυνατή η επιλογή συγκεκριμένου τμήματος των δεδομένων, το οποίο συμμετάσχει στην διαδικασία παρεμβολής. Η δυνατότητα αυτή οφείλεται στο, εκ κατασκευής, χαρακτηριστικό των συστημάτων LiDAR να καταγράφουν πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις ανά εκπεμπόμενο παλμό. Συνεπώς, ένα DSM προερχόμενο από όλες τις επιστροφές, έχει ως αποτέλεσμα μια επιφάνεια η οποία περιλαμβάνει όλη την καταγεγραμμένη από το σύστημα πληροφορία, γεγονός που πολλές φορές επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα, καθώς η σταδιακή αφαίρεση πληροφορίας είναι διαρκής απαίτηση των διαδικασιών αυτόματης ανίχνευσης. Επιπρόσθετες επιφάνειες μπορούν

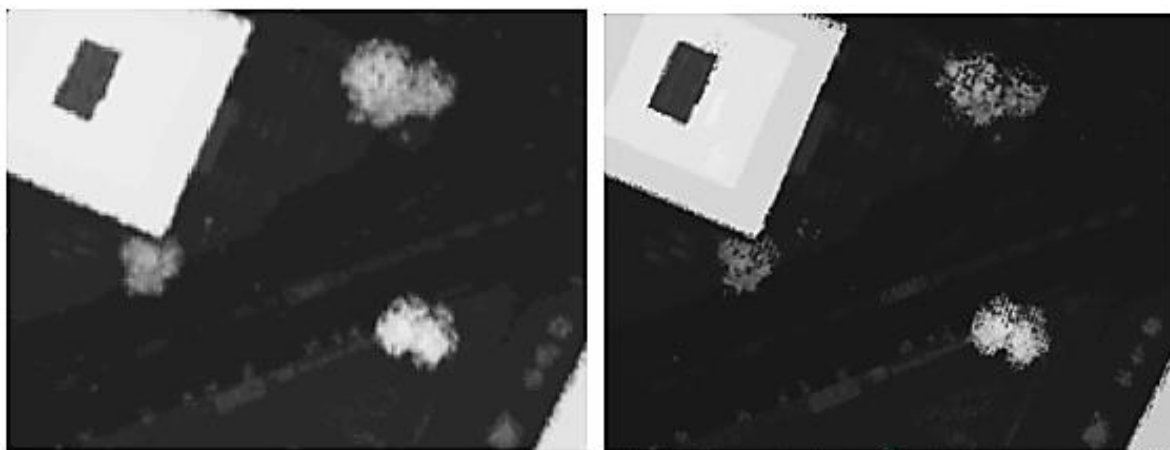
να δημιουργηθούν από τις ενδιάμεσες και τελευταίες επιστροφές των παλμών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν αντικείμενα ή και τμήματα αυτών, τα οποία κείνται σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό της επιφάνειας των πρώτων επιστροφών. Οι επιφάνειες αυτές συνήθως δεν αντιπροσωπεύουν κάποια φυσική επιφάνεια, αλλά μάλλον τυχαία αντικείμενα που συναντώνται στο ίδιο ύψος, ενώ δεν παρουσιάζουν συνέχεια κατά μήκος της περιοχής εργασίας. Εξαίρεση αποτελεί το σύνολο των τελευταίων επιστροφών, οι οποίες δύναται υπό προϋποθέσεις να αντιπροσωπεύουν (δειγματοληπτικά) την επιφάνεια του εδάφους.

Γενικά, κάθε ανάκλαση εκπεμπόμενου παλμού από το σύστημα, κωδικοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η δακρυτοποίηση των επιστροφών που ανήκουν στον ίδιο αρχικό παλμό (multiple returns), από εκείνες που ανήκουν σε διαφορετικούς παλμούς. Η εγγενής δυνατότητα αυτή του συστήματος, καθιστά εύκολο των διαχωρισμό των σημείων που έχουν προκληθεί από πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις και με τα κατάλληλα φίλτρα είναι δυνατή η εξαίρεσή τους από τις διαδικασίες δημιουργίας προϊόντων (πχ rasterization). Η σημασία της απομόνωσης των σημείων προερχόμενων από πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις, σχετίζεται με τα αντικείμενα που συνήθως τις προκαλούν. Σε ένα αστικό περιβάλλον, αναμένονται να προέρχονται από την διείσδυση των παλμών laser στα δέντρα, καθώς και από τις ακμές των κτιρίων, όπου τμήμα του παλμού ανακλάται από την ίδια την ακμή, ενώ η εναπομείνισσα ποσότητα ακτινοβολίας (εφόσον έχει επαρκή ισχύ) συνεχίζει την κατιούσα πορεία ανακλώμενη από παρακείμενα στις πλευρές των κτιρίων αντικείμενα, όπως μπαλκόνια, πεζοδρόμια, οδόστρωμα κ.α. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει η ασφαλής υπόθεση ότι τα σημεία του νέφους που προέρχονται από πολλαπλά οπισθοσκεδαζόμενους παλμούς, αφορούν τις περιοχές βλάστησης στην περιοχή εργασίας και η αναγνώριση και αφαίρεσή τους θα προκαλέσει μείωση της πληροφορίας στο υπόβαθρο, υποβοηθώντας τους αλγόριθμους ανίχνευσης. Η αντίστοιχη αφαίρεση των σημείων πολλαπλών οπισθοσκεδάσεων οφειλόμενα σε ακμές κτιρίων, κρίνεται ότι δεν επηρεάζει την ανίχνευση των ιχνών, καθώς η πληροφορία σε πυκνές σαρώσεις είναι περίσσεια, ενώ σε κάθε περίπτωση η μετέπειτα μορφολογική επεξεργασία θα πραγματοποιήσει μικρές μεταβολές επ' αυτών.

Πρέπει να αναφερθεί, ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν αποσκοπεί στην αφαίρεση της βλάστησης από το υπόβαθρο εργασίας, αλλά μάλλον στην διακοπή της συνέχειας της, με τη δημιουργία μικρών κενών περιοχών, γεγονός που θα οδηγήσει στην υπερκατάτμηση αυτής σε μικρά αντικείμενα, παρά μεγάλα και συνεχή. Το όφελος αναμένεται να είναι η ευκολότερη απομάκρυνση των δέντρων στα επόμενα στάδια της μορφολογικής επεξεργασίας και του φιλτραρίσματος των ακμών, καθώς και ο ευκολότερος διαχωρισμός των ορίων των κτιρίων που παρουσιάζουν επαφή με παρακείμενες συστοιχίες δέντρων.

Στην παρούσα εφαρμογή, το παραγόμενο DSM, που χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου για τη διαδικασία αυτόματης ανίχνευσης κτιρίων, κατασκευάστηκε με την χρήση μόνο των παλμών εκείνων οι οποίοι παράγουν μονή (single) επιστροφή.

Συγκεκριμένα, όσα σημεία του νέφους αποτελούν πρώτες από πολλές επιστροφές (first of many), δεύτερες ή τρίτες (second, third) κ.ο.κ. αφαιρέθηκαν από την διαδικασία παραγωγής του DSM, το οποίο προέκυψε από τα σημεία εκείνα που αντιστοιχούν σε συμπαγή αντικείμενα στην περιοχή. Το αποτέλεσμα, όπως ήταν αναμενόμενο, είναι εμφανές στις περιοχές βλάστησης (εικ 5-1), όπου έχει επέλθει σημαντική μείωση της υπάρχουσας πληροφορίας. Συνεχείς λευκές περιοχές, που στο DSM όλων των επιστροφών αντιπροσωπεύουν μεγάλα δέντρα με πυκνό φύλλωμα, μεταπίπτουν σε κατακερματισμένα, ασυνεχή και συρρικνωμένα τμήματα, γεγονός που αναμένεται να υποστηρίξει σημαντικά τα μετέπειτα στάδια επεξεργασίας.



Εικόνα 5-1: Αραίωση βλάστησης στο DSM μόνων επιστροφών (αριστερά) σε σύγκριση με το DSM πρώτων επιστροφών (δεξιά)

Επιπλέον στάδιο εξωτερικής προεπεξεργασίας του υποβάθρου ανίχνευσης, αποτελεί η υψομετρική επαναταξινόμηση. Σε γενικές γραμμές, αποσκοπεί σε μια απλούστερη ταξινόμηση των εικονιζόμενων αντικειμένων, σε λίγες υψομετρικές κλάσεις, ανάλογα των χαρακτηριστικών της περιοχής και του σκοπού της ανίχνευσης. Σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής, είναι η ανάδειξη των κατασκευών με πολύ χαμηλό ύψος, όπως υπόστεγα και χαμηλές αποθήκες, κυρίως σε αστικές περιοχές με έντονες υψομετρικές διαφορές (συνδυασμό πολύ υψηλών και πολύ χαμηλών κτιρίων). Σε τέτοιες περιοχές, η συνήθως χρησιμοποιούμενη απεικόνιση του DSM (χρωματική παλέτα 8bit, 256 τόνων του γκρι), εξαναγκάζεται να αποδώσει τους λευκότερους τόνους στα υψηλότερα αντικείμενα, ενώ οι αντίστοιχες χαμηλές κατασκευές λαμβάνουν πολύ σκουρότερους, με αποτέλεσμα να απορροφώνται από το υπόβαθρο και να είναι ανέφικτη η ανίχνευσή τους. Η διαδικασία υψομετρικής επαναταξινόμησης, αποδίδει κατόπιν παρέμβασης του χειριστή, διακριτές τιμές χρώματος σε κάθε οριζόμενη και αντίστοιχα διακριτή υψομετρική κλάση και με τον τρόπο αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί η δυνατότητα ανίχνευσης και των χαμηλότερων κτιρίων. Κύριο μειονέκτημα της εν λόγω τεχνικής είναι η αύξηση του υφιστάμενου θορύβου γύρω από τις ακμές των κτιρίων, αλλά και η συμπερίληψη χαμηλών αντικειμένων, όπως μικρά δέντρα, στοίβες κοντέινερ κ.α. Συνεπώς, μη χρήση της διαδικασίας υψομετρικής επαναταξινόμησης αναμένεται να αποδώσει καθαρότερα ίχνη και μικρό αριθμό ανιχνευόμενων αντικειμένων που δεν αποτελούν κτίρια, ενώ

αναμένεται να παρουσιάσει αδυναμία στην ανίχνευση των χαμηλών κατασκευών. Αντίθετα, η ενσωμάτωση της υπόψη τεχνικής αναμένεται να οδηγήσει στην πληρέστερη ανίχνευση, αποδίδοντας πιο ασαφή ίχνη και περιλαμβάνοντας περισσότερες εσφαλμένες ανιχνεύσεις αντικειμένων. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή πρέπει να πραγματοποιείται κατόπιν εκτιμήσεως των ιδιαίτερων συνθηκών κάθε περιοχής, όπως η υψομετρική ομοιομορφία, η πολυπλοκότητα και ο σκοπός της εργασίας.

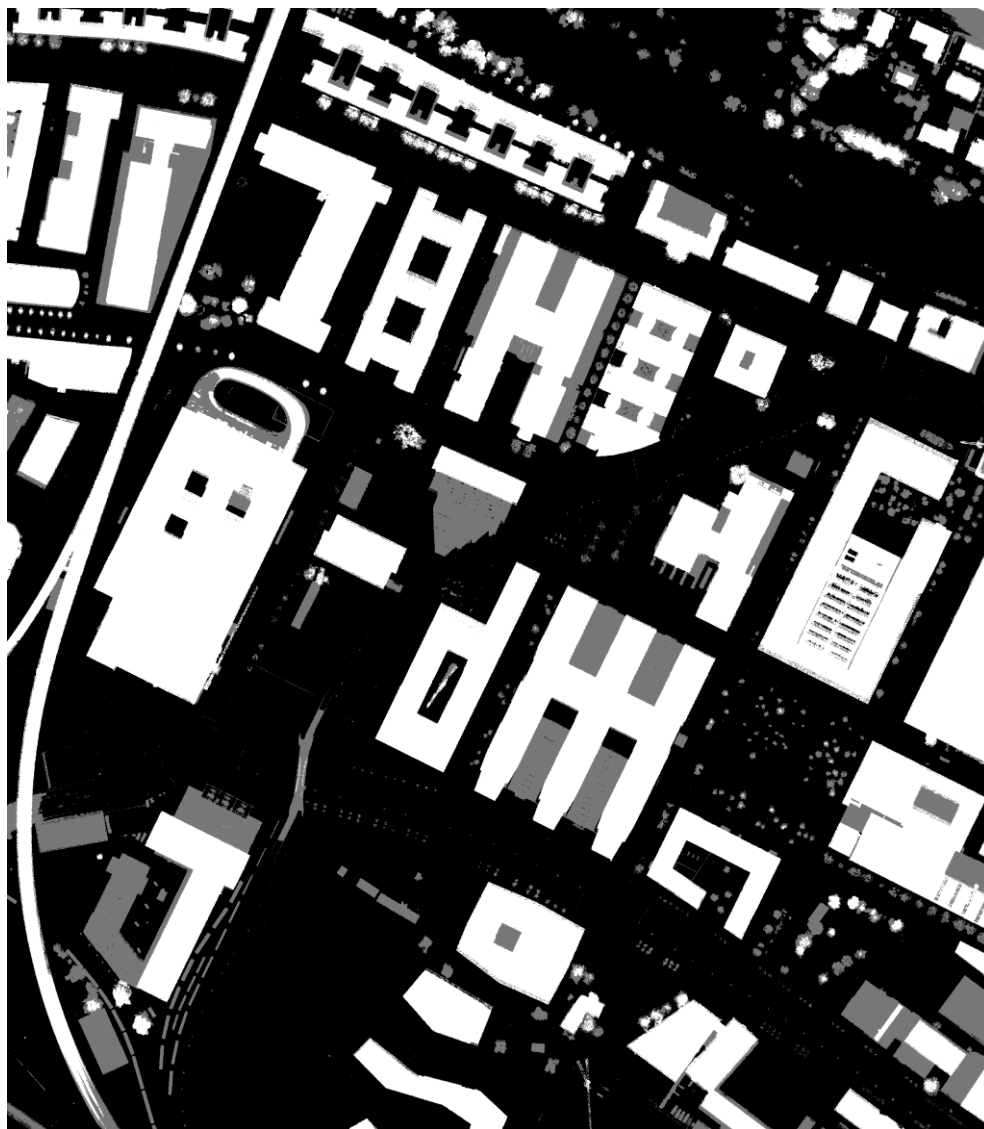
Στην παρούσα εφαρμογή, πραγματοποιήθηκε η παραγωγή ενός δεύτερου, υψομετρικά επαναταξινομημένου DSM, προκειμένου για λόγους πληρότητας και συγκρίσεως μεταξύ των δύο τεχνικών. Επιλέχθηκε η χρήση τριών υψομετρικών κλάσεων, κατόπιν μελέτης της περιοχής εργασίας, οι οποίες σχετίζονται με το ύψος του μικρότερου αναγνωρισθέντος κτιρίου (3,5 m), τη μέση τιμή ύψους (22 m) , καθώς και τη μέγιστη τιμή ύψους από το υψηλότερο κτίριο (84m).

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί, ότι η διαδικασία ανίχνευσης ιχνών κτιρίων με βάση το χαρακτηριστικό του ύψους επί ενός DSM και όπως αυτή εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, στηρίζεται στην παραδοχή της ομαλής τοπογραφίας της §5.1. Είναι κατανοητό, ότι η υψομετρική απεικόνιση των αντικειμένων μιας περιοχής σε ένα raster μοντέλο επιφανείας, σχετίζεται άμεσα με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη υψομετρική αφετηρία. Τα συστήματα LiDAR αποδίδουν τιμές υψομέτρου στα υπολογιζόμενα σημεία του νέφους μέσω της διαδικασίας γεωκωδικοποίησης και με την συγχώνευση δεδομένων καταγραφής θέσης από το σύστημα GNSS. Ως αποτέλεσμα, η a priori χρησιμοποιούμενη υψομετρική αφετηρία είναι η επιφάνεια του ελλειψοειδούς αναφοράς WGS84 (γεωμετρικά υψόμετρα), τα οποία δύναται να αναχθούν σε δεύτερο στάδιο και με τη χρήση κατάλληλου μοντέλου γεωειδούς, ως προς την επιφάνεια της μέσης στάθμης της θάλασσας (ορθομετρικά υψόμετρα). Σε κάθε περίπτωση, η χρήση μιας τέτοιας ενιαίας υψομετρικής αφετηρίας, έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση μεγαλύτερων τιμών υψομέτρου σε χαμηλά αντικείμενα ευρισκόμενα σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου, απ' ότι σε υψηλά αντικείμενα ευρισκόμενα σε περιοχές χαμηλότερου υψομέτρου. Με άλλα λόγια, ένα σπίτι στην κορυφή ενός λόφου, θα παρουσιάζεται λευκότερο από ένα πολυώροφο κτίσμα στο επίπεδο της θάλασσας, όταν αυτά περιλαμβάνονται αμφότερα στην ίδια σκηνή. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αδυναμία ανιχνεύσεως και την παραγωγή σημαντικών σφαλμάτων από τους υπόψη αλγόριθμους. Η υψομετρική ομοιομορφία μια τέτοιας περιοχής, μπορεί να εξασφαλιστεί με την αναγωγή των υψομέτρων ως μια σχετική υψομετρική αφετηρία, η οποία πρέπει να μεταβάλλεται προκειμένου να αντισταθμίζει τις τοπογραφικές διακυμάνσεις. Η ευκολότερα υπολογιζόμενη και σαφέστερα αντιληπτή τέτοια επιφάνεια, είναι η ίδια η επιφάνεια του εδάφους, η οποία αναπαρίσταται με την χρήση ενός DTM. Η εξαγωγή του DTM από τα δεδομένα LiDAR πραγματοποιείται κατόπιν φιλτραρίσματος των σημείων (διαχωρισμός επίγειων και υπέργειων) και η εφαρμογή του για την απόσβεση των αποτελεσμάτων της μεταβολής της τοπογραφίας στην ανίχνευση κτιρίων, συνίσταται στην αφαίρεση του από το DSM. Με τον τρόπο αυτό, αποδίδεται μια επιφάνεια γνωστή ως

κανονικοποιημένο DSM (nDSM), όπου τα υψόμετρα των αντικειμένων αντιπροσωπεύουν το καθαρό ύψος αυτών από την επιφάνεια του εδάφους. Σε μια οπτικοποίηση του nDSM με βάση την 8-bit χρωματική παλέτα τόνων του γκρι, τα αντικείμενα με μεγαλύτερο ύψος θα παρουσιάζονται λευκότερα από τα αντίστοιχα χαμηλότερου ύψους, ανεξάρτητα από την θέση τους επί της φυσικής επιφάνειας, ενώ η αυτόματη ανίχνευση τους θα καθίσταται εφικτή από τους αλγόριθμους της παρούσης εφαρμογής.



Εικόνα 5-2: Το DSM των μονών (single) επιστροφών



Εικόνα 5-3: Το επαναταξινομημένο DSM των μονών (single) επιστροφών

5.4 Εσωτερική προεπεξεργασία υποβάθρων ανίχνευσης

Τα παραγόμενα υπόβαθρα του σταδίου της εξωτερικής προεπεξεργασίας, αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο ανίχνευσης. Η δημιουργία τους αποτελεί και το μόνο στάδιο της συνολικής διαδικασίας, το οποίο απαιτεί εκτεταμένη ανθρώπινη παρέμβαση, καθώς τα τμήματα της εσωτερικής προεπεξεργασίας και της ανίχνευσης λειτουργούν ως επί το πλείστο με αυτοματοποιημένες διαδικασίες και ως ένας κλειστός αγωγός, όπου η ανθρώπινη παρέμβαση περιορίζεται στην κατά περίπτωση ρύθμιση των κατωφλίων λειτουργίας των επιμέρους διαδικασιών. Απόλυτα αυτοματοποιημένη μέθοδος δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί, καθώς καμία περιοχή εργασίας δεν παρουσιάζει απόλυτη ταύτιση με κάποια άλλη. Ακόμα περισσότερο, περιοχές διαφορετικού χαρακτήρα (αστικές, ημιαστικές, βιομηχανικές, περιαστικές κ.α.) παρουσιάζουν έντονα διαφοροποιούμενη ποικιλομορφία αντικειμένων και βαθμό περιλαμβανόμενης πληροφορίας, ενώ ο χαρακτήρας μιας περιοχής δύναται να μεταβάλλεται και εντός της ίδιας σκηνής εργασίας. Για τους λόγους αυτούς, η

ανθρώπινη παρέμβαση είναι πάντα απαραίτητη, ενώ ο στόχος της αυτοματοποίησης των διαδικασιών εστιάζεται στην ελαχιστοποίησή της, ακόμα και σε επίπεδο όπου μπορεί να αφορά την χρήση μη εξειδικευμένου προσωπικού.

Το στάδιο της εσωτερικής προεπεξεργασίας, συνίσταται σε δύο κύριες διεργασίες, την κατωφλίωση και την μορφολογική επεξεργασία και στο σύνολό του αποσκοπεί στην συμπληρωματική βελτιστοποίηση του υποβάθρου εργασίας, προκειμένου να είναι εφικτή η ορθή ανίχνευση των κτιριακών ιχνών σε επόμενο στάδιο. Στη φάση αυτή πραγματοποιούνται σημαντικές εργασίες, όπως η αφαίρεση του θορύβου και των μικρών αντικειμένων, ο διαχωρισμός των πλευρών των κτιρίων από τυχόν παρακείμενη και ως ένα βαθμό εφαπτόμενη βλάστηση, ενώ αφαιρείται και ένα μεγάλο μέρος αυτής από το σύνολο της σκηνής.

Η τεχνική της κατωφλίωσης εικόνας αποτελεί την πρώτη εφαρμοζόμενη διεργασία, η οποία μετασχηματίζει το DSM τόνων του γκρι (greyscale) σε δυαδική (binary) μορφή, δηλαδή μια εικόνα άσπρου μαύρου. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι εικόνες με δυαδική υπόσταση υποστηρίζουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό τους αλγόριθμους αυτόματης ανίχνευσης του πεδίου της όρασης υπολογιστών, καθώς η ύπαρξη τιμών 0 και 1 για τα απεικονιζόμενα αντικείμενα αυξάνει το βαθμό σαφήνειας, μειώνει τα παραγόμενα σφάλματα και απλουστεύει τις διαδικασίες ανάπτυξης των τελευταίων. Η δυαδική εικόνα κατασκευάζεται με την επιλογή μιας τιμής κατωφλίου, η οποία για ένα DSM αντιστοιχεί σε κάποια τιμή υψομέτρου, ενώ στη συνέχεια κάθε εικονοστοιχείο με τιμή μικρότερη της επιλεγείσας λαμβάνει τιμή μηδέν και κάθε εικονοστοιχείο με μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει την τιμή 1. Η επιλογή του κατωφλίου αποτελεί και παραδοσιακά το δυσκολότερο σημείο εφαρμογής της υπόψη μεθόδου, καθώς εξαρτάται από την φύση και την πολυπλοκότητα της περιοχής εργασίας, καθώς και από το σύνολο των απεικονιζόμενων αντικειμένων. Χαμηλές τιμές κατωφλίων τείνουν να συμπεριλαμβάνουν θόρυβο, ενώ υψηλές τιμές να απομακρύνουν σημαντική πληροφορία. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή πραγματοποιείται κατόπιν μιας αρχικής στατιστικής διερεύνησης της κατανομής των τιμών των εικονοστοιχείων σε όλο το εύρος των διαθέσιμων τόνων απεικόνισης (ιστόγραμμα εικόνας), καθώς και με διαδικασίες δοκιμής και λάθους (trial and error), προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα κατωφλίωσης. Είναι αντιληπτό ότι η έννοια του όρου 'βέλτιστο' στην παρούσα φάση, αφορά την ικανοποιητική ισορροπία μεταξύ αφαίρεσης πληροφορίας και συμπερίληψης των επιθυμητών αντικειμένων με κάποιο αποδεκτό βαθμό πληρότητας, διαδικασία η οποία θα συμπεριλαμβάνει σχεδόν πάντα ένα αποδεκτό αριθμό σφαλμάτων.

Οι μέθοδοι κατωφλίωσης μπορεί να διαφέρουν, ανάλογα του επιθυμητού αποτελέσματος. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης δύναται να επιλέξει ένα καθολικό κατώφλι, το οποίο και να εφαρμοστεί σε όλο το εύρος της σκηνής (global thresholding), διαδικασία ιδιαίτερα επιρρεπής σε σφάλματα, κυρίως για σκηνές με χαμηλό βαθμό ομοιογένειας. Σε διαφορετική περίπτωση, μια τεχνική προσαρμοζόμενου κατωφλίου (adaptive thresholding) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, στην

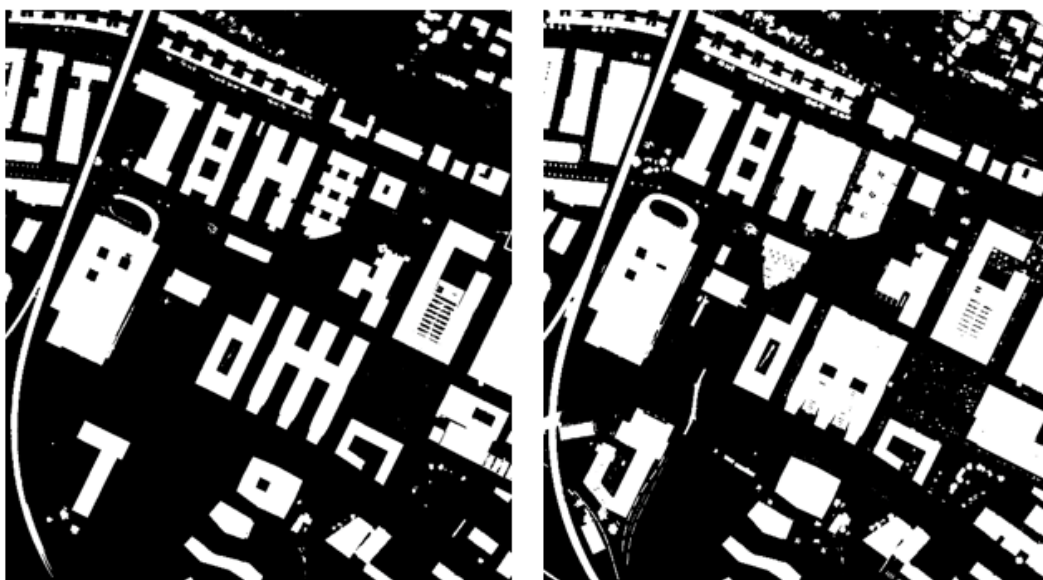
οποία επιλέγονται διαφορετικά κατώφλια για επιμέρους τμήματα της ίδιας σκηνής, τα οποία θεωρούνται επαρκώς ομοιογενή στη βάση κάποιων προκαθορισμένων κριτηρίων. Η γενική αρχή στην οποία στηρίζεται, είναι η παραδοχή ότι μικρές περιοχές σε μια εικόνα είναι πιθανότερο να παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό ομοιογένειας. Θεωρητικά μια τέτοια προσέγγιση προσφέρει βελτιωμένα αποτελέσματα κατωφλίωσης, καθώς λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές ιδιαιτερότητες της περιοχής εργασίας, αλλά η εφαρμογή της απαιτεί εκτεταμένη

χρήση υπολογιστικών πόρων καθώς και σημαντικό βαθμό δοκιμών για τον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων. Μια επιπλέον τεχνική κατωφλίωσης, αποτελεί η μέθοδος OTSU (Otsu, 1979), η οποία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Στη γενική της αρχή, η εν λόγω τεχνική υποθέτει την κατανομή των τιμών των εικονοστοιχείων στο ιστόγραμμα, σε μια κανονική κατανομή δύο κορυφών (bi modal), χωρίζοντας τα σε δύο κύριες κλάσεις που αντιστοιχούν στο προσκήνιο (foreground) και στο παρασκήνιο (background). Στο προσκήνιο περιλαμβάνονται τα αντικείμενα της σκηνής, ενώ στο υπόβαθρο ο λοιπός χώρος, ο οποίος, στην περίπτωση του DSM, απορροφά και τα αντικείμενα χαμηλού ύψους. Το βέλτιστο κατώφλι για το διαχωρισμό των δύο παραπάνω κλάσεων την και τη δημιουργία της δυαδικής εικόνας, επιλέγεται αυτόματα με βάση τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε σκηνής. Σημαντικά μειονεκτήματα της τεχνικής OTSU είναι η αστοχία σε περιπτώσεις όπου οι δύο υποτιθέμενες κλάσεις είναι πολύ ανόμοιες (έχουν πολύ διαφορετικό μέγεθος), καθώς επίσης και σε περιπτώσεις διαφορετικού βαθμού φωτισμού μεταξύ περιοχών της ίδιας σκηνής. Ο διαφορετικός φωτισμός είναι πιθανόν να εμφανιστεί στο χρησιμοποιούμενο DSM, όταν απεικονίζονται περιοχές με σημαντική διαφοροποίηση ως προς την τοπογραφία και όταν υιοθετείται κάποια απόλυτη υψομετρική αφετηρία (ΜΣΘ ή ελλειψοειδές), αντί μιας σχετικής αντίστοιχης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του nDSM.

Η εν λόγω τεχνική, φαίνεται να προσαρμόζεται καλύτερα στην διαδικασία κατωφλίωσης του greyscale DSM για περιοχές ήπιας τοπογραφίας ή του nDSM για περιοχές έντονου αναγλύφου, καθώς τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά bi modal κατανομής και του μεγάλου βαθμού ομοιομορφίας ως προς την απεικόνιση. Παράλληλα, η εξάλειψη της ανάγκης για τον καθορισμό κάθε φορά του βέλτιστου κατωφλίου συντελεί στην αύξηση του βαθμού αυτοματοποίησης της αναπτυσσόμενης μεθόδου.

Η κατωφλίωση εφαρμόστηκε τόσο στο DSM μονών επιστροφών, όσο και στο επαναταξινομημένο DSM (εικ 5-4) και παράγει το ζητούμενο δυαδικό υπόβαθρο ανίχνευσης. Από έναν οπτικό έλεγχο, γίνεται αμέσως αντιληπτός ο μεγάλος βαθμός αφαίρεσης πληροφορίας υποβάθρου η οποία επιτεύχθηκε, με τα κύρια παραμένοντα αντικείμενα να είναι τα κτίρια, κάποια μεμονωμένα μεγάλα δέντρα και συμπαγή τμήματα πυκνής βλάστησης, καθώς και κατασκευές που δεν αποτελούν κτίσματα, όπως πχ υπερυψωμένοι δρόμοι και γέφυρες. Το αποτέλεσμα κρίνεται μάλλον αναμενόμενο, με το επαναταξινομημένο DSM να διατηρεί πολύ περισσότερη πληροφορία τόσο στο υπόβαθρο όσο και γύρω από τις ακμές των κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγαλύτερη πληρότητα περιλαμβάνοντας χαμηλά κτίσματα

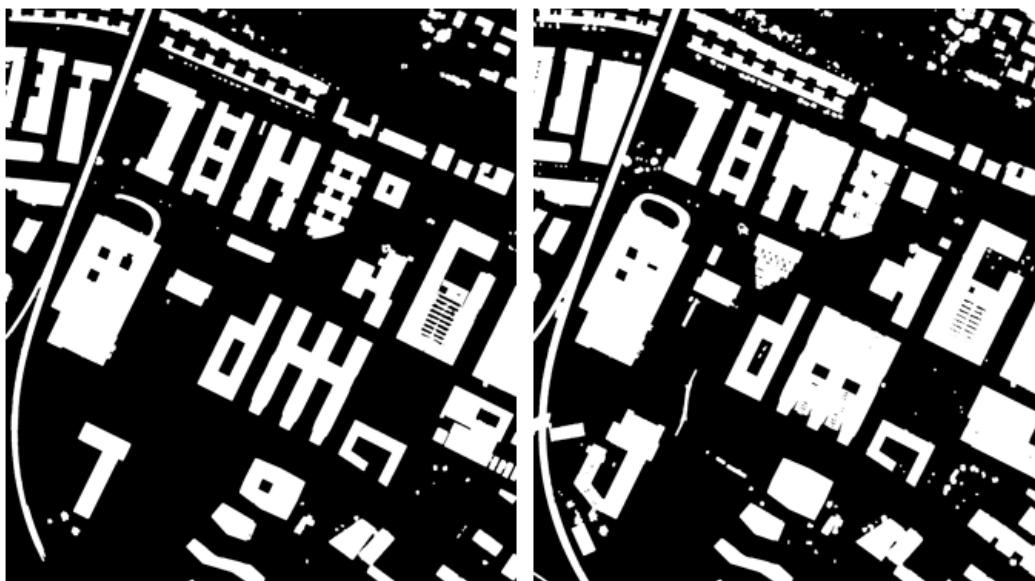
και κατασκευές. Η εναπομείνασα βλάστηση είναι επίσης σημαντικά περισσότερη, ενώ παραμένουν και αντικείμενα που δεν είναι κτίσματα όπως στοίβες με κοντέινερ. Επί του DSM μονών επιστροφών παρατηρείται μεγαλύτερη αφαιρετικότητα και σαφέστερα αντικείμενα, αλλά ο βαθμός πληρότητας εμφανίζεται μειωμένος. Σύνθετα κτίρια, τα οποία περιλαμβάνουν τμήματα μεταβλητού ύψους (όπως ανηφορική ράμπα οχημάτων) δεν παραμένουν αυτούσια μετά την κατωφλίωση, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό ή την απόκρυψη μερών αυτών.



Εικόνα 5-4: Τα δυαδικά υπόβαθρα ανίχνευσης, DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)

Το κατωφλιωμένο δυαδικό υπόβαθρο, υφίσταται στη συνέχεια μια μορφολογική επεξεργασία, με κύριο στόχο της απομάκρυνση της εναπομείνσας βλάστησης, αλλά και μικρών αντικειμένων που παραμένουν στο υπόβαθρο. Οι πράξεις της μαθηματικής μορφολογίας που μπορούν να εφαρμοστούν στο στάδιο αυτό είναι πολλές (§5.3), αναλόγως του επιθυμητού αποτελέσματος. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, επιλέγεται η εφαρμογή ενός μορφολογικού ανοίγματος με διπλό αριθμό επαναλήψεων και τετράγωνο δομικό στοιχείο διαστάσεων 5x5. Η επιλογή του δομικού στοιχείου δύναται να πραγματοποιηθεί κατά περίπτωση, από ένα σύνολο πυρήνων διαφόρων διαστάσεων και σχημάτων, οι οποίοι έχουν προκατασκευαστεί εντός του αλγορίθμου. Η σημασία του δομικού στοιχείου έγκειται στο γεγονός ότι παράγει διαφορετικό αποτέλεσμα, κατόπιν 2d συνέλιξης με το δυαδικό υπόβαθρο, εξαρτώμενο από τα απεικονιζόμενα αντικείμενα και τον προσανατολισμό αυτών. Για παράδειγμα, βλάστηση διατεταγμένη σε γραμμική μορφή είναι πιθανόν να διασπάται καλύτερα από την χρήση ενός σταυροειδούς σχήματος δομικού στοιχείου, ενώ για μεγάλα συνεχή τμήματα, η χρήση ενός ελλειπτικού σχήματος ενδέχεται να ενδείκνυται. Παράλληλα, η επιλεγόμενη, σε κάθε περίπτωση διάσταση μπορεί να αποδώσει διαφορετικά αποτελέσματα και σε γενικές γραμμές η τελική επιλογή πραγματοποιείται κατόπιν διαδικασίας δοκιμής και λάθους.

Η εφαρμογή του μορφολογικού ανοίγματος πραγματοποιήθηκε στα κατωφλιωμένα δυαδικά υπόβαθρα (DSM μονών επιστροφών και επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών) και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικ. 5-5. Παρατηρείται η αφαίρεση της βλάστησης και των μικρών αντικειμένων υποβάθρου σε πολύ σημαντικό βαθμό, ενώ και στις δύο περιπτώσεις υποβάθρων επιτελείται ένα “καθάρισμα” των ορίων των αντικειμένων. Είναι χαρακτηριστική η εξ ολοκλήρου αφαίρεση των παρακείμενων δέντρων, στις πλευρές του γραμμικού κτιρίου στο βόρειο τμήμα της περιοχής, για το DSM μονών επιστροφών.



Εικόνα 5-5: Τα δυαδικά ανοιγμένα υπόβαθρα ανίχνευσης. Ανοιγμένο DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και ανοιγμένο επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)

5.5 Ανάπτυξη φίλτρου κατάτμησης με ανίχνευση ακμών (edge based)

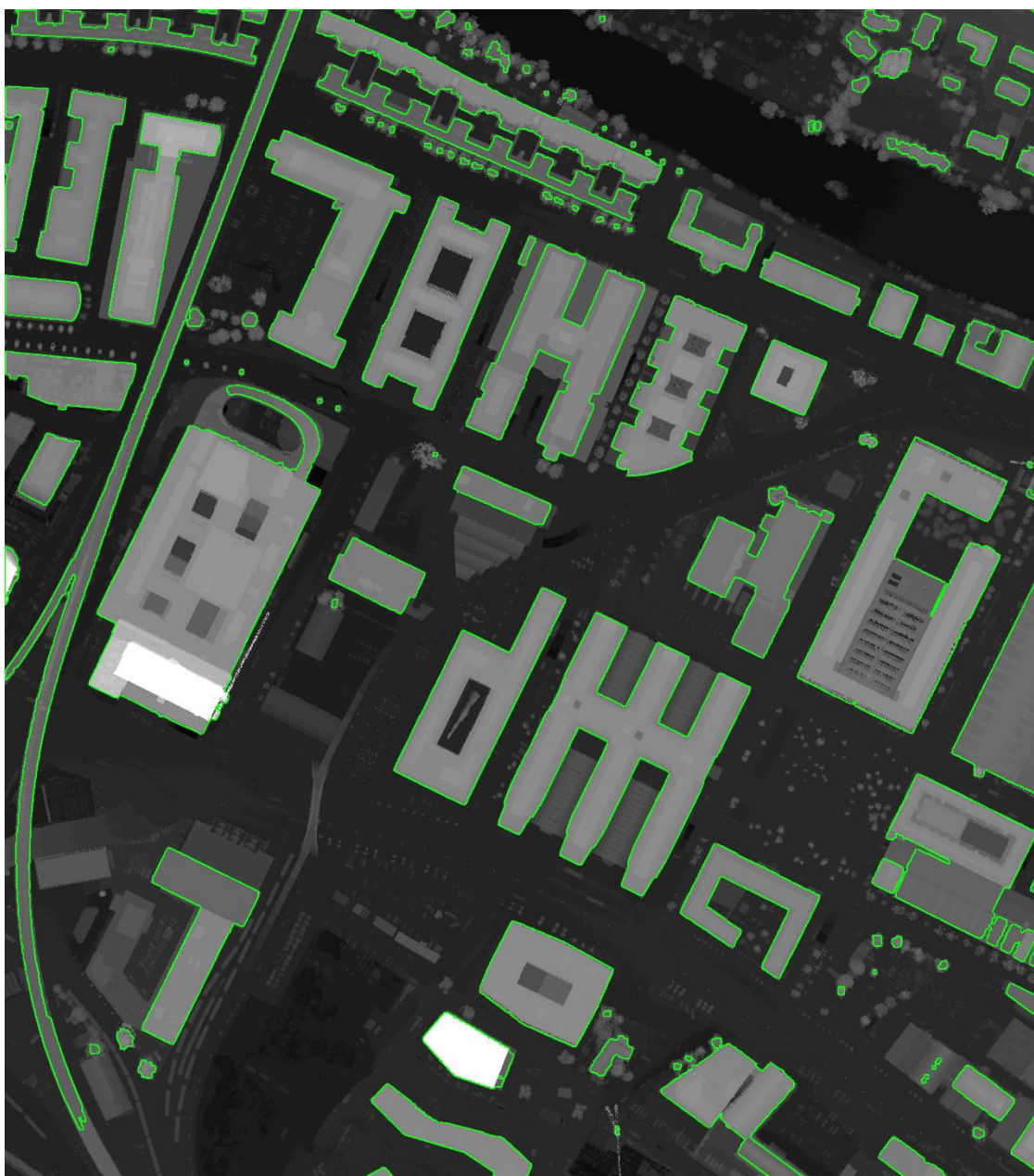
Τα τελικώς επεξεργασμένα δυαδικά υπόβαθρα, που παράχθηκαν στα προηγούμενα στάδια, περιέχουν κατά κύριο λόγο την πληροφορία για τα υφιστάμενα στην περιοχή εργασίας κτίρια, μαζί με τα εναπομείναντα τμήματα βλάστησης και λοιπών μικρών αντικειμένων, που δεν ήταν δυνατό να αφαιρεθούν. Το γενικευμένο σχήμα των κτιρίων, που προκύπτει από την δυαδική μετατροπή της εικόνας, είναι ικανό να αποκρύψει την περιττή πληροφορία περί των ακμών αυτών και να αποδώσει το ζητούμενο εξωτερικό ίχνος της κατασκευής. Η ανίχνευση και η περιγραφή του ίχνους κάθε κτιρίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή διαφορετικών προσεγγίσεων, οι οποίες δύνανται να εστιάζουν στα καθαυτό όρια των αντικειμένων (ανίχνευση ακμών) ή ακόμα και στα ίδια τα αντικείμενα (ανίχνευση ομογενών περιοχών). Στην παρούσα παράγραφο, τα κτιριακά ίχνη στην περιοχή εργασίας εξάγονται με την εφαρμογή ενός φίλτρου ανίχνευσης ακμών, το οποίο συνδυάζει μια αλληλουχία ενεργειών, που αποσκοπεί τόσο στον χονδρικό προσδιορισμό τους, όσο και στην μετέπειτα βελτιστοποίηση και διαλογή τους.

Το κύριο εργαλείο προσέγγισης των ιχνών, είναι ένας ανιχνευτής ακμών, ο οποίος σε γενικές γραμμές θα απομονώσει το όριο μεταξύ υποβάθρου και κάθε αντικειμένου στο υπόβαθρο ανίχνευσης. Ως ακμή σε μία εικόνα, νοείται η γραμμή εκείνη που αποτελείται από διαδοχικά σημεία απότομης αλλαγής της φωτεινότητας αυτής. Αποτελούν γραμμές απότομης αλλαγής κλίσεων και αποδίδουν υψηλές τιμές κατά τη συνέλιξη της εικόνας με φίλτρα ευαίσθητα στις κλίσεις, σε αντίθεση με τις ομοιόμορφες περιοχές που αποδίδουν μηδενικές τιμές μετά τη συνέλιξη. Στην επιστήμη της όρασης υπολογιστών έχει αναπτυχθεί και συνεχίζεται να αναπτύσσεται πλήθος ανιχνευτών ακμών, οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικά κάθε φορά χαρακτηριστικά του εικονιστικού υποβάθρου. Έτσι απλές ανιχνεύσεις ακμών μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω 2d συνέλιξεων με κατάλληλα φίλτρα (π.χ. Sobel, Roberts, Prewitt κ.α.), καθώς και με συνθετότερους τελεστές όπως ο ανιχνευτής Canny, που αποτελούν συνδυασμούς φίλτρων.

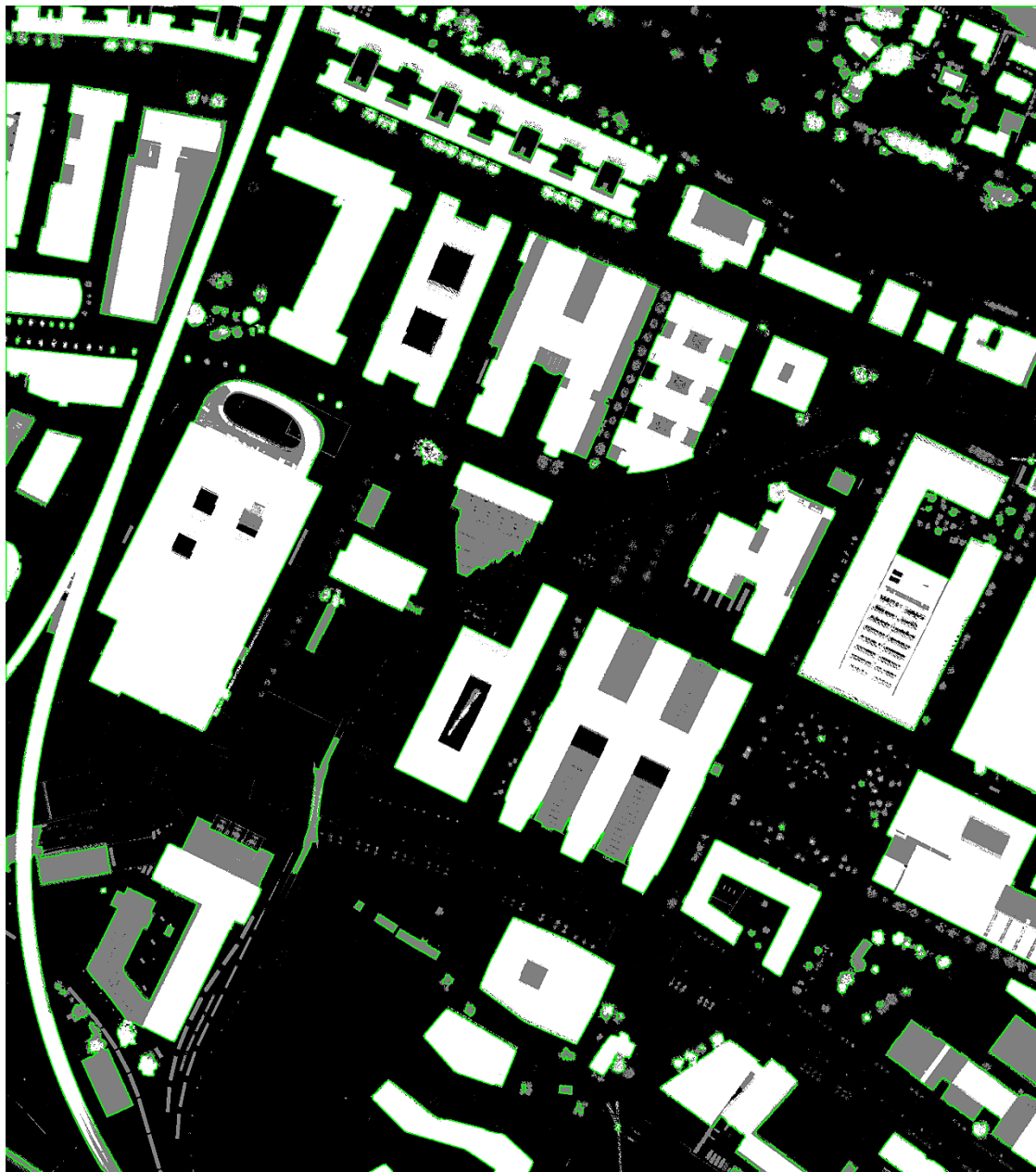
Η ανίχνευση των ακμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάθε μια από τις παραπάνω τεχνικές. Οι αποδιδόμενες γραμμές, είναι μάλλον μεμονωμένες, ενώ συνήθως παρουσιάζονται και διακοπτόμενες λόγω της επίδρασης του θορύβου κοντά στα όρια των αντικειμένων του υποβάθρου ανίχνευσης. Στην περίπτωση των κτιριακών ιχνών, είναι επιθυμητή η εξαγωγή ενός ενιαίου ίχνους το οποίο και να αποτελεί κλειστό πολύγωνο, αποτέλεσμα το οποίο απαιτεί αρκετά σύνθετη και εκλεπτυσμένη εφαρμογή επιπρόσθετων τεχνικών διαχείρισης των ανιχνευόμενων ακμών. Για το λόγο αυτό, το φίλτρο ανίχνευσης των ορίων των αντικειμένων της παρούσης παραγράφου, αναπτύχθηκε με βάση την τεχνική των active contours, αναφερόμενες στην βιβλιογραφία και ως snakes. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σέτ ευέλικτων splines, οι οποίες επηρεάζονται τόσο από «εξωτερικές» δυνάμεις, που αφορούν δεσμεύσεις σχήματος και προσαρμογής, όσο και από «εσωτερικές» δυνάμεις στην εικόνα, που τις ελκύουν προς τα όρια των αντικειμένων. Η εφαρμογή των active contours, αποδίδει μια κλειστή καμπύλη η οποία περιγράφει το όριο των ανιχνευόμενων αντικειμένων, ως ένα διανυσματικό σύνολο από διαδοχικά σημεία, που ενώνονται με μικρά ευθύγραμμα τμήματα. Ο βαθμός προσέγγισης του ορίου από μια contour εξαρτάται από την ευκρίνεια και τη διαχωριστικότητα αυτού επί του υποβάθρου ανίχνευσης. Ασαφή όρια, λόγω θορύβου, έλλειψης πληροφορίας ή μειωμένης ευκρίνειας, θα προσεγγιστούν από καμπύλες με μάλλον «πριονωτό» σχήμα, παρά από ξεκάθαρα ευθύγραμμα τμήματα.

Σημαντικό πλεονέκτημα των active contours, είναι η δυνατότητα υπολογισμού ενός συνόλου γεωμετρικών χαρακτηριστικών για την κάθε καμπύλη, τα οποία αναφέρονται και ως ροπές (moments). Με την χρήση των ροπών καμπύλης εξάγονται απευθείας (ή υπολογίζονται έμμεσα) μεγέθη όπως το εμβαδόν, το μήκος, η ομοιότητα με πρωτογενή γεωμετρικά σχήματα (π.χ. κύκλος ή τετράγωνο), η εκκεντρότητα, το κεντροειδές, το κέντρο μάζας κ.α. Τα μεγέθη αυτά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερικές δεσμεύσεις σχήματος και μεγέθους, παρέχοντας την ευχέρεια δημιουργίας φίλτρων για την αφαίρεση αριθμού ανιχνευόμενων καμπυλών, οι οποίες κρίνονται ανεπιθύμητες. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα είναι και η δυνατότητα δημιουργίας ιεραρχίας μεταξύ των ανιχνευόμενων contours. Η ιεραρχία αυτή δημιουργείται με την κατάλληλη σήμανση

κάθε καμπύλης, με βάση το κριτήριο της συμπεριληψιμότητας εντός κάποιας άλλης καμπύλης. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτό να διαχωριστούν οι καμπύλες εκείνες οι οποίες αφορούν ανιχνευόμενα αντικείμενα στο εσωτερικό του ίχνους κάθε κτιρίου, όπως αίθρια, κατασκευές και αντικείμενα επί της οροφής κ.α. Η εφαρμογή των active contours για τη παρούσα εφαρμογή, πραγματοποιείται επί των ανοιγμένων μορφολογικών υποβάθρων τα οποία παράχθηκαν κατά το στάδιο της εσωτερικής προεπεξεργασίας (§5.4), με τη χρήση του DSM μονών επιστροφών και του αντίστοιχου επαναταξινομημένου DSM. Ο αλγόριθμος παραμετροποιήθηκε για την απόδοση μόνο των εξώτατων καμπυλών και τα ανιχνευόμενα σε πρώτο στάδιο ίχνη των αντικειμένων, παρουσιάζονται δια επιθέσεως στα αρχικά υπόβαθρα στις εικ. 5.6 και 5.7.



Εικόνα 5-6: Αρχικές ανιχνευόμενες contours επί του ανοιγμένου DSM μονών επιστροφών.



Εικόνα 5-7: Αρχικές ανιχνευόμενες contours επί του ανοιγμένου επαναταξινομημένου DSM μονών επιστροφών.

Καθώς είναι αναμενόμενο, τα ανιχνευόμενα αντικείμενα περιλαμβάνουν τα κείμενα επί του υποβάθρου κτίρια, άλλα αντικείμενα επί της σκηνης καθώς και υπολείμματα βλάστησης. Οι contours δείχνουν γενικά να προσεγγίζουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τα περιγράμματα των κτιρίων, ενώ στο DSM μονών επιστροφών παρουσιάζονται ελλειπείς γύρω από τμήματα κτιρίων με πολύ χαμηλό ύψος, καθώς και γύρω από λοιπές χαμηλές κατασκευές. Στο επαναταξινομημένο DSM μονών

επιστροφών, ανιχνεύονται πληρέστερα ίχνη, καθώς και όλο το εύρος των υφιστάμενων κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται ο βαθμός συμπερίληψης αντικειμένων που δεν είναι κτίρια.

Για την αφαίρεση των αντικειμένων που δεν αποτελούν ίχνη κτιρίων, αναπτύχθηκε μια σειρά από φίλτρα, τα οποία επιβάλλουν δεσμεύσεις σχήματος (shape factors) στις contours που δημιουργήθηκαν. Τα εφαρμοζόμενα φίλτρα ελέγχουν τις υφιστάμενες contours ως προς το εμβαδόν (area), την αναλογία μήκους προς πλάτος (aspect ratio), την κυκλικότητα (circularity) και την συμπαγότητα (compactness), εφαρμόζοντας κατάλληλα κατώφλια για την πραγματοποίηση της διαλογής. Ο υπολογισμός των απαραίτητων μεγεθών για τον υπολογισμό των φίλτρων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των ροπών της κάθε καμπύλης, ενώ η γενική μαθηματική τεκμηρίωση των φίλτρων είναι η ακόλουθη:

Length: m_{00} (Ροπή μηδενικής τάξεως κάθε καμπύλης)

Area: m_{00} (Ροπή μηδενικής τάξεως κάθε καμπύλης, σχεδιασμένη σε εικόνα (ροπή εικόνας))

Aspect Ratio: $\frac{bb_w}{bb_h}$ (Αναλογία πλάτους/ύψους του bounding box κάθε καμπύλης)

Circularity: $\frac{4 \cdot \pi \cdot Area}{Length^2}$ (Αναλογία ροπών μηδενικής τάξεως εικόνας και καμπύλης)

Compactness: $\frac{m_{00}}{m_{02} + m_{20}}$ (Λόγος περιοχής προς μεταβλητότητα σε κάθε άξονα (ροπές δευτέρας τάξεως))

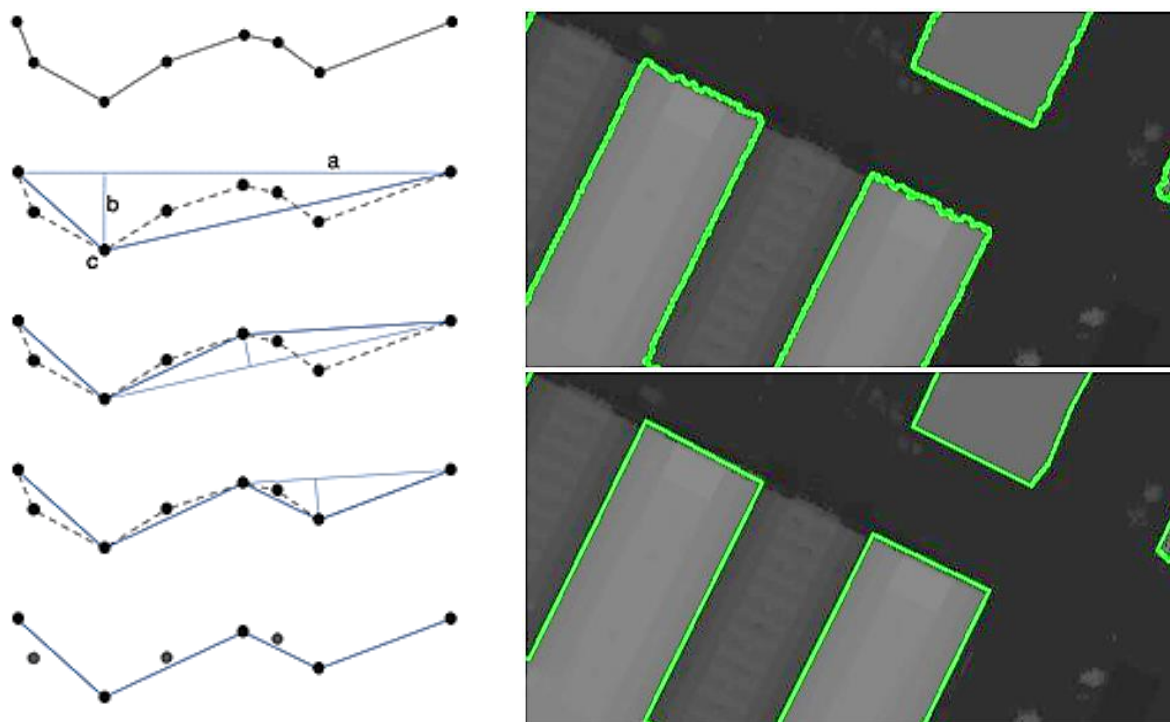


Εικόνα 5-8: Διαδοχή φίλτρων για την διαλογή των ανιχνεόμενων contours

Γενική επιδίωξη των παραπάνω φίλτρων, είναι η διαλογή των ανιχνεόμενων καμπυλών, με βάση την παραδοχή ότι τα κτίρια παρουσιάζουν συγκεκριμένο σχήμα. Με τον τρόπο αυτό, η αναλογία πλάτους μήκους (aspect ratio) ενός ίχνους κτιρίου αναμένεται σημαντικά μεγαλύτερη αυτής του δρόμου ή άλλου επιμήκους αντικειμένου, ενώ το περικλειόμενο εμβαδό σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των μικρών καμπυλών που αφορούν υπολείμματα βλάστησης. Κατά ανάλογο τρόπο, η κυκλικότητα (circularity) των τμημάτων βλάστησης αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από αυτή των κτιρίων, ενώ παράλληλα η συμπαγότητα μικρών τυχαίων ανιχνεόμενων

αντικειμένων αναμένεται να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των ιχνών που αφορούν κτίρια (κανονικότερα σχήματα κτιρίων και όχι τυχαία).

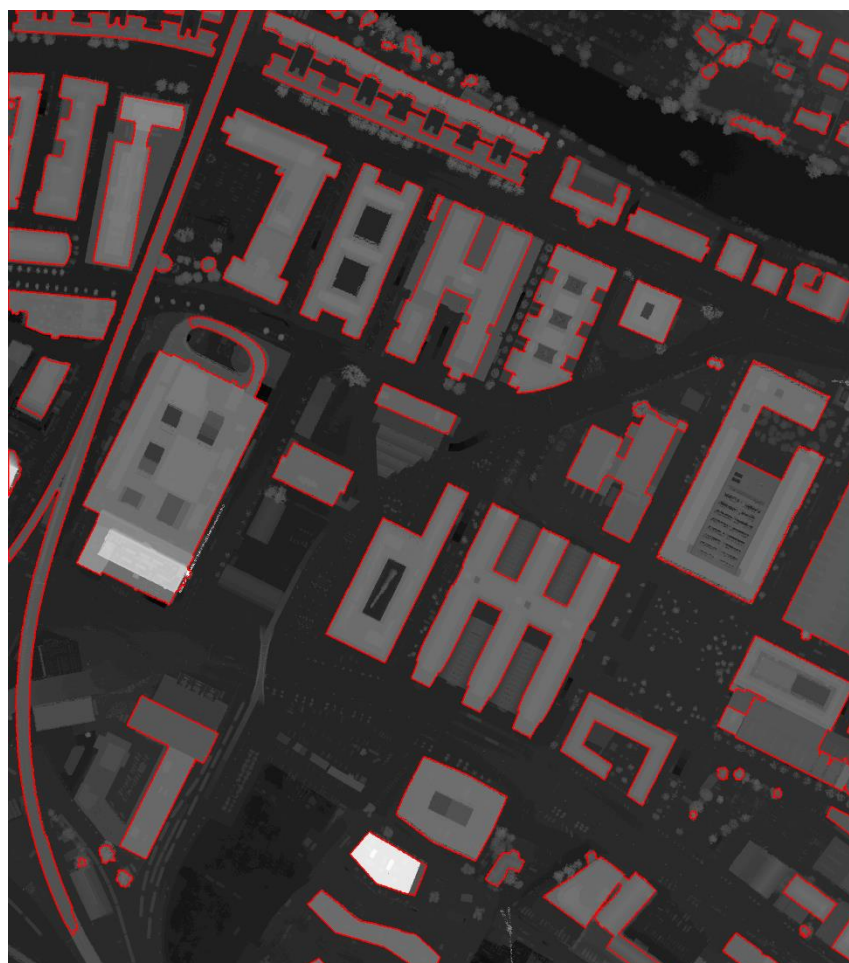
Μέσα από τη διαδοχή των φίλτρων διαλογής, παραμένει ένα τελικό σύνολο καμπυλών, οι οποίες κατά βάση αντιπροσωπεύουν τα εξώτατα ίχνη των κτιρίων του υποβάθρου εργασίας. Τα εν λόγω ίχνη παρουσιάζονται, κατά περίπτωση, να έχουν πριονωτό σχήμα για λόγους που συνδέονται με την ασάφεια του υποβάθρου γύρω από τα όρια των αντικειμένων, την ύπαρξη θορύβου κ.α. Η κανονικοποίηση των ιχνών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση κάποιου αλγόριθμου απλοποίησης γραμμών, με στόχο την αφαίρεση των περιττών κόμβων και τη δημιουργία πιο ομαλών ευθύγραμμων τμημάτων. Επιλέχθηκε η χρήση του αλγόριθμου Douglas Peucker (εικ. 5-9), ο οποίος είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος σε εφαρμογές χαρτογραφικής γενίκευσης γραμμικών στοιχείων. Η γενική αρχή του αλγόριθμου αφορά την σύγκριση κάθε υποψήφιου κόμβου με ένα κατώφλι απόστασης από τη βασική γραμμή. Εάν η απόσταση του υπόψη κόμβου υπερβαίνει το προκαθορισμένο κατώφλι, αυτός απορρίπτεται και ο αλγόριθμος προχωρά στην εξέταση του επόμενου κόμβου. Στην περίπτωση όπου η απόσταση του εξεταζόμενου κόμβου είναι μικρότερη του κατωφλίου, τότε ο κόμβος συμπεριλαμβάνεται στη βασική γραμμή μεταβάλλοντας την. Σημείο προσοχής απαιτεί ο καθορισμός του κατωφλίου ελέγχου, καθώς μεγάλες τιμές οδηγούν στην υπεραπλούστευση της γραμμής και την αφαίρεση σημαντικών (ενδεχομένως) σημαντικών καμπών αυτής. Τα τελικώς εξαγόμενα ίχνη κτιρίων παρουσιάζονται στην εικόνα 5-10.



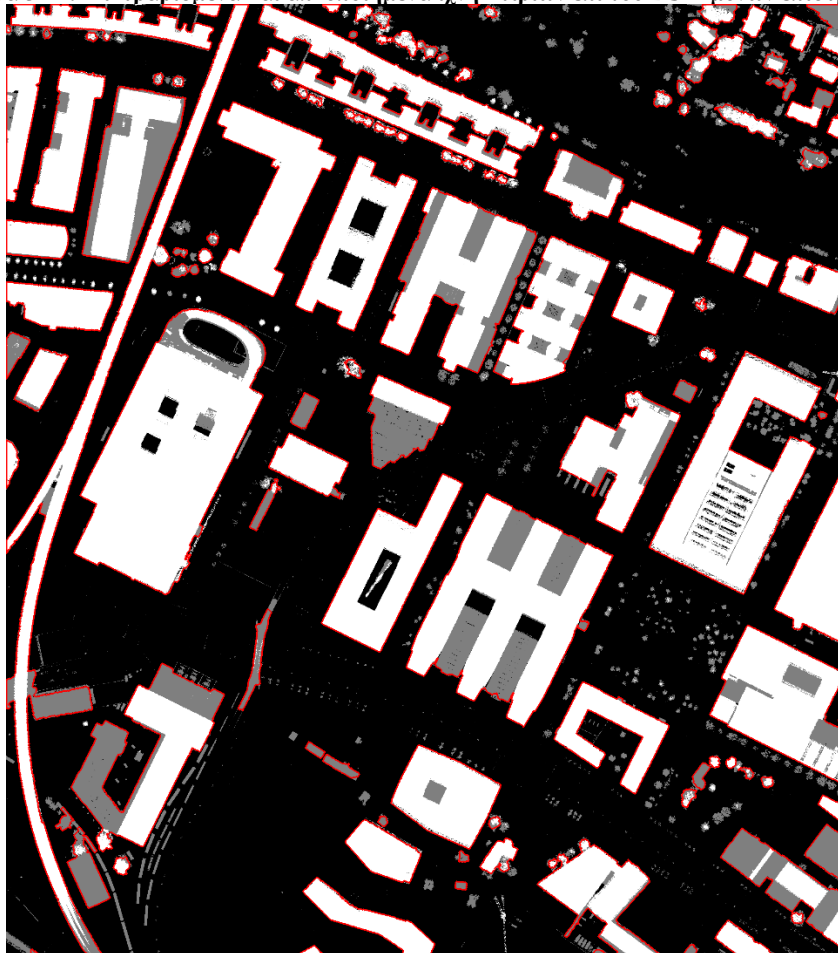
Εικόνα 5-9: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας αλγορίθμου Douglas Peucker και αποτέλεσμα στην απλοποίηση των ιχνών κτιρίων της εφαρμογής



Εικόνα 5- 10: Τα τελικά φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων [ανοιγμένου DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και ανοιγμένου επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)]



Εικόνα 5-11: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του DSM μονών επιστροφών.



Εικόνα 5-12: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του επανταξινομημένου DSM μονών επιστροφών.

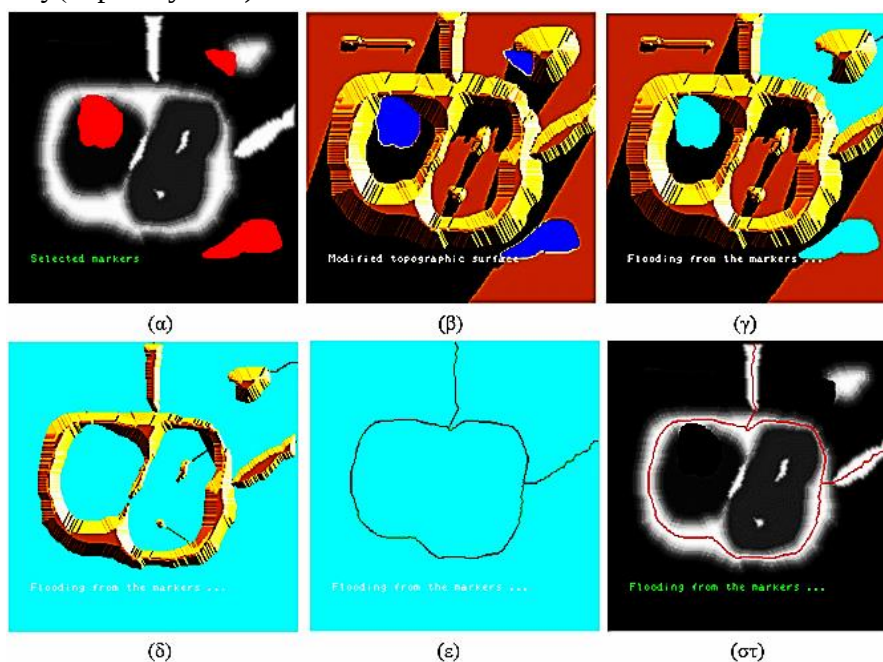
5.6 Ανάπτυξη φίλτρου κατάτμησης με ανίχνευση ομοιογενών περιοχών (area based)

Σε μια δεύτερη προσέγγιση στην αυτοματοποιημένη εξαγωγή ιχνών κτιρίων από δεδομένα LiDAR, αναπτύχθηκε ένα εναλλακτικό φίλτρο ανίχνευσης βασισμένο σε τεχνική κατάτμησης εικόνας μέσω ανίχνευσης ομοιογενών περιοχών. Η κύρια διαφορά με το φίλτρο απευθείας ανίχνευσης, είναι η προσθήκη ενός ενδιάμεσου σταδίου επεξεργασίας του υποβάθρου ανίχνευσης, το οποίο οδηγεί στην εξαγωγή περιοχών οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ομοιότητας στη βάση κάποιων προκαθορισμένων κριτηρίων (γεωμετρικά, μορφολογικά, χωρικά κ.α.), σύμφωνα και με όσα αναλύθηκαν στην §3.4.

Για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής, χρησιμοποιήθηκε το μορφολογικό κριτήριο της έντασης χρώματος στα υπόβαθρα DSM, το οποίο σχετίζεται με το υψόμετρο των κατασκευών από μια δεδομένη επιφάνεια αναφοράς (εδώ το ελλειψοειδές αναφοράς λόγω ομαλής τοπογραφίας), ενώ για την ανίχνευση των ομοιογενών περιοχών σχεδιάστηκε μια εφαρμογή του μορφολογικού αλγόριθμου κατάτμησης του «υδροκρίτη» (watershed), με βάση αρχικά σημεία εκκίνησης (marker based). Ο

αλγόριθμος watershed αντιμετωπίζει την προς κατάτμηση εικόνα ως μια «τοπογραφική επιφάνεια», η οποία αποτελείται από κοιλάδες και όρη. Οι κοιλάδες αντιπροσωπεύουν τις περιοχές που αποτελούν το υπόβαθρο και αποτελούν τον γενικό χώρο μέσα στον οποίο υφίστανται τα αντικείμενα, ενώ τα όρη αντιπροσωπεύουν τα ίδια τα αντικείμενα. Κοιλάδες είναι δυνατόν να υφίστανται και στο εσωτερικό των αντικειμένων, ιδιαίτερα στην περίπτωση σύνθετων σχημάτων (π.χ. κτίρια με αίθρια ή άλλες πολύπλοκες επιφάνειες).

Η γενική ιδέα εφαρμογής του αλγορίθμου (εικ 5-13) μπορεί να προσομοιωθεί από την κατάσταση που δημιουργείται όταν η εικόνα-τοπογραφική επιφάνεια πλημμυριστεί σταδιακά από νερό, εκκινώντας από έναν αριθμό προκαθορισμένων σημείων (markers ή seeds) τα οποία μπορεί να θεωρηθούν ως «πηγές» εισροής ύδατος. Η αυξανόμενη στάθμη του ύδατος που εισέρχεται από κάθε marker τείνει να κατακλύσει το σύνολο της επιφάνειας, γεγονός το οποίο αναστέλλεται από την προοδευτική δημιουργία «φραγμάτων» (barriers) από τον αλγόριθμο, με στόχο την αποφυγή της επαφής των υδάτων που προέρχονται από διαφορετικούς markers. Η προοδευτική αυτή κατασκευή των barriers αποδίδει ένα σύνολο από ακμές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα όρια κάθε «πλημμυρισμένης περιοχής». Όταν όλο το εύρος της εικόνας καλυφθεί από το εισερχόμενο νερό, η διαδικασία ολοκληρώνεται και οι πλημμυρισμένες περιοχές, με τη σειρά τους, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές εκείνες οι οποίες αναγνωρίζονται από τον αλγόριθμο ως ομοιογενείς. Σε μία δυαδική εικόνα, η κατασκευή των barriers ακολουθεί τις ακμές των αντικειμένων, καθώς εκεί παρουσιάζεται η απότομη αλλαγή κλίσης, λόγω μεταβολής της φωτεινότητας από 0 σε 255. Οι τελικά εξαγόμενες ομοιογενείς περιοχές αντιπροσωπεύουν τα αντικείμενα, που αναγνωρίζονται από τον αλγόριθμο, χωρίς να ενσωματώνεται καμίας μορφής γνωσιακή συσχέτιση για το είδος ή την κατηγορία αυτών, όπως θα πραγματοποιούνταν με τη χρήση ενός έμπειρου συστήματος (expert system).



Εικόνα 5-13: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του αλγορίθμου watershed
(Centre for Mathematical Morphology)

Είναι εύκολα αντιληπτό, πως η αρχική επιλογή των markers μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου, ιδιαίτερα σε σύνθετες εικόνες με πολλά γειτονικά αντικείμενα. Είναι γενική επιδίωξη η ύπαρξη ενός marker σε κάθε ομοιογενές τμήμα έκαστου αντικειμένου, καθώς και σε κάθε συνεχές τμήμα του υποβάθρου. Η αρχική δημιουργία των απαιτούμενων markers δεν αποτελεί πάντα μια τυποποιημένη διαδικασία και μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες τεχνικές, ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου υποβάθρου και τον σκοπό της κατάτμησης. Σε κάθε περίπτωση, ο ιδανικός αριθμός markers καθορίζεται από μια διαδικασία trial and error, καθώς χρήση μεγαλύτερου αριθμού αυτών οδηγεί σε πλεονάζουσα κατάτμηση (oversegmentation) και στην δημιουργία περιττών αντικειμένων.

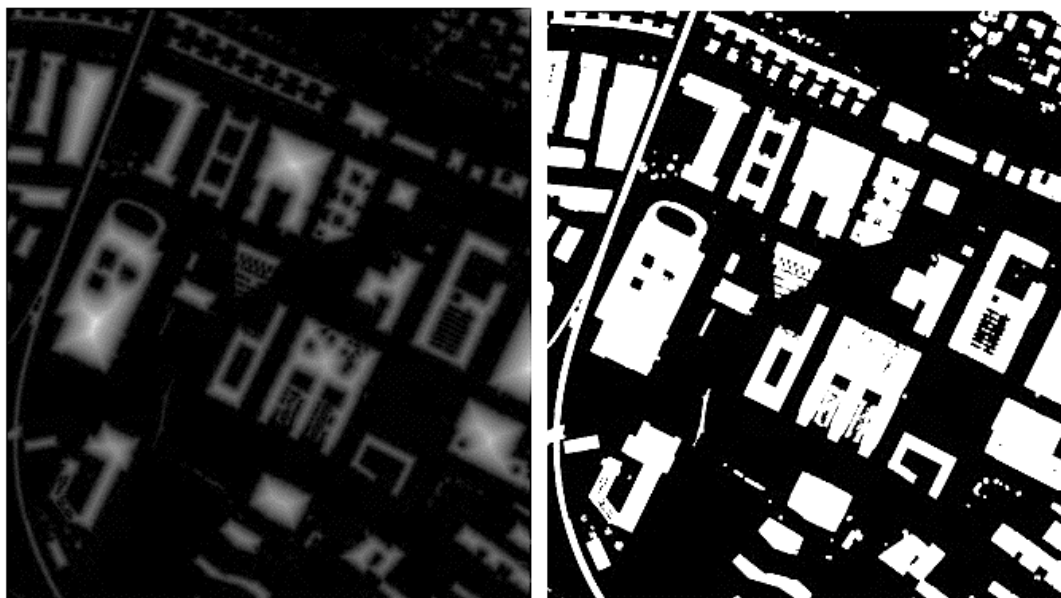
Η εφαρμογή του αλγορίθμου του υδροκρίτη για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής, πραγματοποιήθηκε σε επιμέρους στάδια, επί των οποίων σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν οι απαραίτητες προπαρασκευαστικές ενέργειες για την βέλτιστη απόδοση των αντικειμένων. Οι επιμέρους αυτές διαδικασίες χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης, καθώς εφαρμόζονται στη βάση προκαθορισμένων παραμέτρων, οι οποίες είναι ανεξάρτητες του χρησιμοποιούμενου υποβάθρου και με τον τρόπο αυτό δεν απαιτούν μεταβολή από το χρήστη αναλόγως της εφαρμογής. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε επί των ίδιων ανοιγμένων μορφολογικών υποβάθρων που εξήχθησαν από το στάδιο της εσωτερικής προεπεξεργασίας και χρησιμοποιήθηκαν από το φίλτρο ανίχνευσης ακμών.

Αν υποθέσουμε ότι στην αρχική εικόνα δεν ενσωματώνεται καμία γνώση για τα σημεία διαχωρισμού μεταξύ υποβάθρου και αντικειμένων, πράγμα αληθές δεδομένης της γνωσιακής αδυναμίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών στην αναγνώριση προτύπων, τότε καθίσταται αντιληπτό ότι η απαραίτητη αυτή γνώση πρέπει να χτιστεί προοδευτικά με τρόπο αλγοριθμικό, που να επιτρέπει την αναπαραγωγή της από την μηχανή. Αρχική επιδίωξη είναι η παροχή στοιχείων για τις περιοχές που σίγουρα αποτελούν αδιαμφισβήτητο τμήμα του προσκηνίου (foreground), στην εικόνα, δηλαδή ανήκουν οπωσδήποτε στα αντικείμενα που κείνται επί του υποβάθρου. Για την επίτευξη αυτού, χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός αποστάσεως (distance transform), με βάση της ευκλείδεια απόσταση (L2). Ο μετασχηματισμός αποδίδει μια εικόνα αποστάσεων (εικ 5-14 και 5-15), επί της οποίας τα εικονοστοιχεία αποδίδονται με διαφορετική φωτεινότητα, ανάλογη της εγγύτητάς τους προς κάποιο όριο. Με τον τρόπο αυτό, τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται εγγύτερα σε μια ακμή παρουσιάζονται φωτεινότερα, ενώ καθώς η ευκλείδεια απόσταση από την ακμή αυξάνεται, τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία απεικονίζονται με σκουρότερους τόνους. Η εικόνα του μετασχηματισμού αποστάσεως, μπορεί να θεωρηθεί ότι κατά κάποιο τρόπο αποδίδει ένα σκελετό για το κάθε αντικείμενο, χωρίς ωστόσο να αποτελεί παράγωγο κάποιας διαδικασία σκελετοποίησης, όπως αυτή ορίζεται και εφαρμόζεται στην επεξεργασία εικόνων. Η εφαρμογή μιας διαδικασίας μορφολογικού ανοίγματος στην εικόνα μετασχηματισμού αποστάσεων, παράγει με τη σειρά της μια δεύτερη εικόνα η οποία περιλαμβάνει όλα τα υφιστάμενα αντικείμενα, συρρικνωμένα με κατάλληλο

τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη γνώση για το προσκήνιο (foreground) που απαιτεί ο αλγόριθμος (εικόνα προσκηνίου). Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι ενώ για τον ανθρώπινο εγκέφαλο η συγκεκριμένη διαδικασία φαίνεται ότι παράγει προφανή αποτελέσματα, εντούτοις είναι απαραίτητη για μια μηχανή η οποία στερείται των ανθρώπινων γνωσιακών ικανοτήτων.



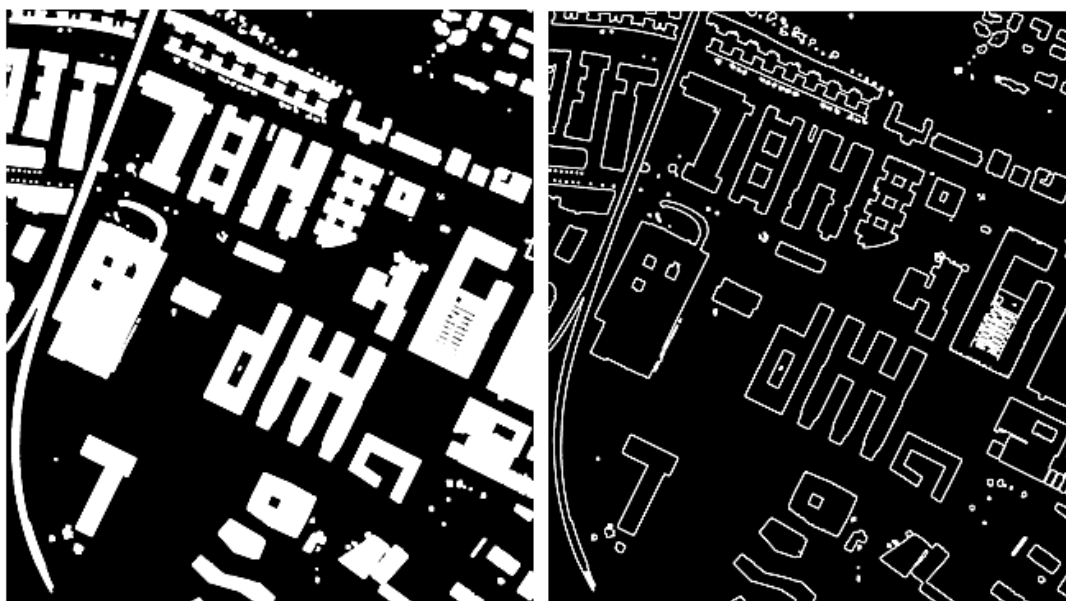
Εικόνα 5-14: Η εικόνα μετασχηματισμού αποστάσεων (αριστερά) και η εικόνα προσκηνίου (δεξιά) από το DSM μονών επιστροφών



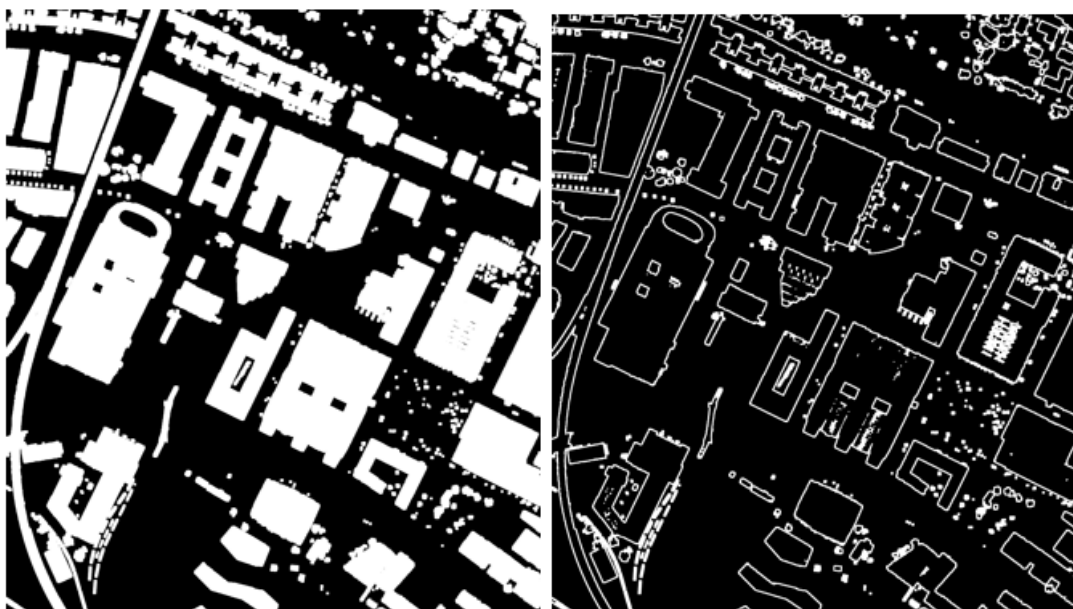
Εικόνα 5-15: Η εικόνα μετασχηματισμού αποστάσεων (αριστερά) και η εικόνα προσκηνίου (δεξιά) από το επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών

Για την πληρέστερη κατανόηση της μεθοδολογίας, κατασκευάστηκε μια εικόνα παρασκήνιου (background), μέσω εφαρμογής της μορφολογικής πράξης της

διαστολής (dilation) στο αρχικό δυαδικό ανοιγμένο υπόβαθρο. Σε αντίθεση με την εικόνα προσκηνίου, η οποία περιλαμβάνει αυστηρά και μόνο τμήματα που ανήκουν στα αντικείμενα, η εικόνα παρασκηνίου περιλαμβάνει με βεβαιότητα τόσο αντικείμενα, όσο και παρασκήνιο. Η αφαίρεση της εικόνας προσκηνίου από την εικόνα παρασκηνίου παράγει μια νέα εικόνα η οποία απεικονίζει τις «άγνωστες περιοχές», δηλαδή τις περιοχές εκείνες εντός των οποίων περιλαμβάνονται τα άγνωστα, προς ανίχνευση όρια (barriers) από τον αλγόριθμο.



Εικόνα 5-16: Η εικόνα παρασκηνίου (αριστερά) και η εικόνα άγνωστων περιοχών (δεξιά) από το DSM μόνων επιστροφών



Εικόνα 5-17: Η εικόνα παρασκηνίου (αριστερά) και η εικόνα άγνωστων περιοχών (δεξιά) από το επαναταξινομημένο DSM μόνων επιστροφών

Ως σημεία εκκίνησης (markers) του αλγορίθμου watershed, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εικόνες προσκηνίου, καθώς σε αυτές περιλαμβάνονται με βεβαιότητα τα επιθυμητά, προς ανίχνευση, αντικείμενα. Οι markers δημιουργούνται ως μια νέα εικόνα, έπειτα από μια διαδικασία labeling, αποτέλεσμα της οποίας είναι η απόδοση τιμής -1 στα εικονοστοιχεία που ανήκουν στα όρια των αντικειμένων, τιμής 1 στα εικονοστοιχεία υποβάθρου και κάποια άλλης θετικής τιμής στα εικονοστοιχεία που ανήκουν εντός της ίδιας ομοιογενούς περιοχής. Η εικόνα των markers (εικ 5-18), περιλαμβάνει το σύνολο της απαραίτητης για το σύστημα γνώσης των «οπών» και παρέχει στον αλγόριθμο την πληροφορία για την εκκίνηση της κατάτμησης επί της αρχικής εικόνας εργασίας.

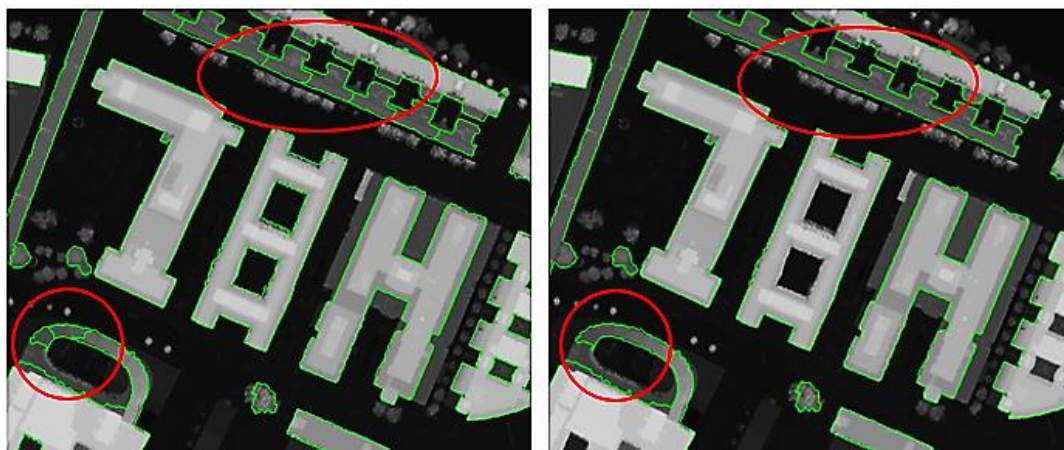


Εικόνα 5-18: Οι εικόνες των markers για την εφαρμογή με το DSM πρώτων επιστροφών (αριστερά) και το επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)

Με το πέρας της εφαρμογής του watershed είναι πιθανή η εμφάνιση υπερκατατμημένων περιοχών, γεγονός που οφείλεται σε ιδιαιτερότητες της αρχικής εικόνας και στα αποτελέσματα των ενδιάμεσων σταδίων επεξεργασίας αυτής (δυναδικοποιήσεις, μορφολογική επεξεργασία κ.α.). Η υπερκατάτμηση αφορά τον διαχωρισμό μιας ενιαίας, σημασιολογικά, περιοχής σε μικρότερα τμήματα και η εμφάνιση του φαινομένου δεν μπορεί να αποφευχθεί με βεβαιότητα. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε μια ρουτίνα συνένωσης (merging) των γειτονικών περιοχών, η οποία λειτουργεί ανεξάρτητα της ύπαρξης (ή μη) του φαινομένου υπερκατάτμησης, διασφαλίζοντας την αποφυγή της εξαγωγής κατακερματισμένων ιχνών.

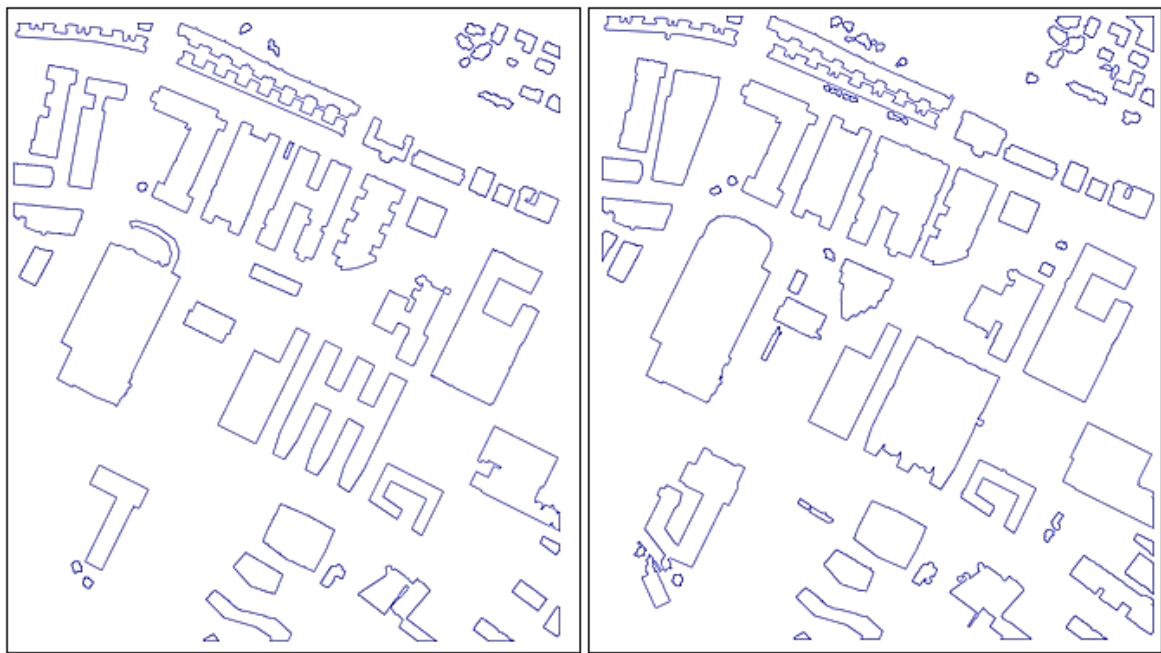
Το τελικό παράγωγο της διαδικασίας κατάτμησης με τον αλγόριθμο watershed, και της επακόλουθης διαδικασίας συγχώνευσης, αποτελείται από μια raster μάσκα των αντικειμένων που ανιχνεύθηκαν. Τα εικονοστοιχεία της μάσκας παρουσιάζουν ενιαία αρίθμηση (label) εντός του ίδιου αντικειμένου και τα όρια των αντικειμένων αυτών μπορούν να εξαχθούν εύκολα με βάση αυτήν. Στην παρούσα εφαρμογή, η εξαγωγή

των ορίων επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με την τεχνική των active contours, όπως αυτή αναπτύχθηκε στην §5.5, ώστε να τους αποδοθεί vector μορφή και να καταστεί εφικτή η διαλογή τους μέσω διαδοχικών φίλτρων (area, aspect ratio, circularity, compactness). Ακολουθώντας αντίστοιχη προσέγγιση με αυτή του φίλτρου ακμών, εξάγονται τα τελικά ίχνη των κτιρίων, από την μέθοδο κατάτμησης με ανίχνευση ομοιογενών περιοχών.

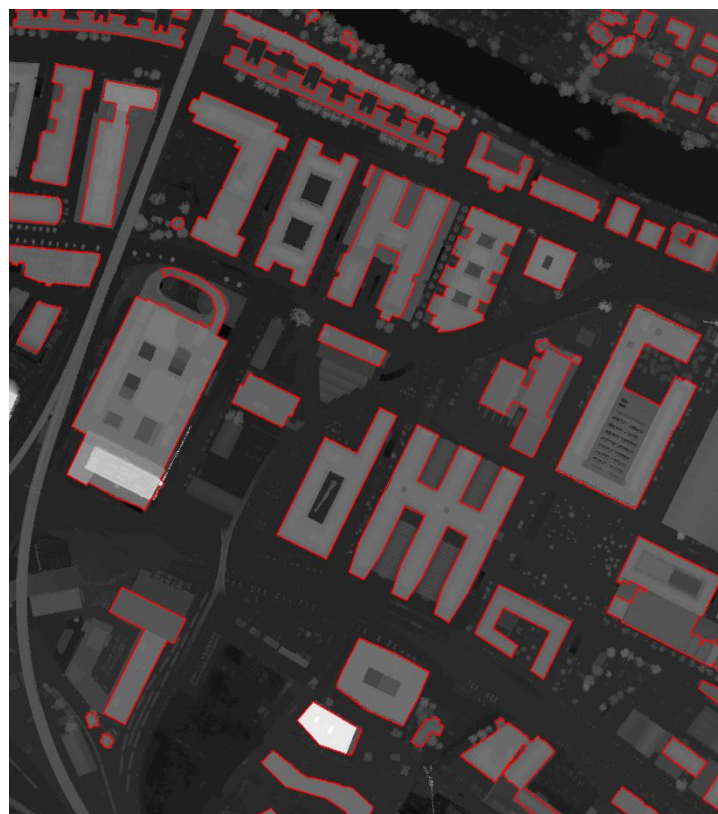


Εικόνα 5-19: Δημιουργία υπερκατάτμησης από την εφαρμογή του αλγόριθμου watershed (αριστερά) και εφαρμογή συγχώνευσης αντικειμένων (δεξιά).

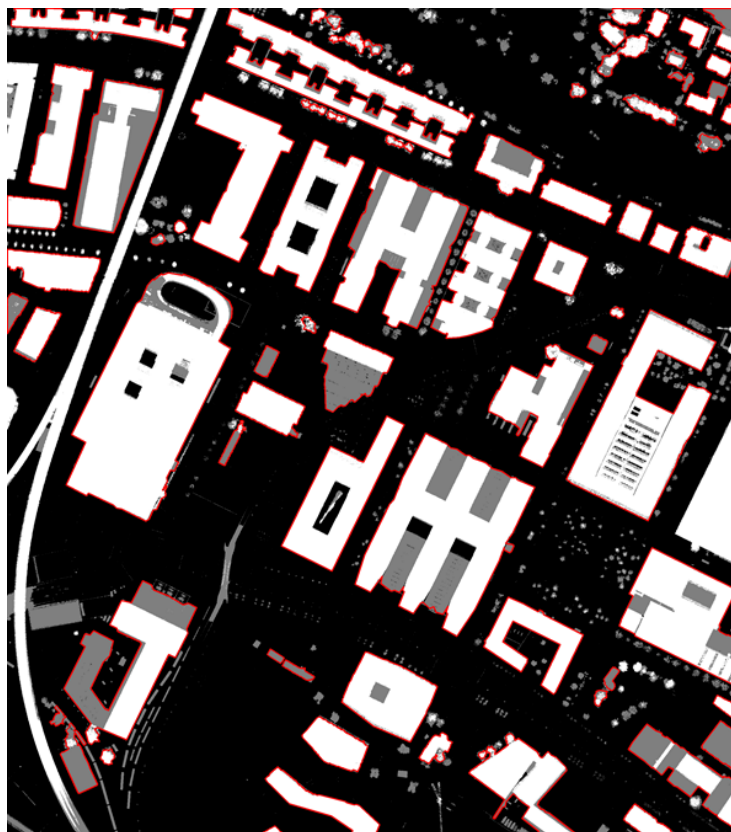
Τα αποτελέσματα μεταξύ εφαρμογής της μεθόδου στο DSM μονών επιστροφών και στο επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών, εμφανίζεται παρόμοιο με αυτό της προηγούμενης εφαρμογής (απευθείας ανίχνευση ακμών). Το επαναταξινομημένο DSM αποδίδει πληρέστερα όρια κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει και μεγαλύτερο βαθμό λανθασμένα εντοπισμένων αντικειμένων λόγω περίσσειας πληροφορίας υποβάθρου. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 5-20, 5-21 και 5-22.



Εικόνα 5-20: Τα τελικά φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων [ανοιγμένου DSM μονών επιστροφών (αριστερά) και ανοιγμένου επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών (δεξιά)]



Εικόνα 5-21: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του DSM μονών επιστροφών.



Εικόνα 5-22: Φιλτραρισμένα και απλοποιημένα ίχνη κτιρίων επί του επανταξινομημένου DSM μονών επιστροφών.

5.7 Έλεγχος απόδοσης φίλτρων ανίχνευσης κτιρίων

Η ενσωμάτωση μεγάλου βαθμού αυτοματοποίησης σε διαδικασίες εξαγωγής ιχνών κτιρίων, αποσκοπεί γενικά στην επιτάχυνση των παραγωγικών διαδικασιών, καθώς και στη μείωση του αντίστοιχου κόστους για την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου εύρους εφαρμογών, ακόμα και καθημερινής χρήσης. Προς το σκοπό αυτό και σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί, αναπτύσσονται διαρκώς προτάσεις, οι οποίες όμως εξαρτώνται από την ακολουθούμενη επιστημονική προσέγγιση. Ο μηχανικός της επιστήμης της γεωπληροφορικής, ο οποίος κατά βάση διαθέτει την αντίστοιχη «χωρική» παιδεία, είναι φυσικό να προσδίδει ανάλογο βάρος όχι μόνο στον υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης, αλλά και στην επιτυγχανόμενη ακρίβεια των παραγόμενων δεδομένων, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύνδεση μεταξύ θεωρητικής προσέγγισης και χρήσης για την ανάπτυξη εφαρμογών. Στο πρόβλημα το οποίο πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική, μια πλήρης χρηστική αντιμετώπιση θα αφορούσε τόσο την αυτόματη εξαγωγή ιχνών κτιρίων, όσο και την επίτευξη της αντίστοιχης χωρικής ακρίβειας για την εκμετάλλευση αυτών σε τρέχουσες εφαρμογές (αναθεώρηση χαρτογραφικών δεδομένων, κατασκευή 3d αστικών μοντέλων κ.α.). Σε κάθε περίπτωση, η επίτευξη και των δύο στόχων σε πολύ υψηλό βαθμό (πλήρης αυτοματοποίηση και υψηλή χωρική ακρίβεια) είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία που απαιτεί πολλές ενδιάμεσες μεμονωμένες προσεγγίσεις προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση, έως ότου πραγματοποιηθεί η επιθυμητή σύγκλιση.

Στην παρούσα εφαρμογή, και σε αντίθεση με την εξαγωγή ιχνών με την τεχνική Lidargrammetry (κεφ 4), δίνεται περισσότερο βάρος στην εξέταση των προτεινόμενων αλγορίθμων από πλευράς δυνατότητας ανίχνευσης των υφιστάμενων κτιρίων, ενώ το θέμα της ακρίβειας των εξαγόμενων ιχνών έχει δευτερεύουσα βαρύτητα. Με τον τρόπο αυτό και για την εκτέλεση των ποιοτικών ελέγχων των αποτελεσμάτων, συμβολίζουμε με TP (True Positives) τα αντικείμενα τα οποία ανιχνεύθηκαν και ταυτόχρονα υφίστανται ως κτίρια στα δεδομένα ελέγχου, με FP (False Positives) τα αντικείμενα τα οποία ανιχνεύθηκαν αλλά δεν υφίστανται ως κτίρια στα δεδομένα ελέγχου και με FN (False Negatives) τα κτίρια στα δεδομένα ελέγχου τα οποία δεν ανιχνεύθηκαν από τους αλγόριθμους. Ορίζονται έτσι τα στατιστικά μεγέθη της πληρότητας και της ορθότητας, τα οποία ποσοτικοποιούν τόσο την ικανότητα των αλγορίθμων να εντοπίζουν όλα τα υφιστάμενα κτίρια στην περιοχή μελέτης, όσο και τον βαθμό εσφαλμένων ανιχνεύσεων αντίστοιχα.

$$\text{Πληρότητα} = \frac{TP}{FN + TP} \quad (5.1)$$

(Βαθμός απόδοσης στον εντοπισμό όλων των υφιστάμενων κτιρίων)

$$\text{Ορθότητα} = \frac{TP}{FP + TP} \quad (5.2)$$

(Βαθμός απόδοσης στον εντοπισμό μόνο κτιρίων και όχι εσφαλμένων αντικειμένων)

Παράλληλα, για λόγους απλότητας ερμηνείας μέσω χρήσης ενός μόνο κριτηρίου, ορίζουμε τον τελικό βαθμό απόδοσης κάθε αλγόριθμου με βάση τη σχέση 5.3 και θεωρώντας ισοβαρή την συμμετοχή των μεγεθών της πληρότητας και της ορθότητας.

$$\text{Βαθμός Απόδοσης} = \frac{\text{Πληρότητα} + \text{Ορθότητα}}{2} \quad (5.3)$$

Η διαδικασία καταμέτρησης των κτιρίων που ταξινομήθηκαν ως TP, FN και FP, διαμορφώθηκε με βάση τις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Ένα κτίριο το οποίο ανιχνεύεται μερικώς, θεωρείται ότι κατατάσσεται ως TP αν το ανιχνεύσιμο μέρος είναι πλέον του 50% (κατά προσέγγιση) του αντίστοιχου υφιστάμενου στα δεδομένα ελέγχου.
- ✓ Η καταμέτρηση των κτιρίων αφορά το σύνολο της απεικονιζόμενης περιοχής. Ως αποτέλεσμα, κτίρια που περιλαμβάνονται μερικώς στην εικόνα (άκρα) λογίζονται ως υφιστάμενα και προσμετρώνται μόνο για το απεικονιζόμενο τμήμα τους, ανεξάρτητα με το ποσοστό αντιστοιχίας τους στην συνολική επιφάνεια του πραγματικού κτιρίου.

✓ Ως προσμετρώμενο αντικείμενο λογίζεται κάθε τμήμα που περιβάλλεται από μια κλειστή καμπύλη, ακόμα και αν αυτό εφάπτεται (τμηματικώς ή συνολικά) με άλλο αντικείμενο. Έτσι, αν για παράδειγμα ένα μεγάλο παραμένον τμήμα βλάστησης έχει διαχωριστεί σε δύο τμήματα που περικλείονται από διαφορετικές καμπύλες, τότε λογίζεται ως δύο αντικείμενα και όχι ως ένα.

Η διαδικασία ποιοτικής ανάλυσης εφαρμόστηκε και για τις δύο προτεινόμενες προσεγγίσεις, με την αντίστοιχη ποσοτικοποίηση των μεγεθών της πληρότητας και της ορθότητας, τόσο με χρήση του DSM μονών επιστροφών, όσο και με τη χρήση του επαναταξινομημένου DSM μονών επιστροφών, από τη σύγκριση των ιχνών με τα αντίστοιχα φωτογραμμετρικά. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα 5-1.

	Φίλτρο ακμών με DSM μονών επιστροφών	Φίλτρο ακμών με επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	Φίλτρο ομοιογενών περιοχών με DSM μονών επιστροφών	Φίλτρο ομοιογενών περιοχών με επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών
TP	43	49	43	49
FN	7	1	7	1
FP	12	30	10	28
Πληρότητα	86%	98%	86%	98%
Ορθότητα	78%	62%	81%	64%
Βαθμός Απόδοσης	82%	80%	83,5%	81%

Πίνακας 5-1: Πίνακας ποιοτικού ελέγχου φίλτρων αυτόματης ανίχνευσης κτιρίων

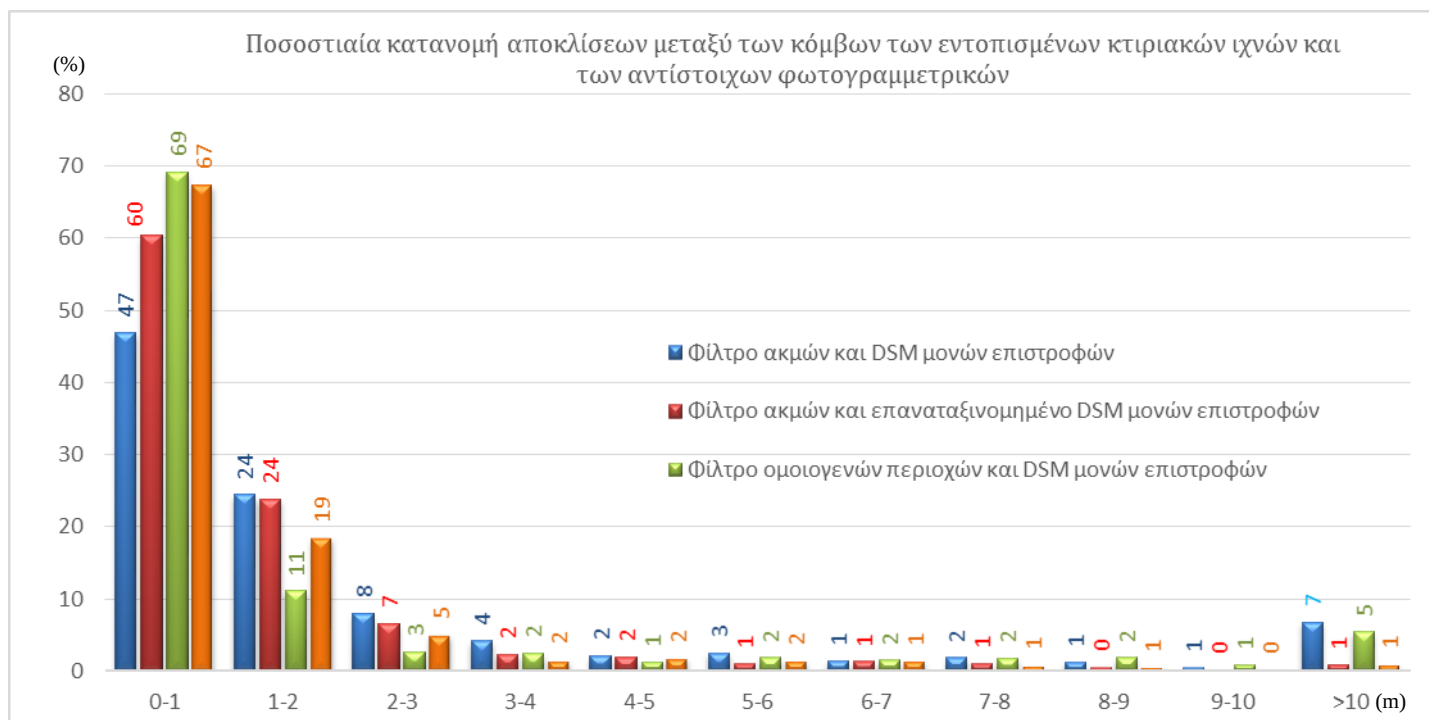
Αποδελτιώνοντας τα εξαγόμενα αποτελέσματα, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι δύο προσεγγίσεις παρουσιάζουν σταθερό βαθμό απόδοσης, για όλες τις εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν. Η πληρότητα των αλγόριθμων κινείται σταθερά σε υψηλότερα ποσοστά από την αντίστοιχη ορθότητα, γεγονός που καταδεικνύει ότι ενώ υπήρξε μεγάλος βαθμός ανίχνευσης των υφιστάμενων κτιρίων, υπήρξε ταυτόχρονα ικανός αριθμός ξένων αντικειμένων και κυρίως υπολείμματα της αστικής βλάστησης. Παράλληλα, η ορθότητα και η πληρότητα κάθε προσέγγισης, παραμένει σχεδόν ίδια, όταν χρησιμοποιείται το ίδιο υπόβαθρο ανίχνευσης, ενώ διαφοροποιείται με τη χρήση του επαναταξινομημένου DSM έναντι του απλού DSM μονών επιστροφών. Η διαφοροποίηση αυτή έγκειται στην ιδιαίτερα υψηλή αύξηση της πληρότητας κατά 12 ποσοστιαίες μονάδες (98%), με μια αντίστοιχη μείωση της επιτυγχανόμενης ορθότητας κατά 16 και 17 ποσοστιαίες μονάδες (62% και 64% αντίστοιχα για τις δύο προσεγγίσεις). Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση, που πραγματοποιήθηκε κατά το στάδιο κατασκευής και αξιολόγησης των υποβάθρων και σύμφωνα με την οποία το επαναταξινομημένο DSM παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στο θόρυβο, ο οποίος αυξάνεται σημαντικά για το σύνολο της σκηνής.

Η αντίστοιχη χωρική ακρίβεια των αυτόματα εξαγόμενων ιχνών κτιρίων, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την εκτέλεση μιας διαδικασίας ανάλυσης εγγύτητας, βάσει της

οποίας πραγματοποιείται υπολογισμός των αποστάσεων των κόμβων των αυτόματα εξαγόμενων ιχνών από τα αντίστοιχα ίχνη ελέγχου (φωτογραμμετρικά αληθή) (πιν 5-2). Για την διασφάλιση της ορθότητας της διαδικασίας, αφαιρέθηκαν από το σύνολο των ανιχνευμένων σετ ιχνών τα αντικείμενα εκείνα τα οποία δεν αποτελούν κτίρια (False Positives - FP), καθώς η συμπερίληψή τους θα αλλοίωνε τα εξαγόμενα στατιστικά τα οποία πρέπει να αναφέρονται αποκλειστικά στα κτιριακά ίχνη. Παράλληλα, για την πληρέστερη εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου και την διευκόλυνση εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων, υπολογίστηκε το ιστόγραμμα των ποσοστιαίων και αθροιστικών ποσοστιαίων οριζοντιογραφικών αποκλίσεων των κόμβων των προς έλεγχο ιχνών (διαγ. 5-1 και 5-2).

	Ελάχιστη μετάθεση (m)	Μέγιστη μετάθεση (m)	Μέση μετάθεση (m)
Φίλτρο ακμών με DSM μονών επιστροφών	0.00	42.84	2.75 ± 4.98
Φίλτρο ακμών με επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	0.00	18.61	1.34 ± 1.90
Φίλτρο ομοιογενών περιοχών με DSM μονών επιστροφών	0.00	42.57	2.19 ± 4.67
Φίλτρο ομοιογενών περιοχών με επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	0.00	20.03	1.24 ± 1.96

Πίνακας 5-2: Συγκριτική θεώρηση μεταξύ ιχνών κτιρίων από τους αλγόριθμους αυτόματης ανίχνευσης και αντίστοιχων φωτογραμμετρικών ιχνών



Διάγραμμα 5-2: Ιστόγραμμα κατανομής ποσοστιαίων αποκλίσεων των αυτόματα εντοπισμένων ιχνών από τα αντίστοιχα αληθή



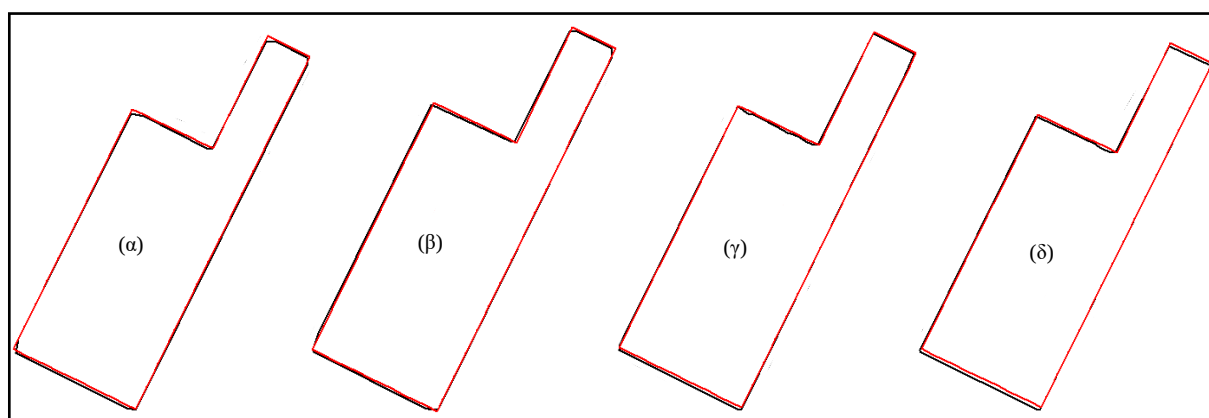
Διάγραμμα 5-3: Ιστόγραμμα αθροιστικής κατανομής ποσοστιαίων αποκλίσεων των αυτόματα εντοπισμένων ιχνών από τα αντίστοιχα αληθή

Αποδελτιώνοντας τον πίνακα 5-2, γίνεται αντιληπτό ότι η οριζοντιογραφική ακρίβεια των εξαγόμενων ιχνών από τις δύο προσεγγίσεις, εξαρτάται περισσότερο από το χρησιμοποιούμενο υπόβαθρο, παρά από την ίδια τη λειτουργία του αλγορίθμου. Η χρήση του επαναταξινομημένου DSM αποδίδει οριζοντιογραφικά ορθότερα ίχνη, η μέση μετάθεση των οποίων κυμαίνεται λίγο περισσότερο από το 1m. Η αντίστοιχη χρήση του απλού DSM μονών επιστροφών αποδίδει ίχνη περίπου μισής ορθότητας (2-3m) γεγονός που κρίνεται ότι οφείλεται στον μικρότερο βαθμό της απεικονιζόμενης πληροφορίας. Σε μια σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων, με την χρήση του ίδιου υποβάθρου, παρατηρείται ότι η μέθοδος ανίχνευσης ιχνών με βάση ομοιογενείς περιοχές (area detection) παράγει ελαφρώς ορθότερα ίχνη, χωρίς ωστόσο οι διαφορές να θεωρούνται στατιστικά σημαντικές, δεδομένης και της γενικής επίδοσης των μεθόδων. Η μέση τιμή οριζοντιογραφικής απόκλισης, αποτελεί ένα πολύ γενικό μέγεθος, το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη τις ιδιαίτερες περιπτώσεις των εξεταζόμενων ιχνών. Με τον τρόπο αυτό, επηρεάζεται αρνητικά από τα μη πλήρη ίχνη, τα οποία αποδίδουν μεγαλύτερες τιμές απόκλισης λόγω σύγκρισης, πρακτικά, ανόμοιων περιγραμμάτων. Μια πιο ρεαλιστική διερεύνηση των πραγματικών δυνατοτήτων των υπόψη μεθόδων, μπορεί να πραγματοποιηθεί ελέγχοντας επί τούτου κάποιο από τα εξαγόμενα ίχνη, το οποίο παρουσιάζει μεγάλη σαφήνεια και πληρότητα. Η χαρακτηριστική περίπτωση της εικόνας 5-23 σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα

ανάλυσης εγγύτητας του πίνακα 5-3, δείχνει ότι τα αυτόματα εξαγόμενα ίχνη από την παρούσα εφαρμογή, μπορούν να παρουσιάζουν πολύ υψηλή οριζοντιογραφική ορθότητα, η οποία κυμαίνεται στις λίγες δεκάδες εκατοστά.

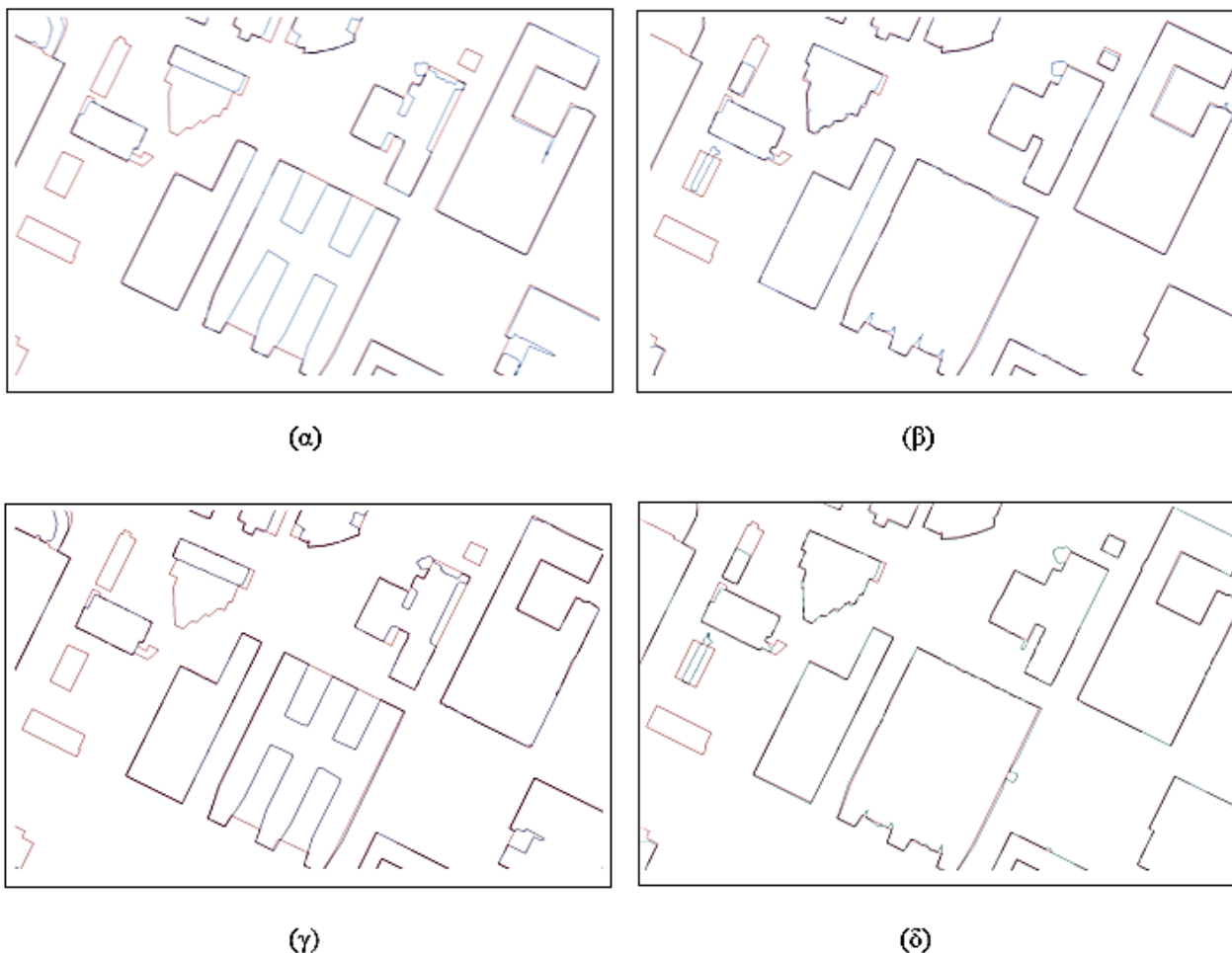
	Πειραματική εφαρμογή	Μέση μετάθεση (m)	Τυπική απόκλιση (m)
(α)	Φίλτρο ακμών με DSM μονών επιστροφών	0,46	0,27
(β)	Φίλτρο ακμών με επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	0,26	0,19
(γ)	Φίλτρο ομοιογενών περιοχών με DSM μονών επιστροφών	0,55	0,29
(δ)	Φίλτρο ομοιογενών περιοχών με επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών	0,24	0,14

Πίνακας 5-3: Οριζοντιογραφικές αποκλίσεις αυτόματα εξαγόμενου ίχνους μεμονωμένου κτιρίου και αντίστοιχου αληθούς



Εικόνα 5-23: : Οπτική σύγκριση αυτόματα εξαγόμενων ίχνων μεμονωμένου κτιρίου (μαύρο) και αληθούς ίχνους (κόκκινο)

Από τα διαγράμματα κατανομής των ποσοστιαίων οριζοντιογραφικών αποκλίσεων των εξαγόμενων ίχνων, γίνεται αντιληπτό ότι οι ακραίες μέγιστες τιμές μεταθέσεων αφορούν ένα πολύ μικρό σύνολο κόμβων, οι οποίοι παρουσιάζονται σε περιπτώσεις μη πλήρων ίχνων, συμπίληψης τυχόν υφιστάμενου, εφαπτομενικού στο κτίριο αντικειμένου (π.χ. δέντρο) κ.α. Με την εξαίρεση των ακραίων αυτών περιπτώσεων, το σύνολο των μεθόδων αποδίδει ίχνη τα οποία στην πλειοψηφία τους βρίσκονται σε μια αβεβαιότητα λιγότερη των 2m γύρω από τα αντίστοιχα αληθή. Από το ιστόγραμμα της αθροιστικής κατανομής, διαπιστώνεται ότι σε επίπεδο εμπιστοσύνης 68% (1σ) τα αποδιδόμενα ίχνη της μεθόδου των ομοιογενών περιοχών παρουσιάζουν αβεβαιότητα το πολύ 1m, ενώ η αντίστοιχη αβεβαιότητα της μεθόδου ακμών κυμαίνεται στο διάστημα 1 και 2m. Στο υψηλότερο επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (2σ) η αβεβαιότητα της χρήσης του επαναταξινομημένου DSM και με τις δύο μεθόδους βρίσκεται να είναι το πολύ 5m, ενώ για την χρήση του απλού DSM διπλασιάζεται και εκτείνεται στα 10m.



Εικόνα 5-24: Οπτική σύγκριση λεπτομέρειας αυτόματα εξαγόμενων ιχνών (μπλε) και αντίστοιχων φωτογραμμετρικών (κόκκινα)

- (α) DSM μονών επιστροφών και φίλτρο ανίχνευσης ακμών
- (β) Επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών και φίλτρο ανίχνευσης ακμών
- (γ) DSM μονών επιστροφών και φίλτρο ανίχνευσης ομοιογενών περιοχών
- (δ) Επαναταξινομημένο DSM μονών επιστροφών και φίλτρο ανίχνευσης ομοιογενών περιοχών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας γύρω από το αντικείμενο της εξαγωγής ιχνών κτιρίων, τόσο μέσω της τεχνικής Lidargrammetry, όσο και με την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων μεθοδολογιών, καταδείχθηκε η σημαντική ευελιξία την οποία παρέχουν τα δεδομένα LiDAR. Τα συμπεράσματα που εξάγονται τόσο από τη μελέτη της βιβλιογραφίας που παρατέθηκε, όσο και από την ανάπτυξη, εκτέλεση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των εφαρμογών της παρούσης, συνοψίζονται στις κάτωθι παραγράφους:

✓ Τα δεδομένα LiDAR αποτελούν μια πολύτιμη προσθήκη τόσο στις ήδη καθιερωμένες φωτογραμμετρικές διαδικασίες, όσο και για τις νέες προσεγγίσεις στην παραγωγή γεωχωρικών δεδομένων, οι οποίες συνεχώς αναπτύσσονται λόγω της αυξανόμενης χρήσης και ενσωμάτωσης ψηφιακών συστημάτων. Η γρήγορη εξέλιξη της εν λόγω τεχνολογίας καθιστά την απόκτηση και εκμετάλλευση τέτοιων δεδομένων σάρωσης, ολοένα και περισσότερο προσβάσιμη σε μεγαλύτερο μέρος του τεχνικού κόσμου, καθώς το κόστος απόκτησης μειώνεται, ενώ η αντίστοιχη ακρίβεια και αξιοπιστία τους αυξάνεται.

✓ Η τεχνική Lidargrammetry εμφανίζεται ικανή να αποδίδει υψηλής χωρικής ακρίβειας γραμμικά δεδομένα. Τα ίχνη των κτιρίων αναγνωρίζονται και ψηφιοποιούνται με ιδιαίτερη ευκολία και με ικανοποιητική ακρίβεια, ακόμα και από νέφη μέσης πυκνότητας. Η ευκρίνεια των στερεομοντέλων έντασης είναι ανάλογη της πυκνότητας των νεφών και επηρεάζει την φωτογραμμετρική δυνατότητα του χειριστή, οδηγώντας στην ευκολότερη και ακριβέστερη απόδοση ιχνών.

✓ Τα δεδομένα LiDAR μπορούν με ιδιαίτερη ευκολία να ενσωματωθούν στις ήδη υφιστάμενες φωτογραμμετρικές διαδικασίες και γραμμές παραγωγής οργανισμών και εταιριών που παράγουν γεωχωρικά δεδομένα. Τόσο με την τεχνική της Lidargrammetry, η οποία εφαρμόζεται με την χρήση των ήδη υπαρχόντων ψηφιακών φωτογραμμετρικών σταθμών, όσο και με την ενσωμάτωση προϊόντων LiDAR (όπως DTMs, DSMs, breaklines κ.α.) στις κλασικές ροές παραγωγής φωτογραμμετρικών δεδομένων, η υπόψη τεχνολογία αφομοιώνεται εύκολα χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές στην υφιστάμενη μεθοδολογία, γεγονός που θα μπορούσε να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για την παραγωγικότητα.

✓ Αναμένεται η αύξηση των εφαρμογών της τεχνικής Lidargrammetry στο άμεσο μέλλον, καθώς η ανάπτυξη συστημάτων με δυνατότητα καταγραφής πληροφορίας έντασης σε διαφορετικά μήκη κύματος laser (πολυφασματικά LiDAR) παρέχει χώρο για έρευνα με εντελώς πρωτοφανή δεδομένα, των οποίων οι δυνατότητες και πιθανές εφαρμογές παρουσιάζουν ενδεχομένως μεγάλο εύρος τόσο για την κλασική φωτογραμμετρία όσο και για τον τομέα της τηλεπισκόπησης.

✓ Επί του παρόντος, η πλήρης ενσωμάτωση της τεχνικής Lidargrammetry απαιτεί αντίστοιχη ανάπτυξη κατάλληλων εμπορικών λογισμικών, τα οποία θα δύνανται να παράγουν αξιόπιστα στερεομοντέλα έντασης, με δυνατότητα εξαγωγής σε κατάλληλο μορφότυπο (format) για την άμεση εκμετάλλευσή τους στην πλειάδα των υφιστάμενων φωτογραμμετρικών συστημάτων 3d ψηφιοποίησης. Η ανάπτυξη ενός ψηφιακού προτύπου για την ενίσχυση της διαλειτουργικότητας μεταξύ των συστημάτων παραγωγής στερεομοντέλων έντασης και των συστημάτων 3d απόδοσης γεωχωρικών δεδομένων, αποτελεί ενδεχομένως ένα κύριο ζητούμενο προς την κατεύθυνση αυτή, γεγονός που αντιμετωπίζει τις προκλήσεις κάθε προϊόντος που διατίθεται για εμπορικούς σκοπούς. Σε κάθε περίπτωση, η εμφάνιση τέτοιων εμπορικών λύσεων

είναι ήδη πραγματικότητα από κάποιες εταιρίες πρωτοπόρες του είδους, ενώ αναμένεται σύντομα η αύξηση του αριθμού τους, καθώς τα δεδομένα LiDAR γίνονται ολοένα περισσότερο προσβάσιμα και φθηνότερα για μεγαλύτερο μέρος του τεχνικού κόσμου.

✓ Η πλήρης αυτοματοποίηση της εξαγωγής ιχνών κτιρίων, αλλά και γενικότερα γεωχωρικών δεδομένων από δεδομένα LiDAR, συμβάλλει στην ήδη μεγάλη προσπάθεια που έχει καταβληθεί στο πεδίο της εκμετάλλευσης των ηλεκτροπτικών εικόνων. Το ζητούμενο των πλήρως αυτόματων διαδικασιών, κινείται στην κατεύθυνση της οικονομικότητας της παραγωγής, την διεύρυνση του πλαισίου χρηστών με την απλοποίηση των εξειδικευμένων τεχνικών και την εν γένει ώθηση της ανάπτυξης. Πεδία εφαρμογής όπως ο τομέας Geospatial Intelligence και Business Intelligence αναμένεται να επωφεληθούν μέγιστα από την ανάπτυξη και καθιέρωση τέτοιων αξιόπιστων διαδικασιών.

✓ Η ανάπτυξη εφαρμογών αυτόματης εξαγωγής ιχνών κτιρίων απαιτεί συνδυασμό τεχνογνωσίας τόσο από το πεδίο των χωρικών επιστημών, όσο και από το πεδίο των επιστημών υπολογιστών. Η βέλτιστη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί από ομάδες εργασίας που μπορούν να συνεισφέρουν εξειδικευμένη γνώση από τον κάθε χώρο, προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκλιση στον στόχο της απόδοσης δεδομένων υψηλής χωρικής ακρίβειας, με ταυτόχρονα υψηλό έως πλήρη βαθμό αυτοματοποίησης.

✓ Η διαρκής ανάγκη για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων φθίνει με ταχύ ρυθμό, καθώς η σύγχρονη τεχνολογία υπολογιστικών συστημάτων παρέχει υψηλές δυνατότητες ακόμα και σε μέτριου κόστους σταθμούς εργασίας. Η ταχεία ανάπτυξη των υπολογιστικών και υπερυπολογιστικών νεφών (cloud computing και supercomputing) αυξάνει τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ, η οποία είναι κύριο προαπαιτούμενο για την ανάπτυξη απαιτητικών αυτόματων διαδικασιών ανίχνευσης και εξαγωγής χωρικών δεδομένων για τη μοντελοποίηση του φυσικού κόσμου .

✓ Αυτόματα εξαγόμενα ίχνη κτιρίων μπορούν πολύ εύκολα να μετασχηματιστούν σε απλά 3d μοντέλα κτιρίων, για άμεση εκμετάλλευση σε συστήματα GIS, με την χρήση μιας ενιαίας τιμής υψομέτρου η οποία παρέχεται επίσης από τα ίδια αρχικά δεδομένα LiDAR και συγκεκριμένα από τα ίδια υπόβαθρα ανίχνευσης (DSMs και nDSMs).

✓ Οι τεχνικές εξαγωγής ιχνών κτιρίων από δεδομένα LiDAR, παρουσιάζουν ιδιαίτερη ποικιλία, καθώς μπορεί να γίνει χρήση τόσο των καθιερωμένων πρακτικών που έχουν αναπτυχθεί για χρήση με τα κλασικά ηλεκτροπτικά δεδομένα, όσο και ad hoc διαδικασιών, που σχετίζονται άμεσα με την 3d υπόσταση του νέφους σημείων και την ενσωματωμένη σε αυτό πληροφορία, για την αναγνώριση γεωμετρικών δομών την οποία παρέχουν. Η υπόψη πληροφορία καθιστά εφικτή την αναγνώριση ακόμα και λεπτομερειών σε τμήματα επιφανειών, των οποίων η σύνθεση μπορεί να αποδώσει περίπλοκα και ρεαλιστικά μοντέλα κτιρίων για εξειδικευμένες εφαρμογές.

✓ Οι προτεινόμενοι στην παρούσα εφαρμογή αλγόριθμοι εξαγωγής ιχνών κτιρίων παρουσιάζουν μια καλή απόδοση για εφαρμογή σε αστικό περιβάλλον, η οποία δύναται να αυξηθεί σημαντικά με τη χρήση επιπλέον δεδομένων, όπως καλά εγγεγραμμένες ηλεκτροπτικές απεικονίσεις για την λεπτομερέστερη αφαίρεση της βλάστησης, η οποία αποτελεί και ένα από τα κυριότερα θέματα που επηρεάζει την ποιότητα των εξαγόμενων δεδομένων.

✓ Η χωρική ακρίβεια των αυτόματα εξαγόμενων ιχνών εντοπίζεται μικρότερη σε περιπτώσεις ημιτελών ιχνών, ενώ αγγίζει πολύ υψηλά επίπεδα για καλώς αναγνωρισμένα κτίρια. Αριθμός αυτόματα εντοπισμένων ιχνών παρουσιάζεται ικανός για άμεση χρήση ακόμα και σε μεγάλης κλίμακας διαγράμματα, καθώς η χωρική ακρίβειά τους φτάνει και το 0,5m. Με εξασφαλισμένη, συνεπώς, την δυνατότητα αυτή, βάρος πρέπει να δοθεί στην αντίστοιχου βαθμού πληρότητα, προκειμένου να επιτευχθεί συνολικά υψηλός βαθμός ποιότητας για τα υπόψη γεωχωρικά δεδομένα.

Με βάση τα γενικά αυτά συμπεράσματα, μπορούν στην συνέχεια να διατυπωθούν κατάλληλες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, οι οποίες θα αποτελέσουν επέκταση της εργασίας που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή και θα εξειδικεύσουν σε μεγαλύτερο βάθος τις προτεινόμενες τεχνικές. Συνοπτικά, οι κύριες προτάσεις είναι οι ακόλουθες:

✓ Ευρύτερη πειραματική εφαρμογή της τεχνικής Lidargrammetry, για περιοχές με διαφορετική πυκνότητα και είδος αστικής κάλυψης, προκειμένου να γίνει ευρεία ποσοτικοποίηση των δυνατοτήτων της. Σύνδεση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε αρχικά δεδομένα, τις απαιτούμενες παραμέτρους των αποστολών σάρωσης, καθώς και με τις ελάχιστες απαιτούμενες δυνατότητες των χρησιμοποιούμενων, για κάθε σκοπό, συστημάτων LiDAR.

✓ Πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας εξαγωγής λοιπών γεωχωρικών δεδομένων με την τεχνική Lidargrammetry, όπως ακτογραμμές, γραμμές αλλαγής κλίσης εδάφους ακόμα και ισούψείς καμπύλες, σε περιοχές με πυκνή βλαστική κάλυψη και με ταυτόχρονη αφαίρεση αυτής μέσω τεχνικών φιλτραρίσματος του νέφους.

✓ Επέκταση της χρήσης των στερεομοντέλων έντασης, με την κατασκευή υβριδικών μοντέλων από fusion πληροφορίας ταξινόμησης νέφους και έντασης, ή με διαδικασίες pansharpen από κατάλληλες εικόνες.

✓ Ενασχόληση με την ανάπτυξη διαδικασιών για την κατασκευή στερεομοντέλων έντασης, καθώς και αντίστοιχων προτύπων για μεταφορά και ενσωμάτωσή τους σε υπάρχοντα φωτογραμμετρικά συστήματα στερεοαπόδοσης.

✓ Διερεύνηση μεθόδων βελτίωσης των υποβάθρων ανίχνευσης, για την βελτίωση του βαθμού πληρότητας των εξαγόμενων ιχνών κτιρίων.

- ✓ Επέκταση των προτεινόμενων μεθόδων, με ανάπτυξη διαδικασίας κατασκευής απλών μοντέλων κτιρίων, αξιολόγησή τους και ενσωμάτωσή τους σε σύστημα GIS.
- ✓ Διερεύνηση μεθόδων εξαγωγής κτιρίων με την χρήση τεχνικών στο 3d χώρο και την απευθείας εκμετάλλευση της raw μορφής του νέφους σημείων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

1. Alharthy, A., & Bethel, J. (2002). Heuristic filtering and 3D feature extraction from LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 29-34.
2. Alharthy, A. and Bethel, J. (2002). Heuristic filtering and 3d feature extraction from lidar data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV(Part 3A/B).
3. Awrangjeb, M., & Fraser, C. S. (2014). Automatic segmentation of raw LiDAR data for extraction of building roofs. *Remote Sensing*, 6(5), 3716-3751.

4. Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIII(B4), 110-117.
5. Baltsavias, E. P. (1996). Digital ortho-images a powerful tool for the extraction of spatial-and geo-information. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 51, 63-77.
6. Baltsavias, E. P. (1999). Airborne Laser Scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS Journal of photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 199-214.
7. Bandyopadhyay, M., et al. (2013). Classification and Extraction of Trees and Buildings from Urban Scenes Using Discrete Return LiDAR and Aerial Color Imagery. *Laser Radar Technology and Applications XVIII*, 8731.
8. Bartels, M., et al. (2006). DTM generation from LIDAR data using skewness balancing. *Proceedings, 18th International Conference on Pattern Recognition, Part I*, pp. 566–569. Hong Kong, China.
9. Blachut, T. (1968). Further Extension of the Orthophoto Technique. *The Canadian Surveyor*, 22(1), 206-220.
10. Blachut, T. J. (1976.). The Stereo-Orthophoto Technique in Cadastral and General Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42(12), 1511-1519.
11. Blachut, T.J. and van Wijk , M.C. (1970). 3D information from orthophotos. *Photogrammetry Engineering*, 36(4), 365-374.
12. Brandtberg, T. (1999). Automatic Individual Tree-based Analysis of High Spatial Resolution Remotely Sensed Data. *PhD Thesis*. Swedish University of Agricultural Sciences.
13. Brandtberg, T., et al. (2003). Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LIDAR data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), 290-303.
14. Brovelli, M., et al. (2003). LiDAR Data Filtering and DTM Interpolation within GRASS. *Transactions in GIS*, 8(2), pp. 155-174.
15. Chehata, N., et al. (2008). IDAR data classification using hierarchical K-means clustering. *ISPRS Congress Beijing 2008*, 37, pp. 325-330.
16. Chen, Z., et al. (2004). Building footprint simplification techniques and their effects on radio propagation predictions. *The Computer Journal*, 47(1), 103-133.
17. Collins, S. (1968). Stereoscopic orthophoto maps. *Canadian Surveyor*, 22(1), 167-176.
18. Collins, S. H. (1970). The ideal mechanical parallax for stereo-orthophoto. *The Canadian Surveyor*, 24(5), 561-568.
19. Committee on Floodplain Mapping Technologies. (2007). *Elevation Data for Floodplain Mapping*. National Research Council. Washington DC: The National Academies Press.
20. Crosilla, G. et al. (2005). A Segmentation procedure of Lidar data by applying mixed parametric and nonparametric models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36(Part 3/W1).

21. Demir, N. and Baltsavias, E. (2010). Combination of image and Lidar data for building and tree extraction. (ASPRS, Ed.) *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVIII(Part 3B), 131-136.
22. Demir, N., et al. (2008). Extraction of buildings and trees using images and lidar data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(Part B4).
23. Elmqvist, M. (2001). Ground estimation of laser radar data using active shape models. *Proceedings of the OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*.
24. Filin, S. (2002). Surface clustering from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 119-124.
25. Filin, S. (2002). Surface clustering from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 117-124.
26. Filin, S. and Pfeifer, N. (2006). Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2), 71-80.
27. Flood, M., et al. (2012). LiDAR data and complementary technologies. In M. Renslow (Ed.), *Manual of airborne topographic LiDAR*. Maryland: ASPRS.
28. Fowler, R. A., et al. (2007). Topographic and Terrestrial Lidar. In D. F. Maune (Ed.), *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. Bethesda, Maryland: ASPRS.
29. Fuchs, F. (2001). Building reconstruction in urban environment: a graph-based approach. In E. P. Baltsavias, A. Gruen, & L. V. Gool (Eds.), *Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images (III)* (pp. 205-245). Taylor & Francis.
30. Garvin J. B. and Bufton J. L. (1992). Lunar Observer Laser Altimeter Observations for Lunar Base Site Selection. In W. W. Mendell (Ed.), *NASA Conference Publication 3166*, 1, pp. 209-217.
31. Gorte, B. (2002). Segmentation of TIN-structured laser altimetry points clouds. *Symposium on Geospatial Theory Processing and Application*.
32. Habib, A. (2009). Synergistic characteristics of LiDAR and photogrammetric data. In J. Shan, & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press.
33. Heath, M., et al. (1998). Comparison of edge detectors a methodology and initial study,. *Computer Vision and Image Understanding*, 69, 35-54.
34. Hebel, M., & Stilla, U. . (2008). *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Pre-classification of points and segmentation of urban objects by scan line analysis of airborne LiDAR data*, 37(B3a), 105-110.
35. Hermosilla, T., et al. (2011). *Remote Sensing*, 3, 1188-1210.
36. Hofton, M.A., et al. (2000). Decomposition of laser altimeter waveforms. *Geoscience and Remote Sensing*, 38(4), 1989-1996.

37. Hoge F.E., et al. (1980). Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. *Applied Optics*, 19, pp. 871-883.
38. Holmgren, J. and Persson, A.,. (2004). Identifying species of . *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 415-423.
39. Hyypä, J., et al. (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3d tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5), 969-975.
40. Hyypä, J. and Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The photogrammetric journal of Finland*, 16(2), 27-42.
41. Hyypä, J., et al. (2003b). Factors affecting object-oriented forest growth estimates obtained using laser scanning. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 18, 16-31.
42. Hyypä, J., et al. (2004). Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry ,Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI(8/W2), 82-89.
43. Jacobsen, K. and Lohmann, P. (2003). Segmented filtering of laser scanner DSMs. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, .XXXIV(3/W13).
44. Jiang, X. & Bunke, H. (1999). Edge detection in range images based on scan line approximation. *Computer Vision and Image Understanding*, 73, , 183-199.
45. Jiang, X., & Bunke, H. (1994). Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. *Machine vision and applications*, 7, 115-122.
46. Jutzi, B., Stilla, U. (2005). Waveform processing of laser pulses for reconstruction of surfaces in urban areas. In M. a. Moeller (Ed.), *3rd International Symposium: Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN 2005)*. 36. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
47. Khalifa, I., et al. (2003). Range image segmentation using local approximation of scan lines with application to CAD model acquisition. *Machine Vision Applications*, 13, 263-274.
48. Kilian, J. (2001). *Simple Image Analysis By Moments*. Technical report, freely distributable, Version 0.2.
49. Kim, T., & Muller, J. P. (1999). Development of a graph-based approach for building detection. *Image and Vision Computing*, 17, 3-14.
50. Kobler, et al. (2007). Repetitive Interpolation: A Robust Algorithm for DTM Generation from Aerial Laser Scanner Data in in Forested Terrain. *Remote Sensing of Environment*, 108, 9-23.
51. Kraus, K., and Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 193–203.
52. Kraus, K., et al. (1979). Digitally Controlled Production of Orthophotos and Stereo-Orthophotos. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45(10), 1353-1362.
53. Krzystek, P. (2003). Filtering of laser scanning data in forest areas using finite elements. *Workshop Proceedings: 3d Reconstruction from Airborne Laser Scanner and InSAR Data*.

54. Lee, I. & Schenk, T. (2002). Perceptual organization of 3D surface points. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 193-198.
55. Li, D., et al. (2002). Principle of Seamless Stereo Orthoimage Database and its Measurement Accuracy. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV, part 3.
56. Liang, X., et al. (2007). Deciduous-coniferous tree classification using difference between first and last pulse laser signatures. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI(Part 3 / W52).
57. Maas, H. G. (1999). Fast determination of parametric house models from dense airborne laserscanner data. *ISPRS Workshop on Mobile Mapping Technology, International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXII.
58. Mayer, H. (1999). Automatic object extraction from aerial imagery—A survey focusing on buildings. *Computer Vision and Image Understanding*, 74(2), 138–149.
59. Meng X., et al. (2010). Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, 2, 833-860.
60. Meng, X., et al. (2009). Morphology-based building detection from airborne LIDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(4), 437-442.
61. Michel, M. and Habib, A. (2002). Interpolation of lidar data and automatic building extraction.
62. Morgan, M. and Tempfli, K. (2000). Automatic building extraction from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII(Part 3B), 616-623.
63. Næsset, E. (1997). Determination of mean tree height of forest stands using an airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, 49-56.
64. Nardinocchi, C., et al. (2003). Classification and filtering of laser data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV(3/W13).
65. Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-9, No 1, 62-66.
66. Pack, R.T. et al. (2012). An overview of ALS technology. In M. Renslow (Ed.), *Manual of airborne topographic LiDAR*. Maryland: ASPRS.
67. Pfeifer, N., et al. (2001). Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. *Proceedings of the OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*. Stockholm.
68. Pfeifer, N., Mandlbürger, G. (2009). LiDAR Data Filtering and DTM Generation. In J. Shan, & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* (pp. 307-333). CRC Press.
69. Rabbani, T., et al. (2006). Segmentation of point clouds using smoothness constraints. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 248-253.

70. Reitberger, J., et al. (2008). Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1407-1431.
71. Roggero, M. (2001). Airborne laser scanning: clustering in raw data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34, , 227–232.
72. Rottensteiner, F. (2003). Automatic generation of high-quality building models from lidar data. *Computer Graphics and Applications*, 23, 42-50.
73. Sappa, A.D. & Devy, M. (2001). Fast range image segmentation by an edge detection strategy. *Proceedings of 3rd International Conference on 3d Digital Imaging and Modeling*, 292-299.
74. Schwalbe, E., et al. (2005). 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. *Proceedings of ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser Scanning*, (pp. 209–214).
75. Shan, J., et al. (2012). Building extraction and reconstruction from LiDAR point clouds. In M. Renslow (Ed.), *Manual of airborne topographic LiDAR*. ASPRS.
76. Sithole, G. (2001). Filtering of Laser Altimetry Data Using a Slope Adaptive Filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV(3/W4).
77. Sithole, G. and Vosselman, G. (2004). Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare Earth Extraction From Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59 (1-2), 85-101.
78. Sithole, G., & Vosselman, G. (2003). Automatic structure detection in a point cloud of an urban landscape. *Proceedings of 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 67-71.
79. Sohn, G., Dowman, I. (2002). Terrain surface reconstruction by the use of tetraedron model with the MDL Criterion. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXIV (3A), 336-344.
80. Sohn, G., et al. (2007). A data driven method for modelind 3D building objects using a binary space partitioning tree. In J. Shan, & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and processing*. CRC Press.
81. Straub, B. M. (2004). A multiscale approach for the automatic extraction of tree tops from remote sensing data. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(Part B3), 418-423.
82. Tarsha-Kurdi, F., et al. (2007). Model-driven and data-driven approaches using LIDAR data: Analysis and comparison. *ISPRS Workshop, Photogrammetric Image Analysis (PIA07)*, (pp. 87-92).
83. Teo, T.A., et al. (2010). The generation of inferred stereo images from lidar data. *Proceedings of the 31th Asian Conference on Remote Sensing*. Honai, Vietnam.
84. Tovari, D., and Pfeifer, N. (2005). Segmentation based robust interpolation - a new approach to laser data filtering. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI(3/W19).
85. Vosselman, G. (2000). Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII.

86. Vosselman, G., & Dijkman, S. (2001). 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (Part 3/W4), 37–43.
87. Wang, J., & Shan, J. (2009). Segmentation of LiDAR point clouds for building extraction. *ASPRS Remote Sensing Annual Conference*, (pp. 9-13). Baltimore.
88. Wang, L., & Chu, H. (2008). Graph theoretic segmentation of airborne LiDAR data. *SPIE Defense and Security Symposium*. 6979. International Society for Optics and Photonics.
89. Wang, M. (2004). A New Approach for Denerating a Measurable Seamless Stereo Model Based on Mosaic Orthoimage and Stereomate. *Proceedings of the ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. XXXV, part B1*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
90. Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne Laser Scanning: An introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82.
91. Yong, L. (2011). Automatic edge extraction by lidar-optical data fusion adaptive for complex building shapes. *International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications*. SPIE.
92. Young J., Graham L. (2012). Status of LiDAR industry support systems. In M. Renslow (Ed.), *Manual of airborne topographic LiDAR*. Maryland: ASPRS.
93. Young, J. and Abdullah, Q. (2012). Data Processing. In M. Renslow (Ed.), *Manual of Airborn Topographic LiDAR*. Maryland : ASPRS.
94. Yu, X., et al. (2004). Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90, 451-462.
95. Zhang, K., et al. (2003). A Progressive Morphological Filter for Removing Non Ground Measurements from Airborne LiDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 872-882.
96. Zhang, K., et al. (2008). A framework for automated construction of building models from airborne lidar measurements. In J. Shan, & C. K. Tothc. (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Taylor and Francis.
97. Zhang, K., et al. (2006). Automatic Construction of Building Footprints From Airborne LIDAR Data. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2523 - 2533.
98. Ziegler, M., et al. (2000). Assessment of forest attributes and single-tree segmentation by means of laser scanning. In G. W. Kamerman, N. U. Singh, C. Werner, & V. V. Molebny (Eds.), *Laser Radar Technology and Applications* (Vol. 4035, pp. 73-84). SPIE.
99. Φράγκος, Π. (2013). Αρχές λειτουργίας εναέριων σαρωτών LiDAR και εφαρμογές τους στην παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων. *Διπλωματική εργασία*. ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Διαδικτυακοί τόποι

<http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>

(προσπέλαση 4/4/2015)

http://ejournal.com/print/articles/lidar-best-practices?doing_wp_cron=1433334496.3235800266265869140625

(προσπέλαση 15/4 /2015)

<http://www.waurisa.org/conferences/2013/presentations/24%20Lidargrammetry%20-%20Using%203D%20stereo%20photogrammetry%20for%20lidar%20interpretation%20and%20feature%20extraction.pdf>

(προσπέλαση 18/4/2015)

https://www.e-education.psu.edu/geog481/l5_p5.html

(προσπέλαση 27/4/2015)

http://www.geotree.uni.edu/media/cms_page_media/6/GeoCue_QA-QCProcesses.pdf

(προσπέλαση 5/5/2015)

<https://www.google.com/patents/US7804498>

http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MARBLE/medium/segment/split.ht

(προσπέλαση 16/5/2015)

<http://opencv-python-tutroals.readthedocs.org/en/latest/index.html>

(προσπέλαση σε πολλαπλές ημερομηνίες)

<http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS791E/Notes/Thresholding.pdf>

(προσπέλαση 13/7/2015)